



**UNIVERSITAT  
JAUME·I**

**Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y Materiales  
Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I**

# **Problemática del resbalamiento en pavimentos cerámicos**



**Tesis doctoral  
Adoración Muñoz Lázaro**

**Directores tesis doctoral  
Dr. Agustín Escardino Benlloch  
Dr. Carlos Felú Mingarro**

**Castelló de la Plana, abril 2019**





Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y Materiales  
Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I

# Problemática del resbalamiento en pavimentos cerámicos

Memoria presentada por Adoración Muñoz Lázaro para optar al grado de  
doctora por la Universitat Jaume I

Doctorando:

*Adoración Muñoz Lázaro*

Directores tesis:

*Agustín Escardino Benlloch*  
Catedrático de Ingeniería Química

*Carlos Felú Mingarro*  
Doctor en Ingeniería Química

Castelló de la Plana, abril 2019





*Este estudio ha sido financiado por:*

- *Comisión Europea a través del programa “Capacities” del VII Programa Marco dentro del Proyecto “Design Tools for high grip surfaces” Expediente: 262413 ULTRAGRIP.*
- *Ministerio de Ciencia e Innovación a través del programa “LIA - Proyectos de I+D+I - Programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada” dentro del proyecto “Estudio integral de los mecanismos de fricción asociados a diferentes condiciones de tránsito peatonal” Expediente: PID-560520-2009-6.*
- *Instituto de Tecnología Cerámica (Instituto Universitario de Tecnología Cerámica “Agustín Escardino” de la Universitat Jaume I y Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas AICE).*



## **Agradecimientos**



En primer lugar, quiero dar las gracias a mis directores de tesis, a D. Agustín y a Carlos, por guiarme y apoyarme durante el desarrollo del estudio y confección de la memoria.

Quiero agradecer de forma muy especial la ayuda a todos los compañeros del Instituto de Tecnología Cerámica que han colaborado en el trabajo desarrollado, sin los cuales este proyecto no hubiese sido posible.

Por un lado, a los que han intervenido en la parte más técnica asesorándome en la planificación y organización de las diferentes tareas, en la realización de los distintos ensayos, y por supuesto, en la valoración e interpretación de los resultados. Muchas gracias a Rebeca, Iván, Belén, Alejandro, Pilar, Helena, Ana, Jessica, Julia, Pilar G., Alfredo y sobre todo Gonzalo por tus aportaciones tan valiosas.

Por el otro, a los que me han echado una mano en la maquetación de esta memoria y me han ayudado con la presentación de la misma. Muchas gracias David por tu paciencia.

Y no quiero olvidarme del resto de compañeros que, aunque no hayan intervenido directamente en el trabajo, sí que me han dado su apoyo y muchos ánimos en los momentos más duros y más pesados de este largo trayecto hasta conseguir el objetivo que ahora ya puedo ver plasmado en esta memoria.

También quiero recordar a los compañeros de INESCOP (Asociación de Investigación de las Industrias del Calzado y Conexas) que han realizado algunos de los ensayos incluidos en el presente trabajo, y a los del IAT (Instituto Andaluz de Tecnología) que han participado en la generación de la herramienta para la estimación del coeficiente de fricción a partir de un conjunto de parámetros de rugosidad.

Y, por último, y no menos importante, quiero agradecer muy especialmente a mis padres Antonio y Dora que con sus esfuerzos hace ya algunos años, me han dado la educación y los consejos necesarios en el inicio de esta andadura; y, ya últimamente, el apoyo moral de mi madre para conseguir acabar esta última etapa del camino. También quiero acordarme de mi hermana Toñi, que además ha sido mi compañera de estudios durante la carrera, con la que compartí muchas fatigas en aquellos momentos.

Y por supuesto, gracias Ricardo por aguantarme todo este tiempo, por tener tanta paciencia en algunos momentos, por darme ánimos en las ocasiones en las que incluso pensé en abandonar, en definitiva, por estar ahí siempre.

A todos, muchas gracias.



# Índice





<b>Resumen.....</b>	<b>17</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>23</b>
<b>Resum.....</b>	<b>29</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>35</b>
1.1 Factores que influyen sobre la resbaladidad de los pavimentos cerámicos .....	37
1.1.1 Topografía superficial del pavimento .....	38
1.1.2 Presencia de un agente contaminante .....	40
1.1.3 Naturaleza del elemento deslizador.....	42
1.1.4 Desgaste superficial.....	44
1.2 Tipología de superficies de pavimentos cerámicos.....	46
1.3 Métodos de ensayo, normativa y reglamentación .....	48
1.3.1 Métodos para evaluar la resistencia al deslizamiento.....	48
1.3.1.1 Tribómetro lineal estático .....	48
1.3.1.2 Tribómetro lineal dinámico .....	49
1.3.1.3 Método del péndulo de fricción .....	54
1.3.1.4 Método de la rampa inclinada .....	57
1.3.2 Evolución de la normativa.....	62
1.3.3 Reglamentación .....	65
1.3.4 Guías .....	67
<b>2. ANTECEDENTES, OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN Y PLAN DE TRABAJO .....</b>	<b>73</b>
2.1 Antecedentes y objeto de la investigación .....	75
2.1.1 Antecedentes.....	75
2.1.2 Objeto de la investigación.....	76
2.2 Plan de trabajo.....	78
<b>3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>81</b>
3.1 Materiales .....	83
3.1.1 Tipos de superficies de pavimento cerámico estudiadas.....	83
3.1.2 Naturaleza del elemento deslizador .....	87
3.1.2.1 Caucho 57.....	87
3.1.2.2 Caucho 96.....	89
3.1.2.3 Caucho SBR 95 .....	89
3.1.3 Contaminantes estudiados .....	90
3.1.3.1 Agua potable .....	90
3.1.3.2 Agua + Lauril sulfato sódico .....	90
3.1.3.3 Aceite .....	90

3.2	Procedimiento experimental .....	91
3.2.1	Métodos de evaluación de la resistencia al deslizamiento utilizados y condiciones de ensayo empleadas en cada caso .....	91
3.2.1.1	Tribómetro lineal dinámico .....	91
3.2.1.2	Ensayo de la rampa inclinada con calzado .....	92
3.2.1.3	Péndulo de fricción.....	94
3.2.1.4	Tribómetro BOT 3000.....	95
3.2.1.5	Ensayo de rampa con pie descalzo .....	96
3.2.2	Medida de los parámetros de superficie .....	98
3.2.2.1	Parámetros de rugosidad R .....	99
3.2.2.2	Parámetros de ondulación S .....	105
3.2.3	Medida del desgaste superficial.....	111
3.2.3.1	Desgaste por tránsito peatonal .....	111
3.2.3.2	Desgaste acelerado a escala de laboratorio .....	115
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>117</b>
4.1	Estudio comparativo de diferentes métodos de medida de la resistencia al deslizamiento .....	119
4.1.1	Valores de la resistencia al deslizamiento medida mediante cada uno de los métodos de ensayo utilizados.....	120
4.1.2	Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos con cada método de ensayo y contaminante estudiados .....	124
4.1.2.1	Medio contaminante: agua potable .....	124
4.1.2.2	Medio contaminante: agua + SLS .....	129
4.1.2.3	Medio contaminante: aceite .....	138
4.1.3	Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos aplicando la norma vigente en España y los resultantes de aplicar las normas en vigor en otros países. Validez de las correlaciones obtenidas. ....	141
4.1.3.1	Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento determinados aplicando la norma vigente en España y los resultantes de utilizar las normas en vigor en otros países.....	141
4.1.3.2	Validez de las correlaciones obtenidas .....	150
4.2	Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento .....	156
4.2.1	Valores de los parámetros superficiales de las muestras estudiadas	157
4.2.2	Relación entre la resistencia al deslizamiento y cada uno de los parámetros superficiales.....	167
4.2.2.1	Correlación entre la resistencia al deslizamiento y cada parámetro superficial de rugosidad elegido: parámetros con los que se obtienen los mejores ajustes.....	167
4.2.2.2	Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados mediante las mejores correlaciones obtenidas.	184
4.2.2.3	Aplicación de las correlaciones a los resultados obtenidos con varias muestras duplicadas. ....	190
4.2.3	Relación entre la resistencia al deslizamiento y un conjunto de parámetros de rugosidad autoseleccionados por el método utilizado. ....	193
4.2.3.1	Procedimiento a utilizar .....	193

4.2.3.2	Ecuaciones obtenidas .....	193
4.2.3.3	Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados a partir de las ecuaciones seleccionadas por el procedimiento estadístico empleado .....	195
4.2.3.4	Aplicación de las correlaciones a los resultados obtenidos con varias muestras duplicadas .....	197
4.3	Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento .....	201
4.3.1	Puesta a punto del equipo y de la metodología para simular el desgaste por tránsito peatonal a escala de laboratorio .....	203
4.3.1.1	Características del equipo y condiciones de ensayo.....	203
4.3.1.2	Efectividad del equipo de laboratorio diseñado para simular el desgaste por tránsito peatonal real.....	209
4.3.2	Evolución de la resistencia al deslizamiento con el progresivo desgaste superficial.....	220
4.3.2.1	Piezas sometidas a desgaste por tránsito peatonal real .....	220
4.3.2.2	Piezas sometidas a desgaste acelerado en el laboratorio .....	224
4.3.2.3	Comparación de los resultados obtenidos por desgaste acelerado y por tránsito peatonal .....	230
4.3.2.4	Relación entre los valores de los parámetros A y B de las ecuaciones (4.37) y (4.39) con la naturaleza y topografía de la superficie. ..	234
4.3.3	Influencia del desgaste sobre los parámetros de rugosidad .....	242
4.3.3.1	Estudio preliminar .....	242
4.3.3.2	Evolución de la resistencia al deslizamiento y los parámetros de rugosidad con la intensidad del desgaste .....	244
4.3.3.3	Influencia de la intensidad del desgaste sobre la relación entre la resistencia al deslizamiento y algunos parámetros de rugosidad. ....	250
4.3.4	Relación entre la resistencia al deslizamiento de las muestras desgastadas y cada uno de los parámetros superficiales. ....	253
4.3.4.1	Ensayo con el conjunto de las 37 muestras desgastadas.....	253
4.3.4.2	Ensayo con las muestras de los modelos originales de perfil plano (grupos 1 y 2).....	254
4.3.4.3	Ensayo con las muestras de los modelos originales de perfil ondulado o con relieve (grupos 3 a 5) .....	254
4.3.5	Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados mediante las correlaciones seleccionadas. ....	258
4.3.5.1	Ensayo con las 37 muestras desgastadas .....	258
4.3.5.2	Ensayo con las muestras de los modelos originales encuadrados en los grupos 1 y 2 .....	259
4.3.5.3	Ensayo con las muestras de los modelos originales encuadrados en los grupos 3 a 5 .....	259
4.3.6	Aplicación de la metodología empleada en el Apartado 4.2.3 a los resultados obtenidos con las 37 muestras desgastadas referenciadas en el Apartado 4.3. ....	260
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>263</b>
5.1	Estudio comparativo de los diferentes métodos de medida de la resistencia al deslizamiento .....	265
5.2	Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento .....	268

5.3	Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento .....	271
<b>6.</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>275</b>
<b>7.</b>	<b>APÉNDICE .....</b>	<b>279</b>
7.1	Muestras .....	281
7.1.1	Muestras seleccionadas .....	283
7.1.2	Muestras industriales .....	303
7.2	Parámetros de superficie .....	309
7.2.1	Valores parámetros rugosidad y ondulación de las muestras ensayadas .....	311
7.2.2	Correlaciones PTV/100 con parámetros de superficie .....	321
7.2.3	Comparación entre los valores experimentales de PTV/100 y los calculados a partir de los parámetros de rugosidad .....	341
7.2.4	Valores parámetros rugosidad de las muestras desgastadas .....	353
7.2.5	Comparación entre los valores experimentales de PTV/100 y los calculados a partir de los parámetros de rugosidad de las muestras desgastadas .....	359
7.3	Software estimación CoF a partir de un conjunto de parámetros de rugosidad .....	365
7.3.1	Introducción .....	367
7.3.2	Algoritmos de clasificación con predicción numérica .....	368
7.3.2.1	Regresión lineal múltiple .....	368
7.3.2.2	M5P .....	368
7.3.2.3	Preselección de atributos .....	369
7.3.3	Resultados .....	371
<b>8.</b>	<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>377</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>385</b>

## **Resumen**



Millones de personas son tratadas anualmente, en todo el mundo, debido a lesiones producidas por caídas, a consecuencia de resbalones, hasta el punto de haberse convertido en una de las principales causas de lesiones involuntarias atendidas en los hospitales.

Debido a la creciente importancia de este problema, en El Código Técnico de la Edificación (CTE), que es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad en España, se ha introducido, como medida de la seguridad frente al riesgo de caídas por resbalamiento, el concepto de resistencia al deslizamiento del pavimento a instalar. El documento que establece, tanto los requisitos mínimos a cumplir, como la metodología utilizada para realizar dicha medida, es el *DB-SUA "Documento Básico de Seguridad de Utilización y Accesibilidad" Sección SUA 1 "Seguridad frente al riesgo de caídas" Apartado 1 "Resbaladidad de los suelos"* junto con el *DA DB-SUA/3 (Documento de Apoyo al Documento Básico de Seguridad de Utilización y Accesibilidad. Resbaladidad de suelos)*. Un aspecto muy importante que debemos tener en cuenta es que estos requisitos se deben mantener durante toda la vida útil del pavimento.

Para cuantificar el valor de la resistencia al deslizamiento de superficies de pavimentación para tránsito peatonal se suelen utilizar diferentes parámetros de medida, dependiendo del procedimiento que se emplea para determinarla. Los parámetros normalmente utilizados son: el "Coeficiente de fricción dinámico", que se mide con el tribómetro lineal dinámico y se representa habitualmente por los símbolos DCOF o  $\mu_d$ ; el "Angulo crítico de deslizamiento" que se determina por el método de la rampa y se representa con el símbolo  $\alpha$ , y el "Pendulum Test Value" que se mide con el péndulo de fricción y se representa como PTV. Entre los valores de estos tres parámetros existe una cierta proporcionalidad, de modo que, en general, la resistencia al deslizamiento de una superficie es tanto mayor cuanto más alto es el valor de cualquiera de ellos.

La adecuación de un pavimento a la reglamentación en vigor, desde el punto de vista del documento del CTE citado más arriba, depende del valor de su resistencia al deslizamiento, determinada mediante el ensayo del péndulo, en base a la norma *UNE-ENV 12633*.

Aunque lo comentado anteriormente es aplicable a todo tipo de superficies para tránsito peatonal, el presente estudio se ha limitado al campo de los pavimentos cerámicos, incluyendo una amplia tipología de baldosas cerámicas de diferente naturaleza y acabado superficial.

En primer lugar, se ha intentado relacionar los valores de la resistencia al deslizamiento que se obtienen utilizando los diferentes métodos de ensayo citados anteriormente.

Inicialmente, utilizando las mismas condiciones de ensayo (elemento deslizador y agente contaminante), se han comparado los resultados que se obtienen al utilizar los distintos equipos habituales de ensayo. Posteriormente, con vistas a relacionar los diferentes métodos normalizados que se emplean habitualmente, se han comparado los valores de la resistencia al deslizamiento, medidos según las normas en vigor fuera de España, con los que resultan al aplicar la metodología propuesta en la norma *UNE-ENV 12633*, que es la indicada por la reglamentación vigente en España.

En segundo lugar, se ha estudiado la relación existente entre la resistencia al deslizamiento y la topografía superficial de un conjunto de modelos de baldosa cerámica, elegidos tratando de abarcar un amplio abanico de pavimentos cerámicos. Los modelos estudiados se han clasificado en cinco grupos, atendiendo al perfil (plano u ondulado) y a la mayor o menor rugosidad, textura o relieve apreciados a simple vista (apreciación visual y táctil).

Para realizar este estudio ha sido preciso determinar previamente los valores de los parámetros de topografía superficial de las muestras de los 52 modelos estudiados. Seguidamente se ha estudiado la relación de la resistencia al deslizamiento con cada uno de los diferentes parámetros estudiados, considerados individualmente, habiendo seleccionado un reducido conjunto de ellos, para los que se han obtenido las mejores correlaciones. Los parámetros seleccionados han sido todos representativos del perfil de rugosidad, ya que las correlaciones resultantes con los parámetros representativos del perfil de ondulación han conducido a coeficientes de correlación muy bajos.

Con la intención de mejorar las correlaciones obtenidas, se ha utilizado también un método estadístico, que se describe en el Apéndice de esta Memoria, para tratar de relacionar la resistencia al deslizamiento de las muestras estudiadas con un conjunto de parámetros de rugosidad autoseleccionados por el procedimiento empleado.

Esta parte del estudio se ha realizado con vistas a contribuir al desarrollo de conocimiento en lo referente a la relación resistencia al deslizamiento-topografía superficial. Los resultados obtenidos permiten predecir, de forma aproximada, el valor de la resistencia al deslizamiento, a partir de los valores de los parámetros de rugosidad representativos de la textura superficial de la superficie de una pieza de pavimento, lo cual puede ser muy útil para diseñar determinados modelos de pavimento.

Por último, se ha diseñado y desarrollado un dispositivo y metodología para producir el desgaste acelerado de la superficie de baldosas cerámicas, a escala de laboratorio, capaz de simular de forma bastante fiel la abrasión que se origina en las mismas debido al tránsito peatonal, en condiciones reales.

Con este dispositivo, es posible evaluar, en muy poco tiempo, la evolución de la resistencia al deslizamiento de la superficie de una pieza de pavimento cerámico, con la intensidad del desgaste, lo cual permite predecir, conocida la



equivalencia entre etapas de desgaste en el equipo de laboratorio y el tránsito peatonal real, la evolución del comportamiento antideslizante de una pieza, a largo plazo, como consecuencia del desgaste producido por tránsito peatonal real, una vez instalada.

Mediante esta metodología es posible cuantificar el tránsito peatonal que puede llegar a soportar un pavimento cerámico, manteniendo una resistencia al deslizamiento por encima del mínimo requerido para el local o espacio en el que se ha de instalar.

Asimismo, se ha estudiado la evolución de la resistencia al deslizamiento, por tránsito peatonal real y por el método de laboratorio puesto a punto, de una serie de muestras de pavimento de algunos modelos elegidos entre los 52 estudiados en otros apartados de esta Memoria, determinando, a la vez, los correspondientes valores de los parámetros de rugosidad más representativos, lo que ha permitido relacionarlos entre sí.

Los resultados obtenidos, en esta parte del trabajo, han suministrado una valiosa información que será útil para poder diseñar piezas de pavimento cerámico aptas y duraderas. Es decir, piezas cerámicas cuya superficie sea de un material y posea un acabado superficial que le confieran no solo un valor preestablecido de la resistencia al deslizamiento, sino también que el valor de esta propiedad se mantenga, durante largo tiempo, dentro de los límites exigibles por las normas de seguridad que requiere el lugar donde se vayan a instalar.

En el contexto actual, en el que la sostenibilidad es uno de los aspectos más importantes a valorar, poder desarrollar productos que mantengan no sólo su aspecto superficial, sino también sus prestaciones antideslizantes, durante el mayor tiempo posible, va a ser un factor muy importante de diferenciación.

Cuidar, en este último aspecto, la calidad de las piezas de pavimento cerámico reducirá la posibilidad de caídas y accidentes por resbalamiento y ayudará a los fabricantes a poder diseñarlas adecuadamente en función del lugar donde esté previsto instalarlas.



## **Abstract**



Millions of people are treated annually worldwide for slip and fall injuries, making such accidents one of the main causes of involuntary injuries attended to in hospitals.

Owing to the increasing importance of this problem, the concept of the slip resistance of the flooring to be installed, as a safety measure against the risk of slip-falls, has been introduced in the Technical Building Code (TBC), the regulatory framework that lays down the requirements buildings must meet with regard to basic safety and habitability requirements in Spain. The document establishing the minimum requirements and the methodology used to implement this measure is *DB-SUA*, “*Basic Document on Safety of Use and Accessibility*” Section *SUA 1 “Safety against fall risk”* Section 1 “*Slipperiness of floors*” together with *DA DB-SUA/3 (Back-up Document to the Basic Document on Safety of Use and Accessibility. Slipperiness of floors)*. A particularly important aspect to be taken into account is that these requirements shall be maintained throughout the flooring service life.

To quantify the slip resistance value of flooring surfaces for pedestrian traffic, different measurement parameters are typically used, depending on the method applied to determine slip resistance. The following parameters are usually employed: the “Dynamic coefficient of friction”, measured with the dynamic linear tribometer and customarily represented by the symbols *DCOF* or  $\mu_d$ ; the “Critical angle of slip”, determined by the ramp method and represented by the symbol  $\alpha$ ; and the “Pendulum Test Value”, measured with the friction pendulum and represented by *PTV*. There is a certain proportionality among the values of these three parameters so that, in general, the higher the value of any of these parameters, the greater the surface slip resistance.

The conformity of a flooring to the regulation in force, from the standpoint of the above TBC document, depends on the value of its slip resistance, determined by the pendulum test, based on standard *UNE-ENV 12633*.

Although the above is applicable to all types of surfaces for pedestrian traffic, this study has limited itself to the field of ceramic floorings, encompassing a wide range of types of tile of different nature and surface finish.

It was sought, first of all, to relate the slip resistance values obtained using the different test methods mentioned above.

Initially, using the same test conditions (slider and contaminant), the results obtained using the different typical test devices were compared. To relate the different standard methods that are customarily used, the slip resistance values measured according to the standards in force outside Spain were compared with those obtained on applying the methodology set out in standard *UNE-ENV 12633*, this being the one indicated in the regulations in force in Spain.

Secondly, the relation between the slip resistance and surface topography of a set of ceramic tile models, chosen so as to include a wide range of ceramic floorings, was studied. The studied models were divided into five groups, according to profile (flat or wavy) and greater or lower roughness, texture or relief observed at sight (visual and tactile appreciation).

To perform this study, the values of the surface topography parameters of samples of the 52 studied models needed to be previously determined. The relationship of slip resistance with each of the different studied parameters, considered individually, was analysed, on selecting a small set of these, for which the best correlations were obtained. The selected parameters were all representative of the roughness profile, because the resulting correlations of the parameters representative of the waviness profile led to very low correlation coefficients.

To improve the resulting correlations, a statistical method described in the Appendix to this Report was also used, in order to try to relate the slip resistance of the studied samples to a set of roughness parameters auto-selected by the method used.

This part of the study aimed to contribute to a better understanding of the relationship of slip resistance to surface topography. The results obtained allow approximate prediction of the slip resistance value from the values of the roughness parameters representing the surface texture of a floor tile, which can be very useful for designing certain floor tile models.

Finally, a device and methodology were designed and developed to produce accelerated wear of the ceramic tile surface on a laboratory scale, which enabled quite faithful simulation of the abrasion generated in these tiles from pedestrian traffic in real conditions.

The device enables evaluation, in a very short time, of how the slip resistance of a ceramic tile surface will evolve with wear intensity, which allows prediction, on knowing the equivalence between the wear stages in the laboratory device and real pedestrian traffic, of how tile slip resistance will evolve in the long term as a result of the wear produced by real pedestrian traffic upon installation.

This methodology allows the pedestrian traffic to be quantified that a ceramic flooring will be able to withstand, keeping slip resistance above the minimum requirement for the premises or domain in which the flooring is to be installed.

The evolution of slip resistance, by real pedestrian traffic and by the developed laboratory method, was studied of a series of floor tile samples of some models chosen from among the 52 studied models in other sections of this Report, concurrently determining the corresponding values of the most representative roughness parameters, which allowed them to be related to each other.

The results obtained in this part of the studied yielded valuable information that will be useful in designing suitable, long-lasting ceramic flooring. That is,

ceramic tiles whose surface is of a material and which also have a surface finish such that the tiles do not just have a pre-set slip resistance, but that this slip resistance is held for a long time, within the limits required by the safety standards for the intended tile installation site.

In the current context, in which sustainability is one of the most important aspects to be evaluated, the ability to develop products that maintain not only their surface appearance but also their slip resistance performance, for as long as possible, is going to be a very important differentiating factor.

In this last regard, attending to the quality of ceramic floor tiles will reduce the possibility of slip and fall accidents and will help manufacturers design floor tiles appropriately as a function of the intended tile installation site.





## **Resum**



Milions de persones són tractades anualment, a tot el món, a causa de lesions produïdes per caigudes, a conseqüència de relliscades, fins al punt d'haver-se convertit en una de les principals causes de lesions involuntàries ateses als hospitals.

A causa de la creixent importància d'aquest problema, en El Codi Tècnic de l'Edificació (CTE), que és el marc normatiu que estableix les exigències que han de complir els edificis en relació amb els requisits bàsics de seguretat i habitabilitat a Espanya, s'ha introduït, com a mesura de la seguretat enfront del risc de caigudes per relliscades, el concepte de resistència al lliscament del paviment a instal·lar. El document que estableix, tant els requisits mínims a complir, com la metodologia utilitzada per a realitzar aquesta mesura, és el DB-SUA "Document Bàsic de Seguretat d'Utilització i Accessibilitat" Secció SUA 1 "Seguretat front al risc de caigudes" Apartat 1 "Relliscament dels sòls" juntament amb el DA DB-SUA/3 (Document de Suport al Document Bàsic de Seguretat d'Utilització i Accessibilitat. Relliscament de sòls). Un aspecte molt important que hem de tindre en compte és que aquests requisits s'han de mantindre durant tota la vida útil del paviment.

Per a quantificar el valor de la resistència al lliscament de superfícies de pavimentació per a trànsit de vianants se solen utilitzar diferents paràmetres de mesura, depenent del procediment que s'empra per a determinar-la. Els paràmetres normalment utilitzats són: el "Coeficient de fricció dinàmic", que es mesura amb el tribòmetre lineal dinàmic i es representa habitualment pels símbols DCOF o  $\mu_d$ ; el "Angle crític de lliscament" que es determina pel mètode de la rampa i es representa amb el símbol  $\alpha$ , i el "Pendulum test Value" que es mesura amb el pèndol de fricció i es representa com PTV. Entre els valors d'aquests tres paràmetres existeix una certa proporcionalitat, de manera que, en general, la resistència al lliscament d'una superfície és tant major com més alt és el valor de qualsevol d'ells.

L'adequació d'un paviment a la reglamentació en vigor, des del punt de vista del document del CTE citat més amunt, depèn del valor de la seua resistència al lliscament, determinada mitjançant l'assaig del pèndol, sobre la base de la norma UNE-ENV 12633.

Encara que el comentat anteriorment és aplicable a tota mena de superfícies per a trànsit de vianants, el present estudi s'ha limitat al camp dels paviments ceràmics, incloent una àmplia tipologia de rajoles ceràmiques de diferent naturalesa i acabat superficial.

En primer lloc, s'ha intentat relacionar els valors de la resistència al lliscament que s'obtenen utilitzant els diferents mètodes d'assaig citats anteriorment.

Inicialment, utilitzant les mateixes condicions d'assaig (element lliscant i agent contaminant), s'han comparat els resultats que s'obtenen en utilitzar els diferents equips habituals d'assaig. Posteriorment, amb vista a relacionar els diferents mètodes normalitzats que s'empen habitualment, s'han comparat els

valors de la resistència al lliscament, mesurats segons les normes en vigor fora d'Espanya, amb els que resulten d'aplicar la metodologia proposada en la norma UNE-ENV 12633, que és la indicada per la reglamentació vigent a Espanya.

En segon lloc, s'ha estudiat la relació existent entre la resistència al lliscament i la topografia superficial d'un conjunt de models de rajola ceràmica, triats tractant d'abastar un ampli ventall de paviments ceràmics. Els models estudiats s'han classificat en cinc grups, atès el perfil (pla o ondulat) i a la major o menor rugositat, textura o relleu apreciats a simple vista (apreciació visual i tàctil).

Per a realitzar aquest estudi ha calgut determinar prèviament els valors dels paràmetres de topografia superficial de les mostres dels 52 models estudiats. Seguidament s'ha estudiat la relació de la resistència al lliscament amb cadascun dels diferents paràmetres estudiats, considerats individualment, havent seleccionat un reduït conjunt d'ells, per als quals s'han obtingut les millors correlacions. Els paràmetres seleccionats han sigut tots representatius del perfil de rugositat, ja que les correlacions resultants amb els paràmetres representatius del perfil d'ondulació han conduït a coeficients de correlació molt baixos.

Amb la intenció de millorar les correlacions obtingudes, s'ha utilitzat també un mètode estadístic, que es descriu en l'Apèndix d'aquesta Memòria, per a tractar de relacionar la resistència al lliscament de les mostres estudiades amb un conjunt de paràmetres de rugositat seleccionats pel propi procediment emprat.

Aquesta part de l'estudi s'ha realitzat amb vista a contribuir al desenvolupament de coneixement referent a la relació resistència al lliscament- topografia superficial. Els resultats obtinguts permeten predir, de forma aproximada, el valor de la resistència al lliscament, a partir dels valors dels paràmetres de rugositat representatius de la textura superficial de la superfície d'una peça de paviment, la qual cosa pot ser molt útil per a dissenyar determinats models de paviment.

Finalment, s'ha dissenyat i desenvolupat un dispositiu i metodologia per a produir el desgast accelerat de la superfície de rajoles ceràmiques, a escala de laboratori, capaç de simular de forma bastant fidel l'abrasió que s'origina en les mateixes a causa del trànsit de vianants, en condicions reals.

Amb aquest dispositiu, és possible avaluar, en molt poc temps, l'evolució de la resistència al lliscament de la superfície d'una peça de paviment ceràmic, amb la intensitat del desgast, la qual cosa permet predir, coneguda l'equivalència entre etapes de desgast en l'equip de laboratori i el trànsit de vianants real, l'evolució del comportament antilliscant d'una peça, a llarg termini, com a conseqüència del desgast produït per trànsit de vianants real, una vegada instal·lada.

Mitjançant aquesta metodologia és possible quantificar el trànsit de vianants que pot arribar a suportar un paviment ceràmic, mantenint una resistència al lliscament per damunt del mínim requerit per al local o espai en el qual s'ha d'instal·lar.

Així mateix, s'ha estudiat l'evolució de la resistència al lliscament pel trànsit real de vianants i pel mètode de laboratori posat a punt, d'una sèrie de mostres de paviment d'alguns models triats entre els 52 estudiats en altres apartats d'aquesta Memòria, determinant, alhora, els corresponents valors dels paràmetres de rugositat més representatius, la qual cosa ha permès relacionar-los entre si.

Els resultats obtinguts, en aquesta part del treball, han subministrat una valuosa informació que serà útil per a poder dissenyar peces de paviment ceràmic aptes i duradores. És a dir, peces ceràmiques la superfície de les quals siga d'un material i posseïska un acabat superficial que li conferisquen no solament un valor preestablert de la resistència al lliscament, sinó també que el valor d'aquesta propietat es mantinga, durant llarg temps, dins dels límits exigibles per les normes de seguretat que requereix el lloc on es vagen a instal·lar.

En el context actual, en el qual la sostenibilitat és un dels aspectes més importants a valorar, poder desenvolupar productes que mantinguen no solament el seu aspecte superficial, sinó també les seues prestacions antilliscants, durant el major temps possible, serà un factor molt important de diferenciació.

Cuidar, en aquest últim aspecte, la qualitat de les peces de paviment ceràmic reduirà la possibilitat de caigudes i accidents per lliscament i ajudarà els fabricants a poder dissenyar-les adequadament en funció del lloc on estiga previst instal·lar-les.

.



# **1.Introducción**





El fenómeno del deslizamiento es muy complejo y existen muchos factores que es necesario tener en cuenta para intentar medir y prever el riesgo de que se produzca.

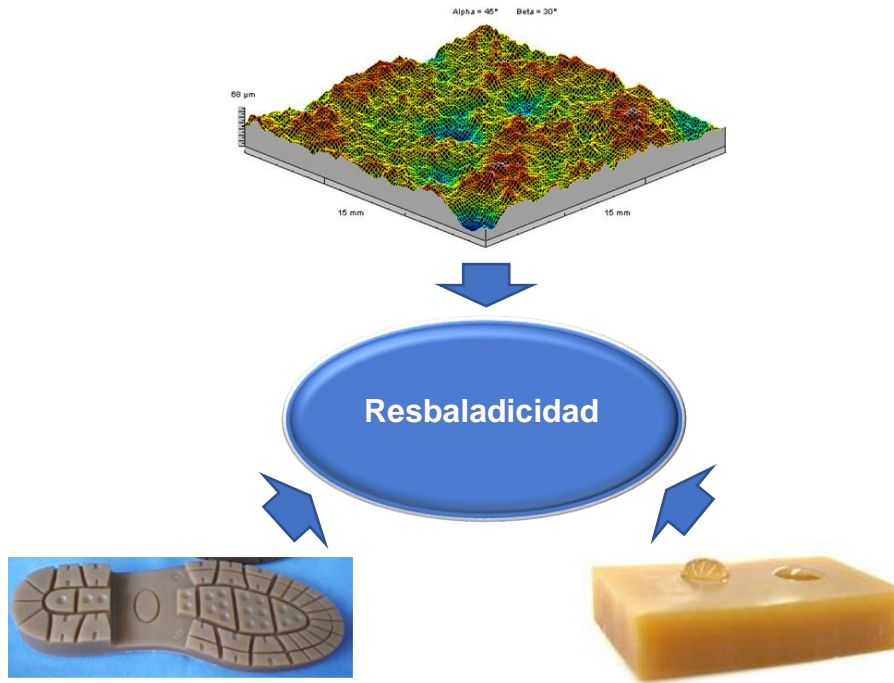
En función de la actividad que se realice (andar, correr, saltar, etc.), la edad, el estado físico de las personas, etc., la fricción mínima requerida, en un pavimento, para evitar el deslizamiento puede ser diferente. En todo caso, la resistencia real al deslizamiento del pavimento debe ser siempre mayor que la mínima requerida para efectuar dicha actividad si queremos evitar el riesgo de resbalamiento (Figura 1.1).



*Figura 1.1 Riesgo de deslizamiento cuando la fricción real es menor a la fricción requerida.*

## **1.1 Factores que influyen sobre la resbaladidad de los pavimentos cerámicos**

La resistencia al deslizamiento de la superficie de un pavimento depende de varios factores. Entre ellos, cabe destacar la topografía superficial (que se modifica con el desgaste derivado del uso), la presencia, cantidad y naturaleza de un agente contaminante, la naturaleza y geometría de la suela del calzado que se utiliza, etc. (Figura 1.2).



**Figura 1.2 Principales factores que influyen sobre la resistencia al deslizamiento.**

A continuación, se describe el modo en que influyen los factores más significativos, sobre el valor de la resistencia al deslizamiento, en el caso de los pavimentos cerámicos.

### 1.1.1 Topografía superficial del pavimento

En la bibliografía se han localizado algunos trabajos en los que, al estudiar la influencia de la topografía de la superficie de diversos materiales sobre su resistencia al deslizamiento, se ha encontrado una cierta relación entre esta propiedad y algunos parámetros superficiales de rugosidad.

*Grönqvist, R. et al. 1990* demostraron que existe una correlación entre el parámetro de rugosidad  $R_a$  y la resistencia al deslizamiento, expresada como coeficiente de fricción, en el caso de superficies contaminadas con glicerol. Estos investigadores sugirieron que el valor de  $R_a$ , para que una superficie de estas características sea antideslizante, debería estar alrededor de 7–9  $\mu\text{m}$ .

*Harris, G.W. & Shaw, S.R., 1988* mostraron una correlación entre el parámetro de rugosidad  $R_{tm}$  y la tendencia al deslizamiento, observada por varios usuarios, en distintos suelos contaminados con agua.

La entidad británica *Health and Safety Executive (HSE)*, 1999 recomienda la utilización del parámetro  $R_{pm}$  en una de sus publicaciones.

*Chang, W.R.*, 1998 encontró que los parámetros  $R_a$  y  $R_{pm}$  eran los que presentaban mejor coeficiente de correlación, al representarlos frente a los respectivos valores del coeficiente de fricción medidos en baldosas no esmaltadas de diferente textura. En un posterior estudio (*Chang, W.R.*, 2001), este mismo autor encontró también una buena correlación entre los valores de los parámetros  $R_{pm}$ ,  $\Delta a$  y  $R_k$  y el del coeficiente de fricción, medidos en superficies contaminadas por mezclas de glicerol-agua de diferente viscosidad, utilizando neolite y *rubber 4S* como material del elemento deslizador (suela del calzado). En otro trabajo *Chang, W.R.*, 2002, utilizando goma vulcanizada como material del elemento deslizador (suela del calzado), dicho investigador observó que los parámetros  $R_{sk}$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta q$  y  $R_k$ , eran los que presentaban la mejor correlación con los respectivos valores del coeficiente de fricción.

En los trabajos mencionados en los párrafos anteriores, se ha estudiado, la relación individual existente entre algunos de los parámetros de rugosidad y el coeficiente de fricción, para diferentes condiciones de ensayo.

Los primeros en investigar la influencia conjunta de varios parámetros de rugosidad sobre el coeficiente de fricción fueron *Chang, W.R. et al.*, 2010 quienes, utilizando modelos de regresión lineal, propusieron un grupo de parámetros de rugosidad superficial que, en su opinión, eran los que influían en mayor medida sobre el valor de dicho coeficiente. En su investigación, utilizaron neolite, de diferente textura, como elemento deslizante y un simulador de resbalamiento para determinar el coeficiente de fricción. Ahora bien, las condiciones de operación utilizadas en dicho trabajo son poco representativas de la realidad, ya que el neolite no es un material que se utilice actualmente como suela de calzado y el simulador de resbalamiento no se emplea en ninguno de los métodos que actualmente se proponen, en las normas en vigor, para medir la resistencia al deslizamiento.

Ahora bien, la influencia de la topografía de una superficie sobre su resistencia al deslizamiento parece ser que no depende únicamente del valor de los parámetros que definen su perfil de rugosidad, sino que también está condicionada, por su perfil de ondulación o relieve y por la forma más o menos aguda de las crestas o picos.

En efecto, en el caso de superficies planas o con un perfil de ondulación suave, se ha observado que al aumentar la rugosidad suele incrementarse el valor de su resistencia al deslizamiento. Cuando poseen relieves con un elevado número de crestas agudas (Figura 1.3), presentan un valor elevado de la resistencia al deslizamiento.

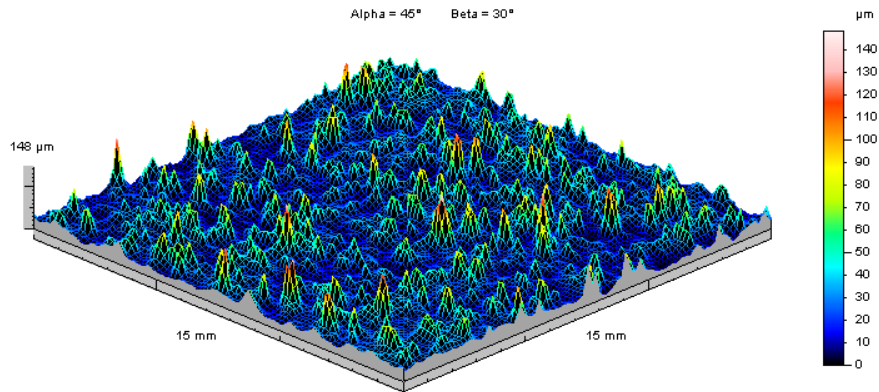


Figura 1.3 Topografía 3D de un perfil plano con picos agudos.

En cambio, las superficies que tienen perfiles con crestas de forma redondeada (Figura 1.4), suelen presentar valores relativamente bajos de la resistencia al deslizamiento que, en ocasiones, llegan a ser inferiores a los de algunas superficies planas y lisas, debido a que, en estos casos, además de tener crestas romas, la superficie de contacto efectiva con el elemento deslizador del dispositivo de medida es menor que en una superficie plana y lisa.

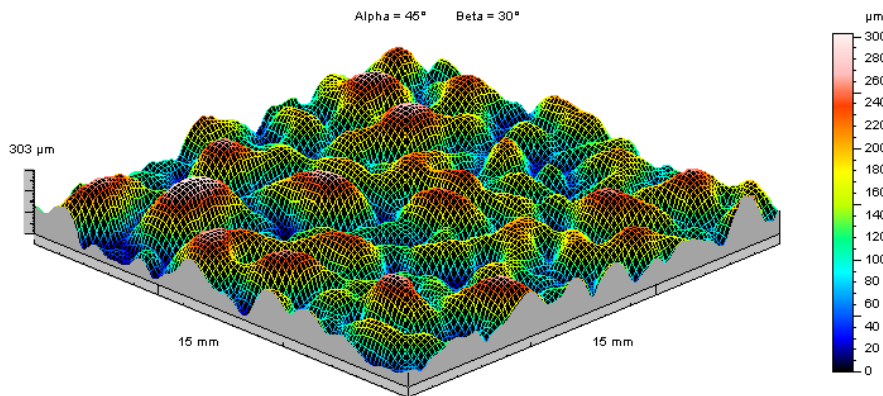


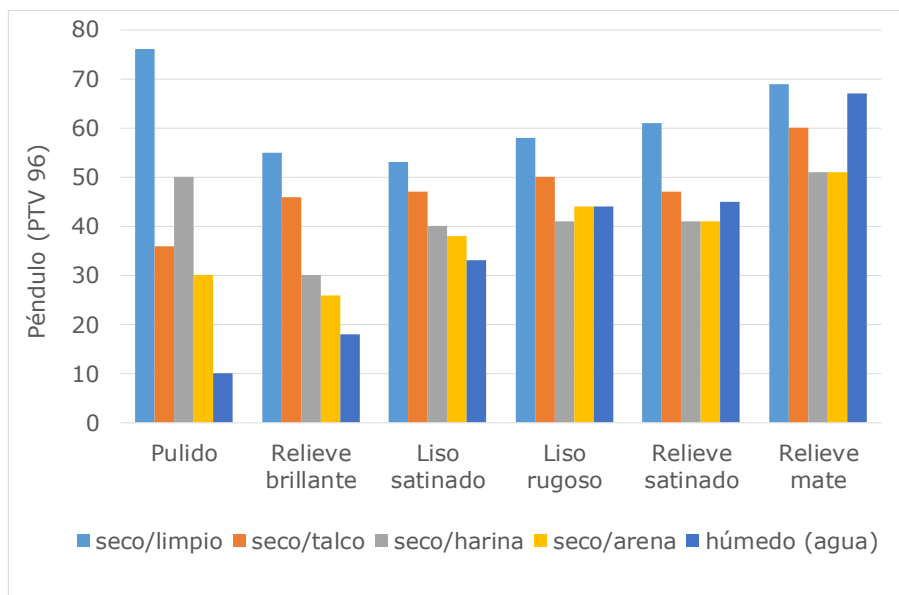
Figura 1.4 Topografía 3D de un perfil con crestas redondeadas.

### 1.1.2 Presencia de un agente contaminante

La resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico también está influenciada por la presencia de agentes contaminantes, como agua o aceite (Silva, G. et al. 2002, 2006). En realidad, los pavimentos contaminados por sólidos o líquidos son la causa principal de los accidentes por resbalamiento.

La presencia del agente contaminante hace que disminuya la adherencia entre la superficie de contacto pavimento-suela y, como consecuencia, el valor de la resistencia al deslizamiento del conjunto.

En la Figura 1.5 (Silva, G. et al. 2018) se presentan los resultados obtenidos para la resistencia al deslizamiento medida con el método del péndulo y con goma de dureza IRHD 96±2 (PTV 96) de un conjunto de pavimentos, en los que se ha ido modificando el contaminante presente.



**Figura 1.5 Comparación de la resistencia al deslizamiento (PTV caucho 4S) de distintas superficies cerámicas, medida en presencia de diferentes contaminantes (Silva, G. et al. 2018).**

En esta figura, se puede apreciar que la resistencia al deslizamiento, en ausencia de contaminantes (seco y limpio), está muy influenciada por los fenómenos de adherencia que se generan entre la superficie del pavimento y el calzado. Por ello, la superficie pulida presenta el valor máximo de PTV 96, el cual se reduce para superficies de perfil ondulado o ligera rugosidad, para después volver a aumentar en el caso de superficies muy rugosas o con relieve.

Por otra parte, la presencia de contaminantes, tanto sólidos como fluidos, afecta de forma más acusada a las superficies lisas y brillantes, reduciéndose su influencia cuando la superficie dispone de otros elementos superficiales que favorecen el contacto o el anclaje, como la rugosidad y el relieve.

A continuación, se relacionan los materiales que más frecuentemente contaminan la superficie de los pavimentos cerámicos:

- Sólidos (residuos superficiales):
  - De naturaleza inorgánica: p. ej. arena, polvo de partículas finas.
  - De naturaleza orgánica: p. ej. pelo, alimentos en polvo, escamas de piel, turba.
  
- Líquidos (películas superficiales):
  - Contaminantes polares: p. ej. agua, café, refrescos, bebidas de frutas.
  - Contaminantes no polares: p. ej. aceite, grasa, alquitrán.

De todos ellos, los más estudiados han sido: agua, agua más un tensioactivo y aceite. La utilización de un tensioactivo para reducir la tensión superficial del agua tiene por finalidad alcanzar la máxima impregnación de la superficie sólida, lo que permite evaluar su resistencia al deslizamiento en las condiciones más desfavorables. Algunas normas de ensayo recomiendan utilizar un tensioactivo para mejorar la reproducibilidad del ensayo (*DIN 51097*, *ANSI A.137.1*, *UNE-EN ISO 13287*).

En el caso de superficies lisas o con baja rugosidad, el uso de agua conteniendo un tensioactivo, como agente contaminante, disminuye la adherencia, y por tanto la resistencia al deslizamiento, en comparación a cuando se utiliza sólo agua (*Silva, G. et al. 2002*).

Cuando se utiliza aceite como agente contaminante, se reduce mucho más la adherencia entre el pavimento y el elemento deslizador, en comparación con lo que ocurre cuando se emplea agua o agua con tensioactivo.

### **1.1.3 Naturaleza del elemento deslizador**

El fenómeno de fricción entre una superficie rígida y una suela de calzado también depende de la capacidad de adaptación de la suela a dicha superficie, sobre todo cuando está seca y limpia.

La dureza de la suela afecta a la capacidad de deformación de ésta. Estudios previos, que utilizaron dos cauchos sintéticos lisos de distinta dureza, muestran que los valores del coeficiente de fricción obtenidos utilizando el caucho más duro son, casi siempre, ligeramente superiores a los obtenidos con el caucho blando (*Silva, G. et al. 2002*).

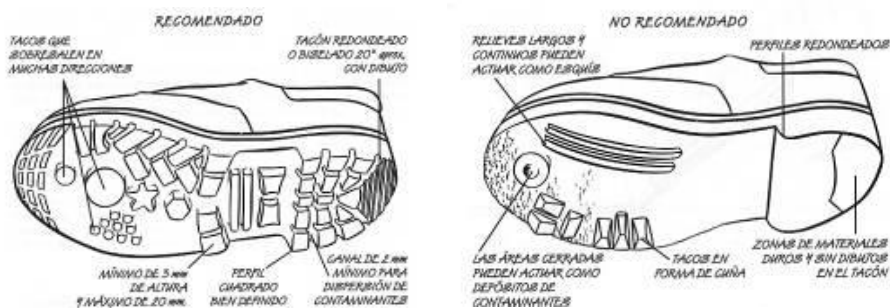
En el sector calzado existe una gran variedad de materiales disponibles en el mercado con propiedades totalmente diferenciadas, tales como:

- Caucho vulcanizado o goma.
- Caucho termoplástico o TR.
- Poliuretano de dos componentes o PUR.
- Poliuretano termoplástico o TPU.
- Policloruro de vinilo o PVC.
- Etilén-vinil acetato en estado microporoso o EVAm.

Se ha constatado, que las suelas de caucho y de PUR, además de tener un buen coeficiente de fricción, poseen excelentes propiedades físico-mecánicas. Por este motivo son los materiales más utilizados en la fabricación de calzado de altas prestaciones, tales como el calzado de seguridad, en el que uno de los requisitos básicos es el de presentar un valor de resistencia al deslizamiento adecuado.

Otra característica del calzado, que tiene gran influencia sobre su comportamiento frente al resbalamiento, es el diseño de la suela: geometría del relieve, presencia de ángulos vivos o redondeados en las pastillas del relieve, presencia de superficies lisas o rugosas, separación entre pastillas, posicionado de las hendiduras del relieve, altura del relieve, etc. (Figura 1.6).

La suela en sí, entendida como la combinación material-diseño, debe ser capaz de maximizar la superficie de contacto suela-pavimento, ya que cuanto mayor es su valor, más alto es el del coeficiente de fricción. Además, dicha combinación debe ser capaz de evacuar los posibles contaminantes existentes en el pavimento, principalmente en determinados ambientes profesionales, tales como agua, grasas, etc., para favorecer un mayor agarre al suelo, es decir para mejorar el citado coeficiente.



**Figura 1.6 Recomendaciones de diseño de la suela para obtener una resistencia al resbalamiento adecuada (ULTRAGRIP, 2010).**

#### 1.1.4 Desgaste superficial

A partir del momento de la instalación de un pavimento, existen múltiples causas que provocan un desgaste sobre su superficie que puede causar una modificación en sus características superficiales lo que conlleva una modificación de su topografía y, por consiguiente, de su resistencia al deslizamiento.

*Derler, S. et al. 2005* mostró mediante medidas in situ del coeficiente de fricción y de algunos parámetros de rugosidad de pavimentos de diferente naturaleza que tanto la topografía de la superficie como la resistencia al deslizamiento variaba a lo largo de los meses. Dicha variación la achacó al desgaste producido en la superficie del pavimento debido al tránsito de personas y a los procesos de limpieza y mantenimiento que se realizaban de forma habitual.

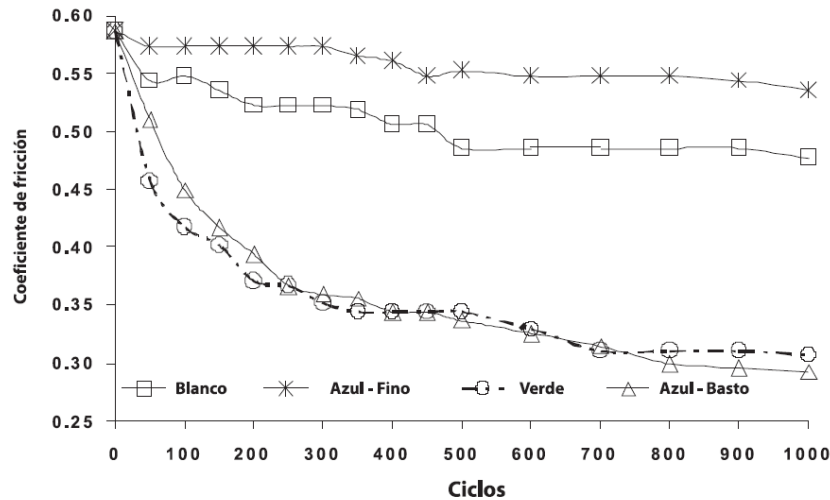
La norma australiana *AS 4586:2013 Slip resistance classification for new pedestrian surface materials* ya advierte, en su Introducción, de la conveniencia de realizar un acondicionamiento por desgaste acelerado de las baldosas “nuevas” para valorar la resistencia al deslizamiento tras la posible alteración que el producto puede sufrir debido al desgaste.

La correcta ejecución de esta recomendación permitiría seleccionar, entre un conjunto de modelos de pavimento que poseen la misma resistencia al deslizamiento cuando salen de fábrica, cuáles son los más adecuados. Es decir, sería una buena herramienta de selección, sobre todo en el caso de pavimentos que van a ser sometidos a un tránsito peatonal intenso. Sin embargo, dicha norma no especifica ningún método para realizar dicho acondicionamiento por desgaste acelerado.

Aunque en las normativas actuales aún no se contempla la medida previa de la evolución de la resistencia al deslizamiento a largo plazo, ni existe un método de desgaste acelerado reconocido para simular a escala de laboratorio el desgaste por tránsito peatonal, existen varios investigadores que han trabajado en ello.

Cabe destacar el método desarrollado por *Strautins, C.J., 2008*. Este método se basa en el uso de la máquina con la que se llevan a cabo los ensayos de lavabilidad y desgaste en el sector de pinturas. Dicha máquina tiene un deslizador de movimiento lineal, al que se fijan distintos materiales abrasivos (estropajos) capaces de ejercer diferente grado de abrasión (Figura 1.7). A partir de diferentes estudios de los materiales abrasivos ensayados y de otras variables de funcionamiento del equipo, *Strautins* definió unos parámetros de trabajo que actualmente se están empleando en Australia para valorar la resistencia al deslizamiento a largo plazo. Sin embargo, no se ha realizado ningún estudio comparativo entre el desgaste producido por dicho equipo y el que se origina por tránsito peatonal real.





**Figura 1.7** Disminución del coeficiente de fricción, medido con el método del péndulo con caucho 96, debida al proceso de desgaste, utilizando diferentes materiales abrasivos (Strautins, C. J. 2008).

Recientemente, *Engels, M., 2016*, mediante el uso de un dispositivo de limpieza con discos abrasivos, simuló el desgaste real validándolo mediante medidas topográficas realizadas tanto “in situ”, como sobre pavimentos desgastados en laboratorio con dicho dispositivo de limpieza. Asimismo, midió la resistencia al deslizamiento de las piezas ensayadas mediante el método de la rampa, observando que en la mayoría de las muestras estudiadas se producía una reducción de la resistencia al deslizamiento entre un 30 y un 70% respecto a su valor inicial durante los primeros 20 ciclos de desgaste (que según su validación respecto a las medidas topográficas in situ, correspondía a 1 año y medio de uso en un local de alto tránsito con presencia constante de materiales abrasivos).

En la Figura 1.8 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución que experimenta el ángulo crítico de deslizamiento (método de la rampa) de diferentes superficies de pavimento cerámico con la intensidad del desgaste al que se las ha sometido. En las representaciones gráficas de dicha figura, se observa como el valor del ángulo crítico de deslizamiento disminuye significativamente en las primeras etapas de desgaste, hasta el punto de que dichos pavimentos llegan a cambiar de “clase de resistencia al deslizamiento” durante su primer año de uso.

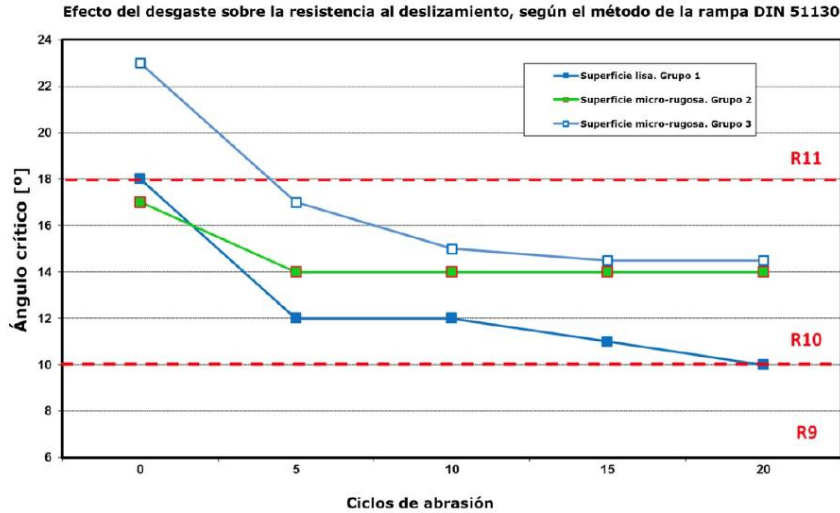


Figura 1.8 Disminución de la resistencia al deslizamiento debida al desgaste determinada mediante el método de la rampa DIN 51130. (Engels, M. 2018).

## 1.2 Tipología de superficies de pavimentos cerámicos

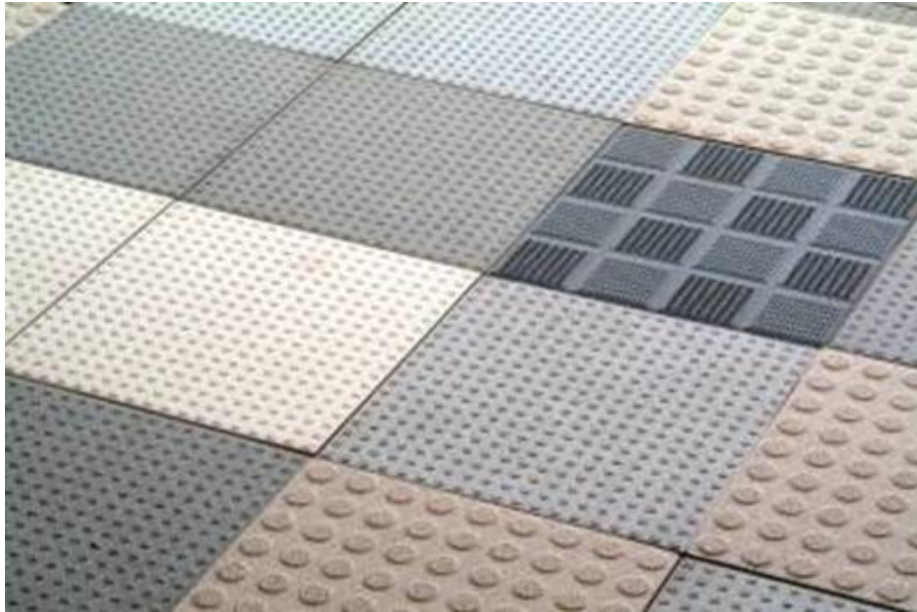
Es un hecho comprobado que tanto la rugosidad, como el relieve de la superficie de la cara vista de un pavimento cerámico, influyen de forma significativa sobre su comportamiento respecto al deslizamiento.

La superficie de los pavimentos cerámicos puede ser lisa, con pequeños relieves o con ondulaciones. Las superficies lisas pueden presentar diferente rugosidad, según que el acabado sea con brillo, satinado, semi-mate o mate.

Los diferentes acabados superficiales de los recubrimientos vidriados se consiguen utilizando distintos tipos de fritas y empleando diferentes formas de aplicación (granillas, gránulos, micro gránulos, esferoidizados, plaquetas, etc.) (Rincón, R.J. et al. 2008).

Los materiales más utilizados, para obtener superficies rugosas son las granillas, que son partículas de frita, físicamente irregulares, que se aplican vía seca sobre la superficie de la pieza fundiéndolas a continuación. Mediante el uso de estos materiales se obtienen superficies con diferente rugosidad, según la temperatura de fusión de la granilla aplicada, de modo que se denominan granillas suaves o agudas según den lugar, tras la cocción, a superficies con picos redondeados o agudos, respectivamente.

También se fabrican baldosas de pavimento a las que se les provoca relieves de diferente diseño en la cara vista, durante la fase de conformado del proceso de fabricación (Figura 1.9), con la intención de mejorar sus cualidades antideslizantes (Llanes-Parreño, M.D, 2009).



**Figura 1.9 Pavimentos cerámicos con diferentes geometrías superficiales.**

En ocasiones se efectúan tratamientos mecánicos o químicos de la superficie del producto acabado, en el caso de los pavimentos lisos y brillantes, para mejorar su comportamiento frente al deslizamiento. Estos tratamientos pueden agruparse en dos tipos, según la metodología utilizada:

- a) Perforación de la superficie del material con láser para permitir la evacuación del componente contaminante y favorecer la deformación del elemento deslizador (la suela de los zapatos) (Hauptmann, J. & Wiedemann, G. 2003).
- b) Alteración química de la superficie mediante la aplicación de un agente químico selectivo (normalmente ácido fluorhídrico diluido), para aumentar su rugosidad.

Estos métodos tienen el inconveniente de que modifican el aspecto de la superficie (principalmente el brillo) y favorecen su ensuciamiento con el uso.

### 1.3 Métodos de ensayo, normativa y reglamentación

#### 1.3.1 Métodos para evaluar la resistencia al deslizamiento

##### 1.3.1.1 Tribómetro lineal estático

Este dispositivo permite medir el coeficiente de fricción estático ( $\mu_e$ ) y se describe en la norma americana *ASTM C 1028*. El método consiste en determinar la fuerza mínima necesaria, en dirección paralela al plano de desplazamiento ( $F_R$ ), para que un elemento deslizador de neolite, de masa  $m$ , inicie el movimiento sobre una superficie plana dispuesta horizontalmente (Figura 1.10 y Figura 1.11). Se ha de utilizar una superficie mínima de ensayo de 102 mm x 102 mm. El deslizador de neolite soporta una carga de 22 kg. El ensayo se realiza primero sobre la superficie seca y después sobre la superficie completamente cubierta de agua destilada.

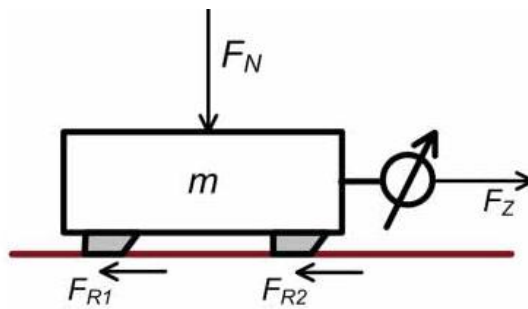


Figura 1.10 Esquema de un tribómetro lineal.

El coeficiente de fricción estático ( $\mu_e$ ) se calcula a partir del valor de  $F_R$  y de la fuerza normal al plano de desplazamiento que ejerce el deslizador ( $F_N = m \cdot g$ ), mediante la expresión:

$$\mu_e = \frac{F_R}{m \cdot g} \quad (1.1)$$

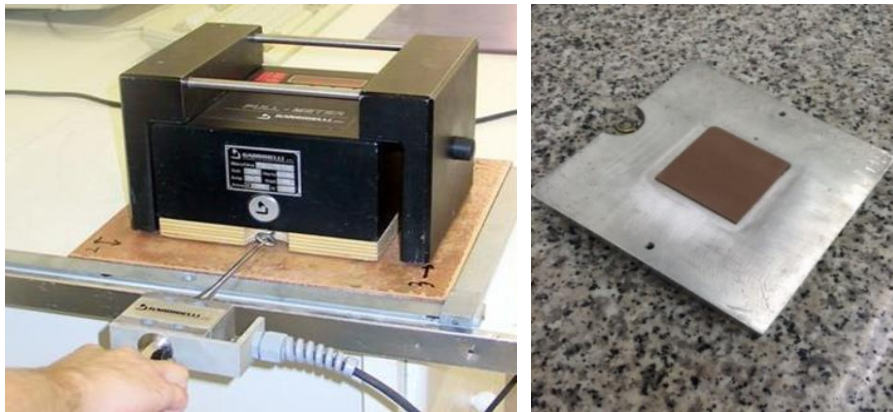
Respecto a la efectividad de este método de ensayo para evaluar la resistencia al deslizamiento, cabe citar las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Sistema sencillo y económico.
- Lectura instrumental directa (en la escala del dinamómetro empleado) de la fuerza  $F_R$  necesaria para que se inicie el movimiento.
- Deslizador de geometría simple y material normalizado (neolite).
- Permite realizar ensayos sobre material instalado.

Inconvenientes:

- Ligera dependencia del operador que realiza la tracción.
- Ensayo estático (una mayoría de expertos opina que no reproduce bien las condiciones de fricción que se producen durante el tránsito peatonal).



**Figura 1.11** Equipo normalizado empleado para medir el coeficiente de fricción estático en pavimentos (ASTM C 1028) y detalle del elemento deslizador.

### 1.3.1.2 Tribómetro lineal dinámico

El esquema representativo es análogo al mostrado en la Figura 1.10, con la diferencia de que, en este caso, la fuerza  $F_R$  es la necesaria para desplazar el elemento deslizador de masa  $m$ , a velocidad constante, sobre la superficie plana horizontal cuyo coeficiente de rozamiento dinámico (DCOF) se desea medir.

Partiendo de la fuerza normal ejercida por el elemento deslizador ( $F_N$ ) y de la fuerza necesaria para desplazarlo, a velocidad constante ( $F_R$ ), se calcula el valor del coeficiente de fricción dinámico (DCOF), de modo continuo, en base a la relación:

$$DCOF = \frac{F_R}{F_N} = \frac{F_R}{m * g} \quad (1.2)$$

A continuación, se describen los equipos o dispositivos más frecuentemente utilizados para medir el DCOF.

#### 1.3.1.2.1 Equipo Tortus®

Este procedimiento fue desarrollado por el centro de investigación británico British Ceram Research para intentar reproducir la fricción ejercida por la parte posterior del talón, al entrar en contacto con la superficie del pavimento, en base a un estudio de las condiciones de deslizamiento durante el caminar humano.

Se incorporó en el borrador de norma *ISO/DIS 10545-17* documento que no llegó a ser publicado como norma.

El equipo consiste en una probeta cilíndrica de caucho normalizado 4S, de 9 mm de diámetro, que soporta una carga autopropulsada de 200g, que se desplaza, a velocidad constante (17 mm/s), sobre una superficie plana horizontal (Figura 1.12). La probeta (elemento deslizador) lleva incorporado un dispositivo que permite medir continuamente la fuerza paralela a la mencionada superficie que se ejerce para desplazarla (fuerza de rozamiento).

El coeficiente de fricción dinámico se calcula mediante la ecuación (1.2), dado que en este dispositivo el deslizador se desplaza también a velocidad constante.

Las medidas se realizan en condiciones de pavimento seco y mojado (agua más un agente humectante).

Como características principales de este método cabe resaltar:

Ventajas:

- Equipo instrumental autopropulsado (opera a velocidad del deslizador constante, evaluación no subjetiva).

- Lectura continua y directa del coeficiente de fricción dinámico (homogeneidad del pavimento).
- Deslizador de geometría simple y material normalizado (4S rubber).
- Permite realizar ensayos sobre material instalado.

Inconvenientes:

- Análisis complejo de la respuesta oscilante del sensor.
- No adecuado para superficies con relieve.
- Desplazamiento lento del deslizador (intenta reproducir la fricción al caminar).



**Figura 1.12 Equipo Tortus® empleado para medir el coeficiente de fricción dinámico en pavimentos cerámicos y detalle del deslizador.**

#### 1.3.1.2.2 Equipo BOT-3000

Este método de ensayo viene descrito en la norma americana *ANSI A137.1 Apdo. 9.6.* y recientemente se ha incorporado también en la norma *ANSI A326.3.*

Consiste también en un equipo autopropulsado que se desplaza, a velocidad constante (20 cm/s), sobre una superficie plana horizontal (Figura 1.13). En este caso, sobre el deslizador, que es de caucho SBR de dureza Shore A  $95\pm 3$ , se incorpora un peso que permite aplicar una fuerza normal de 21,3N. El elemento deslizador lleva incorporado un dispositivo que permite medir continuamente la fuerza paralela a la mencionada superficie que se ejerce

para desplazarla (fuerza de rozamiento). Partiendo de la fuerza normal ejercida por el conjunto deslizador – carga ( $F_N$ ) y de la fuerza necesaria para desplazar la probeta ( $F_R$ ), se calcula el valor del coeficiente de fricción dinámico (DCOF), de modo continuo, mediante el software adecuado, en base a la expresión (1.2), dado que el deslizador se desplaza asimismo a velocidad constante.

Las medidas se realizan en condiciones de pavimento mojado (agua más un agente humectante).



**Figura 1.13** Equipo BOT-3000 empleado para medir el coeficiente de fricción dinámico en pavimentos cerámicos y detalle del deslizador.

Como características principales de este método cabe resaltar:

Ventajas:

- Equipo instrumental autopropulsado (velocidad constante, evaluación no subjetiva).
- Lectura continua y directa del coeficiente de fricción dinámico (homogeneidad del pavimento).
- Permite realizar ensayos sobre material instalado.

Inconvenientes:

- Análisis complejo de la respuesta oscilante del sensor.
- No adecuado para superficies con mucho relieve.



### 1.3.1.2.3 Equipo utilizado en la industria del calzado

Este método se describe en la norma europea *UNE-EN ISO 13287* y es prácticamente análogo al anterior.

En la norma de resbalamiento de calzado, se establecen dos tipos de suelo de referencia (acero o baldosas cerámicas) y dos tipos de agentes contaminantes (glicerina o disolución acuosa con lauril sulfato sódico).

En dicho método, el calzado se coloca sobre una superficie plana horizontal (equivalente al suelo) y se le aplica una fuerza vertical ( $F_N$ ). A continuación, se mueve horizontalmente sobre la superficie a velocidad constante, midiendo la fuerza de que se está aplicando para desplazarlo ( $F_R$ ) y, a partir de la expresión (1.2), se calcula directamente el coeficiente de fricción dinámico de las distintas suelas que se ensayan.

En la Figura 1.14 se muestra una imagen del equipo utilizado para determinar la resistencia al resbalamiento de calzado, que está reconocido en la normativa española, europea e internacional. En este equipo, el coeficiente de fricción dinámico se puede medir poniendo el zapato en tres posiciones distintas (plano, punta y talón).



**Figura 1.14** Equipo normalizado empleado para medir el coeficiente de fricción dinámico de suelas de calzado (*EN-ISO 13287*).

Como características principales de este método cabe citar:

Ventajas:

- Características del equipo instrumental (velocidad y fuerza constante, evaluación no subjetiva)
- Posibilidad de evaluación directa del DCOF (coeficiente de fricción dinámico) en tres posiciones distintas de apoyo de la suela.
- Adecuado para cualquier tipo de material de suela y calzado
- Posibilidad de cambiar el tipo de pavimento
- Permite realizar el ensayo sobre hielo

Inconvenientes:

- No está determinada la correspondencia entre las condiciones de ensayo (fuerzas, velocidad de aplicación, ángulo, etc.) utilizadas para cada talla de calzado y las generadas durante el movimiento real en el uso.
- No permite realizar ensayos sobre material instalado.
- Procedimiento desarrollado para ensayos de calzado, no para pavimentos.

1.3.1.3 Método del péndulo de fricción

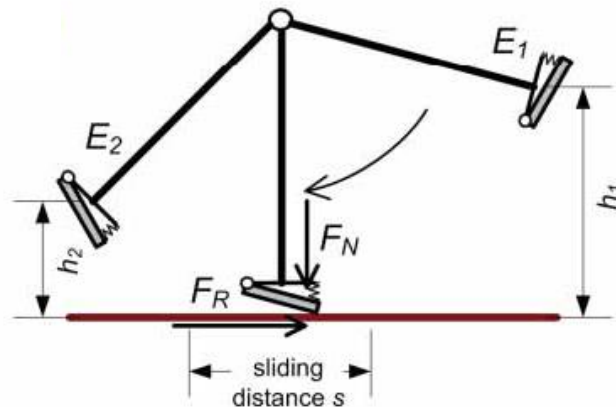
Este método fue desarrollado en el Transport Road Research Laboratory (TRRL) al objeto de determinar la resistencia al deslizamiento en carreteras, actividad para la que se viene utilizando en España según el procedimiento descrito en el documento *NLT-175 "Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo del TRRL"*, y que fue incorporado a la normativa española procedente de la norma europea equivalente, tras su publicación como norma *UNE-EN 13036-4: "Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 4: Método para medir la resistencia al deslizamiento/derrape de una superficie. Ensayo del péndulo"*.

La utilización del péndulo de fricción se fue generalizando como método de medida en distintos materiales destinados al recubrimiento de suelos (piedra natural, baldosas de cemento, terrazo, madera, etc.). En la actualidad es el método propuesto en la reglamentación española (*UNE-ENV 12633*) para dicha finalidad. La norma *UNE-ENV 12633* ha sido anulada recientemente, pero se sigue utilizando al ser el método de referencia que cita la reglamentación española.

Para los pavimentos de piedra natural, este método se propone, con ligeras variaciones, en tres normas europeas: *UNE-EN 1341* (baldosas para uso exterior), *UNE-EN 1342* (adoquines) y *UNE-EN 14231* (piedra natural), esta última contemplando la realización de dos ensayos, en húmedo y en seco.

Otras normativas nacionales también utilizan este equipo de ensayo para la medida de la resistencia al deslizamiento. Hay que destacar sobre todo la norma *BS 7976-2+A1* que contempla 4 condiciones de ensayo: caucho IRHD 55 y/o 96 y ensayo en seco y/o húmedo, así como la norma australiana *AS 4586* que incluye el ensayo en húmedo con ambos cauchos.

El equipo se muestra esquemáticamente en la Figura 1.15 Se basa en la pérdida de energía potencial debida al rozamiento de un elemento deslizador o patín sobre una superficie plana horizontal.



**Figura 1.15** Esquema representativo del péndulo de fricción.

Consiste en un péndulo de longitud de brazo de 510 mm, que soporta un deslizador de caucho de aproximadamente 76 mm x 25 mm (Figura 1.16). La altura del equipo se ajusta para conseguir que el deslizador (caucho de dureza IRHD  $59 \pm 4$  o  $96 \pm 2$ ), que soporta una carga máxima ( $F_{Nm}$ ) de 22 N, mantenga el contacto con la superficie durante un recorrido de 124 mm. El patín incide sobre la superficie con un ángulo medio de  $26 \pm 3^\circ$ , rozando con una de sus aristas, de longitud 76 mm, ligeramente biselada.

A partir de la diferencia entre las medidas de la altura inicial del elemento deslizador ( $h_1$ ) y la que alcanza después de la fricción ( $h_2$ ), se puede calcular un valor para el "pendulum test value" (PTV) de la superficie ensayada, mediante la expresión:

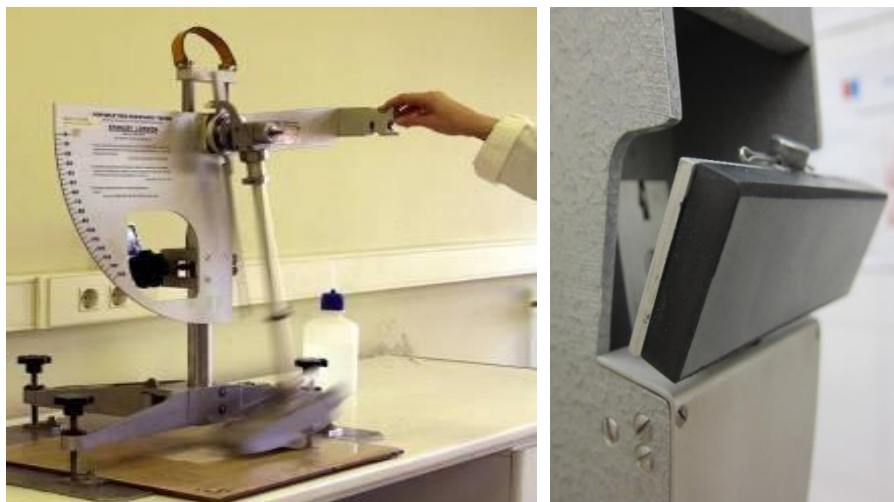
$$\left[ \frac{PTV}{100} \right] = m * g * \frac{h_1 - h_2}{s * F_N} \quad (1.3)$$

en la que  $s$  representa la longitud del recorrido del elemento deslizador (mm) y donde la carga que ejerce el elemento deslizador sobre la superficie plana ( $F_N$ ) varía a lo largo de su recorrido, pasando por un valor máximo ( $F_{Nm}$ ). En consecuencia, la ecuación (1.3) debería aplicarse con un valor medio empírico de  $F_N$  para calcular el coeficiente de fricción.

Varias normas incluyen un procedimiento para la verificación del equipo mediante un material de referencia (lámina abrasiva comercial 3M 261X 3µm), para un valor alto de la escala de medida, y con vidrio flotado, para un valor bajo de la escala.

Recientemente han sido publicadas en España las normas *UNE 41901 EX* y *UNE 41901 EX* que se aplican a cualquier tipo de superficie para tránsito peatonal. La primera de ellas contempla la realización del ensayo en condiciones húmedas y con caucho de dureza IRHD 57 (método de ensayo equivalente al de la norma *UNE-ENV 12633* anulada). La segunda contempla la realización del ensayo en seco y con caucho de dureza IRHD 96.

La comparación entre los resultados obtenidos en distintos laboratorios, para condiciones húmedas, tanto a escala nacional (*Centro Tecnológico del Mármol, 2008, 2010, 2014*), como a escala europea (*Slip Resistance Proficiency Testing. Pendulum Friction Tester. Safe Environments Pty Ltd 2018*) ha puesto de manifiesto la aceptable reproducibilidad del método, y la necesidad de disponer de un material de referencia con valores de resistencia al deslizamiento intermedios. En España se ha seleccionado con este propósito un producto cerámico que se ha incorporado a la norma *UNE 41901 EX*.



**Figura 1.16** Péndulo de fricción y detalle del deslizador.

Respecto a su adecuación para la medida de las propiedades antideslizantes, en pavimentos cerámicos, deben considerarse los siguientes aspectos:

Ventajas:

- Características del equipo instrumental (evaluación no subjetiva).
- Deslizador de geometría simple y material normalizado.
- Permite realizar ensayos sobre material instalado.
- Es el sistema más utilizado por los comités de normalización de otros materiales.

Inconvenientes:

- Evaluación del parámetro representativo de la fricción a velocidad demasiado elevada y variable a lo largo del recorrido del deslizador.
- No representa la disposición más común del pie en el momento del resbalamiento.
- El resultado de cualquier medida se obtiene en unidades propias de la escala del equipo (PTV), que después se han de transformar en valores equivalentes del coeficiente de fricción dinámico (DCOF) que aproximadamente equivale al valor de PTV/100.

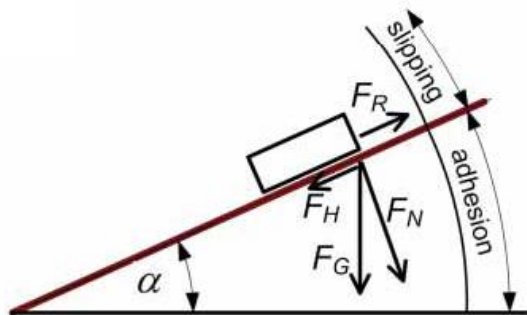
#### 1.3.1.4 Método de la rampa inclinada

Este ensayo viene descrito en las normas alemanas *DIN 51130* y *DIN 51097*.

La norma *DIN 51130* se desarrolló para la evaluación de la resistencia al deslizamiento de pavimentos en lugares de trabajo o locales industriales, susceptibles de la presencia de líquidos derramados sobre el pavimento, aunque posteriormente se ha incluido en la reglamentación alemana para la evaluación de distintos tipos de superficies comerciales y de concurrencia pública.

El dispositivo para la prueba se basa en determinar el coeficiente de rozamiento dinámico de un objeto que se desliza sobre un plano inclinado (Figura 1.17). Consiste en una plancha rígida plana con una anchura de 600 mm y una longitud de 2000 mm, sobre la que se sitúa el pavimento en estudio (Figura 1.18). La persona encargada de realizar la prueba debe caminar sobre la superficie a ensayar, calzado con unas botas de seguridad con una suela a base de caucho de nitrilo, de dureza Shore A 73±5 con el relieve que se muestra en la Figura 1.19.

El técnico camina en posición erguida, con la mirada dirigida hacia abajo, realizando pasos cortos hacia delante y hacia atrás. La inclinación del plano se va aumentando a razón de  $1^\circ$  por segundo aproximadamente hasta que se detecta riesgo de deslizamiento. El límite de seguridad se determina subiendo y bajando el ángulo de inclinación alrededor de la zona crítica.



**Figura 1.17 Fundamento del ensayo de la rampa inclinada.**

El ángulo de inclinación límite o ángulo de fricción se determina tres veces, partiendo de la posición original, realizando el ensayo, cada vez, por dos personas distintas que previamente han comprobado sus resultados frente a tres superficies de referencia (ST-I, ST-II y ST-III A). A partir de los valores obtenidos, se calculan los índices de corrección correspondientes a cada sujeto (D1 y D2).

Dado que este método de ensayo fue desarrollado inicialmente para evaluar pavimentos de uso industrial, las pruebas se efectúan aplicando uniformemente  $100 \pm 1$  ml de aceite SAE 10W30, tanto sobre la superficie como sobre la suela de las botas de seguridad.

La norma *DIN 51097* mide las propiedades antideslizantes de pavimentos situados en zonas en las que se camina descalzo. El procedimiento es el mismo que el de la norma *DIN 51130*, con la única diferencia que la superficie a ensayar está constantemente impregnada de una solución acuosa de un tensioactivo.



**Figura 1.18** Equipo para realizar el ensayo de la rampa inclinada.



**Figura 1.19** Suela del calzado normalizado utilizado en la norma DIN 51130.

En función del ángulo de inclinación obtenido, la muestra se clasifica en uno de los grupos de clasificación antideslizante detallados en la Tabla 1.1 para la norma DIN 51130 o en la Tabla 1.2 para la norma DIN 51097.

**Tabla 1.1 Grupos de clasificación antideslizante DIN 51130.**

Valor total medio	Grupo de clasificación
$6^\circ \leq \alpha_{\text{tot}} \leq 10^\circ$	R9
$10^\circ < \alpha_{\text{tot}} \leq 19^\circ$	R10
$19^\circ < \alpha_{\text{tot}} \leq 27^\circ$	R11
$27^\circ < \alpha_{\text{tot}} \leq 35^\circ$	R12
$35^\circ < \alpha_{\text{tot}}$	R13

**Tabla 1.2 Grupos de clasificación antideslizante DIN 51097.**

Valor total medio	Grupo de clasificación
$12^\circ \leq \alpha_{\text{tot}} < 18^\circ$	Clase A
$18^\circ \leq \alpha_{\text{tot}} < 24^\circ$	Clase B
$\alpha_{\text{tot}} \geq 24^\circ$	Clase C

Con respecto a este método, cuya ejecución resulta compleja debido a su dependencia de la forma de caminar de los técnicos de ensayo, deben tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

Ventajas:

- Buena aproximación al comportamiento en condiciones reales.
- Adecuado para superficies con relieve y con alto coeficiente de fricción.
- Evalúa la homogeneidad del pavimento (sobre panel instalado).

Inconvenientes:

- Ligera dependencia del operador que realiza el ensayo.
- No permite realizar ensayos sobre material instalado.
- Deslizador de geometría compleja (botas de seguridad con suela normalizada o pie descalzo).
- No es adecuado para materiales de coeficiente de fricción medio-bajo o para reproducir condiciones de uso residencial (utiliza aceite como agente contaminante).

En la Tabla 1.3 se resume la naturaleza del deslizador y del componente contaminante que se utiliza en cada uno de los métodos normalizados de



medida de la resistencia al deslizamiento más utilizados en el campo de los pavimentos cerámicos.

**Tabla 1.3 Resumen de las características y condiciones de ensayo de cada uno de los métodos de medida descritos.**

Método de ensayo	Norma	Deslizador	Dureza	Agente contaminante
Deslizador estático (dinamómetro horizontal)	ASTM C 1028	Neolite	Shore A 93-96	Agua
Deslizador autopropulsado (Tortus®)	ISO/DIS 10545-17	Caucho 4S	IRHD 96±2	Agua + tensoactivo
Deslizador autopropulsado (BOT-3000)	ANSI A137.1 ANSI A326.3	Caucho SBR	Shore A 95±3	Agua + tensoactivo
Péndulo de fricción	UNE-ENV 12633	Caucho 59	IRHD 59±4	Agua
	UNE 41901 EX	Caucho 57	IRHD 55-61	Agua
	UNE 41902 EX	Caucho 96	IRHD 96±2	Seco
	BS 7976	Caucho TRL Caucho 4S	IRHD 55±5 IRHD 96±2	Seco / Agua
	AS 4586	Caucho 55 Caucho 96	IRHD 55±5 IRHD 96±2	Agua
Rampa inclinada	DIN 51130	Calzado de seguridad con suela normalizada	Shore A 73±5	Aceite
	DIN 51097	Pie descalzo	--	Agua + tensoactivo

### 1.3.2 Evolución de la normativa

El Mandato Europeo M/119 “Floorings” de la Directiva de Productos de Construcción (CPD 89/106) y posteriormente el Reglamento Europeo de Productos de la Construcción (RPC 305/2011) establece la necesidad de evaluar la resistencia al deslizamiento de las baldosas cerámicas, como requisito necesario para la obtención del mercado CE. Este hecho obliga a los fabricantes de pavimentos cerámicos a verificar sus productos de acuerdo con los métodos prescritos en las diferentes reglamentaciones nacionales de los países de destino, debido a la falta de consenso a nivel europeo en la adopción de un método único.

Siendo ésta una característica muy relevante respecto al uso previsto, durante décadas se han desarrollado diferentes métodos y aún en la actualidad continúan proponiéndose otros nuevos para evaluar la resistencia al deslizamiento en baldosas cerámicas (Bowman, R. 1997, 1998, 2004, 2016, 2018, Bowman, R. et al., 2012)

En el año 2000, y en el marco del comité europeo CEN/TC 67 Ceramic tiles, se inició un intento de armonización con el proyecto de norma *pr-EN 13552*, que recogía los cuatro métodos más utilizados en aquel momento para evaluar la resistencia al deslizamiento de pavimentos cerámicos, anteriormente descritos (coeficiente de fricción estático, coeficiente de fricción dinámico, rampa y péndulo).

Sin embargo, esta norma no progresó por falta de acuerdo entre las delegaciones nacionales, que deseaban mantener sus reglamentaciones y por la constitución en febrero de 2002 de un comité de normalización horizontal (CEN/TC 339 WG1), cuyo objetivo era aglutinar la visión de todas las tipologías de materiales para pavimentación, representadas a través de los respectivos comités de normalización sectoriales.

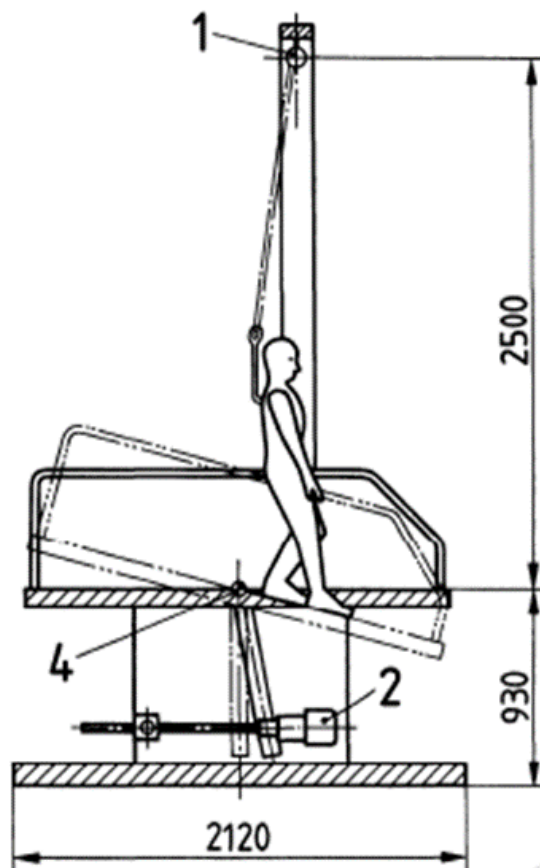
Desde entonces el avance ha sido muy escaso. En 2007 el TC 339 presentó a votación un borrador de norma *pr-EN 15763-1 “Determination of slip resistance of pedestrian surfaces - Method of evaluation - Part 1: Reference method”*. Este documento describe un método de referencia, basado en el método de la rampa inclinada (Figura 1.20), que incorpora tres procedimientos para la determinación en el laboratorio de la resistencia al deslizamiento de suelos en las siguientes situaciones más habituales: calzado normal, pie descalzo y calzado industrial (Tabla 1.4).

El dispositivo para la prueba consiste en una plancha rígida plana con una anchura de 600 mm y una longitud de 2000 mm, sobre la que se sitúa el pavimento en estudio. La persona encargada de realizar la prueba debe caminar sobre la superficie a ensayar, en posición erguida y con la mirada dirigida hacia abajo, y realizar pasos cortos hacia delante y hacia atrás. La inclinación del plano se va aumentando a razón de 1º/segundo aproximadamente hasta que se detecta riesgo de deslizamiento. El límite de

seguridad se determina subiendo y bajando el ángulo de inclinación alrededor de la zona crítica.

Este ángulo de inclinación se mide entre tres y cinco veces (dependiendo del procedimiento empleado), partiendo cada vez de la posición original, por dos personas distintas, que previamente han comprobado sus resultados frente a tres superficies de referencia (que varían según el procedimiento empleado).

Sin embargo, este proyecto de norma no fue aprobado debido a la falta de consenso en anticiparlo respecto a la parte 2 de la norma y continúa como borrador del comité TC 339. La *pr-EN 15763-2*, tiene por objeto definir otros métodos de ensayo portátiles, que deberán ser validados respecto al método de referencia descrito en la Parte 1.



**Figura 1.20** Ejemplo de un equipo de medida con los dispositivos de seguridad (1), motor (2) y medidor del ángulo de inclinación (4).

**Tabla 1.4 Condiciones de ensayo de la norma prEN 15673-1.**

Procedimiento	Suela calzado	Dureza	Contaminante
1. Calzado normal	Caucho liso 4S	Shore D 47±3	Agua potable o disolución acuosa 0,1% del tensoactivo dodecil sulfato de sodio
2. Pie descalzo	--	--	
3. Calzado industrial	Bota de seguridad normalizada	Shore A 73±5	Aceite motor SAE 10W30

Al no llegarse a un acuerdo para la aprobación de una norma europea, en 2012, fue aprobada la especificación técnica europea *CEN/TS 16165* (posteriormente ratificada en 2016) que contempla prácticamente todos los métodos que se están utilizando en los diferentes países de Europa:

- Anexo A: rampa con pie descalzo y agua más tensoactivo
- Anexo B: rampa con zapato de seguridad y aceite de motor
- Anexo C: péndulo caucho IRHD 57 y/o 96, ensayo en seco y/o con agua
- Anexo D: tribómetro lineal dinámico deslizador SBR Shore D 50, ensayo con agua más tensoactivo.

Por ello, en la actualidad todavía no se ha establecido un método único para evaluar el resbalamiento en los pavimentos (*Tenaglia, A. 2008, Strautins, C. J. 2008, Bowman, R., 2018*). Existe un consenso internacional entre los expertos que investigan los métodos de evaluación y así, puede comprobarse en la amplia bibliografía disponible, al afirmar que no es posible disponer de un método de ensayo universal, que permita evaluar todas las posibles condiciones de uso, ya que la modificación de la tipología del deslizador o calzado utilizado, así como del contaminante entre las superficies en contacto (aire, agua, lubricantes), provoca cambios radicales en los resultados obtenidos.

En la práctica, se continúa utilizando principalmente dos métodos, que son los que con mayor probabilidad serán incluidos en las normas europeas para la determinación de la resistencia al deslizamiento: el de la rampa (defendido por Alemania y Francia como método de referencia) y el del péndulo (mucho más extendido en la mayoría de los diferentes comités europeos de normalización CEN/TC de pavimentos).

### 1.3.3 Reglamentación

A nivel europeo, sólo se conocen dos reglamentaciones nacionales referentes a la resistencia al deslizamiento de pavimentos, una italiana y una española.

En Italia se estableció el método del deslizador autopropulsado Tortus® (*Decreto Ministeriale 14 giugno 1989, nº 236*), utilizando el valor del coeficiente de fricción dinámico como criterio para definir los límites de seguridad, en condiciones de suelo seco y de suelo húmedo (Tabla 1.5). Este método de medida se ha descartado en la mayoría de los países europeos debido a que genera resultados demasiado “optimistas” (*Silva, G. 2002*) cuando se aplica a superficies lisas.

**Tabla 1.5 Requisitos antideslizamiento** (*Decreto Ministeriale 14 giugno 1989, nº 236*).

Condiciones	Coefficiente de fricción dinámico
Suelo seco	Ensayo en seco $\mu > 0,40$
Suelo húmedo	Ensayo en húmedo $\mu > 0,40$

En España, el Código Técnico de la Edificación desarrolla las exigencias básicas de seguridad, que deben cumplir los suelos en función de su localización y características. El *Documento Básico Seguridad de Utilización y Accesibilidad (DB SUA)*, Sección SUA-1 Seguridad frente al riesgo de caídas, define los requisitos de resistencia al deslizamiento de los suelos.

Dichos requisitos son exigibles a los suelos de los edificios y zonas de uso sanitario, docente, comercial, administrativo, aparcamiento y pública concurrencia

Este Documento establece el ensayo del péndulo de fricción descrito en la norma *UNE-ENV 12633* como método para la determinación del valor de resistencia al deslizamiento.

Los suelos se clasifican en cuatro grupos dependiendo del valor del PTV (Tabla 1.6).

**Tabla 1.6 Clasificación de los suelos según su resbaladidad** (*UNE-ENV 12633:2003*).

Resistencia al deslizamiento	Clase
$PTV \leq 15$	0
$15 < PTV \leq 35$	1
$35 < PTV \leq 45$	2
$PTV > 45$	3

Con el fin de limitar el riesgo de resbalamiento, los suelos de los edificios se incluyen en uno de estos grupos, dependiendo de su localización y características de uso (Tabla 1.7).

**Tabla 1.7 Clase exigible a los suelos en función de su localización (UNE-ENV 12633:2003).**

Zona	Clase
Zonas interiores secas	
Superficies con pendiente menor del 6%	1
Superficies con pendiente igual o mayor que el 6% y escaleras	2
Zonas interiores húmedas, tales como entradas a los edificios desde el exterior (1), terrazas cubiertas, baños, cocinas, etc	
Superficies con pendiente menor del 6%	2
Superficies con pendiente igual o mayor que el 6% y escaleras	3
Zonas interiores donde, además de agua, pueda haber agentes (grasas, lubricantes, etc.) que reduzcan la resistencia al deslizamiento, tales como cocinas industriales, mataderos, aparcamientos, zonas de uso industrial, etc.	3
Zonas exteriores. Piscinas (2)	3

(1) Excepto cuando se trate de accesos directos de uso restringido.

(2) En zonas previstas para usuarios descalzos y en el fondo de los vasos, en las zonas en las que la profundidad no exceda de 1,50. m

Posteriormente, fue publicado el Documento de apoyo al documento básico de seguridad de uso y accesibilidad, *DA DB-SUA/3 Resbaladidad de suelos (marzo 2014)* que contempla la posibilidad de realizar el ensayo descrito en la norma *UNE-ENV 12633* en seco en el caso de pavimentos destinados a zonas interiores secas estableciendo los requisitos detallados en la Tabla 1.8:

**Tabla 1.8 Requisitos alternativos para zonas interiores secas (DA DB-SUA/3).**

Zona	PTV seco
Zonas interiores secas	
Superficies con pendiente menor del 6%	>40
Superficies con pendiente igual o mayor que el 6% y escaleras	>65

En dicho documento además se detalla una relación de suelos considerados como “seguros” (Tabla 1.9) incluyendo los clasificados como R11 según la norma *DIN 51130*, y los clasificados como clase B según la norma *DIN 51097* (éste último caso solo aplicable a zonas de usuarios descalzos tales como duchas, entorno de piscinas, etc.)

**Tabla 1.9 Suelos considerados como seguros según DA DB-SUA/3.**

Suelo	Norma referencia	Observaciones
Adoquines de hormigón	UNE EN 1338:2004	
Baldosas de hormigón	UNE EN 1339:2004	
Bordillos de hormigón	UNE EN 1340:2004	
Adoquines de arcilla cocida	UNE EN 1344:2002	Siempre que no hayan sido fabricados de tal forma que se haya producido una superficie muy lisa
Suelos de piedra natural con acabado flameado		Definición de acabado según norma UNE EN 12670:2003
Suelos de piedra natural con acabado abujardado		Definición de acabado según norma UNE EN 12670:2003
Suelos clasificados como R11	DIN 51130 <sup>(1)</sup>	
Suelos clasificados como Clase B	DIN 51097 <sup>(1)</sup>	Únicamente en zonas de usuarios descalzos tales como duchas, entorno de piscinas, etc.

<sup>(1)</sup> En la actualidad, no existe correlación entre la clasificación obtenida según el ensayo de la rampa definido en la norma alemana DIN y el ensayo del péndulo definido en la norma UNE ENV 12633. Sin embargo, se considera aceptable, como suelos suficientemente seguros, los clasificados al menos como R11 y clase B en las condiciones establecidas en la tabla.

### 1.3.4 Guías

Existen algunas recomendaciones basadas en la utilización de uno de los métodos de medida expuestos o en combinaciones de ellos.

En la Tabla 1.10 se detallan las Guías o normativas elaboradas por diferentes países en las que se recogen las recomendaciones respecto al valor mínimo de la resistencia al deslizamiento en pavimentos. En algunos casos, se ha definido un valor mínimo a cumplir, mientras que, en la mayor parte de los casos, se especifican distintos requisitos en función del uso de la zona o del local. Esta última opción es la más acertada ya que, como se ha comentado anteriormente, el grado de fricción requerido para evitar el riesgo de deslizamiento va a depender de las condiciones de uso y la actividad desarrollada (contaminantes, mantenimiento, desgaste, etc.).

**Tabla 1.10 Valores mínimos recomendados en diferentes Guías o normas.**

Propuesto por	Método	Condiciones	Especificación
ADA Recommendation	ASTM C1028	Neolite y agua	$\mu_e > 0,5$
ANSI A137.1	ANSI A137.1	Caucho SBR y agua	DCOF $\geq$ 0,42
UKSRG	BS 7976-2	Caucho 4S y agua	PTV>35
GUV-R 181	DIN 51130	Bota de seguridad y aceite	En función del uso
DGUV 207-006	DIN 51097	Pie descalzo y agua	En función del uso
XP P 05-011	XP P 05-010	Bota de seguridad y aceite	En función del uso
		Pie descalzo y agua	
SA HB 198	AS 4586 Appendix A	Caucho 96 ó 55 y agua	En función del uso
	AS 4586 Appendix C	Pie descalzo y agua	
	AS 4586 Appendix D	Bota de seguridad y aceite	

La primera de las recomendaciones no parece demasiado aconsejable, ya que se basa en el valor del coeficiente de fricción estático ( $\mu_e$ ). Como ya se ha indicado anteriormente, hay un amplio consenso internacional respecto a que la fuerza que se mide en el tribómetro lineal estático, para que se inicie el desplazamiento del deslizador, no es demasiado representativa de las condiciones a las que se efectúa el rozamiento del zapato con el suelo durante el caminar humano, ya que se considera que los mecanismos de fricción, en condiciones estáticas y dinámicas, son sensiblemente diferentes. Por ello, esta medida se encuentra prácticamente en desuso en la actualidad.

En Estados Unidos la recomendación anterior fue sustituida por el valor del coeficiente de fricción dinámico DCOF $\geq$ 0,42. Este valor se mide mediante el uso del tribómetro lineal dinámico BOT-3000 en condiciones húmedas. La propia norma indica que este valor mínimo puede no ser apropiado para todos los posibles usos de una baldosa, por ejemplo, cuando pueda existir presencia de otros contaminantes como aceite, grasas, etc.



En Inglaterra, diferentes asociaciones y organismos (*UKSRG*, *HSE*) han planteado una clasificación utilizando el método del péndulo con caucho 4S (Tabla 1.11).

**Tabla 1.11 Riesgo de deslizamiento (*UKSRG*, *HSE*).**

PTV96	Riesgo potencial de deslizamiento
<24	alto
24 - 35	moderado
36 - 64	bajo
>65	muy bajo

En Alemania, el documento *GUV-R 181* establece recomendaciones, respecto al valor de resistencia al deslizamiento, expresada como valor del ángulo  $\alpha$  (medido por el método de la rampa según *DIN 51130*) para una lista de locales industriales y de trabajo, entre los que incluye áreas generales, locales sanitarios, docentes y comercios.

Por otro lado, el documento *DGUV 207-006*, basándose en la clase de resistencia al deslizamiento (A, B ó C) utilizando como método de medida la rampa según *DIN 51097*, indica las recomendaciones mínimas para los pavimentos instalados en zonas y locales de andar descalzo (piscinas, duchas, etc).

En Francia, han adoptado los dos métodos de ensayo alemanes de la rampa en la norma experimental *XP P 05-010* y han elaborado a su vez otra norma experimental, la *XP P 05-011*, en la que se establecen los valores mínimos de ángulo crítico de deslizamiento para los diferentes locales tanto de uso público y residencial, como zonas de trabajo o zonas de andar descalzo utilizando una de las dos condiciones de ensayo.

En Australia, el propio organismo de normalización publicó la Guía *SA HB 198* que recogía la clasificación según el método del péndulo o según el método de la rampa, ambos contemplados en la norma australiana *AS 4586*.

Dicha guía establece las recomendaciones mínimas de diferentes zonas y locales de uso público, docente, sanitario, deportivo, etc., en función de la clase de resistencia al deslizamiento obtenida a partir de las medidas de péndulo (Tabla 1.12), o mediante las medidas de la rampa con pie calzado y aceite (clasificación R9-R13) o pie descalzo y agua (clasificación A, B o C).

**Tabla 1.12 Clasificación de las superficies de tránsito peatonal en función de su resistencia al deslizamiento mediante el método del péndulo según norma AS 4586.**

Clase	PTV 96	PTV 55
P5	>54	>44
P4	45-54	40-44
P3	35-44	35-39
P2	25-34	20-34
P1	12-24	<20
P0	<12	-

El último intento de unificar los criterios de estimación de los límites de la resistencia al deslizamiento de pavimentos, la constituye el proyecto europeo *SlipSTD* (Engels, M. et al 2008, Tari, G et al 2008).

En el marco de este proyecto fue publicado el documento *SlipSTD PAS* que establece una clasificación de los suelos duros en tres grupos, en base a la presencia de contaminantes:

- Clase 1: Recubrimientos de suelo duros, en zonas peatonales interiores, que están previsiblemente limpios y secos y que se mantienen regularmente en estas condiciones.
- Clase 2A: Recubrimientos de suelo duros, en zonas peatonales interiores, previsiblemente contaminados con agua y/o contaminantes secos.
- Clase 2B: Recubrimientos de suelo duros, en zonas peatonales interiores, previsiblemente contaminados con líquidos distintos de agua, como aceite, grasa o sangre.

Al mismo tiempo, propone una clasificación de los suelos, en tres grupos, en función de las características superficiales detectables por inspección visual y del valor de los parámetros de rugosidad primarios Pp y Pk:

- Grupo 1. Superficies esencialmente lisas, con  $Pk < 30 \mu\text{m}$ .
- Grupo 2. Superficies sin relieve, con una micro-rugosidad de  $30 < Pk < 100 \mu\text{m}$  y  $Pp < 200 \mu\text{m}$ .
- Grupo 3. Superficies estructuradas con macro-rugosidad y superficies con relieve, con  $Pk > 100 \mu\text{m}$  y  $Pp > 200 \mu\text{m}$ .

El parámetro primario  $P_p$  es la altura máxima del perfil sobre la línea media (Figura 1.21)

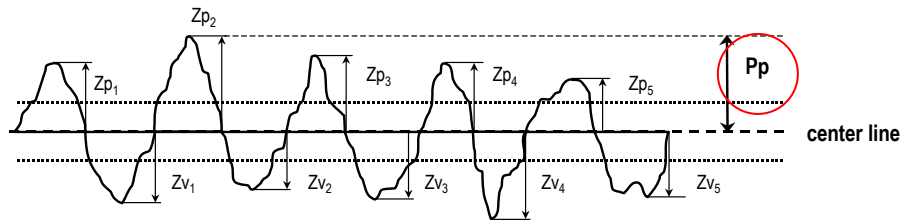


Figura 1.21 Representación gráfica del parámetro primario  $P_p$ . SlipSTD PAS.

El parámetro  $P_k$  es el valor no filtrado de la rugosidad central o del 'núcleo' (profundidad del perfil de la zona portante de la carga de la superficie), calculado a partir de la curva de la relación de material (UNE-EN ISO 13565-2) a partir de los puntos de corte de la línea de mejor ajuste, que presenta el gradiente más bajo sobre el 40% de la porción de material, sobre el eje de ordenadas en la porción de materiales = 0 % y 100% (Figura 1.22).

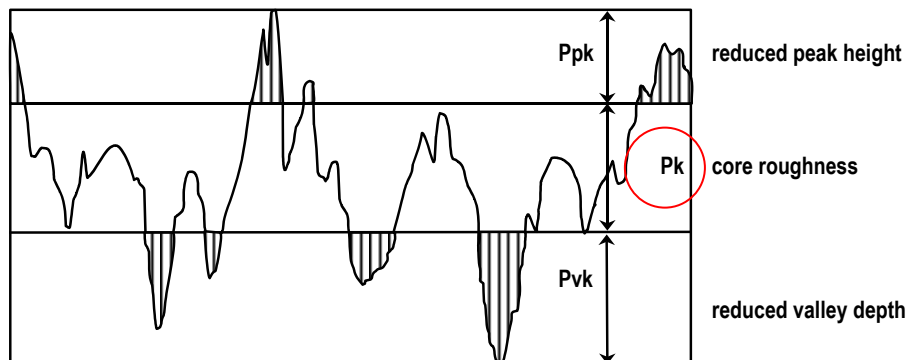


Figura 1.22 Representación gráfica del parámetro primario  $P_k$ . SlipSTD PAS.

Los valores de  $P_p$  y  $P_k$  recomendados para los recubrimientos de suelo peatonales de las Clases 2A y 2B, al salir de la fábrica y recién colocados, se especifican en la Tabla 1.13.

**Tabla 1.13 Requisitos recomendados para los recubrimientos de suelo duros, colocados en zonas peatonales interiores, medidos al salir de la fábrica y después de su colocación. SlipSTD PAS.**

Clase	Requisitos superficiales mínimos	
	Superficie microrrugosa Grupo 2	Superficie estructurada y con relieve Grupo 3
1	Sin requisitos	Sin requisitos
2A	$P_k > 50 \mu\text{m}$ y $P_p > 90 \mu\text{m}$	$P_k > 100 \mu\text{m}$ y $P_p > 200 \mu\text{m}$
2B	No aplicable	$P_k > 150 \mu\text{m}$ y $P_p > 300 \mu\text{m}$

Este proyecto sólo contempla las características superficiales de los pavimentos, los procedimientos de limpieza y los tipos de contaminantes más usuales y, en base a esto, establece un criterio geométrico para estimar el potencial de resbalamiento de los pavimentos. Así, recomienda la medida del parámetro  $R_z$  como un parámetro habitual (de mantenimiento) para el seguimiento de las modificaciones durante el uso de la superficie de los recubrimientos de suelo. El *Health Safety Executive (HSE)* ha determinado que podría existir un alto riesgo de resbalamiento:

- si el valor de  $R_z$  se reduce por debajo de  $20 \mu\text{m}$  y es probable que la superficie se contamine con agua limpia, o
- si el valor de  $R_z$  es inferior a  $70 \mu\text{m}$  y es probable que la superficie se contamine con aceite.

El proyecto *SlipSTD* no propone ningún método actual para la medida de la resistencia al resbalamiento de los recubrimientos de suelo, ni define un nuevo método de ensayo.

Para concluir podemos decir que el proyecto *SlipSTD* ha abordado el problema del resbalamiento sin el enfoque global necesario para considerar conjuntamente la influencia de todos los factores que contribuyen a modificar la fricción, por lo que sus resultados solamente pueden extrapolarse a unas condiciones particulares.

## **2. Antecedentes, objeto de la investigación y plan de trabajo**



## 2.1 Antecedentes y objeto de la investigación

### 2.1.1 Antecedentes

Como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior, se han desarrollado varias líneas de trabajo, por diversos investigadores, con vistas a tratar de conocer mejor la problemática de la resbaladidad en pavimentos de todo tipo (piedra natural, piedra aglomerada, polímeros orgánicos, materiales cerámicos, etc.). Ahora bien, a pesar de haberse avanzado bastante, aún siguen existiendo importantes lagunas en el conocimiento de este fenómeno que hacen necesario seguir investigando.

En lo que respecta a las baldosas cerámicas, en opinión de las empresas que las fabrican, sería muy interesante utilizar un solo procedimiento de medida de la resistencia al deslizamiento, que proporcionara valores suficientemente reproducibles y fiables de dicha propiedad, y que fuera aplicable tanto “in situ” (para poder determinar dicha propiedad en pavimentos colocados), como en el laboratorio.

Ya en el mandato europeo de 1997 *M/119*, para pavimentos, se pedía un único método de ensayo de resistencia al deslizamiento que se pudiera aplicar a todo tipo de superficies. En 2012, el Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 339, Resistencia al deslizamiento de superficies peatonales-Métodos de evaluación) publicó la especificación técnica *CEN/TS 16165*, con la intención de desarrollar un solo método de ensayo aplicable a todas las superficies de pavimento. En 2015, el CEN/TC 339 presentó un documento conjunto de los organismos de investigación franceses INRS y CSTB (*Marchal, P. et al 2015*) en el que se realiza un estudio comparativo de varios métodos de ensayo con la finalidad de sugerir la utilización del que considerasen más adecuado. Finalmente en la 16ª Reunión del CEN/TC celebrada en Berlín en octubre de 2016 se decidió confirmar la especificación técnica *CEN/TS 16165*, antes mencionada, poniendo de manifiesto que “no se puede tener un solo método de ensayo de la resistencia al deslizamiento válido para todos los casos posibles”, por lo que sigue manteniendo los tres métodos propuestos en 2012: Prueba de la Rampa inclinada (con el pie descalzo y agua más tensioactivo, o con botas y aceite como contaminante), el del Péndulo de Fricción (con agua como contaminante) y el del Tribómetro Lineal Dinámico (con agua más tensioactivo).

Disponer de una medida fiable y reproducible de la resistencia al deslizamiento es imprescindible para poder diseñar la superficie de las baldosas cerámicas, a fin de proporcionarles las características antideslizantes deseadas, no solo a la salida de fábrica, sino también a lo largo de un prolongado periodo de tiempo después de su colocación.

Está reiteradamente demostrado (*Harris, G.W. & Shaw, S.R., 1988, Grönqvist, R. et al. 1990, Health and Safety Executive (HSE), 1999, Chang, W.R., 1998, 2001, 2002,*

## 2.1. Antecedentes y objeto de la investigación

---

2010, Li, K.W. et al. 2003, Kim, I.J., 2013) que la resistencia al deslizamiento de la superficie de un pavimento está íntimamente relacionada con su topografía, a nivel macro y microscópico. El consorcio europeo *SlipSTD*, en 2009 (*SlipSTD PAS*), puso de manifiesto que la resistencia al deslizamiento de las baldosas se podía relacionar, de forma individual, con el valor de ciertos parámetros de su rugosidad superficial, estableciendo una clasificación de las mismas en base al valor de dichos parámetros.

Por otra parte, la naturaleza del material de las suelas y su diseño constituye un factor adicional a considerar, en lo que respecta al valor de la resistencia al deslizamiento de la superficie de un pavimento (Chang, W.R. 2000, Silva, G. et al. 2002, Li, K.W. et al. 2003, ULTRAGRIP, 2010 Silva, G. et al. 2018).

El conocimiento de la evolución de la resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico, a lo largo del proceso de su desgaste producido por el tránsito peatonal, debería ser imprescindible al evaluar la idoneidad de su diseño. La disminución de la resistencia al deslizamiento debida al tránsito peatonal es, a veces, tan rápida que el comportamiento antideslizante del pavimento deja de ser fiable al poco tiempo de su colocación (Derler, S. et al. 2005, Strautins, C.J. 2008, Kuisma, R. et al. 2009, Kim, I.J., 2013, Engels, M. 2016).

Por todo ello, se hace imprescindible disponer de un equipo que permita predecir, a escala de laboratorio y mediante un procedimiento que se pueda desarrollar en un reducido espacio de tiempo, la forma en que evolucionará la resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico una vez instalado, como consecuencia del desgaste producido por tránsito peatonal real.

### 2.1.2 Objeto de la investigación

De acuerdo con lo que antecede, se pensó en desarrollar un proyecto de investigación, orientado únicamente a pavimentos cerámicos, con vistas a adquirir información inédita o a confirmar en parte, la disponible, relacionada con la problemática que se ha puesto de manifiesto.

La información que se consideró de interés adquirir fue la siguiente:

- i) Empleando elementos deslizadores recomendados por la normativa vigente, comparar los valores de los parámetros representativos de la resistencia al deslizamiento, de un amplio abanico de muestras de pavimento cerámico, determinados por cada uno de los métodos de ensayo preseleccionados, a fin tratar de relacionarlos con los valores de dicha propiedad obtenidos al aplicar el procedimiento del péndulo de fricción, según la norma española (UNE-ENV 12633).
- ii) Determinar los valores de los parámetros de rugosidad de las muestras de pavimento seleccionadas a fin de tratar de



relacionarlos individualmente primero y agrupados después, si procede, con los respectivos valores de la resistencia al deslizamiento, medidos por el procedimiento de ensayo del péndulo de fricción (*UNE-ENV 12633*).

- iii) Poner a punto un equipo y metodología, a escala de laboratorio, para provocar y medir el desgaste acelerado de varias muestras de pavimento cerámico con diferentes acabados superficiales.
- iv) Utilizando como criterio los valores de la resistencia al deslizamiento, comparar los resultados obtenidos por desgaste acelerado (usando el equipo de laboratorio y metodología puestos a punto) de una serie de muestras de pavimento con los resultantes del desgaste peatonal de las mismas muestras, a fin de tratar de obtener una relación entre ambos procesos.
- v) Utilizando el procedimiento acelerado puesto a punto, determinar la variación de la resistencia al deslizamiento de un conjunto de muestras de pavimento cerámico con la intensidad del desgaste, para disponer de información acerca del comportamiento de dichos modelos de pavimento como consecuencia del desgaste producido por tránsito peatonal real.
- vi) Estudiar la evolución, con la intensidad del desgaste, de los parámetros de rugosidad más representativos de algunos de las muestras de pavimento estudiadas en el apartado anterior.
- vii) Comparar la evolución sufrida por la resistencia al deslizamiento con los cambios experimentados por los parámetros de rugosidad en las muestras estudiadas en los dos apartados anteriores.
- viii) Contrastar los resultados obtenidos en los apartados v) y vi) con los estimados en función de los valores de los parámetros de rugosidad a lo largo del proceso de desgaste, calculados a partir de las correlaciones obtenidas en el apartado (ii).

## 2.2 Plan de trabajo

El desarrollo del trabajo a realizar, para tratar de alcanzar los objetivos previstos, se planificó del modo siguiente:

Los métodos de ensayo a utilizar se eligieron en base a las sugerencias de la mencionada especificación técnica *CEN/TS 16165* y la normativa en vigor española para el calzado. Los métodos seleccionados fueron el del Péndulo de fricción, el de la Rampa inclinada y dos de los basados en el tribómetro lineal dinámico: el procedimiento utilizado por INESCOP (Instituto Tecnológico del Calzado de la red de Centros Tecnológicos de la Generalitat Valenciana) (*UNE-EN ISO 13287*), y el método basado en la norma americana *ANSI A.137.1 Apdo. 9.6.* (equipo BOT-3000).

Partiendo de las sugerencias de la especificación técnica *CEN/TS 16165* se decidió realizar la medida de la resistencia al deslizamiento, en los métodos de ensayo a comparar, utilizando los dos tipos de elemento deslizador que se proponen para el método de ensayo con el péndulo de fricción, en la norma española (*UNE-ENV 12633*, *UNE 41901 EX* y *UNE 41902 EX*) y en la inglesa (*BS 7976-2*), en vigor actualmente: Zapatas de caucho lisas de dureza IRHD 57 y 96 (según la Norma *ISO 48*). En los equipos que lo permitían, también se realizó algún experimento con suelas de tacos para ver su influencia en la resistencia al deslizamiento.

Como elementos contaminantes se decidió utilizar los propuestos, en las respectivas normas, para los métodos elegidos: agua potable, solución de lauril sulfato sódico (SLS) al 0,5 % en agua potable y aceite SAE 10W30.

Para realizar las pruebas se eligió un conjunto de muestras de pavimento cerámico de diferente naturaleza (sin esmaltar, con recubrimiento vidriado, de perfil liso u ondulado, con relieve, etc.), procurando abarcar un amplio abanico de diseño topográfico de su cara vista, tanto desde el punto de vista macroscópico como microscópico.

Con cada tipo de pavimento elegido se planificó realizar las actividades siguientes:

Medir la resistencia al deslizamiento por cada uno de los métodos, elemento contaminante y elemento deslizador propuestos, tratando de relacionar los resultados obtenidos.

Determinar la topografía y los valores de los parámetros de rugosidad de cada uno de los diferentes tipos de pavimento elegidos, con vistas a tratar de relacionarlos, individual o conjuntamente, con los correspondientes valores de la resistencia al deslizamiento.

Poner en marcha un nuevo método de desgaste de la superficie de las piezas de pavimento cerámico para poder predecir, a escala de laboratorio y en un reducido espacio de tiempo, la variación que experimentará su resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal real.

Medir la evolución de la resistencia al deslizamiento de un conjunto de piezas de pavimento, desgastadas por tránsito peatonal y por desgaste acelerado (utilizando el procedimiento y equipo de laboratorio puestos a punto), a fin de tratar de establecer una posible relación entre ambos procesos de abrasión.

Tratar de relacionar la evolución de la resistencia al deslizamiento, debida al desgaste, con la variación experimentada por los parámetros de rugosidad seleccionados previamente, como más representativos.



### **3. Materiales y procedimiento experimental**



## 3.1 Materiales

### 3.1.1 Tipos de superficies de pavimento cerámico estudiadas

Como se ha indicado en el Apartado 2.1.1, la resistencia al deslizamiento de una superficie está íntimamente relacionada con su topografía a nivel macroscópico (perfil, relieve, uniformidad) y microscópico (tacto áspero o suave).

Para realizar este trabajo se han elegido 54 tipos de baldosas cerámicas de pavimento, tratando de abarcar el más amplio abanico de texturas posible de su cara vista. Estas baldosas se han encuadrado en cinco grupos utilizando únicamente criterios de tipo psicofísico (aspecto visual y táctil) de su topografía superficial. Dichos grupos se detallan a continuación:

- Grupo 1. Superficies de perfil liso y tacto suave.
- Grupo 2. Superficies de perfil liso y tacto áspero.
- Grupo 3. Superficies con perfil ondulado.
- Grupo 4. Superficies con relieve irregular
- Grupo 5. Superficies con relieve geométrico uniforme.

En las figuras 3.1 a 3.5, se ha incluido a modo de ejemplo los mapas topográficos de una de las muestras representativas de cada grupo.

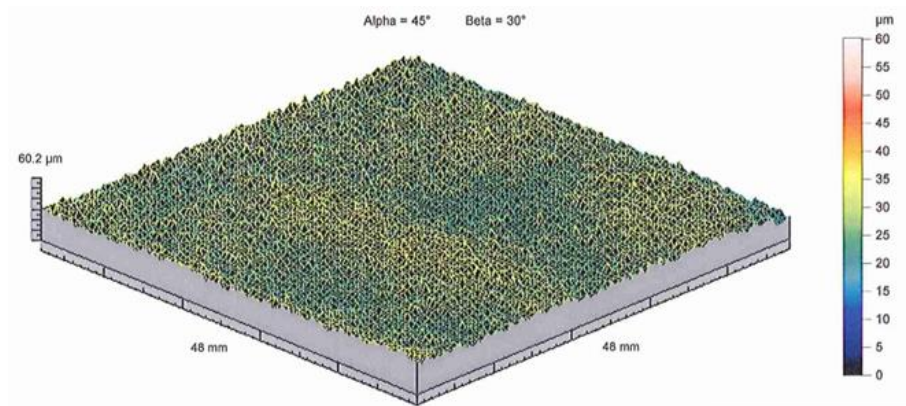
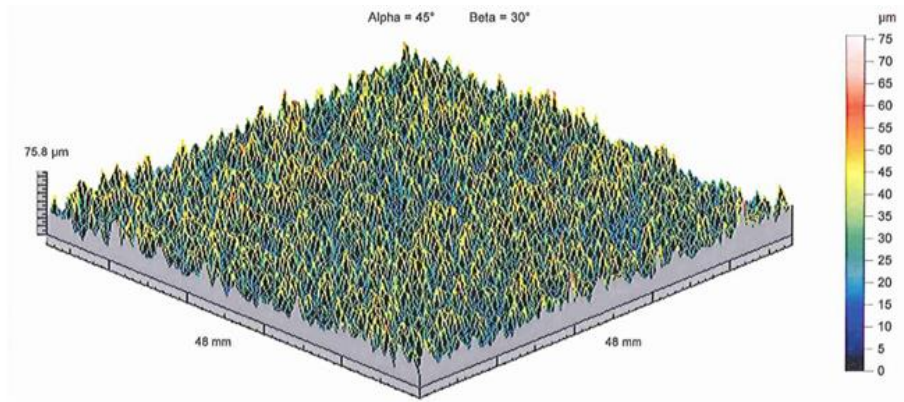
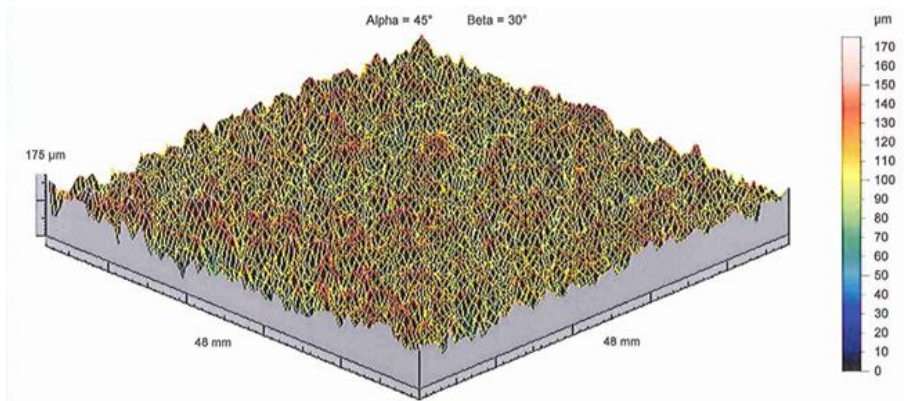


Figura 3.1 Ejemplo de muestra perteneciente al grupo 1.

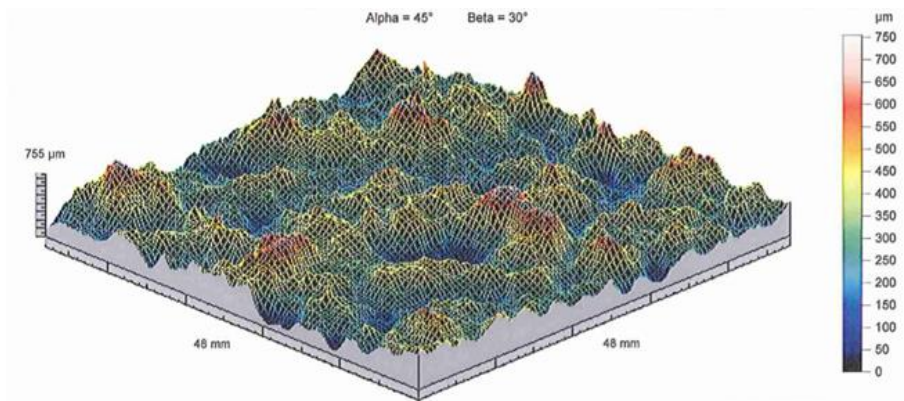
3.1. Materiales



**Figura 3.2** Ejemplo de muestra perteneciente al grupo 2.

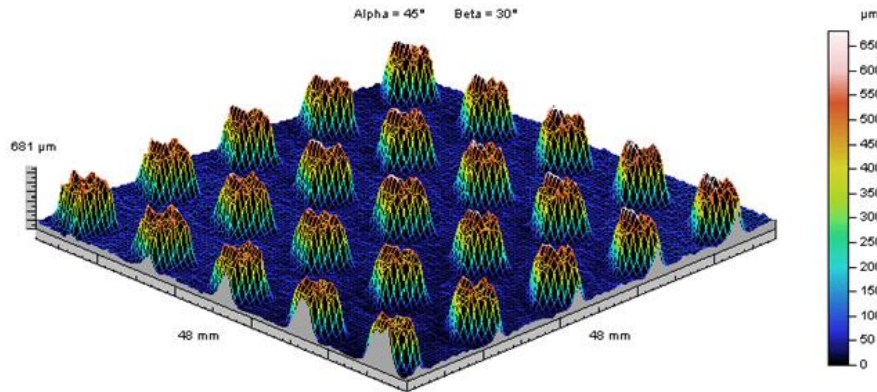


**Figura 3.3** Ejemplo de muestra perteneciente al grupo 3.



**Figura 3.4** Ejemplo de muestra perteneciente al grupo 4.





**Figura 3.5** Ejemplo de muestra perteneciente al grupo 5.

Una parte de las baldosas utilizadas en este estudio se han preparado en planta piloto, tratando de conferirles las características superficiales que interesaban. Pero, en la mayor parte de los casos, concretamente en lo que se refiere a las piezas pertenecientes a los Grupos 3 a 5, no fue posible obtener, en planta piloto, las características superficiales deseadas, por lo que se tuvo que recurrir a utilizar diferentes tipos de pavimento cerámico, de producción industrial, existentes en el mercado.

En la Tabla 3.1 se detalla la relación y naturaleza de las baldosas nuevas (recién producidas o tal como se expenden en el mercado) elegidas para realizar este estudio que se han referenciado con arreglo al siguiente criterio:

- a) Un primer dígito (del 1 al 5), seguido de un punto, indica el grupo en el que se las ha clasificado, en base a las premisas indicadas anteriormente (Ver las fotos de la cara vista de las baldosas y la correspondiente topografía en el Apéndice, Apartado 7.1).
- b) Los dígitos que se han puesto a continuación (del 1 al 54), dentro de cada grupo, sirven para identificar y diferenciar los diferentes tipos de baldosa estudiados. Dentro de cada grupo, el orden propuesto se ha establecido aleatoriamente.

En el Apartado 7.1.1 del Apéndice se muestra una fotografía de detalle de la superficie de cada una de las muestras junto con los mapas topográficos obtenidos para la medida de los parámetros superficiales (Apartado 3.2.2).

En ocasiones, se ha recurrido a utilizar información, obtenida en los laboratorios de ITC, correspondiente a piezas de pavimento industriales nuevas, distintas a las incluidas en la Tabla 3.1, a fin de confirmar o mejorar la validez de las correlaciones obtenidas. En estos casos, se identificarán sin encasillarlas en ningún grupo, en las Tablas 7.1, 7.2 y 7.3 del Apartado 7.1.2 del Apéndice.

### 3.1. Materiales

**Tabla 3.1 Relación y naturaleza de las piezas de pavimento nuevas elegidas.**

Referencia	Descripción
1.1	Gres porcelánico natural tipo 1
1.2	Gres porcelánico natural tipo 2
1.3	Gres porcelánico natural satinado tipo 1
1.4	Gres porcelánico vidriado mate tipo 1
1.5	Gres porcelánico vidriado mate tipo 2
2.6	Gres extrudido vidriado mate rugoso tipo 1
2.7	Gres porcelánico vidriado granilla antideslizante tipo 2
2.8	Gres porcelánico vidriado liso micro-rugoso tipo 1
2.9	Gres porcelánico vidriado mate muy rugoso tipo 1
2.10	Gres porcelánico vidriado mate poco rugoso tipo 1
2.11	Gres porcelánico vidriado mate rugoso tipo 1
2.12	Gres porcelánico vidriado mate suave tipo 1
2.13	Gres vidriado mate micro-rugoso tipo 1
2.14	Gres vidriado mate muy rugoso tipo 1
2.15	Gres vidriado mate muy rugoso tipo 2
2.16	Gres vidriado mate poco rugoso tipo 1
2.17	Gres vidriado mate poco rugoso tipo 2
2.18	Gres vidriado mate rugoso tipo 1
2.19	Gres vidriado mate rugoso tipo 2
2.20	Gres vidriado mate rugoso tipo 3
2.21	Gres vidriado mate rugoso tipo 4
2.22	Gres vidriado satinado suave tipo 1
3.23	Gres porcelánico vidriado mate muy rugoso tipo 2
3.24	Gres porcelánico vidriado mate muy rugoso tipo 3
3.25	Gres porcelánico vidriado mate suave tipo 2
3.26	Gres porcelánico vidriado semi-brillo rugoso tipo 1
3.27	Gres porcelánico vidriado semi-brillo rugoso tipo 2
3.28	Gres vidriado granilla fina semiabierta tipo 1
3.29	Gres vidriado granilla fina tupida tipo 1
3.30	Gres vidriado granilla suave tipo 1
3.31	Gres vidriado mate rugoso tipo 5
3.32	Gres vidriado ondulado suave tipo 1
3.33	Gres porcelánico vidriado mate muy rugoso tipo 4
3.34	Gres porcelánico vidriado mate suave tipo 3
4.35	Gres extrudido natural con relieve irregular tipo 1
4.36	Gres extrudido vidriado mate con relieve irregular tipo 1
4.37	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 1
4.38	Gres porcelánico natural con relieve imitación piedra tipo 1
4.39	Gres porcelánico natural con relieve imitación piedra tipo 2
4.40	Gres porcelánico vidriado brillo con relieve imitación piedra tipo 1
4.41	Gres porcelánico vidriado granilla antideslizante tipo 1
4.42	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 2
4.43	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 3
4.44	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 4
4.45	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 5
4.46	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 6
4.47	Gres porcelánico vidriado mate con relieve imitación piedra tipo 7
4.48	Gres porcelánico vidriado mate relieve ondulado tipo 1
4.49	Gres vidriado mate muy rugoso tipo 3
5.50	Gres extrudido vidriado con relieve geométrico hexagonal
5.51	Gres extrudido vidriado con relieve geométrico surcos
5.52	Gres porcelánico natural con relieve prensa rombos
5.53	Gres porcelánico vidriado brillo con relieve prensa rombos
5.54	Gres porcelánico vidriado mate con relieve prensa rombos

### 3.1.2 Naturaleza del elemento deslizador

Para la realización del estudio comparativo de métodos, se han utilizado los dos tipos de caucho definidos en el documento *CEN/TS 16165* (caucho 57 y caucho 96). Para los ensayos de medida del coeficiente de fricción dinámico con el equipo BOT-3000, se ha utilizado el caucho SBR 95 propio de dicho equipo indicado en la norma *ANSI A137.1*.

#### 3.1.2.1 Caucho 57

La resiliencia y la dureza IRHD (International Rubber Hardness Degree, según la Norma *ISO 48*) del caucho 57, debe ser conforme a la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Propiedades del caucho 57.**

Temperatura (°C)	Resiliencia Lübke (%)	Dureza IRHD
5	43 a 49	
10	58 a 65	
20	66 a 73	
23		53 a 61
30	71 a 77	
40	74 a 79	

Para la realización de los ensayos con los métodos de la rampa y del calzado según *UNE-EN ISO 13287* se han fabricado zapatos con suela lisa (Figura 3.6). Sobre la suela de estos zapatos es posible intercambiar en la zona delantera (media suela) y en la trasera (tacón) distintos materiales de suela, así como distintos acabados (liso/relieve) (Figura 3.7).



**Figura 3.6 Zapatos para realización de ensayos de la rampa y del calzado.**

### 3.1. Materiales



**Figura 3.7 Ejemplos de piezas de media suela y tacón para fijar como suela del zapato de referencia.**

En la Figura 3.8 se muestra el proceso de fijación de la media suela y tacón sobre el calzado de referencia, utilizando cintas adhesivas de doble cara.



**Figura 3.8 Colocación de pieza de tacón y pieza delantera a modo de suela. Variante de diseño lisa.**

Además, en los ensayos en los que el elemento deslizador era un zapato, se realizaron medidas con suelas que presentaban relieve en forma de tacos. En la Tabla 3.3 se han clasificado las suelas en 3 tipos en función de la geometría, forma y altura de los tacos.

**Tabla 3.3 Descripción y clasificación de las suelas ensayadas como deslizador.**

Diseño de suela	Geometría de los tacos	Cantos de los tacos	Altura del relieve (mm)
Tipo 2	Cuadrada	Vivos	3
Tipo 3	Cuadrada	Vivos	1
Tipo 4	Cuadrada	Redondeados	3

A continuación, en la Figura 3.9 se muestran imágenes comparativas de los diseños tipo 2, 3 y 4, en los que se puede apreciar la diferencia en la altura del relieve, de 1,0 mm el de menor altura y de 3,0 mm el de mayor.



Diseños tipo 2 y 3

Diseño tipo 4

**Figura 3.9 Comparativa de diseños de suela con diferente altura de relieve, con ángulos vivos y redondeados.**

### 3.1.2.2 Caucho 96

La resiliencia y la dureza IRHD (International Rubber Hardness Degree, según la Norma ISO 48) del caucho 96, debe ser conforme a la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Propiedades del caucho 96.**

Temperatura (°C)	Resiliencia Lübke (%)	Dureza IRHD
5	19 a 23	94 a 98
23	21 a 26	
40	26 a 30	

### 3.1.2.3 Caucho SBR 95

Para los ensayos de medida del coeficiente de fricción dinámico efectuados con el equipo BOT-3000 se ha utilizado un patín de caucho de dureza shore A 95 (ISO 7619) de diferente naturaleza especificado por la norma ANSI A. 137.1. Las propiedades de dicho caucho se detallan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Propiedades del caucho SBR 95.**

Propiedad	Valor
Dureza Shore A	95±3
Densidad	1,23±0,2 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a tracción	>10 MPa

### 3.1.3 Contaminantes estudiados

#### 3.1.3.1 Agua potable

El contaminante más comúnmente utilizado en los ensayos de medida de la resistencia al deslizamiento es el agua potable. Gran parte de las normas basadas en el péndulo utilizan dicho contaminante cuando se realiza el ensayo en condiciones húmedas (*UNE-ENV 12633*, *UNE 41901EX*, *BS 7976-2*, *AS 4586*, etc.).

#### 3.1.3.2 Agua + Lauril sulfato sódico

Con el objetivo de disminuir la tensión superficial del agua, se ha añadido un agente surfactante al agua. Se ha seleccionado el lauril sulfato sódico (SLS "sodium lauryl sulfate"), que aparece en varias normas de resistencia al deslizamiento, aunque en cada una de ellas con una concentración diferente:

- UNE-EN ISO 13287: 0,5%
- DIN 51097: 1 g/l (0,1%)
- ANSI A137.1: 0,05%

Para los ensayos comparativos realizados con el tribómetro del calzado, con el péndulo y con la rampa con zapato de caucho 57 se utilizó la disolución con una concentración del 0,5% de SLS.

Para los ensayos efectuados según la norma *DIN 51097* con pie descalzo, se utilizó la concentración detallada por dicha norma (1g/l SLS).

Para los ensayos realizados según la norma *ANSI A.137.1* mediante el tribómetro lineal BOT-3000 se utilizó también la concentración indicada por la norma (0,05% SLS).

En estos dos últimos ensayos se respetó la concentración exacta indicada por sus respectivas normas ya que el objetivo final era comparar el método tal y como se indica en la normativa.

#### 3.1.3.3 Aceite

Para los ensayos con aceite, se ha utilizado el contaminante descrito en la norma *DIN 51130*, es decir, aceite de motor con una viscosidad SAE 10 W-30 de acuerdo con la norma *SAE J 300*.

## 3.2 Procedimiento experimental

### 3.2.1 Métodos de evaluación de la resistencia al deslizamiento utilizados y condiciones de ensayo empleadas en cada caso

#### 3.2.1.1 Tribómetro lineal dinámico

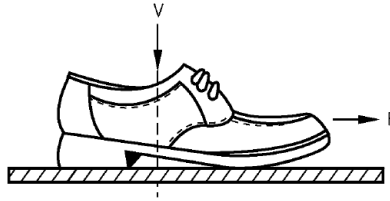
En el presente estudio, el tribómetro utilizado para la medida del coeficiente de fricción dinámico ha sido el utilizado en el sector del calzado para medir la resistencia al deslizamiento de zapatos de seguridad, calzado de protección y calzado de trabajo. Las medidas efectuadas con dicho equipo han sido realizadas por INESCOP (Asociación de Investigación de las Industrias del Calzado y Conexas).

Se ha seguido el procedimiento que se describe en la norma *UNE-EN ISO 13287:2008*. “Equipos de protección individual. Calzado. Método de ensayo para la determinación de la resistencia al deslizamiento”. La muestra de calzado que se va a ensayar se coloca sobre una superficie, se ejerce una fuerza normal sobre ella y se mueve horizontalmente a velocidad constante sobre dicha superficie. Se mide la fuerza de fricción y se calcula el coeficiente de fricción dinámico.



**Figura 3.10** Equipo normalizado empleado para medir el coeficiente de fricción dinámico de suelas de calzado (EN-ISO 13287).

En la Figura 3.10 se muestra una imagen del equipo utilizado para determinar la resistencia al resbalamiento de calzado. En este equipo, el coeficiente de fricción dinámico se puede medir poniendo el zapato en tres posiciones distintas (plano, punta y talón). Para este trabajo, únicamente se han efectuado los ensayos en la posición de zapato plano (Figura 3.11).



**Figura 3.11 Posición de ensayo: deslizamiento en plano.**

En la norma de resbalamiento de calzado, se establecen dos tipos de suelo de referencia (acero y baldosa cerámica, ambos con una rugosidad  $R_z$  especificada en la propia norma) y dos tipos de agentes contaminantes (glicerina y disolución acuosa de lauril sulfato sódico).

En el caso que nos ocupa, se ha utilizado como “suelo” cada una de las muestras de baldosas cerámicas seleccionadas en el Apartado 3.1.1 y como calzado los zapatos preparados a partir de las suelas tanto lisas como con tacos descritas en el Apartado 3.1.2.

#### 3.2.1.2 Ensayo de la rampa inclinada con calzado

El ensayo se ha realizado siguiendo el método descrito en la norma *DIN 51130:2014 Apdo.5 “Testing of floor coverings – Determination of the anti-slip properties – Workrooms and fields of activities with slip danger, walking method - Ramp test”*.

El dispositivo para la prueba consiste en una plancha rígida, plana con una anchura de 600 mm y una longitud de 2000 mm, inclinable desde  $0^\circ$  a  $40^\circ$ . La inclinación tendrá una velocidad angular máxima de  $1^\circ/\text{segundo}$ . Un medidor de inclinación colocado sobre el dispositivo de prueba, indica el ángulo de la plataforma respecto al plano horizontal (Figura 3.12).

El ensayo según norma se realiza con un calzado de seguridad normalizado y se efectúa una calibración para limitar la influencia subjetiva de algunos factores sobre la prueba. Para ello, cada uno de los técnicos que realizan el ensayo, comprueba sus resultados frente a tres superficies de referencia. A partir de los valores obtenidos se calculan los índices de corrección correspondientes a cada sujeto.

En el caso que nos ocupa, se han utilizado los zapatos preparados a partir de las suelas tanto lisas como con tacos descritas en el Apartado 3.1.2.

Como superficies de referencia se han utilizado unos patrones internos que previamente habían ensayado varias veces cada uno de los técnicos que iban a efectuar los ensayos con los diferentes calzados. A cada combinación de



superficie patrón y tipo de calzado se le asignó como valor de referencia el valor medio obtenido en los diferentes ensayos previos.

Las muestras a ensayar (pavimento cerámico detallado en el Apartado 3.1.1) se montaron sobre unos paneles rígidos planos de dimensiones 100cmx50cm.



**Figura 3.12 Ensayo rampa pie calzado.**

Justo antes del inicio de la prueba se aplicó uniformemente 100 ml del contaminante utilizado (Apartado 3.1.3) sobre la superficie a ensayar y sobre la suela de los zapatos.

Cada persona encargada de realizar la prueba debe caminar sobre la superficie a ensayar en posición erguida y con la mirada dirigida hacia abajo, y realizar pasos cortos hacia delante y hacia atrás. La inclinación del plano debe ir aumentando a razón de 1º/segundo aproximadamente. El límite de seguridad sin peligro se determina subiendo y bajando el plano inclinado alrededor de la zona crítica. El ángulo de inclinación se determina tres veces partiendo cada vez desde la posición original.

Este ángulo de inclinación se determina por dos personas. A partir de los seis valores individuales se calcula la media aritmética y se obtiene el ángulo de inclinación medio  $\alpha$ .

A partir del ángulo crítico de inclinación  $\alpha$  se calcula el coeficiente de fricción mediante la ecuación (3.1).

$$\mu = \tan \alpha \quad (3.1)$$

### 3.2.1.3 Péndulo de fricción

Para la realización de dicho ensayo, se ha seguido el procedimiento de la norma *UNE-ENV 12633: 2003*. "Método de la determinación del valor de la resistencia al deslizamiento/resbalamiento de los pavimentos pulidos y sin pulir".

El equipo consiste en un péndulo de longitud de brazo de 510 mm, que soporta un deslizador de caucho de aproximadamente 76 mm x 25 mm (Figura 3.13). La altura del equipo se ajusta para conseguir que el deslizador (caucho de dureza IRHD 59±4 o 96±2), que soporta una carga máxima ( $F_{Nm}$ ) de 22 N, mantenga el contacto con la superficie durante un recorrido de 126 mm. El patín incide sobre la superficie con un ángulo medio de 26±3°, rozando con una de sus aristas, de longitud 76 mm, ligeramente biselada.



**Figura 3.13** Péndulo de fricción.

En primer lugar, se realizó el acondicionamiento del patín descrito en la norma *UNE-ENV 12633* y se verificó el buen funcionamiento del conjunto equipo-deslizador mediante las siguientes superficies de referencia:

- Lámina abrasiva comercial 3M 261X 3µm, (detallada en la norma *UNE-ENV 12633*).

- Baldosa cerámica STD-P (especificada en la norma *UNE 41901 EX*).

Para cada una de las muestras se realizaron medidas en 4 probetas y en las direcciones 0° y 180° eligiendo siempre las más desfavorables. Sobre cada una de las zonas de ensayo se realizan 5 repeticiones de la medida y se calcula como resultado de cada medida individual su valor medio. Como resultado final se calculó el valor medio de las 8 medidas individuales (4 en 0° y 4 en 180°).

A partir de la lectura leída en el equipo (*PTV Pendulum Test Value*) para la superficie ensayada, se calculó el valor de PTV/100.

Como elementos deslizadores se usaron cauchos lisos de dureza IRHD 57 y 96 descritos en el Apartado 3.1.2.

Como agentes contaminantes se utilizaron todos los especificados en el Apartado 3.1.3.

#### 3.2.1.4 Tribómetro BOT 3000

Este ensayo se efectuó siguiendo el método descrito en la norma *ANSI A137.1:2017 Clause 9.6. "American National Specification for Ceramic Tile. Procedure for Dynamic Coefficient of Friction (DCOF) Testing"*.

Consiste en un equipo autopropulsado que se desplaza, a velocidad constante (20 cm/s), sobre una superficie plana horizontal (Figura 3.14). En este caso, sobre el deslizador, que es de caucho SBR de dureza Shore A 95±3, se incorpora un peso que permite aplicar una fuerza normal de 21,3N. El elemento deslizador lleva incorporado un dispositivo que mide continuamente la fuerza paralela a la mencionada superficie que se ejerce para desplazarla (fuerza de rozamiento). Partiendo de la fuerza normal ejercida por el conjunto deslizador – carga ( $F_N$ ) y de la fuerza necesaria para desplazar la probeta ( $F_R$ ), el propio equipo registra en continuo el valor del coeficiente de fricción dinámico (DCOF).

Antes de realizar el ensayo, se procedió a efectuar el acondicionamiento del patín según el procedimiento descrito en la norma *A137.1* y se verificó la superficie de referencia detallada en la citada norma.

Para cada una de las muestras se realizaron medidas en 3 probetas y en las direcciones 0°, 90°, 180° y 270°. Como resultado final sea calculado el valor medio de las 12 medidas individuales.



**Figura 3.14 Equipo BOT-3000.**

En este caso, como elemento deslizador sólo se ha utilizado el caucho SBR propio de la norma ANSI A137.1 y descrito en el Apartado 3.1.2.3.

Del mismo modo, como agente contaminante se ha usado la disolución de agua + SLS con una concentración del 0,05%.

#### 3.2.1.5 Ensayo de rampa con pie descalzo

El ensayo se ha realizado siguiendo el método descrito en la norma *DIN 51097: 1992. "Testing of floor coverings. Determination of the anti-slip properties. Wet loaded workrooms and fields of activities with slip danger. Walking method - Ramp test"*.

El equipo utilizado es el mismo que el descrito en el Apartado 3.2.1.2 para la realización del ensayo según DIN 51130. El dispositivo de ensayo consiste en una placa plana a prueba de torsión, con una anchura de 600 mm y una longitud de 2000 mm, cuya inclinación en la dirección longitudinal se puede ajustar desde 0° hasta 45°. Un medidor de ángulo acoplado al dispositivo de ensayo, que no puede ser leído por la persona encargada de realizar el ensayo cuando lo realiza, muestra el ángulo de inclinación de la placa con respecto al plano horizontal en unidades de 1°. Para la seguridad de la persona que realiza el ensayo, el dispositivo está provisto de unas barandillas de sujeción laterales.

En este caso, la persona encargada de realizar el ensayo camina descalza (Figura 3.15). Antes del inicio del ensayo, debe introducir los pies en agua durante por lo menos 10 minutos.



**Figura 3.15** Ensayo rampa pie descalzo.

Para la reducción de las influencias subjetivas en el resultado del ensayo, los técnicos encargados de realizarlo, previamente a su realización caminan sobre unas superficies de referencia cuyo valor del ángulo  $\alpha$  es conocido, con el fin de obtener un índice de corrección respecto a los valores establecidos para estos patrones. Posteriormente al ensayo sobre cada muestra, se aplica dicho índice de corrección tal y como se establece en la norma *DIN 51130*.

Como contaminante se utiliza una solución acuosa de lauril sulfato sódico con una concentración de 1 g/l. La solución de ensayo se prepara con agua potable justo antes del ensayo.

Durante la realización del ensayo se debe asegurar la inundación constante y uniforme del recubrimiento de ensayo con  $(6\pm 1)$  litros de líquido de ensayo cada minuto. Cuando se trata de recubrimientos con capacidad de succión, se debe asegurar, mediante una impregnación previa, la humectación uniforme de la superficie.

La persona encargada de realizar el ensayo debe caminar en posición erguida, con pasos de longitud de medio pie hacia delante y hacia atrás y con la mirada dirigida hacia abajo sobre el recubrimiento de ensayo, cuya inclinación, desde la posición horizontal inicial, se incrementa a una velocidad de aproximadamente  $1^\circ/\text{segundo}$ . El ángulo de inclinación, al cual la persona

### 3.2. Procedimiento experimental

---

que realiza el ensayo alcanza el límite del andar seguro, se determina subiendo y bajando varias veces el plano inclinado alrededor de la zona crítica.

Este ángulo de inclinación de la placa del dispositivo de ensayo se determina por dos personas que realizan el ensayo, cada una cuatro veces, partiendo cada vez desde la posición horizontal del recubrimiento de ensayo. Cada técnico de ensayo corrige sus resultados a partir del índice de corrección obtenido.

A partir de los ocho valores individuales corregidos se calcula la media aritmética y se obtiene el ángulo de inclinación medio  $\alpha$ .

En el caso que nos ocupa, además se ha calculado el coeficiente de fricción mediante la ecuación (3.1) con el objetivo de comparar los diferentes métodos de ensayo.

#### 3.2.2 Medida de los parámetros de superficie

Para la evaluación de las características superficiales de los pavimentos se ha utilizado un perfilómetro de contacto (Figura 3.16).



Figura 3.16 Rugosímetro HOMMELWERKE T8000.

El equipo dispone de un palpador mecánico con una punta de diamante de 5  $\mu\text{m}$  de diámetro y una curvatura de 90° (Figura 3.17).



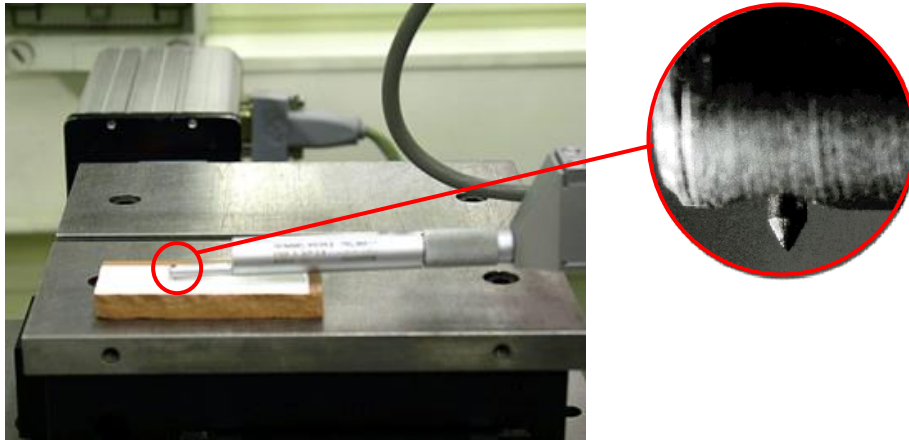


Figura 3.17 Detalle del palpador y punta de diamante.

### 3.2.2.1 Parámetros de rugosidad $R$

Sobre cada una de las superficies estudiadas se obtuvo una topografía compuesta por 81 perfiles de 1 mm de longitud y distanciados entre sí  $12,5\mu\text{m}$ , abarcando así una superficie de  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ . Para el cálculo de los parámetros de rugosidad se utilizó un filtro (cut-off) de  $0,15\text{mm}$ .

En la Tabla 3.6 se resumen las condiciones de ensayo utilizadas.

Tabla 3.6 Condiciones de medida para la obtención de los parámetros de rugosidad  $R$ .

	Valor
Dimensiones	1 mm x 1 mm
Cut-off ( $\lambda_c$ )	0,15 mm
Nº Perfiles	81
Velocidad	0,15 mm/s
Rango	80 $\mu\text{m}$

A partir de cada uno de los perfiles obtenidos se calcularon diferentes parámetros de rugosidad. Se ha de tener en cuenta que algunos de los parámetros necesitan realizar un nivelado del perfil original antes de ser calculados, tal como se presenta en la Figura 3.18.

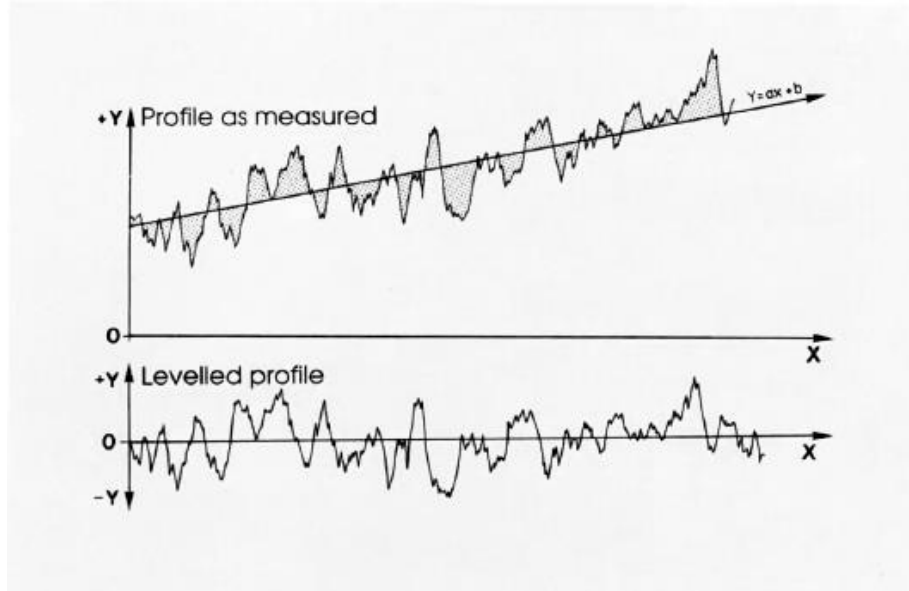


Figura 3.18 Nivelado del perfil original medido.

Además, la mayoría de los parámetros no se calculan a partir de la distancia real ensayada del perfil, sino a partir de la distancia de evaluación. Esta distancia se calcula del siguiente modo, de acuerdo con la Figura 3.19:

Se divide el perfil original en seis secciones iguales (según el cut-off).

La primera sección (S1) se divide en dos partes iguales (S1/2), eliminándose una distancia equivalente por la parte anterior y posterior del perfil original.

La distancia de evaluación se considera la distancia igual a cinco secciones del perfil original, eliminando la primera parte y la última a una misma distancia.

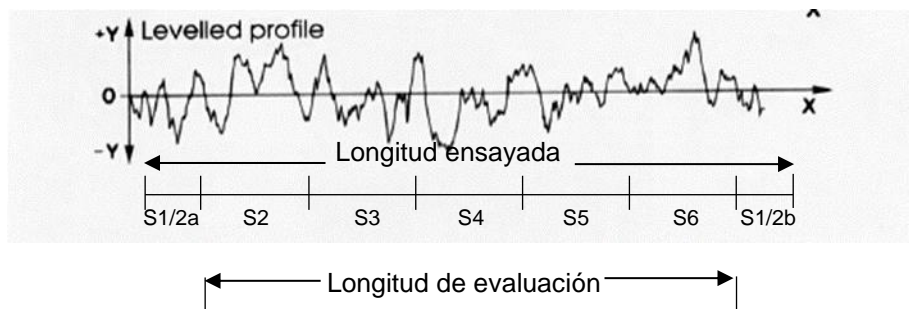


Figura 3.19 Diferencia entre el perfil ensayado y el perfil evaluado en el cálculo de los parámetros de rugosidad.



Los parámetros primarios, con los que una superficie queda bien definida, se pueden dividir en cuatro grupos, atendiendo al tipo de característica de la superficie que estudian (Tabla 3.7).

**Tabla 3.7 Parámetros de rugosidad R.**

	Valor
Parámetros de amplitud (distancia en y)	Ra, Rc, Rz, Rt, Rq, Rz <sub>ISO</sub> , Rsk, Rpm, Rp, Pt', Wt'
Parámetros espaciales (distancia en x)	D, Rpc, Rsm
Parámetros híbridos	Δa, Δq, λa, λq, Im <sub>0</sub> , lo
Parámetros funcionales	Rpk*, Rpk, Rk, Rvk*, Rvk, Mr <sub>1</sub> , Mr <sub>2</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>

#### a) Parámetros de amplitud

**Ra (μm):** Media aritmética de los valores absolutos de la distancia de los puntos que componen el perfil a una línea media. Es el parámetro más representativo de la rugosidad media de una superficie.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (3.2)$$

siendo  $l_m$  la longitud evaluada (5/6 de la longitud total, eliminando primeros y últimos puntos).

**Rc (μm):** Media aritmética de la distancia vertical pico-valle ( $z_i$ ) de cada una de las cinco fracciones en las que se ha dividido el perfil.

$$Rc = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (3.3)$$

**Rz (μm):** Máxima distancia vertical pico-valle de las cinco fracciones en las que se ha dividido el perfil ( $l_m$ ).

Para determinar Rc y Rz el perfil de evaluación debe ser dividido en 5 longitudes de la misma distancia y determinar la distancia máxima pico-valle en cada una de ellas. Rz es la máxima de las cinco y Rc es la media de las mismas.

**Rt (μm):** Distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo del perfil de rugosidad filtrado sobre la longitud evaluada.

**Rq (µm):** Valor obtenido de la desviación media geométrica de los puntos del perfil de rugosidad.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \quad (3.4)$$

**Rz<sub>ISO</sub> (µm):** Media aritmética de la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo de cada una de las cinco fracciones en la que se ha dividido el perfil evaluado, sin que se haya dividido el perfil en secciones iguales.

$$R_{ZISO} = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |Y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |Y_{vi}| \right) \quad (3.5)$$

**Rsk:** Coeficiente de Skewness del perfil. Dicho parámetro está relacionado con la simetría de la amplitud del perfil evaluado obtenida a partir del perfil filtrado.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \bar{Y})^3 \quad (3.6)$$

Siendo **n** el número de puntos que componen el perfil

**Rpm (µm):** Distancia media de los picos que componen el perfil respecto de la línea media, tras la subdivisión del perfil en cinco secciones.

$$Rpm = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 p_i \quad (3.7)$$

**Rp (µm):** Distancia del pico más elevado del perfil respecto de la línea media.

**Pt' (µm):** Distancia pico-valle máxima del perfil calculada a partir del perfil sin filtrar.

**Wt' (µm):** Profundidad de la ondulación, calculada a partir de la altura máxima de ondulación del perfil.

**b) Parámetros espaciales**

**D (picos):** Número de picos que componen un perfil, no normalizado. El número de picos se evalúa a partir de una distancia umbral paralela a la línea media, definida por el técnico.

**RPc (picos/cm):** Densidad de picos del perfil normalizada respecto de la longitud del perfil evaluada y calculada para 10 mm de longitud. El número de picos se evalúa a partir de una distancia umbral paralela a la línea media, definida por el técnico.

**RSm (mm/pico):** Media aritmética de la distancia entre dos puntos consecutivos que cruzan la línea media del perfil.

$$RSm = \frac{l_m}{D} \quad (3.8)$$

donde  $l_m$  es la distancia de evaluación y  $D$  el número de picos que componen el perfil.

**c) Parámetros híbridos**

**$\Delta a$  (rad):** Pendiente media del perfil filtrado respecto de la línea media.

$$\Delta a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right| \quad (3.9)$$

siendo  $\Delta y_i$  la división en fracciones del avance del perfil en horizontal y  $\Delta x_i$  la variación de dicha fracción en altura y  $n$  el número de incrementos en los que se divide el perfil.

**$\Delta q$  (rad):** Media cuadrática de la pendiente del perfil filtrado respecto de la línea media.

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2} \quad (3.10)$$

siendo  $\Delta y_i$  la división en fracciones del avance del perfil en horizontal y  $\Delta x_i$  la variación de dicha fracción en altura y  $n$  el número de incrementos en los que se divide el perfil.

**$\lambda_a$  ( $\mu\text{m}$ ):** Ondulación media del perfil, que tiene en cuenta la ondulación y la distancia pico-valle.

$$\lambda_a = 2\pi \frac{Ra}{\Delta a} \quad (3.11)$$

siendo Ra la rugosidad media del perfil y  $\Delta a$  la pendiente media del perfil.

**$\lambda_q$  ( $\mu\text{m}$ ):** Media cuadrática de la ondulación media del perfil.

$$\lambda_q = 2\pi \frac{Rq}{\Delta q} \quad (3.12)$$

siendo Rq la desviación geométrica de la rugosidad media del perfil y  $\Delta q$  la media cuadrática de la pendiente media del perfil.

**$L_m$  ( $\mu\text{m}$ ):** Longitud de evaluación. También se denomina  $l_m$ . En este caso como los perfiles ensayados son de 1 mm, la distancia  $l_m$  que le corresponde es de 0,83 mm.

**$l_{m0}$  ( $\mu\text{m}$ ):** Longitud real del perfil medida sobre el perfil de rugosidad nivelado respecto de una línea recta media.

$$l_{m0} = \int_0^{l_m} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} dx \quad (3.13)$$

**$l_0$ :** Parámetro que representa el cociente entre la longitud obtenida siguiendo el trazo dibujado por la línea del perfil ( $l_{m0}$ ) y la longitud del recorrido efectuado por el palpador en línea recta ( $l_m$ , distancia de evaluación).

$$l_0 = \frac{l_{m0}}{l_m} \quad (3.14)$$

#### **d) Parámetros funcionales**

**$R_{pk}^*$ :** Zona de picos más agudos del perfil (ver Figura 3.20).

**$R_{pk}$ :** Zona de picos del perfil, eliminando los más agudos (ver Figura 3.20).

**$R_k$ :** Zona central del perfil, eliminando picos y valles (ver Figura 3.20).

**$R_{vk}^*$ :** Zona de valles más profundos del perfil (ver Figura 3.20).

- $R_{vk}$ :** Zona de valles del perfil eliminando los más profundos (ver Figura 3.20).
- $M_{r1}$  (%):** Ratio de picos respecto de la zona central del perfil  $R_k$  (ver Figura 3.20).
- $M_{r2}$  (%):** Ratio de valles respecto de la zona central del perfil  $R_k$  (ver Figura 3.20).
- $A_1$ :** Parámetro estadístico de la curva de Abbot-Firestone relacionado con los picos del perfil (ver Figura 3.20).
- $A_2$ :** Parámetro estadístico de la curva de Abbot-Firestone relacionado con los picos del perfil (ver Figura 3.20).

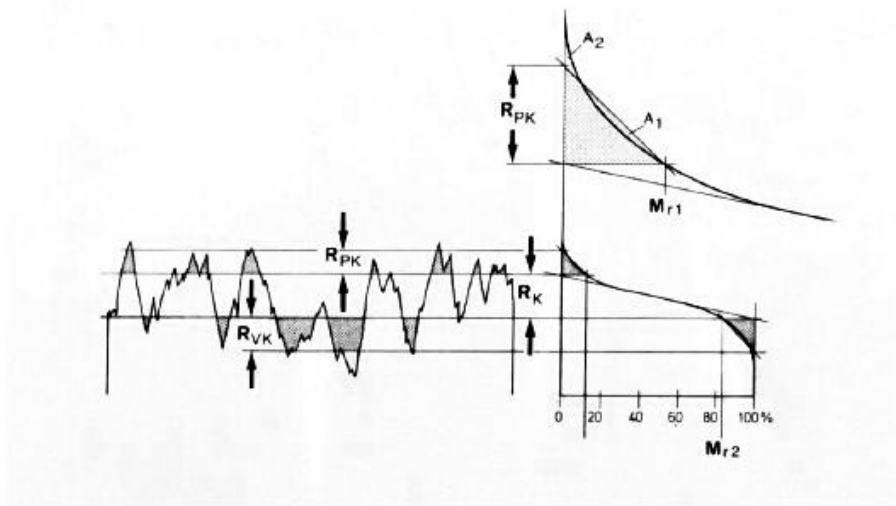


Figura 3.20 Definición de los parámetros  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_k$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ ,  $A_1$  y  $A_2$ .

### 3.2.2.2 Parámetros de ondulación S

Sobre cada una de las superficies estudiadas se obtuvo una topografía compuesta por 205 perfiles de 48mm de longitud y distanciados entre sí 235,5 $\mu$ m, abarcando así una superficie de 48mmx48mm. Para el cálculo de los parámetros de ondulación se utilizó un filtro (cut-off) de 8mm.

En la Tabla 3.8 se resumen las condiciones de ensayo utilizadas.

**Tabla 3.8 Condiciones de medida para la obtención de los parámetros de ondulación S.**

	Valor
Dimensiones	48 mm x 48 mm
Cut-off ( $\lambda_c$ )	8 mm
Nº Perfiles	205
Velocidad	4 mm/s
Rango	1600 $\mu\text{m}$

Los parámetros primarios, con los que una superficie queda bien definida, se pueden dividir en cuatro grupos, atendiendo al tipo de característica de la superficie que estudian (Tabla 3.9).

**Tabla 3.9 Parámetros de ondulación S.**

	Valor
Parámetros de amplitud (distancia en y)	Sa, Sq, Sp, Sv, St, Ssk, Sku, Sz,
Parámetros espaciales (distancia en x)	Spc, Sds, Str, Sal, Std
Parámetros híbridos	Sfd, S $\Delta$ q, Ssc, Sdr
Parámetros funcionales	Sk, Spk, Svk, Sr <sub>1</sub> , Sr <sub>2</sub> , Sbi, Sci, Svi

**a) Parámetros de amplitud**

**Sa ( $\mu\text{m}$ ):** Desviación media aritmética de la superficie

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |\eta(x_i, y_j)| \quad (3.15)$$

Su significado estadístico es el mismo que la desviación media aritmética.

**Sq ( $\mu\text{m}$ ):** Desviación media cuadrática de la superficie

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |\eta^2(x_i, y_j)|} \quad (3.16)$$

Su significado estadístico es el mismo que la desviación estándar.

**Sp (μm):** Distancia de pico máxima de la superficie

Distancia máxima de pico respecto de la línea media en que se divide la superficie original.

**Sv (μm):** Distancia de valle máxima de la superficie

Distancia máxima de valle respecto de la línea media en que se divide la superficie original.

**St (μm):** Distancia total pico-valle

Distancia máxima pico-valle de la superficie original nivelada pero no filtrada.

**Ssk:** Alabeo de la superficie

Es la medida de la asimetría de la superficie respecto del plano medio, o de la inclinación de la curva de distribución de alturas hacia un lado u otro. Los valores negativos son representativos de superficies que presentan una concentración de material en la parte superior de la topografía (desviación de la curva a la derecha). Por el contrario, los valores positivos son característicos de las superficies con mucho hueco en la parte superior (desviación de la curva a la izquierda). Se expresa como:

$$Ssk = \frac{1}{MNSq^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^3(x_i, y_j) \quad (3.17)$$

**Sku:** Curtosis

Este parámetro es indicativo de la mayor o menor anchura de la curva de distribución de alturas, es decir, de la dispersión de los puntos que la componen. La campana de Gauss tiene una curtosis de 3. Valores >3 son indicativos de topografías poco profundas. Una curtosis <3 significa que la altura de la topografía es elevada.

$$Sku = \frac{1}{MNSq^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^4(x_i, y_j) \quad (3.18)$$

**Sz (µm):** Altura de diez puntos de la superficie

Se define como el valor medio de las alturas absolutas de los diez picos más altos y de los cinco valles más profundos de toda el área de medida. La fórmula es:

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |\eta_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |\eta_{vi}|}{5} \quad (3.19)$$

La elección de los puntos máximos se efectúa mediante un criterio estadístico establecido en el programa del equipo de medida.

**b) Parámetros espaciales**

**SPc (picos/mm<sup>2</sup>):** Número de máximos de la superficie

Es el número de máximos en la superficie. La elección de los máximos en tres dimensiones se efectúa mediante un método estadístico, establecido en el programa de medida, sobre el cual no se puede intervenir.

**Sds (picos/mm<sup>2</sup>):** Densidad de máximos de la superficie

Es el número de máximos en una unidad de área. La elección de los máximos en tres dimensiones se efectúa mediante un método estadístico, establecido en el programa de medida, sobre el cual no se puede intervenir.

$$Sds = \frac{\text{Numero de maximos}}{(M - 1)(N - 1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \quad (3.20)$$

**Str:** Relación de aspecto de textura de la superficie

Este parámetro sirve para identificar el patrón de textura de la superficie. Los valores de este parámetro están comprendidos entre 0 y 1. Cuanto más alto es el valor, más uniforme es la superficie (más isotrópica).

**Sal (mm):** Longitud de caída de la función de autocorrelación



Determina, en sentido horizontal (eje X) la longitud necesaria para que la función de autocorrelación del perfil caiga en un valor de 0,2. Un valor elevado de este parámetro indica que en la superficie predomina una baja frecuencia (alta longitud de onda).

**Std (°):** Dirección de la textura

Determina el ángulo principal de la textura de la superficie. Este parámetro tiene sentido sólo en el caso de que Sal esté por debajo de 0,5. Dicho ángulo se expresa en grados entre -90° y 90°.

Si la superficie tiene una textura circular, de torneado o serrado, dicho parámetro indicará una direccionalidad errónea, tangencial a la línea circular de la textura. En caso de que la muestra presente dos direccionalidades preferentes, el parámetro Sal nos indicará el ángulo preferente.

### c) **Parámetros híbridos**

**Sfd:** Dimensión fractal de la superficie

Indica la complejidad de la superficie utilizando la teoría de la dimensión fractal. La dimensión de una superficie varía entre 2 (superficie plana) y 3 (superficie muy compleja). En algunas superficies geométricas, la dimensión fractal no puede calcularse y el valor no debe tenerse en cuenta.

**SΔq (μm/μm):** Media cuadrática de la pendiente de la superficie

Es la medida cuadrática de las pendientes de la superficie. Su expresión matemática es como sigue:

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left[ \left( \frac{\eta(x_i, y_j) - \eta(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{\eta(x_{i-1}, y_{j-1}) - \eta(x_{i-1}, y_{j-2})}{\Delta y} \right)^2 \right]} \quad (3.21)$$

**Ssc (1/μm):** Media aritmética de la curvatura de los máximos

Este parámetro se calcula después de haber seleccionado los máximos de la superficie según el criterio establecido en el programa del equipo. El concepto matemático es el siguiente:

$$S_{sc} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial^2 \eta^2(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta^2(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (3.22)$$

**Sdr (%)**: Relación de área superficial desarrollada

Este parámetro representa la relación entre el área interfacial de la superficie (área real) y el área de medida.

**d) Parámetros funcionales**

**Sk, Spk y Svk (µm)**:

Son parámetros característicos de la curva de material obtenidos a partir de la recta de mínima pendiente. Indican respectivamente el centro de la rugosidad, los picos y los valles de la superficie, estudiados de forma estadística.

**Sr<sub>1</sub> y Sr<sub>2</sub> (%)**:

Son las relaciones de material en ambos extremos del centro de la rugosidad Sk.

**Sbi**: Índice de superficie portante

Es la razón entre la desviación media cuadrática (Sq) y la altura de la superficie al 5% de material portante, es decir, la altura de un plano de corte en el que el 5% de área está ocupada por sólido. Se expresa como:

$$Sbi = \frac{Sq}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (3.23)$$

Para una superficie gaussiana, el valor de este parámetro es de 0,61. Un valor elevado indica que la superficie presenta buenas propiedades portantes.

**Sci**: Índice de retención de líquidos

Es la relación entre el volumen de hueco en la zona central de la superficie (entre  $h_{0,05}$  y  $h_{0,8}$ ) y la desviación media cuadrática (Sq). Su expresión matemática es:

$$Sci = \left( \frac{V_v(h_{0,05}) - V_v(h_{0,8})}{(M - 1)(N - 1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \right) / Sq \quad (3.24)$$

Un valor elevado de este parámetro indica una buena capacidad de retención de líquidos en la zona central de la superficie. Para una superficie gaussiana, el valor de este parámetro es de 1,56. En general, los valores de este parámetro están en el siguiente intervalo:

$$0 < S_{ci} < 0,95 (h_{0,05} - h_{0,8})$$

**S<sub>vi</sub>:** Índice de retención de fluido en los valles

Es la relación entre el volumen de hueco en la zona de los valles y la desviación media cuadrática ( $S_q$ ). Se expresa como sigue:

$$S_{vi} = \left( \frac{V_v(h_{0,8})}{(M-1)(N-1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \right) / S_q \quad (3.25)$$

Un valor elevado indica buena retención de fluidos en la zona de valles. El intervalo de valores es:

$$0 < S_{vi} < 0,2 (h_{0,8} - h_{\min})$$

### 3.2.3 Medida del desgaste superficial

#### 3.2.3.1 Desgaste por tránsito peatonal

Como ya se ha comentado anteriormente, el desgaste real que ocurre sobre la superficie del pavimento va a depender, además de las características propias de la baldosa, de factores externos como el nivel de tránsito, la presencia de materiales abrasivos, la frecuencia y el tipo de limpieza del local, etc.

Para valorar el desgaste que ocurre en condiciones reales, se decidió realizar dos estudios "in situ" en zonas de alto tránsito y con presencia de materiales abrasivos para abordar las condiciones más desfavorables y poder estimar en un plazo de tiempo no excesivamente largo la evolución de la resistencia al deslizamiento de diferentes pavimentos.

Para la medida de la resistencia al deslizamiento se utilizó el método del péndulo según *UNE-ENV 12633*, expresando los resultados como PTV/100.

##### 3.2.3.1.1 Estudio "in situ" en condiciones exteriores

Uno de los estudios se realizó en una zona exterior, con presencia constante de polvo y con poca frecuencia de limpieza.

### *3.2. Procedimiento experimental*

---

Para ello, se utilizaron dos de las entradas de las instalaciones del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) de la Universitat Jaume I, en las cuales se disponía de información cuantitativa del tránsito peatonal real mediante el sistema de control de fichajes del personal (Figura 3.21).

En primer lugar, se midió la resistencia al deslizamiento de la baldosa instalada justo en el centro de cada uno de los accesos (zona en la que se pisa al entrar o salir por la puerta). Dichas baldosas llevaban instaladas 5 años en esa ubicación y se disponía de información acerca de las personas que habían transitado sobre ellas durante ese tiempo.

Dos de dichas baldosas fueron arrancadas y sustituidas por dos piezas nuevas, del mismo material, a las que previamente se había medido su resistencia al deslizamiento.

Desde el momento de su instalación, se realizó un seguimiento periódico de su comportamiento como consecuencia del desgaste producido por el tránsito de personas (Figura 3.22). Durante el primer año, en el que se preveía una variación importante de la resistencia al deslizamiento se realizaron un elevado número de medidas de dicha propiedad. Posteriormente se fue ampliando el intervalo de tiempo transcurrido entre ellas.



**Figura 3.21 Puerta de acceso restringido mediante fichaje.**



**Figura 3.22** Medida sobre la baldosa de seguimiento colocada en el centro del acceso.

#### 3.2.3.1.2 Estudio “in situ” en un local interior con acceso directo al exterior

Por otro lado, se realizó otro estudio de similares características, pero en condiciones de uso interior, en un local con acceso directo al exterior. En este caso, también había un aporte continuo de polvo, pero la limpieza era más frecuente, de modo que la cantidad de material abrasivo presente podría ser un poco menor.

Se instalaron diferentes muestras de baldosas cerámicas en el pavimento de los pasillos del autoservicio de uno de los comedores de la Universitat Jaume I (Figura 3.23). Al ser un área de paso unidireccional, limitada por barandillas era fácil controlar el número de personas que transitaban sobre las piezas en estudio instalando contadores ópticos, a la salida junto a las cajas registradoras (Figura 3.24).

Se utilizó un sistema de instalación sin adhesivos (Figura 3.24) para permitir la retirada y reposición de las piezas, con objeto de poder medir periódicamente la resistencia al deslizamiento de éstas en el laboratorio. Para la realización de dicho estudio, se seleccionaron piezas con diferentes acabados superficiales y resistencia al deslizamiento inicial, desde valores relativamente bajos a muy altos. En general, se escogieron preferentemente modelos de superficie con elevado valor de la resistencia al deslizamiento, con la finalidad de poder medir cambios de mayor magnitud en las propiedades antideslizantes.



**Figura 3.23 Estudio in situ en la zona de self-service de la universidad.**



**Figura 3.24 Contador óptico y sistema de instalación sin adhesivo para facilitar la retirada de piezas.**

### 3.2.3.2 Desgaste acelerado a escala de laboratorio

El equipo desarrollado para provocar el desgaste acelerado sobre la superficie de los pavimentos a escala de laboratorio ha consistido en un cabezal de pulido semi-industrial al que se pueden acoplar diferentes materiales abrasivos.

Dicho cabezal de pulido se utiliza habitualmente para estudiar las condiciones industriales de pulido de baldosas cerámicas (Figura 3.25). Este equipo opera de forma que la muestra de pavimento oscila, con la ayuda de una cinta, bajo el cabezal, que gira al mismo tiempo. El cabezal dispone de 6 porta-muelas (Figura 3.26) donde se pueden fijar diferentes materiales abrasivos.

Este equipo permite controlar las siguientes variables de operación:

- Velocidad de giro del cabezal
- Velocidad de la cinta
- Número de oscilaciones
- Presión ejercida sobre la muestra
- Material abrasivo



**Figura 3.25** Cabezal de pulido utilizado para simular el desgaste en pavimentos.



**Figura 3.26 Portamuelas del cabezal de pulido.**

En el Apartado 4.3.1 se describe el proceso de diseño y puesta a punto, tanto del equipo, como de la metodología utilizada para producir el desgaste del material a largo plazo, simulando la abrasión que se origina debido al tránsito peatonal.



## **4.Resultados y discusión**



#### 4.1 Estudio comparativo de diferentes métodos de medida de la resistencia al deslizamiento

Se ha encontrado bastante información en la bibliografía referente a la comparación entre los métodos de resistencia al deslizamiento utilizando métodos de ensayo muy diversos y materiales de pavimento de diferente naturaleza (piedra natural, baldosas de terrazo, pavimentos cerámicos, suelos de madera o plásticos, superficies metálicas, etc.) (Silva, G. et al., 2002, Silva, G. et al., 2006, Powers, C. M. et al., 2007, Ricotti, R., 2009, Sebald, J., 2009, Bowman, R., 2010, Bowman, R. et al., 2012, Wetzel, C. et al., 2015, Marchal, P. et al., 2015, Terjék, A., 2018). El estudio cuyos resultados se exponen en esta Memoria, se ha realizado únicamente con pavimentos de naturaleza cerámica.

De acuerdo con lo indicado en el Apartado 2.2, los métodos de ensayo que se han utilizado en este estudio han sido el del péndulo de fricción, el de la rampa inclinada y dos de los basados en el tribómetro lineal dinámico: el procedimiento utilizado por INESCOP (Instituto Tecnológico del Calzado de la red de Centros Tecnológicos de la Generalitat Valenciana) (UNE-EN ISO 13287), y el método basado en la norma americana ANSI A.137.1 Apdo. 9.6.2. (equipo BOT-3000). Todo ello con la finalidad de comparar los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos mediante los tres últimos procedimientos y los correspondientes obtenidos al emplear el péndulo de fricción, ya que este procedimiento es el que está previsto usar para efectuar las medidas de dicha propiedad superficial en los Apartados 4.2 y 4.3 de esta Memoria, por ser el que se propone en la norma actualmente utilizada en España.

Se han realizado ensayos utilizando los dos tipos de elemento deslizador que se proponen para el método de ensayo con el péndulo de fricción, en la norma española (UNE-ENV 12633 y UNE 41901 EX y UNE 41902 EX) y en la inglesa (BS 7976-2), en vigor actualmente: Zapatitas de caucho lisas de dureza IRHD de 57 y 96 (según la Norma ISO 48). Asimismo, a efectos comparativos, en algún caso se han utilizado deslizadores con tacos o se han efectuado ensayos con pie descalzo (con la rampa inclinada).

Para realizar esta parte del trabajo se han elegido veintidós tipos diferentes de pavimento cerámico de entre los cincuenta y cuatro propuestos en el Apartado 3.1.1, tratando de que fueran suficientemente representativos de los cinco grupos establecidos en dicho apartado.

En algunos casos, se han realizado medidas adicionales de la resistencia al deslizamiento de piezas de pavimento cerámico comerciales, distintas de las inicialmente elegidas, fabricadas en diferentes empresas, a efectos de comparar o de contrastar los resultados con los correspondientes a las medidas efectuadas con las veintidós piezas inicialmente seleccionadas.

#### **4.1.1 Valores de la resistencia al deslizamiento medida mediante cada uno de los métodos de ensayo utilizados**

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de la resistencia al deslizamiento, correspondientes a los veintidós tipos de pavimento elegidos, obtenidos utilizando los diferentes procedimientos indicados.

Dicha propiedad se ha expresado en función del parámetro de medida correspondiente a cada procedimiento y equipo utilizado: el coeficiente de fricción dinámico (DCOF), en el caso del método del calzado o del BOT 3000, el ángulo de la rampa ( $\alpha$ ), expresado como su tangente ( $\tan \alpha$ ), o el valor de la lectura del ensayo realizado con el péndulo de fricción dividido por 100 (PTV/100).

Las medidas se han efectuado utilizando como contaminantes, agua potable, agua+SLS y aceite, con las características indicadas en el Apartado 3.1.3.

Como elemento deslizador se ha utilizado caucho liso IRHD 57 con los tres contaminantes antes indicados. En los ensayos en los que el elemento deslizador era un zapato (rampa y tribómetro calzado) se han usado además suelas con tacos de diferente tamaño y diseño. Por otro lado, también se han efectuado ensayos con caucho liso IRHD 96 (en este último caso usando únicamente agua como contaminante).

Sobre los valores de la resistencia al deslizamiento que se muestran en la citada Tabla 4.1 cabe hacer las consideraciones siguientes:

- a) Las medidas de la resistencia al deslizamiento efectuadas con el péndulo de fricción, en presencia de agua, se han realizado para todas las muestras elegidas, con caucho liso de dureza IRHD 57 e IRHD 96, dado que este procedimiento y naturaleza de los deslizadores son los que se propone en las normas en vigor, tanto en España como en otros países (Reino Unido, Australia, etc.).
- b) Cuando se ha empleado agua como contaminante, solamente se muestran algunos valores de la resistencia al deslizamiento, determinados con el tribómetro (usado por la industria del calzado) y con la rampa, debido a que estas medidas se programaron únicamente a efectos comparativos con las correspondientes obtenidas con el péndulo de fricción, utilizando el mismo tipo de elemento deslizador (caucho liso IRHD 57).
- c) Con algunas salvedades, se aprecia cierto paralelismo entre los valores del PTV/100, obtenidos utilizando agua como contaminante y deslizador de caucho liso, tanto de dureza IRHD 57 como IRHD 96 y los valores de dicho parámetro resultantes de utilizar agua+SLS como contaminante, así como con los valores del DCOF obtenidos por los dos métodos ensayados y el de la

tangente del ángulo  $\alpha$  de inclinación de la rampa, tanto si se usa agua potable, agua+SLS o aceite como contaminantes.

d) La mayor parte de los valores del parámetro PTV/100, medidos en presencia de agua, son algo mayores cuando se utiliza caucho liso de dureza IRHD 96, como elemento deslizador, que si se usa caucho liso de dureza IRHD 57.

e) Se aprecia que los valores de los parámetros determinados por los tres procedimientos ensayados, en presencia de agua+SLS y usando deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57, son ligeramente más bajos que los correspondientes medidos en presencia de agua, como era de esperar.

f) Los valores de los parámetros determinados por los tres procedimientos ensayados, utilizando aceite como contaminante, son sensiblemente más bajos que los correspondientes obtenidos usando agua o agua+SLS, lo cual era de esperar dada la elevada viscosidad del aceite.

g) Cuando se usa aceite como contaminante, no se observan diferencias sensibles entre los valores de las medidas efectuadas con las diferentes muestras encuadradas en los Grupos 1 a 3. En cambio, en las piezas con relieve superficial acentuado y en las de relieve superficial geoméricamente uniforme (Grupos 4 y 5), sí que se aprecian diferencias importantes entre las medidas correspondientes a los distintos modelos ensayados.

h) El tribómetro dinámico BOT 3000 se adquirió, por el ITC, cuando prácticamente todo el trabajo que se describe en este apartado se había realizado ya. Por esa razón, como puede apreciarse en la Tabla 4.1, no se pudo efectuar ensayos con los veintidós modelos elegidos, ya que las muestras disponibles de algunos de dichos modelos eran de tamaño demasiado pequeño para que los resultados de los ensayos fueran suficientemente fiables. No obstante, más adelante, en el Apartado 4.1.3.1.2, se compensó este déficit de datos con los aportados por ensayos realizados con treinta y seis modelos industriales de diferente naturaleza (ver Tabla 4.6).

**Tabla 4.1 Valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos por los diferentes métodos y condiciones ensayados.**

Contaminante	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Aceite	Aceite	Aceite
Naturaleza	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho SBR	Caucho	Caucho	Caucho
Dureza	IRHD 96	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	Shore A 95	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57
Deslizador	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso
Muestra	Péndulo (PTV/100)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Tribómetro BOT 3000 (DCOF)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)
1.1	0,40	0,35	-	-	0,31	0,31	0,35	0,60	0,14	0,03	0,03
1.2	0,32	0,28	0,24	0,40	0,26	0,15	0,28	0,63	0,13	0,03	0,02
1.3	0,20	0,20	0,16	0,25	0,21	0,10	0,27	0,54	0,11	0,03	0,02
1.4	0,34	0,25	-	-	0,22	0,17	0,21	0,56	0,15	0,03	0,03
2.13	0,57	0,57	0,61	0,51	0,54	0,42	0,57	-	0,14	0,03	0,02
2.14	0,62	0,58	-	-	0,54	0,48	0,57	-	0,13	0,05	0,03
2.16	0,48	0,33	-	-	0,29	0,30	0,32	0,71	0,12	0,03	0,01
2.17	0,46	0,26	-	-	0,24	0,27	0,31	-	0,13	0,04	0,02
2.18	0,49	0,49	0,54	0,76	0,46	0,40	0,65	0,67	0,13	0,03	0,02
2.19	0,55	0,51	-	-	0,45	0,42	0,49	-	0,13	0,05	0,02
3.28	0,18	0,17	0,18	0,16	0,14	0,08	0,11	0,34	0,15	0,06	0,06
3.29	0,15	0,19	0,21	0,18	0,17	0,10	0,14	0,40	0,15	0,04	0,06
3.30	0,24	0,20	-	-	0,19	0,21	0,21	0,33	0,14	0,03	0,03
3.32	0,31	0,26	-	-	0,23	0,26	0,26	0,45	0,13	0,03	0,03
3.33	0,14	0,15	-	-	0,13	0,05	0,12	0,40	0,14	0,03	0,03
4.35	0,48	0,45	-	-	0,41	0,70	0,56	0,72	0,15	0,11	0,09
4.40	0,26	0,21	-	-	0,19	0,15	0,21	0,35	0,14	0,10	0,06
5.50	0,60	0,60	-	-	0,53	0,70	0,71	0,75	0,14	0,08	0,08
5.51	0,59	0,37	-	-	0,33	0,32	0,35	0,61	0,20	0,16	0,23
5.52	0,59	0,63	0,62	0,62	0,56	0,58	0,56	-	0,23	0,22	0,24
5.53	0,44	0,29	0,23	0,23	0,27	0,16	0,19	0,48	0,21	0,13	0,14
5.54	0,67	0,69	0,60	0,63	0,62	0,52	0,50	-	0,24	0,21	0,24

**Tabla 4.2 Valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos por los diferentes métodos y condiciones ensayados, ordenadas por PTV/100 57 ascendente.**

Contaminante	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Aceite	Aceite	Aceite
Naturaleza	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho SBR	Caucho	Caucho	Caucho
Dureza	IRHD 96	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	Shore A 95	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57
Deslizador	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso
Muestra	Péndulo (PTV/100)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Tribómetro BOT 3000 (DCOF)	Péndulo (PTV/100)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)
3.33	0,14	0,15	-	-	0,13	0,05	0,12	0,40	0,14	0,03	0,03
3.28	0,18	0,17	0,18	0,16	0,14	0,08	0,11	0,34	0,15	0,06	0,06
3.29	0,15	0,19	0,21	0,18	0,17	0,10	0,14	0,40	0,15	0,04	0,06
1.3	0,20	0,20	0,16	0,25	0,21	0,10	0,27	0,54	0,11	0,03	0,02
3.30	0,24	0,20	-	-	0,19	0,21	0,21	0,33	0,14	0,03	0,03
4.40	0,26	0,21	-	-	0,19	0,15	0,21	0,35	0,14	0,10	0,06
1.4	0,34	0,25	-	-	0,22	0,17	0,21	0,56	0,15	0,03	0,03
2.17	0,46	0,26	-	-	0,24	0,27	0,31	-	0,13	0,04	0,02
3.32	0,31	0,26	-	-	0,23	0,26	0,26	0,45	0,13	0,03	0,03
1.2	0,32	0,28	0,24	0,40	0,26	0,15	0,28	0,63	0,13	0,03	0,02
5.53	0,44	0,29	0,23	0,23	0,27	0,16	0,19	0,48	0,21	0,13	0,14
2.16	0,48	0,33	-	-	0,29	0,30	0,32	0,71	0,12	0,03	0,01
1.1	0,40	0,35	-	-	0,31	0,31	0,35	0,60	0,14	0,03	0,03
5.51	0,59	0,37	-	-	0,33	0,32	0,35	0,61	0,20	0,16	0,23
4.35	0,48	0,45	-	-	0,41	0,70	0,56	0,72	0,15	0,11	0,09
2.18	0,49	0,49	0,54	0,76	0,46	0,40	0,65	0,67	0,13	0,03	0,02
2.19	0,55	0,51	-	-	0,45	0,42	0,49	-	0,13	0,05	0,02
2.13	0,57	0,57	0,61	0,51	0,54	0,42	0,57	-	0,14	0,03	0,02
2.14	0,62	0,58	-	-	0,54	0,48	0,57	-	0,13	0,05	0,03
5.50	0,60	0,60	-	-	0,53	0,70	0,71	0,75	0,14	0,08	0,08
5.52	0,59	0,63	0,62	0,62	0,56	0,58	0,56	-	0,23	0,22	0,24
5.54	0,67	0,69	0,60	0,63	0,62	0,52	0,50	-	0,24	0,21	0,24

#### 4.1.2 Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos con cada método de ensayo y contaminante estudiados

##### 4.1.2.1 Medio contaminante: agua potable

##### 4.1.2.1.1 Deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57

En la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 se han representado las posibles combinaciones entre los valores de la resistencia al deslizamiento medida por los tres métodos ensayados.

Como puede apreciarse, las líneas de tendencia que resultan de las representaciones gráficas de la Figura 4.1 y Figura 4.2 coinciden prácticamente con la línea diagonal, con coeficientes de correlación de 0,95 y 0,77 respectivamente. Este resultado podría interpretarse en el sentido de que, cuando se utiliza agua como contaminante, los valores de la resistencia al deslizamiento medidos con el péndulo de fricción (expresados en la forma PTV/100) y los determinados por el método de la rampa y con el tribómetro dinámico del calzado, (expresados en la forma  $\tan \alpha$  y DCOF respectivamente), son bastante coincidentes, sobre todo los medidos con la rampa.

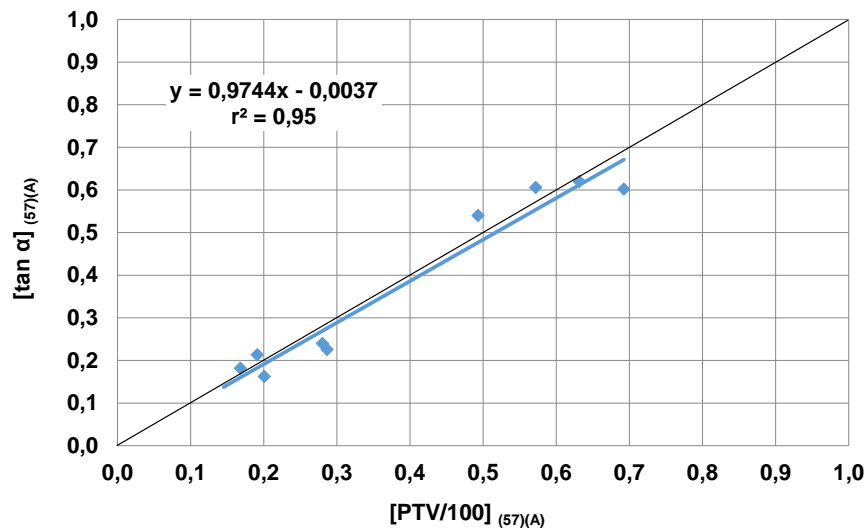


Figura 4.1 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(57)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .



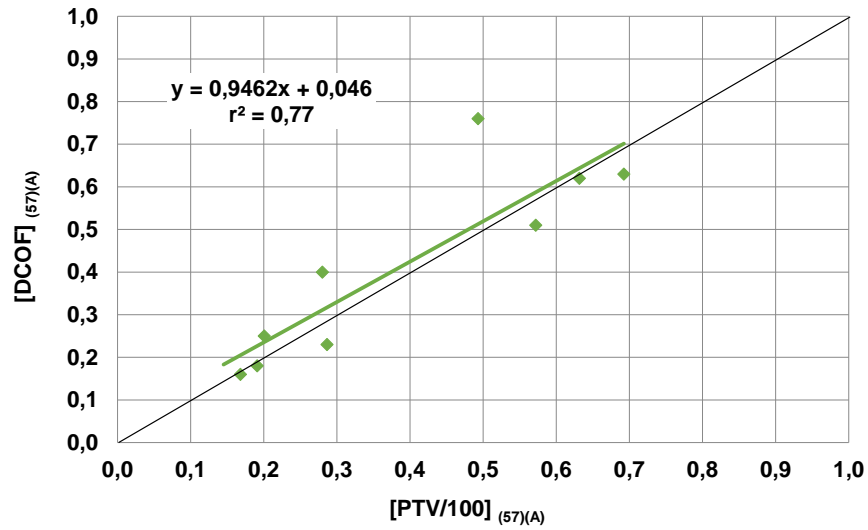


Figura 4.2 Relación entre los valores de [DCOF] (57)(A) y [PTV/100] (57)(A).

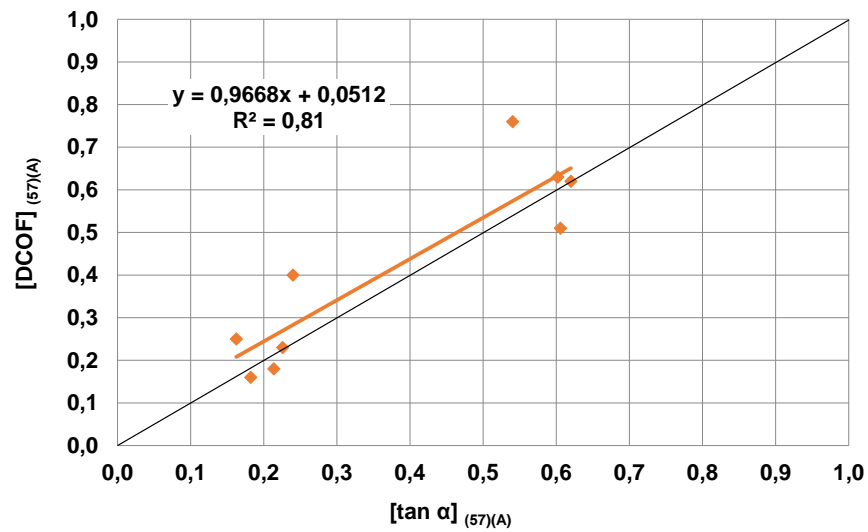


Figura 4.3 Relación entre los valores de [DCOF] (57)(A) y [tan α] (57)(A).

A la vista de las representaciones de la Figura 4.2 y Figura 4.3, conviene poner de manifiesto que el valor del DCOF obtenido para el modelo de referencia 2.18 no encaja demasiado bien con el comportamiento del resto de valores de dicho coeficiente. En efecto, si se prescinde de su valor, los coeficientes de correlación de la línea de tendencia de la Figura 4.2 y Figura 4.3 mejoran, pasando de los valores de 0,77 y 0,81 a los de 0,92 y 0,86 respectivamente.

De la Figura 4.3 se deduce que algunos de los valores de la resistencia al deslizamiento medidos por el procedimiento de la rampa ( $\tan \alpha$ ) son ligeramente inferiores, en algunos casos, que los que se obtienen con el tribómetro usado en la industria del calzado (DCOF), a las mismas condiciones de operación, aun cuando la mayoría de ellos coinciden prácticamente (marcadores situados sobre o junto a la diagonal).

#### 4.1.2.1.2 Deslizador de caucho liso de dureza IRHD 96

En la Figura 4.4 se ha representado los valores obtenidos del parámetro  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , para los veintidós tipos de piezas cerámicas preseleccionadas, frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$ . La línea de tendencia que mejor se adaptó a la representación obtenida, con un coeficiente de correlación de 0,89, fue de tipo exponencial, de ecuación:

$$[PTV/100]_{(57)(A)} = 0,1082 e^{2,6862[PTV/100]_{(96)(A)}} \quad (4.1)$$

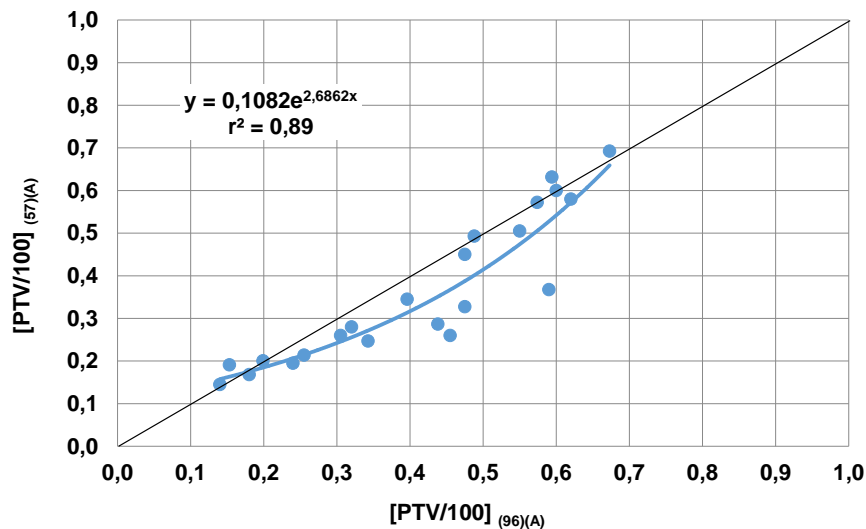
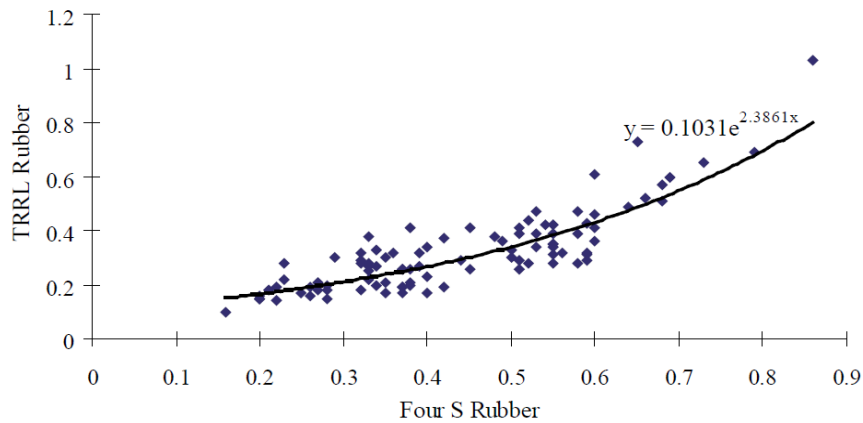


Figura 4.4 Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(96)(A)}$ .

*Bowman, R., 2010*, usando deslizadores similares a los empleados en este trabajo, también en presencia de agua potable como contaminante, determinó los valores del PTV en 96 tipos de pavimento cerámico diferentes. Al representar los valores obtenidos en la forma utilizada en la Figura 4.4, obtuvo la representación que se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.5** Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  obtenidos por *Bowman* utilizando 95 baldosas cerámicas diferentes (*Bowman, R., 2010*).

La ecuación de la línea de tendencia de esta representación, también de tipo exponencial, obtenida por *Bowman* fue de la forma:

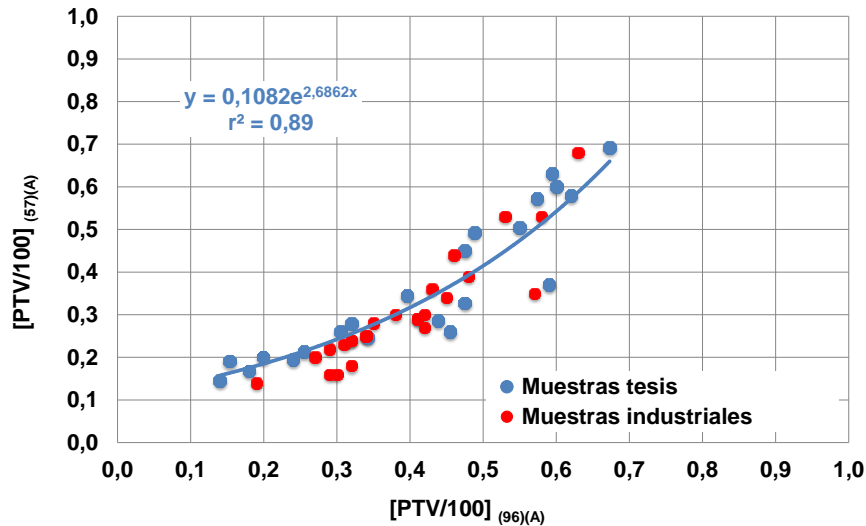
$$[PTV/100]_{(57)(A)} = 0,1031 e^{2,3861[PTV/100]_{(96)(A)}} \quad (4.2)$$

Como puede apreciarse, las representaciones gráficas obtenidas, en uno y otro caso, son muy parecidas, como se deduce de las ecuaciones de las respectivas líneas de tendencia.

A fin de confirmar los resultados obtenidos con las 22 piezas inicialmente elegidas, en la Figura 4.6, se ha añadido a las parejas de valores del PTV/100 representadas en la Figura 4.4, las correspondientes a un conjunto de 25 piezas cerámicas industriales diferentes (obtenidas asimismo utilizando deslizadores de caucho liso de dureza IRHD 57 y 96 en presencia de agua) cuya relación se muestra en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Valores de PTV/100 obtenidos, con deslizadores de caucho liso con dureza IRHD 57 y 96, correspondientes a un conjunto de 25 piezas cerámicas industriales diferentes.**

Muestra	[PTV/100] <sub>(57)(A)</sub>	[PTV/100] <sub>(96)(A)</sub>
PI1	0,29	0,41
PI2	0,25	0,34
PI3	0,24	0,32
PI4	0,23	0,31
PI5	0,22	0,29
PI6	0,27	0,42
PI7	0,18	0,32
PI8	0,16	0,30
PI9	0,16	0,29
PI10	0,34	0,45
PI11	0,28	0,35
PI12	0,20	0,27
PI13	0,30	0,38
PI14	0,53	0,53
PI15	0,53	0,58
PI16	0,68	0,63
PI17	0,29	0,41
PI18	0,25	0,34
PI19	0,24	0,32
PI20	0,44	0,46
PI21	0,39	0,48
PI22	0,14	0,19
PI23	0,36	0,43
PI24	0,30	0,42
PI25	0,35	0,57



**Figura 4.6 Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  para los 47 tipos de pavimento estudiados.**

Como puede apreciarse en esta figura, los valores correspondientes a las 25 piezas industriales añadidas (marcadores de color rojo) se adaptan bastante bien a los datos y a la línea de tendencia de la Figura 4.4 (marcadores y línea azules).

#### 4.1.2.2 Medio contaminante: agua + SLS

##### 4.1.2.2.1 Deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57

A efectos comparativos, en la Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9 se han representado las posibles combinaciones entre los valores de la resistencia al deslizamiento medidos por los tres métodos ensayados. Con el mismo fin, en la Figura 4.10 se han representado los valores obtenidos de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

En las representaciones gráficas de la Figura 4.8 y Figura 4.9 se observa que las líneas de tendencia coinciden prácticamente con la línea diagonal, sobre la que prácticamente se sitúan más del 50% de los puntos representativos en los tres casos considerados. Es decir que, en la mayor parte de los casos, los valores medidos de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ ,  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  coinciden prácticamente.

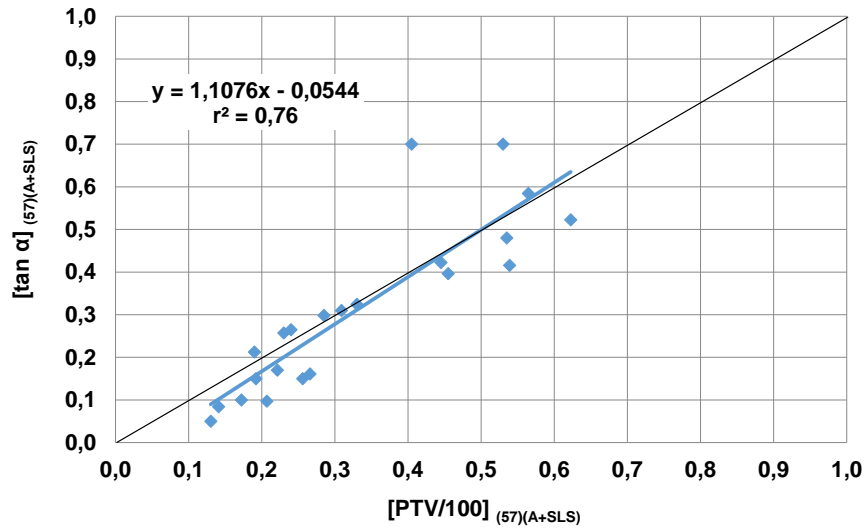


Figura 4.7 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ .

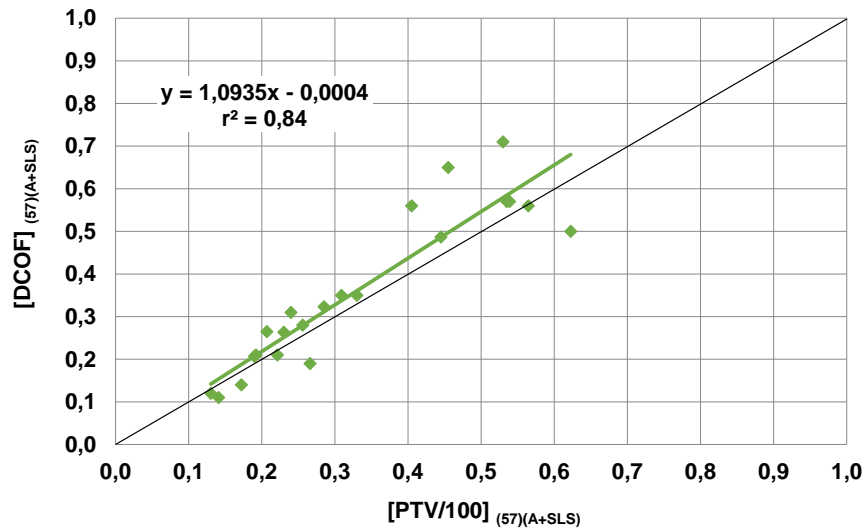


Figura 4.8 Relación entre los valores de  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ .

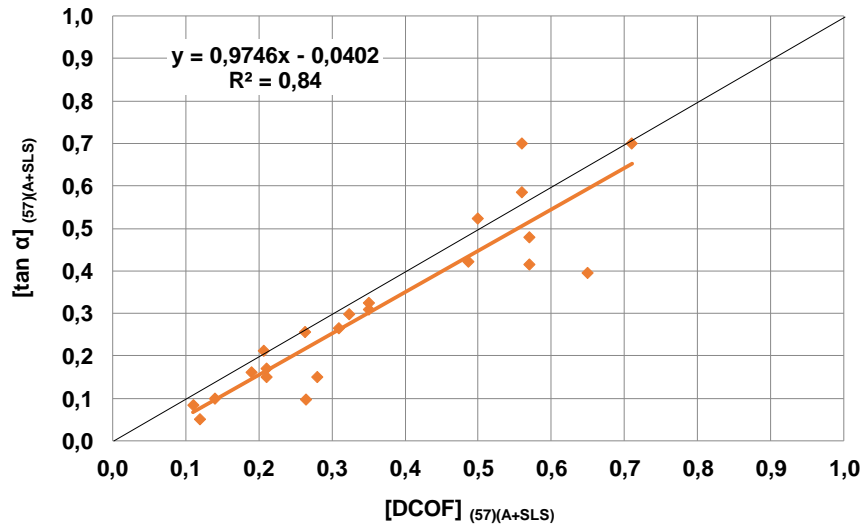


Figura 4.9 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$ .

Los coeficientes de correlación, de las correspondientes líneas de tendencia (**0,76; 0,84 y 0,84**), son bastante buenos, habiéndose observado que mejoran sensiblemente si se prescinde de los valores del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  del modelo de referencia 2.18 y de los valores del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  y de la  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  de los modelos de referencia 4.35 y 5.50 que se desvían sensiblemente del comportamiento del resto, como puede apreciarse en la mencionadas figuras.

Si en las representaciones gráficas de dichas figuras se prescinde de los resultados obtenidos para los tres modelos citados, mejoran sensiblemente los coeficientes de correlación de las correspondientes líneas de tendencia, resultando los valores: **0,89; 0,91 y 0,89** respectivamente, modificándose muy ligeramente las ecuaciones representativas de las mismas, que pasan a ser de la forma:  $y = 0,9674x - 0,0337$ ;  $y = 0,9475x + 0,0236$ ;  $y = 0,9104x + 0,0744$  respectivamente.

Las desviaciones observadas en los valores correspondientes al modelo de referencia 5.50 podrían deberse a que las crestas del relieve que presenta tienen una amplia superficie plana en la parte superior, circunstancia que podría provocar que el deslizador del patín del péndulo de fricción no fuera capaz de detectar este tipo de irregularidad con la misma intensidad que se detecta por el método de la rampa o con el tribómetro dinámico empleado en el método del calzado. (ver foto de la topografía en el Apéndice Apartado 7.1). En lo que se refiere a la pieza 2.18, ya se apreció una desviación importante en el valor del DCOF, medido en presencia de agua, respecto a los respectivos valores medidos con los otros dispositivos, como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior. Por otra parte, el modelo de referencia 4.35, posee un

relieve irregular (ver foto en el Apéndice Apartado 7.1) con picos muy pronunciados, lo que podría afectar más a las medidas realizadas con el deslizador de caucho liso con IRHD 57 en el caso del tribómetro dinámico y de la rampa que en el caso del péndulo de fricción.

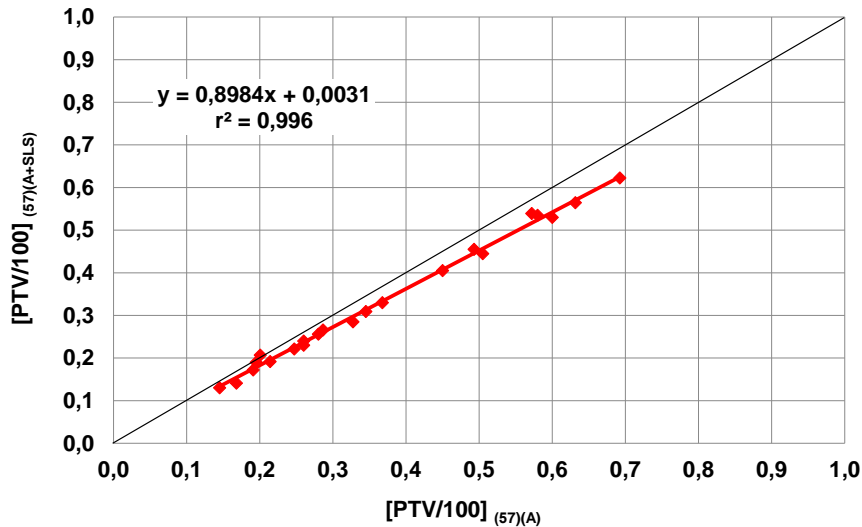


Figura 4.10 Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

En lo que se refiere a la Figura 4.10, conviene resaltar el excelente ajuste de los puntos representativos de las correspondientes parejas de valores de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  y de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , a la línea de tendencia, con un coeficiente de correlación de 0,99. Dicha representación confirma que los valores resultantes de medir la resistencia al deslizamiento con el *péndulo de fricción*, en presencia de agua, son ligeramente superiores a los resultantes de efectuar la medida en presencia de agua con SLS, como líquido contaminante, tal como era de esperar.

#### 4.1.2.2.2 Deslizador de caucho provisto de tacos de dureza IRHD 57.

Como complemento de los ensayos realizados en presencia de agua+SLS como contaminante, se consideró oportuno introducir una pequeña variante: realizar algunos ensayos utilizando zapatos con suelas provistas de tacos de distinta forma y tamaño, de dureza IRHD 57, como deslizadores, y comparar cualitativamente los resultados obtenidos, por el método de la rampa y con el tribómetro dinámico utilizado en la industria del calzado, con los correspondientes obtenidos con un zapato de suela lisa de las mismas características.



En la Tabla 4.4 se muestran las características de las suelas utilizadas y en la Tabla 4.5 los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos por los dos métodos de ensayo utilizados:  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$ .

**Tabla 4.4 Descripción y clasificación de las suelas de los zapatos usados como deslizador.**

Diseño de suela	Geometría de los tacos	Cantos de los tacos	Altura del relieve (mm)
Tipo 2	Cuadrada	Vivos	3
Tipo 3	Cuadrada	Vivos	1
Tipo 4	Cuadrada	Redondeados	3

**Tabla 4.5 Valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos para los diferentes diseños de suela ensayados por los dos métodos de medida empleados.**

Contaminante	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS	Agua+SLS
Naturaleza	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho	Caucho
Dureza	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57	IRHD 57
Deslizador	Liso	Liso	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 4
Muestra	Tribómetro calzado (DCOF)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Rampa (tan $\alpha$ )	Tribómetro calzado (DCOF)	Tribómetro calzado (DCOF)	Rampa (tan $\alpha$ )
1.1	0,35	0,31	0,67	0,48	0,56	0,44	0,40
1.2	0,23	0,15	0,40	0,37	0,38	0,31	0,30
1.4	0,21	0,17	0,47	0,29	0,45	0,33	0,35
2.13	0,57	0,42	0,54	0,53	0,58	0,51	0,48
2.14	0,57	0,48	0,63	-	0,53	-	-
2.16	0,32	0,30	0,40	-	0,34	-	0,41
2.17	0,31	0,27	-	0,35	-	-	-
2.19	0,49	0,42	-	-	-	-	0,54
3.32	0,26	0,26	0,27	0,35	0,28	-	0,23
3.33	0,12	0,05	0,19	0,18	0,16	0,13	0,13
4.35	0,43	0,36	-	-	-	-	-
4.40	0,21	0,15	0,19	0,16	0,18	0,17	0,15
5.50	0,65	0,48	0,62	0,70	0,60	-	-
5.51	0,35	0,32	0,23	0,30	0,27	-	0,22
5.52	0,56	0,58	-	-	-	-	-
5.53	0,19	0,16	0,19	0,17	0,19	0,17	0,18

Los resultados obtenidos se han representado en la Figura 4.11 y Figura 4.12. Como puede apreciarse en ambas figuras, hay cierta dispersión de los puntos representativos de las parejas de valores representados, oscilando los coeficientes de correlación de las líneas de tendencia resultantes entre 0,55 y 0,78. No obstante, de la disposición de las respectivas líneas de tendencia se pueden sacar consecuencias cualitativamente interesantes.

En efecto, en la Figura 4.11, la posición relativa de las líneas de tendencia de las representaciones de la  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLs)}$ , de las suelas de tacos cuadrados tipo 4 y tipo 2, con la misma altura de relieve, muestran que la resistencia al deslizamiento de ambos tipos de suela es algo mayor que la que ofrece la suela lisa con la misma dureza IRHD, siendo la correspondiente a la suela de tipo 2 (tacos con cantos vivos) ligeramente superior a la de la suela de tipo 4 (tacos con cantos redondeados).

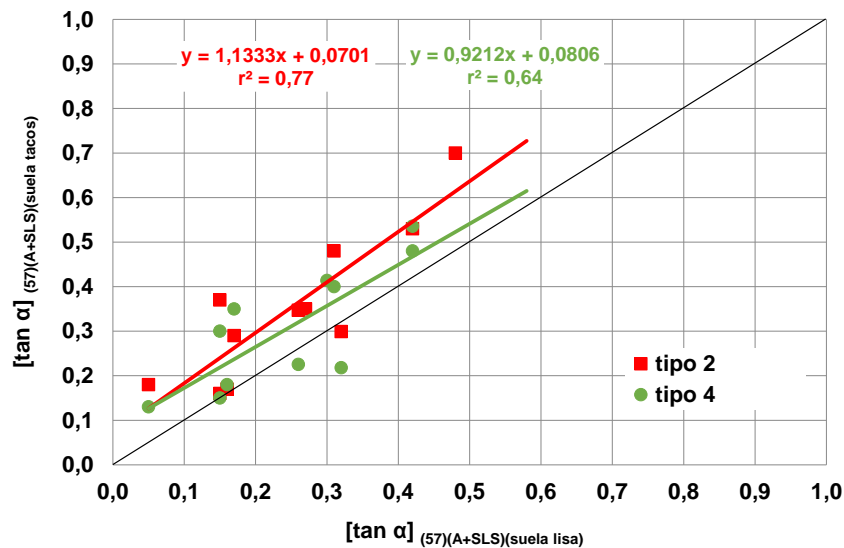


Figura 4.11 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLs)(suela tacos)}$  y  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLs)(suela lisa)}$ .

En lo que se refiere a la Figura 4.12, de la posición relativa de las líneas de tendencia de las representaciones del  $[DCOF]_{(57)(A+SLs)}$  de las suelas de los tipos 2, 3 y 4, se deduce que la resistencia al deslizamiento crece ligeramente en el sentido: suela tipo 4 (tacos con cantos redondeados) → suela tipo 3 (cantos vivos con relieve de 1 mm) → suela tipo 2 (cantos vivos con relieve de 3 mm), para valores de dicho parámetro inferiores a 0,55. Para valores mayores que 0,55 las tres líneas de tendencia convergen, coincidiendo

prácticamente con la diagonal, es decir con los valores del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  correspondientes a la suela lisa.

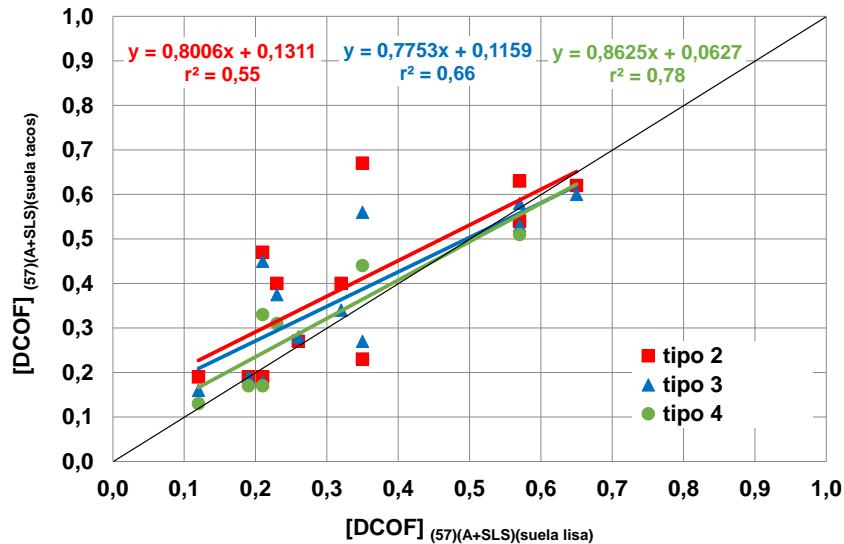


Figura 4.12 Relación entre los valores de  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}(suela\ tacos)$  y  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}(suela\ lisa)$ .

#### 4.1.2.2.3 Deslizador de caucho SBR liso de dureza Shore A 95 (BOT-3000)

En la Figura 4.13 se han representado los valores del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  de la Tabla 4.1 frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ . La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos representados fue de tipo logarítmico, con un coeficiente de correlación de 0,75.

De la representación de la Figura 4.13 se deduce que los valores del DCOF, medidos por el procedimiento de la norma ANSI A137.1 son bastante más elevados que los de PTV/100, medidos con el péndulo de fricción en presencia de agua+SLS como contaminante, correspondientes a los mismos modelos de referencia.

Por otra parte, se observó que la disposición de la línea de tendencia, en dicha figura, resultó ser muy parecida a la de la línea de tendencia que se obtenía al representar los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  de la Tabla 4.1.

Dicha circunstancia puede apreciarse en la Figura 4.14, en la que se ha efectuado dicha representación junto con la correspondiente de la Figura 4.13.

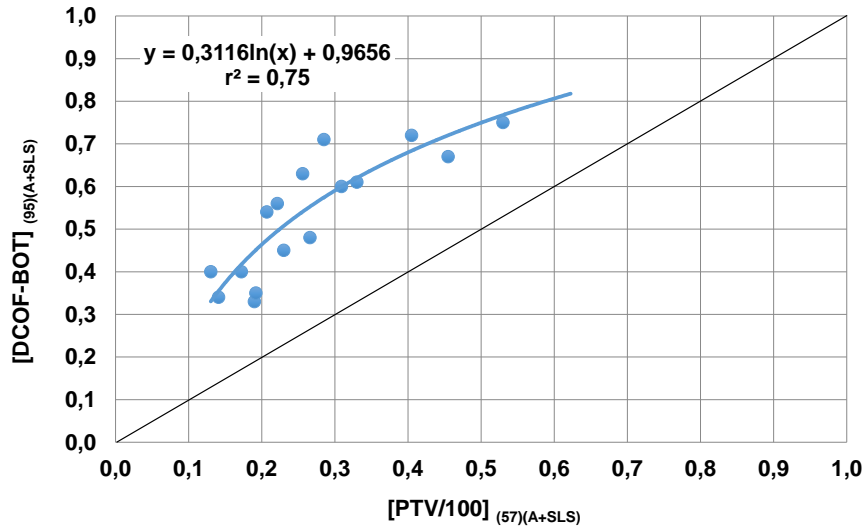


Figura 4.13 Relación entre los valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ .

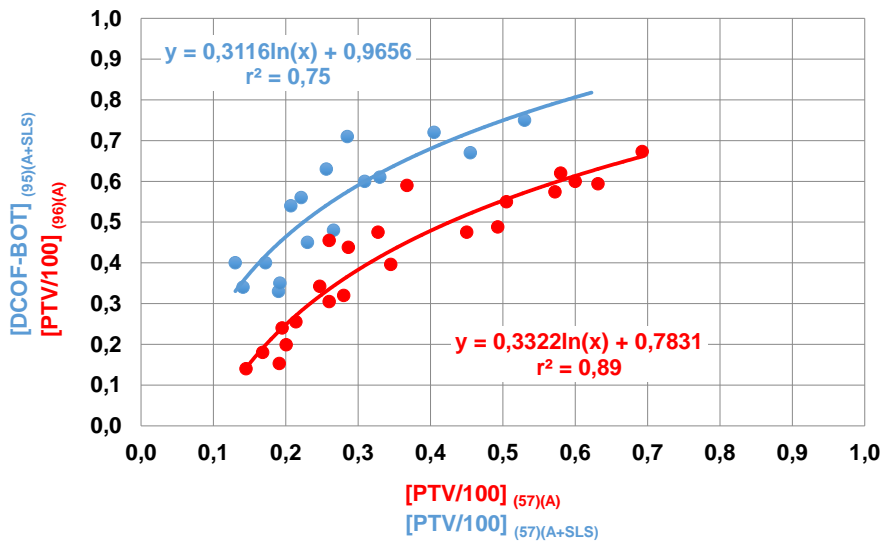


Figura 4.14 Representación de los valores del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  y de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

Con vistas a comprobar si la forma de las representaciones obtenidas se repetía al comparar los resultados obtenidos al medir la resistencia al deslizamiento por los otros procedimientos que se vienen ensayando, al aplicarlos con deslizadores de caucho IRHD 96 y de caucho IRHD 57, se han realizado las representaciones gráficas que se muestran en la Figura 4.15 y Figura 4.16. En ellas se ha representado los valores medidos por el método del BOT  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  frente a los correspondientes a los mismos modelos de referencia medidos con el tribómetro del calzado  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  y por el procedimiento de la rampa en presencia de agua+SLS  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  respectivamente.

En dichas figuras se observa que, también en estos casos, los valores del DCOF obtenidos por el método del BOT 3000, con deslizador de caucho Shore A 95, son bastante mayores que los correspondientes determinados por el método del calzado  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  o por el de la rampa  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$ , con deslizadores de caucho IRHD 57. Por otra parte, resultan asimismo líneas de ajuste curvas de tipo exponencial, análogas a las de las representaciones de la Figura 4.14.

Esta coincidencia parece indicar que las representaciones de los valores de la resistencia al deslizamiento, determinados con deslizador de dureza IRHD 96, frente a los correspondientes a los mismos modelos de referencia, obtenidos empleando un deslizador de dureza IRHD 57, independientemente del procedimiento de medida que se utilice, conducen a líneas de tendencia de tipo logarítmico análogas a las representadas en las Figuras 4.14 a 4.16.

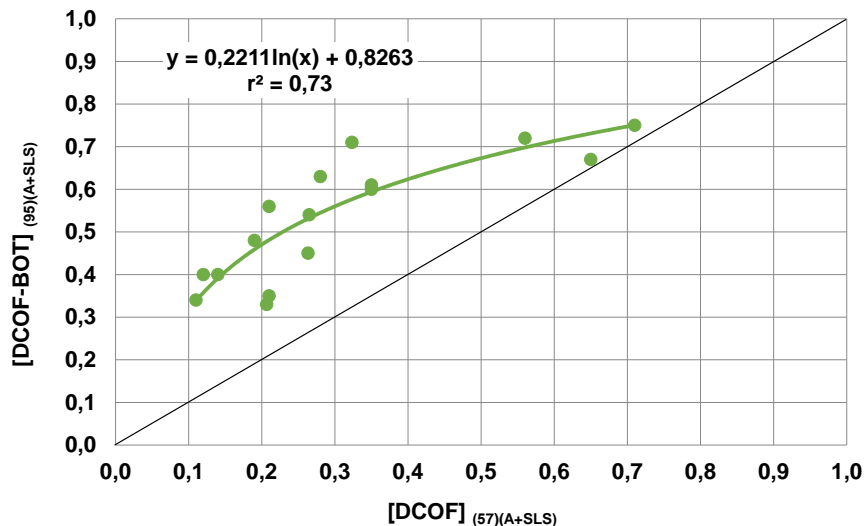


Figura 4.15 Relación entre los valores del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$ .

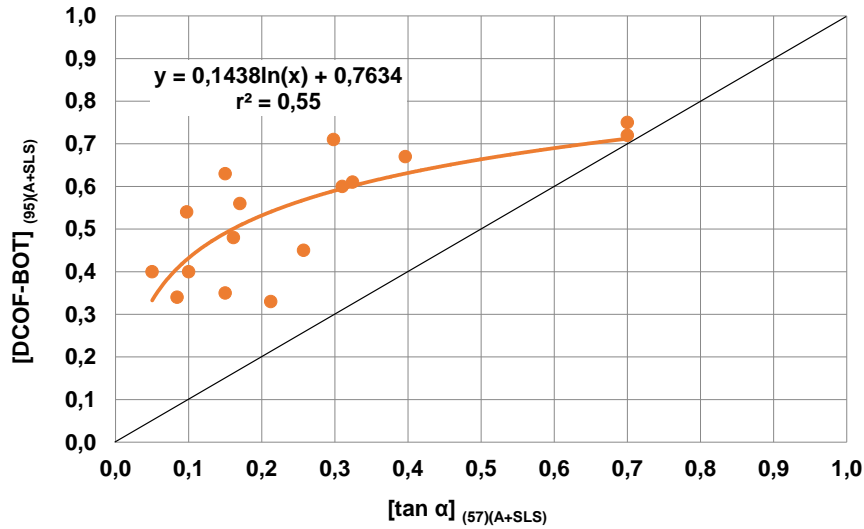


Figura 4.16 Relación entre los valores del [DCOF-BOT] y de  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$ .

#### 4.1.2.3 Medio contaminante: aceite

A efectos comparativos, en la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19 se han representado las tres posibles combinaciones entre los valores de la resistencia al deslizamiento de los veintidós modelos estudiados medida, por los tres métodos ensayados, utilizando aceite de las características descritas en el Apartado 3.1.3.3 como líquido contaminante.

En las gráficas de la Figura 4.17 y Figura 4.18, en las que en el eje de abscisas figuran los valores de  $[PTV/100]_{(57)(aceite)}$ , los mejores ajustes se han obtenido con líneas de tendencia rectas, con coeficientes de correlación relativamente altos (0,84 y 0,89), situadas por debajo de la diagonal, que se aproximan (Figura 4.17) o coinciden prácticamente con ella (Figura 4.18) para valores de dicho parámetro comprendidos entre 0,20 y 0,25.

Ahora bien, se considera importante resaltar que, en las dos representaciones obtenidas, dieciocho de los veintidós puntos representativos de las parejas de valores correspondientes que se han representado en ellas, están situados en el intervalo de valores del eje de abscisas comprendido entre 0,10 y 0,15.

De estas dos representaciones se deduce que, en el intervalo de valores de los parámetros de resistencia al deslizamiento estudiado, cuando se opera en presencia de aceite como líquido contaminante y se utilizan deslizadores lisos de caucho de dureza IRHD 57, las medidas efectuadas con el péndulo de fricción (PTV/100), con el tribómetro dinámico usado en la industria del calzado (DCOF) y por el método de la rampa ( $\tan \alpha$ ), en el intervalo de valores de dichos parámetros comprendidos entre 0,20 y 0,25, son prácticamente del mismo orden de magnitud.

En la gráfica de la Figura 4.19, en la que se ha representado los valores del  $[DCOF]_{(57)(aceite)}$  frente a los de la  $[\tan \alpha]_{(57)(aceite)}$ , el mejor ajuste se ha obtenido con una línea de tendencia recta, con un coeficiente de correlación del orden de 0,94, que prácticamente coincide con la diagonal si se prescinde de dos de los valores representados.

De esta representación se deduce que los valores obtenidos para el DCOF, excepto dos, se aproximan a los correspondientes de la  $\tan \alpha$ , con desviaciones inferiores a  $\pm 0,1$ , en todo el intervalo estudiado.

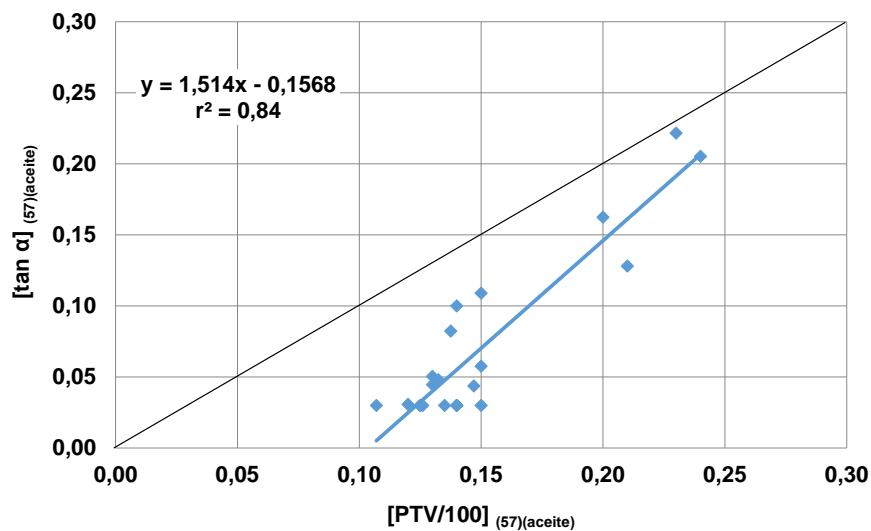


Figura 4.17 Relación entre los valores del  $[\tan \alpha]_{(57)(aceite)}$  y de  $[PTV/100]_{(57)(aceite)}$ .

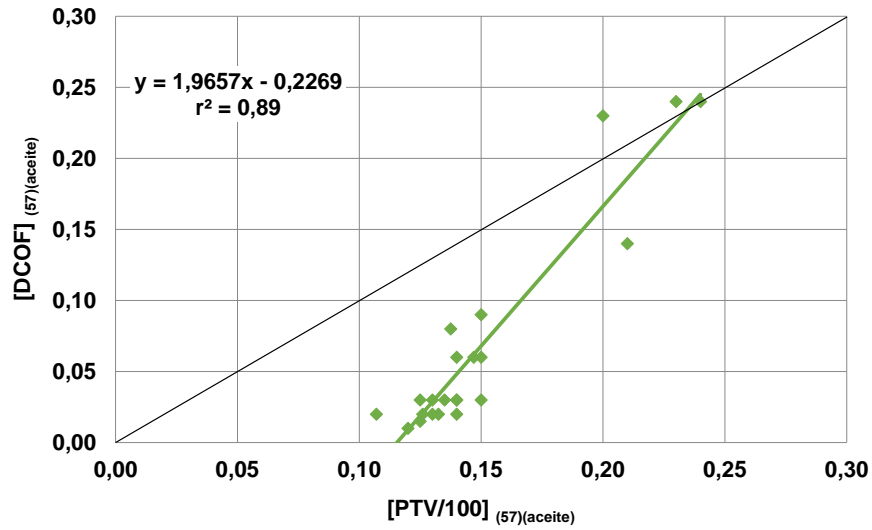


Figura 4.18 Relación entre los valores del [DCOF] (57)(aceite) y de [PTV/100] (57)(aceite).

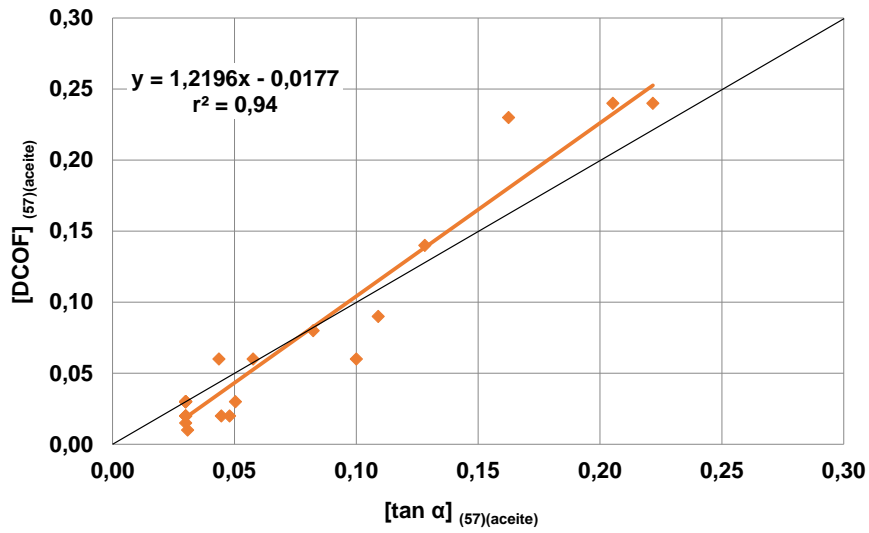


Figura 4.19 Relación entre los valores del [DCOF] (57)(aceite) y de [tan  $\alpha$ ] (57)(aceite).

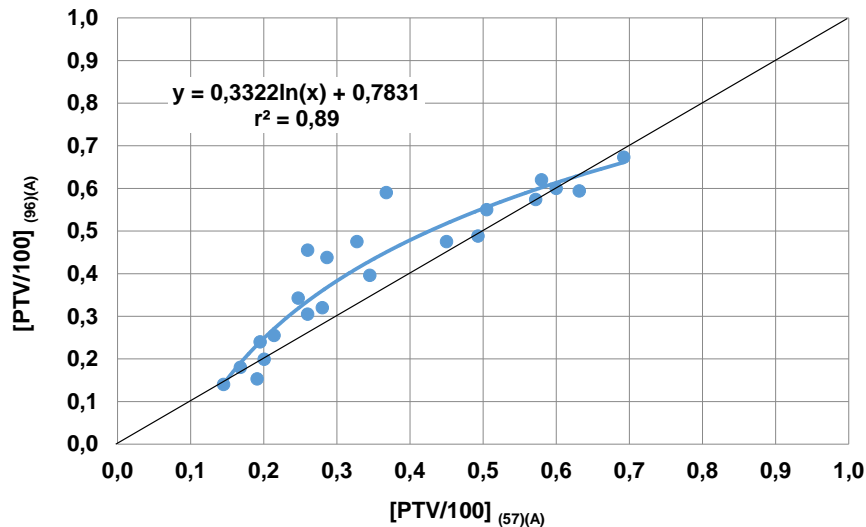


**4.1.3 Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos aplicando la norma vigente en España y los resultantes de aplicar las normas en vigor en otros países. Validez de las correlaciones obtenidas.**

**4.1.3.1 Relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento determinados aplicando la norma vigente en España y los resultantes de utilizar las normas en vigor en otros países.**

**4.1.3.1.1 Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$**

En la Figura 4.20 se muestra la representación de los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$ , de la Tabla 4.1, frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ . El mejor ajuste de los resultados se ha obtenido para una línea de tendencia de tipo logarítmico, como era de esperar a la vista de la Figura 4.4.



**Figura 4.20 Relación entre  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .**

Además, como se disponía de los resultados de las 25 piezas cerámicas industriales detallados en la Tabla 4.3., se han representado todos los datos conjuntamente obteniéndose la representación de la Figura 4.21.

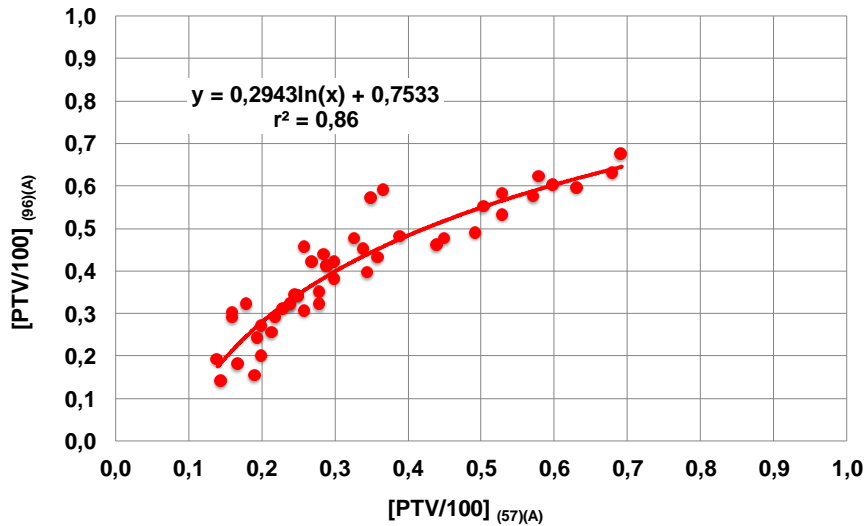


Figura 4.21 Relación entre  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  (22 muestras inicialmente seleccionadas + 25 muestras industriales).

La ecuación representativa de la línea de tendencia resultante es de la forma:

$$[PTV/100]_{(96)(A)} = 0,2943 \ln[PTV/100]_{(57)(A)} + 0,7533 \quad (4.3)$$

con un coeficiente de correlación  $r^2 = 0,86$ .

#### 4.1.3.1.2 Relación entre los valores del $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$ y $[PTV/100]_{(57)(A)}$

Al representar los valores del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  de la Tabla 4.1 frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  se obtuvo la representación de la Figura 4.22.

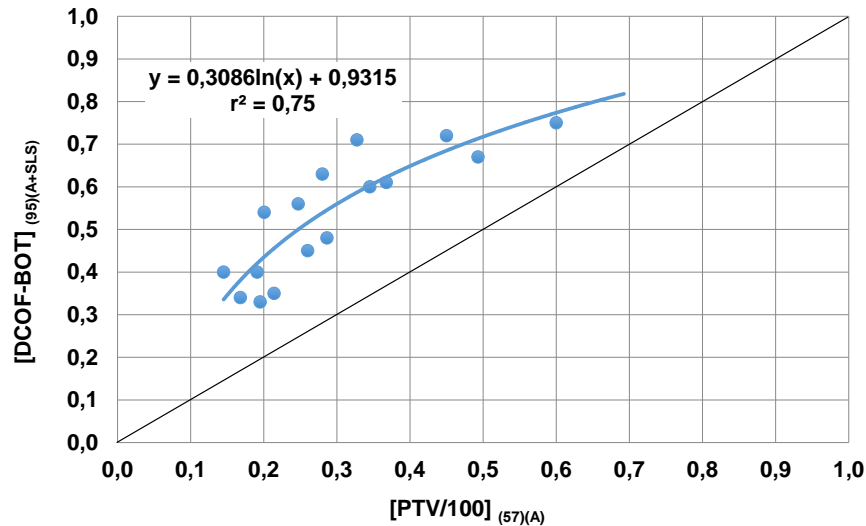


Figura 4.22 Relación entre  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

La línea de tendencia que mejor se ajustó a esta representación, con un coeficiente de correlación de 0,75, fue de tipo logarítmico, como era de esperar, de ecuación:

$$[DCOF - BOT]_{(95)(A+SLS)} = 0,3086 \ln[PTV/100]_{(57)(A)} + 0,9315 \quad (4.4)$$

En la Figura 4.23 se han representado, a efectos comparativos con la representación de la Figura 4.14, los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  y de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  de la Tabla 4.1 frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ . Como puede apreciarse se obtiene una representación casi idéntica a la de la citada Figura 4.14, dado que la relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  y los de  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  (ver Figura 4.10), se ajusta a una línea de tendencia recta con un coeficiente de correlación de 0,99, cuya ecuación es de la forma (Apartado 4.1.2.2.1):

$$[PTV/100]_{(57)(A+SLS)} = 0,8984[PTV/100]_{(57)(A)} + 0,0031 \quad (4.5)$$

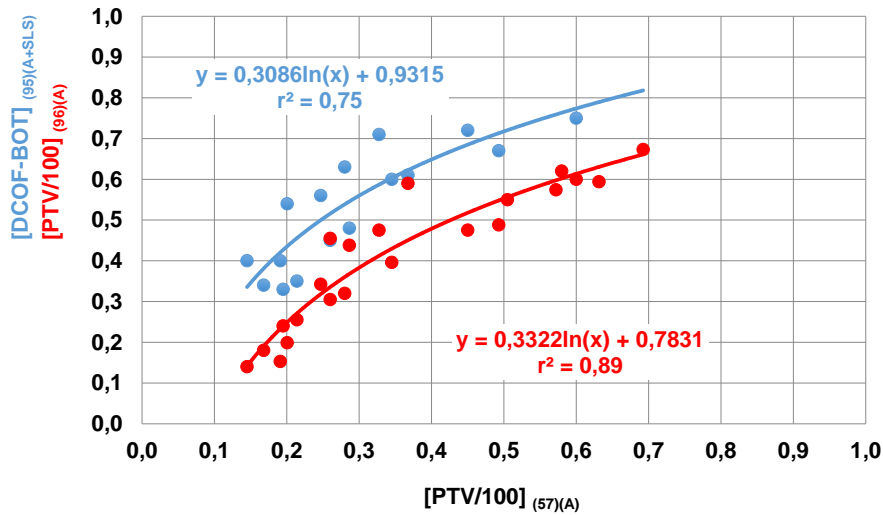


Figura 4.23 Comparación entre las representaciones del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

Dado que, según se indicó al comentar el contenido de la Tabla 4.1, inicialmente se disponía solo de 16 parejas de valores del  $[DCOF-BOT]_{(57)(A+SLS)}$  -  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  de entre las veintidós piezas preseleccionadas en el Apartado 4.1, se consideró de interés ampliar la información experimental sobre la relación entre ambos parámetros de medida de la resistencia al deslizamiento, recurriendo a los archivos de datos del ITC. De este modo se dispuso de un conjunto adicional de treinta y seis parejas de valores de dichos parámetros correspondientes a otras tantas piezas cerámicas industriales, diferentes a las veintidós preseleccionadas, que se muestran en la Tabla 4.6.

En la Figura 4.24 se han representado, por separado, las parejas de valores  $[DCOF-BOT]_{(57)(A+SLS)}$  -  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  correspondientes a los dieciséis modelos inicialmente seleccionados (marcadores de color rojo), y las correspondientes a las treinta y seis piezas industriales elegidas (marcadores de color azul). Como puede apreciarse, las curvas representativas de las respectivas líneas de tendencia casi coinciden, lo cual confirma la validez de ambas representaciones.

En consecuencia, se decidió representar en un solo gráfico, las cincuenta y dos parejas de valores  $[DCOF-BOT]_{(57)(A+SLS)}$  -  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  disponibles. El resultado obtenido se muestra en la Figura 4.25.

**Tabla 4.6** Valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , correspondientes a un conjunto de 36 piezas cerámicas industriales.

Muestra	$[PTV/100]_{(57)(A)}$	$[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$	Tipo de superficie
PI26	0,18	0,41	lisa
PI27	0,35	0,54	lisa
PI28	0,47	0,67	lisa
PI29	0,48	0,77	lisa
PI30	0,57	0,75	lisa
PI31	0,17	0,47	lisa
PI32	0,38	0,63	lisa
PI33	0,53	0,71	relieve
PI34	0,32	0,64	lisa
PI35	0,35	0,54	lisa
PI36	0,33	0,53	lisa
PI37	0,2	0,39	lisa
PI38	0,14	0,22	lisa
PI39	0,3	0,57	lisa
PI40	0,5	0,65	lisa
PI41	0,52	0,62	relieve
PI42	0,48	0,66	lisa
PI43	0,34	0,71	lisa
PI44	0,28	0,65	lisa
PI45	0,65	0,77	relieve
PI46	0,29	0,46	lisa
PI47	0,58	0,73	relieve
PI48	0,6	0,73	relieve
PI49	0,61	0,61	lisa
PI50	0,37	0,74	lisa
PI51	0,57	0,71	lisa
PI52	0,5	0,72	lisa
PI53	0,58	0,64	lisa
PI54	0,62	0,71	lisa
PI55	0,38	0,74	lisa
PI56	0,38	0,73	lisa
PI57	0,37	0,72	lisa
PI58	0,16	0,36	lisa
PI59	0,22	0,59	lisa
PI60	0,46	0,74	lisa
PI61	0,28	0,62	lisa

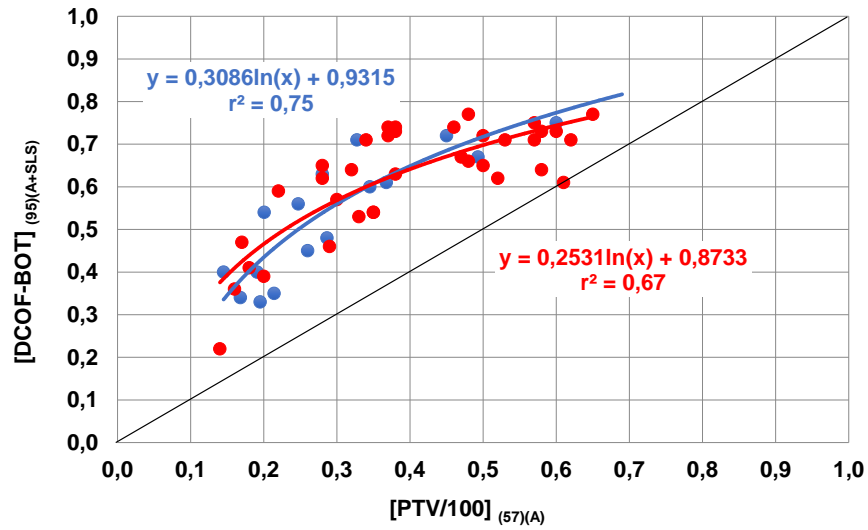


Figura 4.24 Comparación entre las representaciones del  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  correspondientes a los 16 modelos preseleccionados y la obtenidos para las piezas industriales que se detallan en la tabla 4.6.

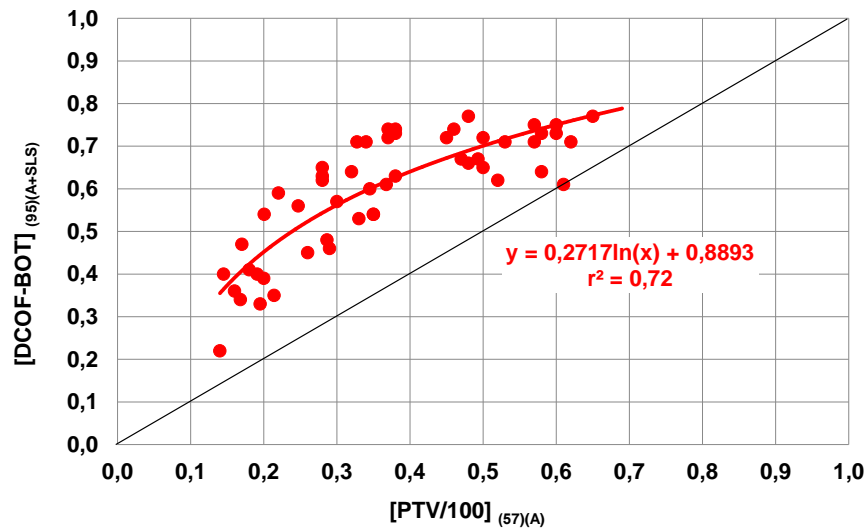


Figura 4.25 Relación entre los valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  del conjunto de 52 muestras

La mejor línea de tendencia que se adapta a los datos representados en la Figura 4.25 es de la forma:

$$[DCOF - BOT]_{(95)(A+SLS)} = 0,2717 \ln[PTV/100]_{(57)(A)} + 0,8893 \quad (4.6)$$

con un coeficiente de correlación  $r^2 = 0,72$ .

Esta ecuación es intermedia entre las dos ecuaciones representativas de las líneas de tendencia que se muestran en la Figura 4.24.

#### 4.1.3.1.3 Relación entre los valores de $[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$ y $[PTV/100]_{(57)(A)}$

En la Tabla 4.7 se muestran los valores de  $[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$  obtenidos para un conjunto de 51 piezas industriales de diferentes modelos, junto con los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ . En la Figura 4.26 se han representado los unos frente a los otros.

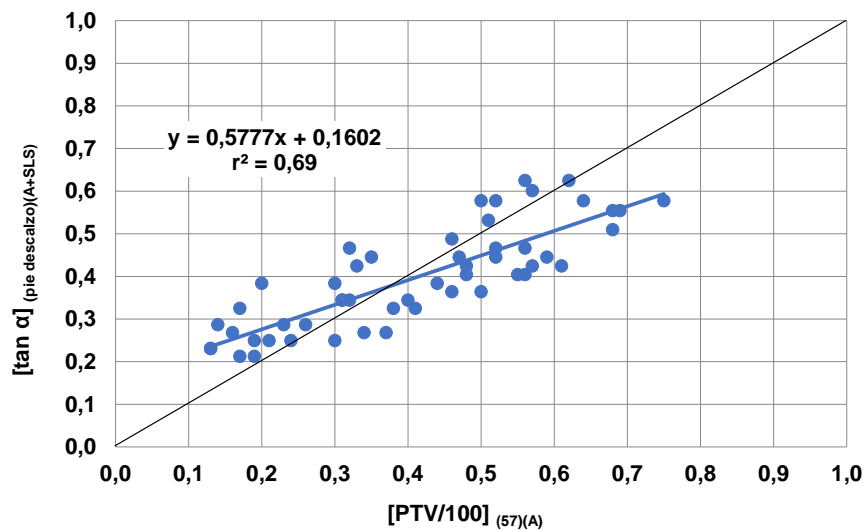


Figura 4.26 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

4.1 Estudio comparativo de diferentes métodos de medida de la resistencia al deslizamiento

**Tabla 4.7 Valores de  $[\tan\alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , correspondientes a un conjunto de 51 piezas cerámicas industriales.**

Muestra	$[PTV/100]_{(57)(A)}$	$[\tan\alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$	Tipo de superficie
PI62	0,17	0,21	relieve
PI63	0,13	0,23	lisa
PI64	0,21	0,25	relieve
PI65	0,24	0,25	lisa
PI66	0,30	0,25	lisa
PI67	0,19	0,25	lisa
PI68	0,37	0,27	relieve
PI69	0,34	0,27	relieve
PI70	0,14	0,29	lisa
PI71	0,26	0,29	relieve
PI72	0,38	0,32	relieve
PI73	0,41	0,32	lisa
PI74	0,32	0,34	lisa
PI75	0,31	0,34	lisa
PI76	0,31	0,34	lisa
PI77	0,40	0,34	lisa
PI78	0,46	0,36	lisa
PI79	0,20	0,38	lisa
PI80	0,30	0,38	relieve
PI81	0,56	0,40	relieve
PI82	0,48	0,40	lisa
PI83	0,55	0,40	relieve
PI84	0,33	0,42	lisa
PI85	0,61	0,42	lisa
PI86	0,35	0,45	lisa
PI87	0,47	0,45	relieve
PI88	0,56	0,47	lisa
PI89	0,68	0,51	lisa
PI90	0,51	0,53	lisa
PI91	0,68	0,55	lisa
PI92	0,69	0,55	lisa
PI93	0,50	0,58	relieve
PI94	0,52	0,58	relieve
PI95	0,57	0,60	relieve
PI96	0,56	0,62	relieve
PI97	0,62	0,62	relieve
PI98	0,48	0,42	lisa
PI99	0,57	0,42	relieve
PI100	0,64	0,58	relieve
PI101	0,50	0,36	lisa
PI102	0,52	0,47	lisa
PI103	0,23	0,29	lisa
PI104	0,75	0,58	lisa
PI105	0,44	0,38	lisa
PI106	0,16	0,27	lisa
PI107	0,17	0,32	lisa
PI108	0,32	0,47	lisa
PI109	0,19	0,21	lisa
PI110	0,52	0,45	lisa
PI111	0,46	0,49	lisa
PI112	0,59	0,45	relieve



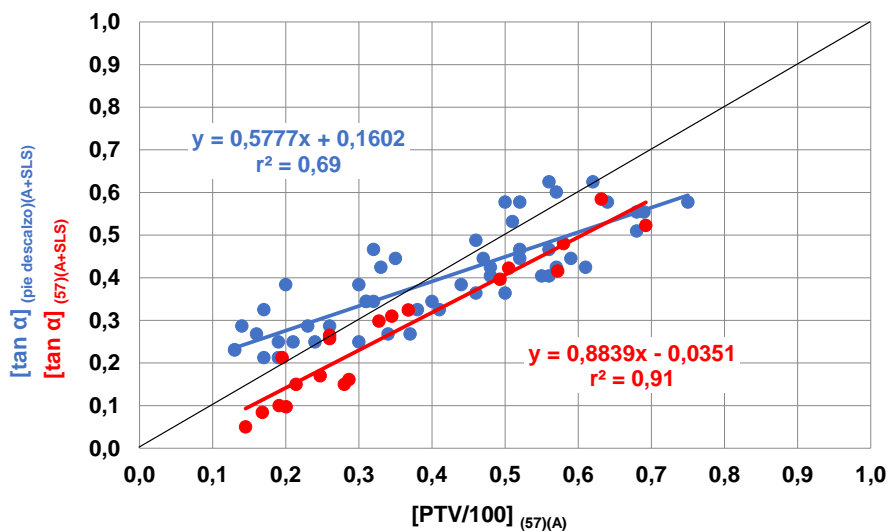
La línea de tendencia que mejor se ha ajustado a los datos representados ha sido una línea recta de ecuación:

$$[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)} = 0,5777[PTV/100]_{(57)(A)} + 0,1602 \quad (4.7)$$

con un coeficiente de correlación  $r^2 = 0,69$ .

Al determinar la resistencia al deslizamiento mediante el ensayo de la rampa, en algún caso, se ha parecido apreciar cierto paralelismo, entre los resultados obtenidos al aplicarlo con pie descalzo y cuando se utiliza calzado de suela lisa de caucho, con dureza IRHD 57. Con el fin de comprobarlo, en la Figura 4.27 se ha representado, por un lado, los datos experimentales de la Figura 4.26  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , usando marcadores azules, y por otro, los de la  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  frente a  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , utilizando marcadores rojos. Como puede apreciarse, una parte importante de los marcadores rojos se integran en la nube de puntos de los marcadores azules.

Por otra parte, las líneas de tendencia (rectas), correspondientes a cada conjunto de datos, confluyen, coincidiendo prácticamente, para valores del  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  mayores que 0,6.



**Figura 4.27** Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  y  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  y los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

De lo que antecede se deduce que, en base a la información experimental manejada, puede aceptarse que los datos que se obtienen a partir de las medidas en la rampa, usando calzado de suela lisa de caucho de dureza IRHD

57 y agua+SLS como líquido contaminante, son bastante representativos (dan valores algo más bajos, en general) de los que se obtienen, utilizando el mismo dispositivo de medida y contaminante, con el pie descalzo.

A una conclusión análoga se hubiera llegado caso de haber representado los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  frente a los correspondientes de  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$ .

#### 4.1.3.2 Validez de las correlaciones obtenidas

##### 4.1.3.2.1 Relación entre los valores de $[PTV/100]_{(96)(A)}$ y $[PTV/100]_{(57)(A)}$

En la Tabla 4.8 se muestran los valores experimentales del  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  y del  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  obtenidos para los 22 modelos preseleccionados (ver Tabla 4.1) y para las 25 piezas industriales detalladas en la Tabla 4.3, así como los respectivos valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  calculados, mediante la ecuación (4.3), partiendo de los correspondientes experimentales de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ . También se muestran los valores de la diferencia entre los valores calculados y los experimentales de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$ .

Como puede apreciarse, tanto en dicha tabla como en la Figura 4.28, la concordancia entre los valores experimentales y los calculados de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  es muy buena, excepto en el caso de los modelos de referencia 3.29, 5.51 y PI25, para los que la diferencia es mayor que 0,1.

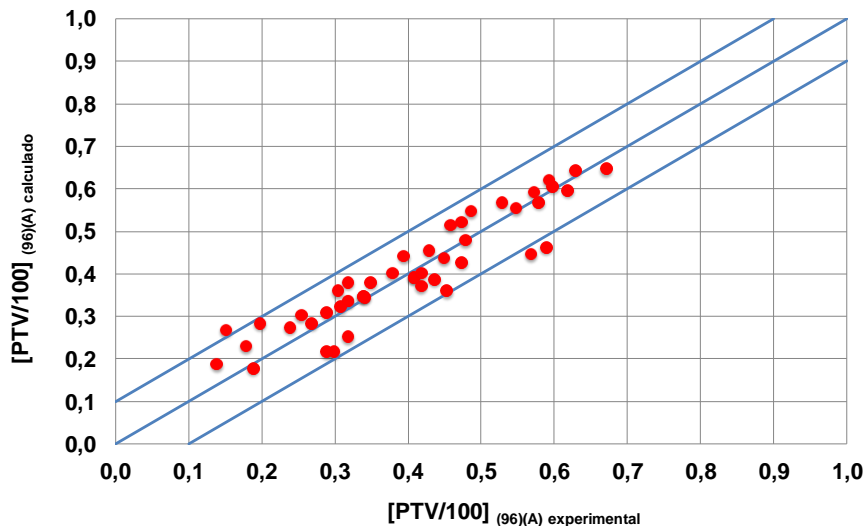


Figura 4.28 Relación entre los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  experimentales y calculados a partir de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

**Tabla 4.8** Valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  experimentales y calculados a partir de los correspondientes  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  correspondientes mediante la ecuación (4.3).

Muestra	$[PTV/100]_{(57)(A)}$ experimental	$[PTV/100]_{(96)(A)}$ experimental	$[PTV/100]_{(96)(A)}$ calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,40	0,44	0,04
1.2	0,28	0,32	0,38	0,06
1.3	0,20	0,20	0,28	0,08
1.4	0,25	0,34	0,34	0,00
2.13	0,57	0,57	0,59	0,01
2.14	0,58	0,62	0,59	-0,03
2.16	0,33	0,48	0,42	-0,05
2.17	0,26	0,46	0,36	-0,10
2.18	0,49	0,49	0,55	0,06
3.19	0,51	0,55	0,55	0,00
3.28	0,17	0,18	0,23	0,05
3.29	0,19	0,15	0,27	0,11
3.30	0,20	0,24	0,27	0,03
3.32	0,26	0,31	0,36	0,05
3.33	0,15	0,14	0,19	0,05
4.35	0,45	0,48	0,52	0,04
4.40	0,21	0,26	0,30	0,04
5.50	0,60	0,60	0,60	0,00
5.51	0,37	0,59	0,46	-0,13
5.52	0,63	0,59	0,62	0,02
5.53	0,29	0,44	0,39	-0,05
5.54	0,69	0,67	0,65	-0,03
PI1	0,29	0,41	0,39	-0,02
PI2	0,25	0,34	0,35	0,01
PI3	0,24	0,32	0,33	0,01
PI4	0,23	0,31	0,32	0,01
PI5	0,22	0,29	0,31	0,02
PI6	0,27	0,42	0,37	-0,05
PI7	0,18	0,32	0,25	-0,07
PI8	0,16	0,30	0,21	-0,09
PI9	0,16	0,29	0,21	-0,08
PI10	0,34	0,45	0,44	-0,01
PI11	0,28	0,35	0,38	0,03
PI12	0,20	0,27	0,28	0,01
PI13	0,30	0,38	0,40	0,02
PI14	0,53	0,53	0,57	0,04
PI15	0,53	0,58	0,57	-0,01
PI16	0,68	0,63	0,64	0,01
PI17	0,29	0,41	0,39	-0,02
PI18	0,25	0,34	0,35	0,01
PI19	0,24	0,32	0,33	0,01
PI20	0,44	0,46	0,51	0,05
PI21	0,39	0,48	0,48	0,00
PI22	0,14	0,19	0,17	-0,02
PI23	0,36	0,43	0,45	0,02
PI24	0,30	0,42	0,40	-0,02
PI25	0,35	0,57	0,44	-0,13

De la Tabla 4.8 y de la figura 4.28 se deduce la efectividad de la ecuación (4.3) para predecir los valores experimentales de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  a partir de los correspondientes  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , ya que solo 3 de los valores calculados difieren de los experimentales en  $\pm 0,1$  en un total de 47 muestras (6,4%).

#### 4.1.3.2.2 Relación entre los valores del $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$ y $[PTV/100]_{(57)(A)}$

En la Tabla 4.9 se muestran los valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.6), a partir de los respectivos experimentales de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  para 16 de los 22 modelos preseleccionados, de los que se disponía de valores del coeficiente de fricción dinámico medidos mediante el BOT, así como de las 36 piezas industriales que se detallan en la Tabla 4.6. En la Figura 4.29 se puede apreciar visualmente la relación entre los respectivos valores experimentales y los calculados.

Como puede apreciarse, la concordancia entre los valores experimentales de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  y los calculados mediante la ecuación (4.6) es bastante buena aun cuando, en este caso, en 10 de los 52 modelos (19,2%) la diferencia entre el valor calculado y el experimental es superior a  $\pm 0,1$ .

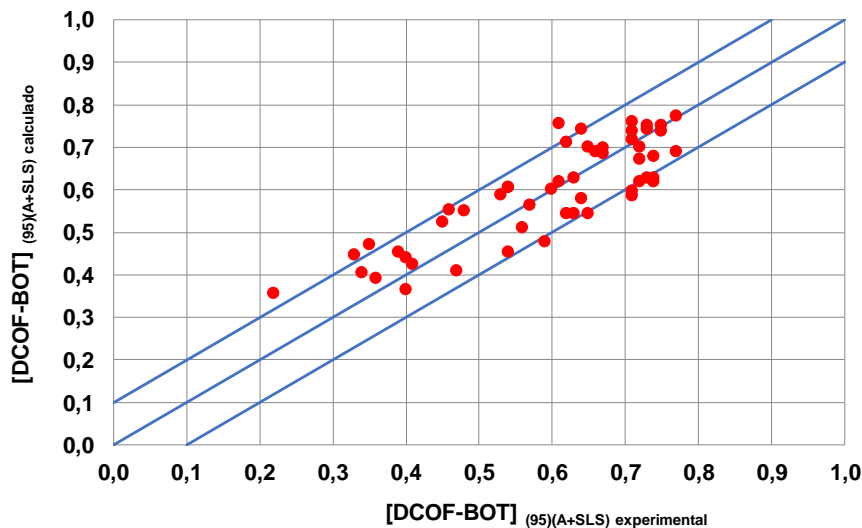


Figura 4.29 Relación entre los valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  experimentales y calculados a partir de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

**Tabla 4.9** Valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  experimentales y calculados a partir de los correspondientes  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  correspondientes mediante la ecuación (4.6).

Muestra	$[PTV/100]_{(57)(A)}$ experimental	$[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$ experimental	$[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$ calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,60	0,60	0,00
1.2	0,28	0,63	0,54	-0,09
1.3	0,20	0,54	0,45	-0,09
1.4	0,25	0,56	0,51	-0,05
2.16	0,33	0,71	0,59	-0,12
2.18	0,49	0,67	0,70	0,03
3.28	0,17	0,34	0,40	0,06
3.29	0,19	0,40	0,44	0,04
3.30	0,20	0,33	0,45	0,12
3.32	0,26	0,45	0,52	0,07
3.33	0,15	0,40	0,36	-0,04
4.35	0,45	0,72	0,67	-0,05
4.40	0,21	0,35	0,47	0,12
5.50	0,60	0,75	0,75	0,00
5.51	0,37	0,61	0,62	0,01
5.53	0,29	0,48	0,55	0,07
PI26	0,18	0,41	0,42	0,01
PI27	0,35	0,54	0,60	0,06
PI28	0,47	0,67	0,68	0,01
PI29	0,48	0,77	0,69	-0,08
PI30	0,57	0,75	0,74	-0,01
PI31	0,17	0,47	0,41	-0,06
PI32	0,38	0,63	0,63	0,00
PI33	0,53	0,71	0,72	0,01
PI34	0,32	0,64	0,58	-0,06
PI35	0,35	0,54	0,60	0,06
PI36	0,33	0,53	0,59	0,06
PI37	0,20	0,39	0,45	0,06
PI38	0,14	0,22	0,36	0,14
PI39	0,30	0,57	0,56	-0,01
PI40	0,50	0,65	0,70	0,05
PI41	0,52	0,62	0,71	0,09
PI42	0,48	0,66	0,69	0,03
PI43	0,34	0,71	0,60	-0,11
PI44	0,28	0,65	0,54	-0,11
PI45	0,65	0,77	0,77	0,00
PI46	0,29	0,46	0,55	0,09
PI47	0,58	0,73	0,74	0,01
PI48	0,60	0,73	0,75	0,02
PI49	0,61	0,61	0,75	0,14
PI50	0,37	0,74	0,62	-0,12
PI51	0,57	0,71	0,74	0,03
PI52	0,50	0,72	0,70	-0,02
PI53	0,58	0,64	0,74	0,10
PI54	0,62	0,71	0,76	0,05
PI55	0,38	0,74	0,63	-0,11
PI56	0,38	0,73	0,63	-0,10
PI57	0,37	0,72	0,62	-0,10
PI58	0,16	0,36	0,39	0,03
PI59	0,22	0,59	0,48	-0,11
PI60	0,46	0,74	0,68	-0,06
PI61	0,28	0,62	0,54	-0,08

4.1.3.2.3 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$

En la Tabla 4.10 se muestran los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.7), a partir de los respectivos experimentales de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , para las 51 piezas industriales que se referencian en la Tabla 4.7. En la Figura 4.30 se han representado los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  calculados frente a los obtenidos experimentalmente.

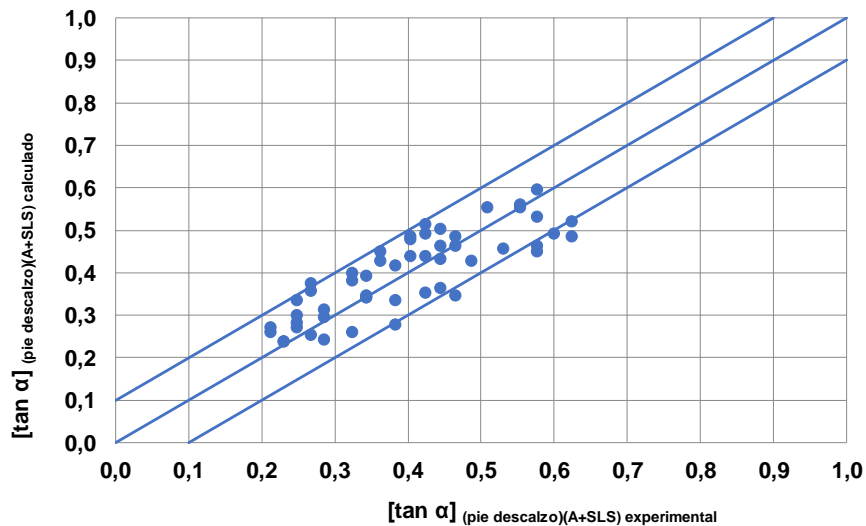


Figura 4.30 Relación entre los valores de  $[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$  experimentales y calculados a partir de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ .

Como puede apreciarse, tanto en la Tabla 4.10 como en la Figura 4.30, la concordancia entre los valores calculados mediante la ecuación (4.7) y los experimentales es bastante buena en el 88% de los casos (en solo seis modelos la diferencia es mayor que 0,1).

**Tabla 4.10** Valores de  $[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$  experimentales y calculados a partir de los correspondientes  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  correspondientes mediante la ecuación (4.8).

Muestra	$[PTV/100]_{(57)(A)}$ experimental	$[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$ experimental	$[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$ calculado	Diferencia
PI62	0,17	0,21	0,26	0,09
PI63	0,13	0,23	0,24	0,11
PI64	0,21	0,25	0,28	0,07
PI65	0,24	0,25	0,30	0,06
PI66	0,30	0,25	0,33	0,03
PI67	0,19	0,25	0,27	0,08
PI68	0,37	0,27	0,37	0,00
PI69	0,34	0,27	0,36	0,02
PI70	0,14	0,29	0,24	0,10
PI71	0,26	0,29	0,31	0,05
PI72	0,38	0,32	0,38	0,00
PI73	0,41	0,32	0,40	-0,01
PI74	0,32	0,34	0,35	0,03
PI75	0,31	0,34	0,34	0,03
PI76	0,31	0,34	0,34	0,03
PI77	0,40	0,34	0,39	-0,01
PI78	0,46	0,36	0,43	-0,03
PI79	0,20	0,38	0,28	0,08
PI80	0,30	0,38	0,33	0,03
PI81	0,56	0,40	0,48	-0,08
PI82	0,48	0,40	0,44	-0,04
PI83	0,55	0,40	0,48	-0,07
PI84	0,33	0,42	0,35	0,02
PI85	0,61	0,42	0,51	-0,10
PI86	0,35	0,45	0,36	0,01
PI87	0,47	0,45	0,43	-0,04
PI88	0,56	0,47	0,48	-0,08
PI89	0,68	0,51	0,55	-0,13
PI90	0,51	0,53	0,46	-0,05
PI91	0,68	0,55	0,55	-0,13
PI92	0,69	0,55	0,56	-0,13
PI93	0,50	0,58	0,45	-0,05
PI94	0,52	0,58	0,46	-0,06
PI95	0,57	0,60	0,49	-0,08
PI96	0,56	0,62	0,48	-0,08
PI97	0,62	0,62	0,52	-0,10
PI98	0,48	0,42	0,44	-0,04
PI99	0,57	0,42	0,49	-0,08
PI100	0,64	0,58	0,53	-0,11
PI101	0,50	0,36	0,45	-0,05
PI102	0,52	0,47	0,46	-0,06
PI103	0,23	0,29	0,29	0,06
PI104	0,75	0,58	0,59	-0,16
PI105	0,44	0,38	0,41	-0,03
PI106	0,16	0,27	0,25	0,09
PI107	0,17	0,32	0,26	0,09
PI108	0,32	0,47	0,35	0,03
PI109	0,19	0,21	0,27	0,08
PI110	0,52	0,45	0,46	-0,06
PI111	0,46	0,49	0,43	-0,03
PI112	0,59	0,45	0,50	-0,09

## 4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

En este Apartado, se ha expresado la resistencia al deslizamiento en función del PTV (“Pendulum test value”), determinado con el Péndulo de Fricción, de acuerdo con la norma española *UNE-ENV 12633*. Según dicha norma, las medidas se han efectuado utilizando un deslizador liso de caucho de IRHD 57, en presencia de agua potable como contaminante.

Como se ha indicado en la Introducción (Apartado 1.1.1), diversos investigadores han estudiado la relación entre la resistencia al deslizamiento de baldosas cerámicas y la topografía de la cara vista de las mismas. Partiendo de un conjunto de modelos de pavimento cerámico diferentes, han tratado de relacionar los valores de la resistencia al deslizamiento (medida por diferentes métodos de ensayo) con ciertos parámetros representativos de su topografía considerados individualmente. Para comprobar la efectividad de las correlaciones resultantes, han utilizado diversos coeficientes (Spearman, Pearson, lineal), habiendo obtenido resultados muy variados, según el dispositivo utilizado para determinar la resistencia al deslizamiento, el parámetro de rugosidad medido o el coeficiente de correlación empleado.

Con la intención de contribuir al desarrollo de conocimiento sobre la relación entre la resistencia al deslizamiento de baldosas cerámicas y los parámetros representativos de su textura superficial (en adelante parámetros superficiales), se han estudiado cincuenta y dos modelos originales (sin utilización previa) de piezas, con estructura superficial diferente, tratando de abarcar el más amplio abanico posible de topografías. Estos modelos se han clasificado en cinco grupos, siguiendo las pautas indicadas en el Apartado 3.1.1.

En primer lugar, teniendo en cuenta simultáneamente los cincuenta y dos modelos de superficie considerados y partiendo de la información disponible en la bibliografía (*Grönqvist, R. et al 1990, Harris, G.W. & Shaw, S.R., 1988, HSE (Health Safety Executive), 1999, Chang, W.R., 1999, Chang, W.R. et al, 2000, Chang, W.R., 2000, Chang, W.R., 2001, Chang, W.R., 2002, Chang, W.R. 2004., Li, K.W., 2004, Derler, S. et al., 2005, Chang, W.R. et al., 2010, Bowman, R., 2010, Kim, I.J., 2013, Chang, W.R. et al., 2015, Chen, C.C., 2015, Terjék, A., 2018*), se ha ido evaluando la relación individual existente entre el valor de su resistencia al deslizamiento y el correspondiente de una serie de parámetros superficiales previamente elegidos. Esa relación se ha cuantificado en base al valor de los coeficientes de correlación lineal ( $r^2$ ) obtenidos para las mejores líneas de tendencia o regresión resultantes. Los resultados se han contrastado con los obtenidos por otros investigadores.

En segundo lugar, con vistas a tratar de mejorar el ajuste de las correlaciones obtenidas a los datos experimentales, se han agrupado los modelos estudiados en dos subconjuntos, por separado, atendiendo al criterio de la



naturaleza de su perfil: plano o liso (Grupos 1 y 2) y ondulado o con relieve irregular o geométrico (Grupos 3 a 5).

Asimismo, se ha estudiado la posible mejora de los ajustes, estudiando cada uno de los cinco Grupos de modelos considerado por separado.

Finalmente, se ha ensayado un procedimiento estadístico, para tratar de predecir los valores de la resistencia al deslizamiento de los modelos estudiados, partiendo de los correspondientes valores experimentales de un reducido conjunto de parámetros de superficie autoseleccionados por el propio método.

Este método estadístico se ha aplicado primero a los cincuenta y dos modelos de superficie elegidos, considerados conjuntamente y, luego, a los modelos de los grupos 1 y 2 y a los de los grupos 3 a 5, considerados por separado.

#### **4.2.1 Valores de los parámetros superficiales de las muestras estudiadas**

En las tablas 7.4 y 7.5 del Apartado 7.2.1 se detalla el valor de los parámetros representativos de la topografía superficial que se han medido en las 52 muestras nuevas inicialmente seleccionadas.

A partir de la información disponible en la bibliografía (Grönqvist, R. et al 1990, Harris, G.W. & Shaw, S.R., 1988, HSE (Health Safety Executive), 1999, Chang, W.R., 1999, Chang, W.R. et al, 2000, Chang, W.R., 2000, Chang, W.R., 2001, Chang, W.R., 2002, Chang, W.R. 2004., Li, K.W., 2004, Derler, S. et al., 2005, Chang, W.R. et al., 2010, Bowman, R., 2010, Kim, I.J., 2013, Chang, W.R. et al., 2015, Chen, C.C., 2015, Terjék, A., 2018) y de los conocimientos adquiridos en los diversos proyectos de investigación en los que ha intervenido el ITC (ULTRAGRIP FP7-SME-2010-1 262413, FLOORSHOE PID-560520-2009-6), para realizar este estudio, se han preseleccionado trece parámetros representativos del perfil de rugosidad ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_{z_{iso}}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_p$ ,  $R_{Pc}$ ,  $R_{Sm}$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta q$ ,  $l_0$ , y  $R_k$ ) y seis parámetros representativos del perfil de ondulación ( $S_p$ ,  $S_t$ ,  $S_z$ ,  $S_{\Delta q}$ ,  $S_{sc}$  y  $S_{dr}$ ), cuyos valores, para los 52 modelos de superficie de pavimento cerámico previamente elegidos se muestran por separado en la Tabla 4.11 y Tabla 4.12, junto con los correspondientes de la resistencia al deslizamiento expresada como [PTV/100].

4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

**Tabla 4.11. Valores de la resistencia al deslizamiento y de los correspondientes parámetros de rugosidad elegidos.**

Muestra	PTV/100	Ra μm	Rz μm	Rt μm	Rq μm	Rz <sub>ISO</sub> μm	Rpm μm	Rp μm
1.1	0,35	1,1	8,0	8,6	1,3	3,3	-	2,5
1.2	0,28	0,89	7,8	8,8	1,1	2,9	-	2,4
1.3	0,20	0,45	5,5	5,9	0,60	1,6	-	0,98
1.4	0,25	0,67	5,8	6,2	0,85	2,3	-	1,7
1.5	0,17	0,70	4,5	4,9	0,89	3,2	1,6	2,5
2.6	0,51	2,3	14	15	2,9	8,8	4,9	8,0
2.7	0,62	1,5	12	13	2,2	6,4	4,0	8,1
2.8	0,45	1,3	8,9	9,4	1,7	6,4	2,2	3,8
2.9	0,67	2,9	22	22	4,0	11	6,1	12
2.10	0,39	1,6	9,2	10	2,0	6,7	3,7	5,8
2.11	0,23	1,1	8,1	8,7	1,5	5,7	2,4	3,6
2.12	0,62	2,3	15	16	2,9	11	5,1	7,6
2.13	0,57	2,1	16	17	2,6	4,8	-	5,4
2.14	0,58	1,4	10	11	1,9	5,7	3,6	7,1
2.15	0,58	2,6	17	18	3,3	12	5,9	9,3
2.16	0,33	0,58	6,2	6,5	0,91	3,3	2,0	4,3
2.17	0,26	0,63	4,4	5,0	0,85	2,8	1,4	2,9
2.18	0,49	1,0	8,7	9,2	1,3	3,1	-	2,8
2.19	0,51	1,5	9,1	9,9	1,9	5,3	3,2	5,8
2.20	0,26	0,93	6,4	6,9	1,2	3,8	2,3	4,3
2.21	0,16	0,78	5,7	6,1	1,1	3,5	1,8	3,6
2.22	0,15	0,75	5,2	5,7	1,0	3,1	1,4	2,3
3.23	0,47	1,6	11	12	2,2	6,3	4,0	7,6
3.25	0,21	0,83	5,1	5,8	1,1	3,6	2,0	3,3
3.26	0,25	0,50	2,7	3,2	0,62	1,4	0,84	1,8
3.27	0,18	0,71	4,6	5,0	0,93	2,6	1,6	2,9
3.28	0,17	0,50	5,1	5,5	0,61	1,5	-	1,3
3.29	0,19	0,42	2,9	3,2	0,51	1,3	-	0,89
3.30	0,20	0,84	5,6	6,0	1,1	3,1	2,3	4,2
3.31	0,51	2,5	16	17	3,2	10	5,7	9,3
3.32	0,26	0,89	6,5	7,0	1,2	4,3	1,8	2,9
3.33	0,15	0,33	2,7	2,9	0,42	1,2	-	0,81
3.34	0,12	0,30	3,3	3,5	0,44	1,9	0,81	1,5
4.35	0,45	2,1	12	13	2,7	8,1	4,5	7,1
4.36	0,50	1,9	11	12	2,4	7,7	3,9	6,2
4.38	0,49	3,0	19	20	3,9	12	5,6	8,0
4.39	0,34	1,6	9,3	10	2,1	5,9	3,3	5,8
4.40	0,21	0,85	7,0	7,5	1,1	2,2	-	2,3
4.41	0,45	1,8	11	13	2,5	4,7	2,8	7,7
4.42	0,30	1,9	10	12	2,5	5,5	3,1	6,7
4.43	0,42	3,1	17	19	3,9	12	6,6	9,5
4.44	0,43	3,1	17	18	3,8	11	6,0	9,0
4.45	0,51	4,8	26	28	6,2	12	7,1	13
4.46	0,45	2,4	15	16	3,1	9,5	5,7	9,7
4.47	0,56	3,9	22	24	4,9	15	7,6	12
4.48	0,62	2,4	15	16	3,1	9,9	5,5	9,4
4.49	0,62	5,3	26	27	6,5	15	8,9	14
5.50	0,60	2,6	16	17	3,3	9,8	5,7	9,3
5.51	0,37	2,5	14	16	3,3	7,1	4,7	8,6
5.52	0,63	2,2	15	15	2,7	5,7	-	4,4
5.53	0,29	0,80	7,3	7,5	1,0	2,0	-	2,5
5.54	0,69	2,5	17	18	3,0	5,9	-	6,2

**Tabla 4.11 Cont. Valores de la resistencia al deslizamiento y de los correspondientes parámetros de rugosidad elegidos.**

Muestra	PTV/100	RPc picos/cm	RSm mm/pico	$\Delta a$ rad	$\Delta q$ rad	$I_0$	Rk
1.1	0,35	264	0,045	0,17	0,23	1,027	3,3
1.2	0,28	287	0,043	0,16	0,21	1,025	2,9
1.3	0,20	410	0,030	0,11	0,15	1,013	1,1
1.4	0,25	302	0,038	0,13	0,17	1,016	2,1
1.5	0,17	185	0,059	0,077	0,10	1,006	2,4
2.6	0,51	115	0,095	0,16	0,23	1,027	7,4
2.7	0,62	99	0,11	0,11	0,17	1,017	4,5
2.8	0,45	274	0,039	0,21	0,28	1,036	3,8
2.9	0,67	146	0,075	0,21	0,28	1,043	7,5
2.10	0,39	135	0,078	0,13	0,18	1,018	5,5
2.11	0,23	182	0,057	0,13	0,18	1,017	3,4
2.12	0,62	165	0,063	0,23	0,32	1,048	7,3
2.13	0,57	157	0,078	0,20	0,27	1,040	7,0
2.14	0,58	159	0,069	0,12	0,19	1,018	3,8
2.15	0,58	151	0,070	0,23	0,33	1,053	8,1
2.16	0,33	227	0,049	0,073	0,13	1,009	1,5
2.17	0,26	198	0,055	0,072	0,10	1,006	2,1
2.18	0,49	226	0,060	0,14	0,19	1,020	3,4
2.19	0,51	107	0,11	0,096	0,15	1,013	5,1
2.20	0,26	133	0,084	0,076	0,11	1,007	3,0
2.21	0,16	184	0,059	0,082	0,11	1,007	2,4
2.22	0,15	157	0,072	0,063	0,095	1,005	2,2
3.23	0,47	128	0,087	0,11	0,17	1,016	4,7
3.25	0,21	164	0,064	0,082	0,11	1,007	2,9
3.26	0,25	231	0,054	0,056	0,071	1,004	1,8
3.27	0,18	136	0,082	0,054	0,080	1,004	2,3
3.28	0,17	289	0,065	0,075	0,099	1,006	1,5
3.29	0,19	308	0,045	0,075	0,098	1,006	1,4
3.30	0,20	109	0,10	0,055	0,081	1,004	2,6
3.31	0,51	115	0,094	0,18	0,25	1,033	8,1
3.32	0,26	199	0,053	0,10	0,14	1,011	2,7
3.33	0,15	344	0,035	0,072	0,10	1,006	1,00
3.34	0,12	318	0,035	0,062	0,11	1,009	0,91
4.35	0,45	144	0,075	0,17	0,23	1,028	6,7
4.36	0,50	144	0,074	0,15	0,21	1,024	6,2
4.38	0,49	132	0,081	0,24	0,32	1,050	9,0
4.39	0,34	125	0,089	0,11	0,15	1,014	5,6
4.40	0,21	142	0,12	0,084	0,11	1,007	2,7
4.41	0,45	183	0,074	0,12	0,16	1,015	5,6
4.42	0,30	108	0,12	0,11	0,15	1,013	6,1
4.43	0,42	117	0,091	0,22	0,29	1,044	10
4.44	0,43	112	0,10	0,19	0,26	1,034	10
4.45	0,51	82	0,14	0,18	0,25	1,038	14
4.46	0,45	93	0,12	0,15	0,22	1,027	8,0
4.47	0,56	115	0,094	0,26	0,36	1,061	13
4.48	0,62	134	0,080	0,19	0,26	1,035	7,6
4.49	0,62	69	0,16	0,21	0,28	1,045	19
5.50	0,60	107	0,10	0,17	0,25	1,032	8,6
5.51	0,37	77	0,15	0,12	0,17	1,017	8,7
5.52	0,63	157	0,073	0,24	0,31	1,047	7,2
5.53	0,29	149	0,11	0,082	0,11	1,008	2,2
5.54	0,69	195	0,059	0,29	0,39	1,071	8,1

4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

**Tabla 4.12 Valores de la resistencia al deslizamiento y de los correspondientes parámetros de ondulación elegidos.**

Muestra	PTV/100	Sp μm	St μm	Sz μm	SΔq μm/μm	Ssc 1/μm	Sdr %
1.1	0,35	43	115	81	0,063	0,0016	0,20
1.2	0,28	35	72	58	0,029	0,00063	0,043
1.3	0,20	13	62	38	0,017	0,00033	0,015
1.4	0,25	36	89	60	0,035	0,00095	0,060
1.5	0,17	36	79	61	0,048	0,0013	0,11
2.6	0,51	51	103	94	0,11	0,0030	0,59
2.7	0,62	69	112	89	0,10	0,0032	0,51
2.8	0,45	34	113	84	0,056	0,0015	0,16
2.9	0,67	110	134	126	0,12	0,0033	0,66
2.10	0,39	55	114	91	0,076	0,0022	0,29
2.11	0,23	45	108	98	0,078	0,0018	0,30
2.12	0,62	50	95	88	0,091	0,0026	0,41
2.13	0,57	85	206	103	0,12	0,0038	0,67
2.14	0,58	70	129	116	0,082	0,0024	0,34
2.15	0,58	75	135	124	0,12	0,0036	0,74
2.16	0,33	40	66	60	0,037	0,0013	0,069
2.17	0,26	88	128	120	0,076	0,0020	0,28
2.18	0,49	92	145	90	0,083	0,0024	0,34
2.19	0,51	47	120	80	0,073	0,0016	0,27
2.20	0,26	36	73	66	0,061	0,0018	0,18
2.21	0,16	43	95	86	0,058	0,0015	0,17
2.22	0,15	32	62	55	0,049	0,0012	0,12
3.23	0,47	137	252	223	0,12	0,0036	0,75
3.25	0,21	584	932	661	0,088	0,0018	0,38
3.26	0,25	129	190	167	0,11	0,0033	0,55
3.27	0,18	129	312	253	0,092	0,0022	0,42
3.28	0,17	160	276	243	0,13	0,0017	0,88
3.29	0,19	94	164	150	0,11	0,0015	0,62
3.30	0,20	78	143	131	0,11	0,0018	0,59
3.31	0,51	77	156	129	0,12	0,0036	0,68
3.32	0,26	118	471	445	0,12	0,0019	0,76
3.33	0,15	101	247	196	0,066	0,0011	0,22
3.34	0,12	71	153	132	0,030	0,00067	0,045
4.35	0,45	205	345	321	0,15	0,0033	1,1
4.36	0,50	241	521	388	0,18	0,0044	1,6
4.38	0,49	379	904	590	0,20	0,0039	1,9
4.39	0,34	393	693	627	0,16	0,0034	1,3
4.40	0,21	552	1.516	702	0,14	0,0028	1,0
4.41	0,45	350	465	425	0,17	0,0036	1,5
4.42	0,30	434	869	749	0,16	0,0042	1,3
4.43	0,42	397	684	621	0,19	0,0039	1,7
4.44	0,43	459	851	750	0,17	0,0045	1,4
4.45	0,51	345	659	596	0,30	0,0091	4,4
4.46	0,45	273	587	540	0,15	0,0036	1,1
4.47	0,56	272	704	572	0,21	0,0052	2,1
4.48	0,62	460	1.036	756	0,15	0,0042	1,1
4.49	0,62	145	278	254	0,30	0,0085	4,3
5.50	0,60	103	265	253	0,15	0,0037	1,2
5.51	0,37	801	1.649	1.599	0,68	0,0081	19
5.52	0,63	570	715	707	0,27	0,0038	3,4
5.53	0,29	542	681	661	0,23	0,0029	2,6
5.54	0,69	591	743	721	0,24	0,0037	2,9

A la vista de la definición de los parámetros superficiales elegidos es evidente que debe existir una cierta relación entre los valores de algunos de ellos. Para analizarlo, se procedió a representar los valores de cada uno de los trece parámetros de rugosidad, antes indicados, frente a los respectivos valores de cada uno de los restantes parámetros, para los cincuenta y dos modelos de superficie elegidos. Otro tanto se hizo con los seis parámetros de perfil de ondulación mencionados anteriormente.

En la Tabla 4.13 se muestran los valores de todos los coeficientes de regresión ( $r^2$ ) obtenidos en el caso de los parámetros representativos del perfil de rugosidad, considerando el ajuste de los datos a las líneas de regresión que presentaban un mejor valor de  $r^2$ . En la Figura 4.31 se muestra, a modo de ejemplo, las representaciones gráficas con mejor coeficiente de correlación ( $r^2$ ) obtenidas.

Como puede apreciarse en las mencionadas tabla y figura, se observan ciertas similitudes entre los valores de algunos de dichos parámetros, tal como es el caso de los conjuntos  $Ra-Rz-Rt-Rq-Rk$ ;  $Rz_{iso}-Rpm-Rp$  y  $\Delta a-\Delta q-l_0$ . En todas las representaciones correspondientes a estos conjuntos de parámetros, se obtienen ajustes, a líneas de regresión lineal, con coeficientes de correlación del orden de 0,95 o mayores.

En cambio, no se ha encontrado una relación demasiado buena entre los valores de los parámetros  $R_{Pc}$  y  $R_{Sm}$  y el resto de los parámetros ensayados, aunque si entre dichos dos parámetros, mediante ajuste de tipo potencial, para el que se obtiene un coeficiente de correlación de 0,90.

En la Tabla 4.14 se muestran los valores de todos los coeficientes de regresión ( $r^2$ ) obtenidos en el caso de los parámetros representativos del perfil de ondulación, considerando el ajuste de los datos a líneas de regresión rectas. En la Figura 4.32 se muestra, a modo de ejemplo, las representaciones gráficas con mejor coeficiente de correlación ( $r^2$ ) obtenidas.

En este caso, se observan correlaciones de tipo lineal entre los parámetros  $S_p$ ,  $S_t$  y  $S_z$ , con coeficientes de correlación entre 0,87 y 0,96.

En cambio, los parámetros  $S_{\Delta q}$ ,  $S_{sc}$  y  $S_{dr}$  se relacionan entre sí mejor mediante líneas de regresión de tipo potencial, para las que se obtienen coeficientes de correlación entre 0,84 y 0,99.

**Tabla 4.13 Relación entre los parámetros de rugosidad estudiados. Coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos.**

	Ra	Rz	Rt	Rq	Rk	Rz <sub>ISO</sub>	Rpm	Rp	$\Delta a$	$\Delta q$	$I_0$	RPC	RSm
Ra		<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	0,86	0,89	0,86	0,57	0,58	0,60	<i>0,58</i>	<i>0,47</i>
Rz	<b>0,95</b>		<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,90</b>	0,85	<b>0,94</b>	0,85	0,68	0,70	0,70	<i>0,45</i>	<i>0,37</i>
Rt	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>		<b>0,96</b>	<b>0,91</b>	0,85	<b>0,93</b>	0,86	0,67	0,70	0,70	<i>0,46</i>	<i>0,38</i>
Rq	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>		<b>0,97</b>	0,87	<b>0,90</b>	0,89	0,56	0,57	0,59	<i>0,59</i>	<i>0,46</i>
Rk	<b>0,99</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,97</b>		0,84	0,87	0,83	0,55	0,56	0,57	<i>0,61</i>	<i>0,49</i>
Rz <sub>ISO</sub>	0,86	0,85	0,85	0,87	0,84		<b>0,95</b>	0,87	0,59	0,63	0,61	<i>0,53</i>	<i>0,34</i>
Rpm	0,89	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	0,87	<b>0,95</b>		<b>0,92</b>	0,74	0,76	0,77	<i>0,54</i>	<i>0,47</i>
Rp	0,86	0,85	0,86	0,89	0,83	0,87	<b>0,92</b>		0,41	0,45	0,45	<i>0,69</i>	<i>0,51</i>
$\Delta a$	0,57	0,68	0,67	0,56	0,55	0,59	0,74	0,41		<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<i>0,08</i>	<i>0,04</i>
$\Delta q$	0,58	0,70	0,70	0,57	0,56	0,63	0,76	0,45	<b>0,99</b>		<b>0,98</b>	<i>0,09</i>	<i>0,04</i>
$I_0$	0,60	0,70	0,70	0,59	0,57	0,61	0,77	0,45	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>		<i>0,09</i>	<i>0,04</i>
RPC	<i>0,58</i>	<i>0,45</i>	<i>0,46</i>	<i>0,59</i>	<i>0,61</i>	<i>0,53</i>	<i>0,54</i>	<i>0,69</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>	<i>0,09</i>		<b>0,90</b>
RSm	<i>0,47</i>	<i>0,37</i>	<i>0,38</i>	<i>0,46</i>	<i>0,49</i>	<i>0,34</i>	<i>0,47</i>	<i>0,51</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	<b>0,90</b>	

**Nota:**  $r^2$  correspondiente a líneas de regresión lineal excepto valores en *cursiva* correspondientes a *líneas de regresión tipo potencial*.

**Tabla 4.14** Relación entre los parámetros de ondulación estudiados. Coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos.

	Sp	St	Sz	Sdq	Ssc	Sdr
Sp		0,87	<b>0,90</b>	0,54	0,28	0,37
St	0,87		<b>0,96</b>	0,61	0,36	0,47
Sz	<b>0,90</b>	<b>0,96</b>		0,69	0,38	0,55
Sdq	0,54	0,61	0,69		<i>0,84</i>	<b>0,99</b>
Ssc	0,28	0,36	0,38	<i>0,84</i>		<i>0,84</i>
Sdr	0,37	0,47	0,55	<b>0,99</b>	<i>0,84</i>	

**Nota:**  $r^2$  correspondiente a líneas de regresión lineal excepto valores en *cursiva* correspondientes a líneas de regresión tipo potencial.

4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

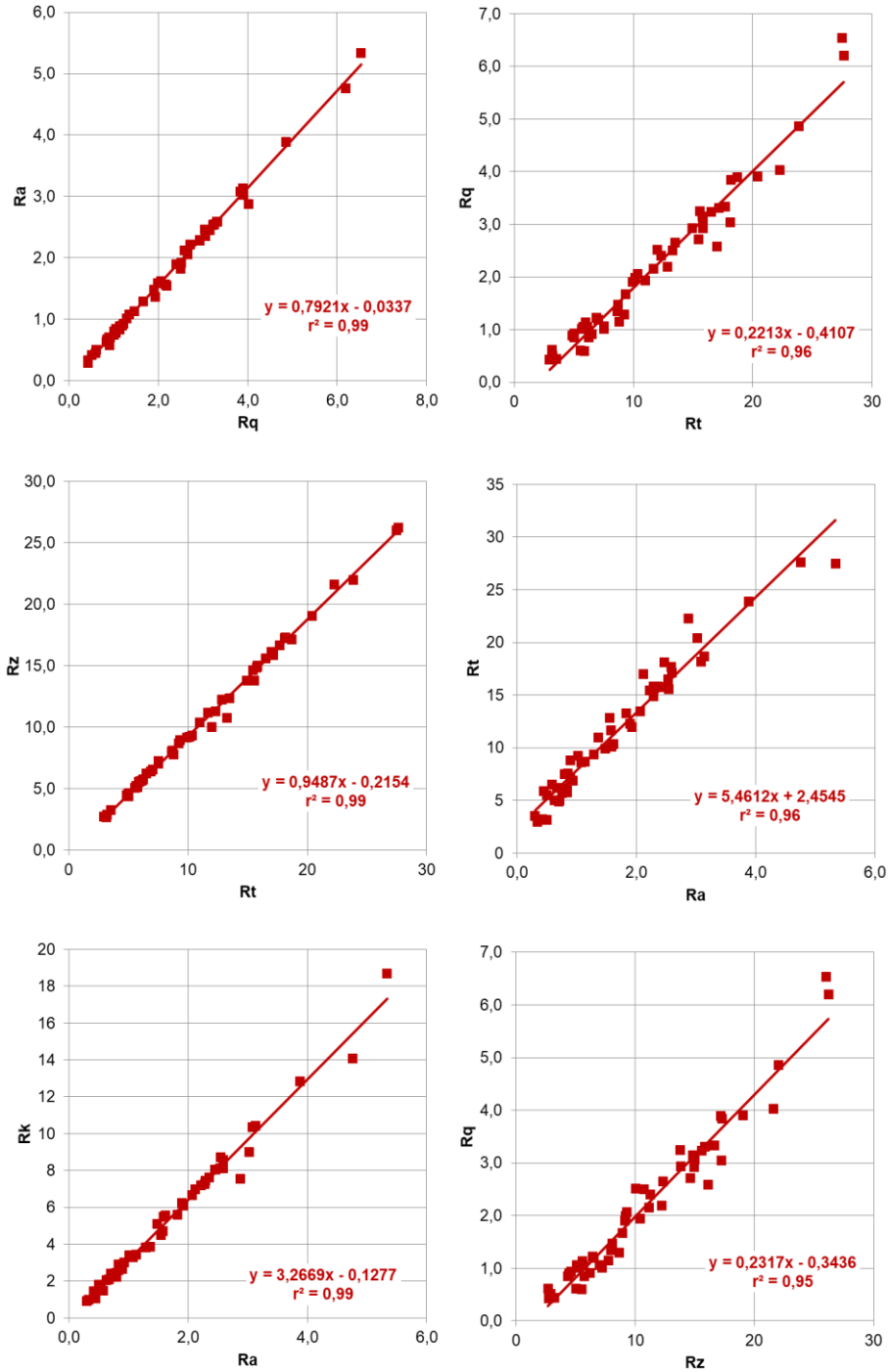


Figura 4.31 Mejores relaciones entre los parámetros de rugosidad estudiados.



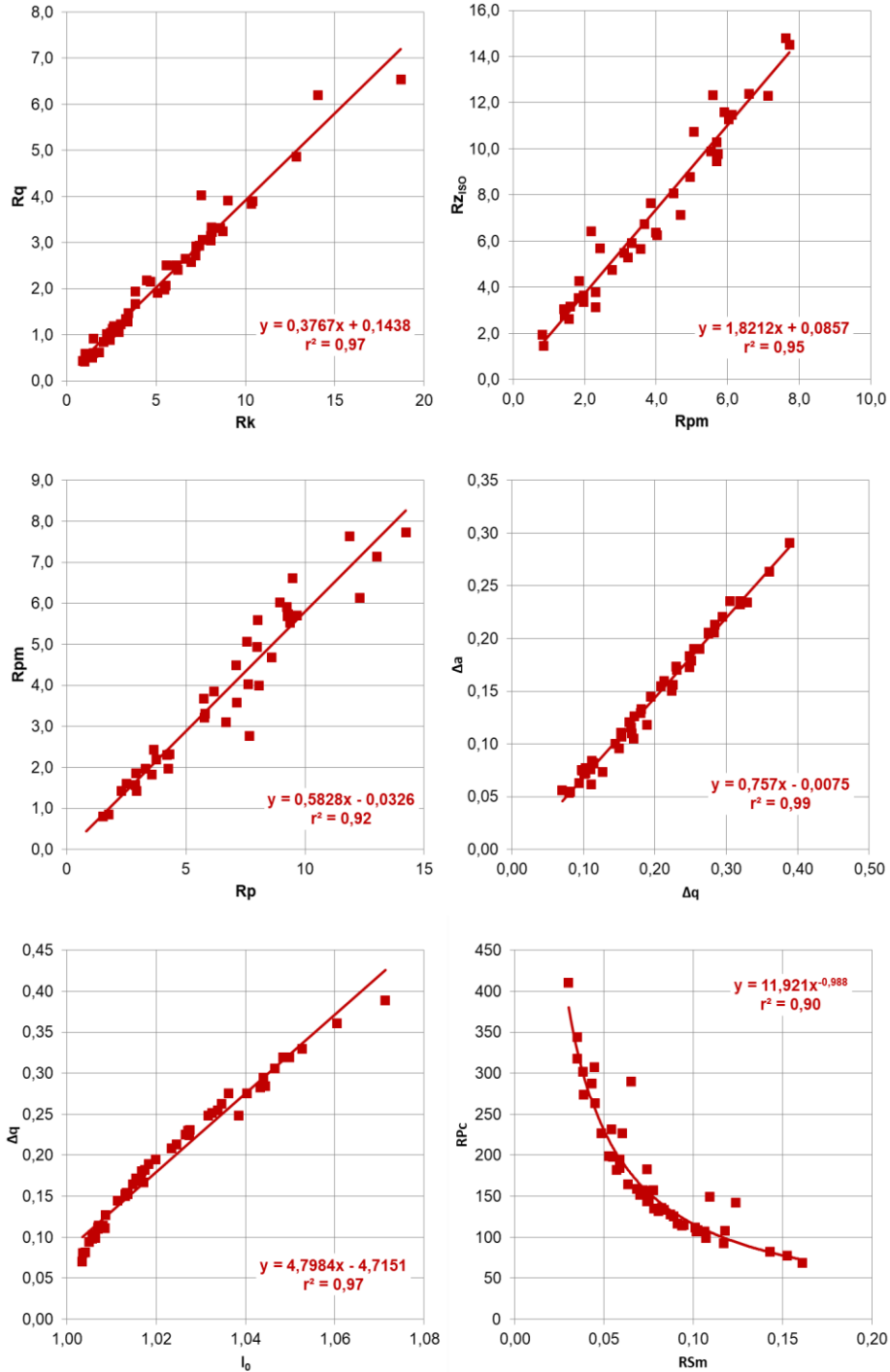


Figura 4.31 Cont. Mejores relaciones entre los parámetros de rugosidad estudiados.

4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

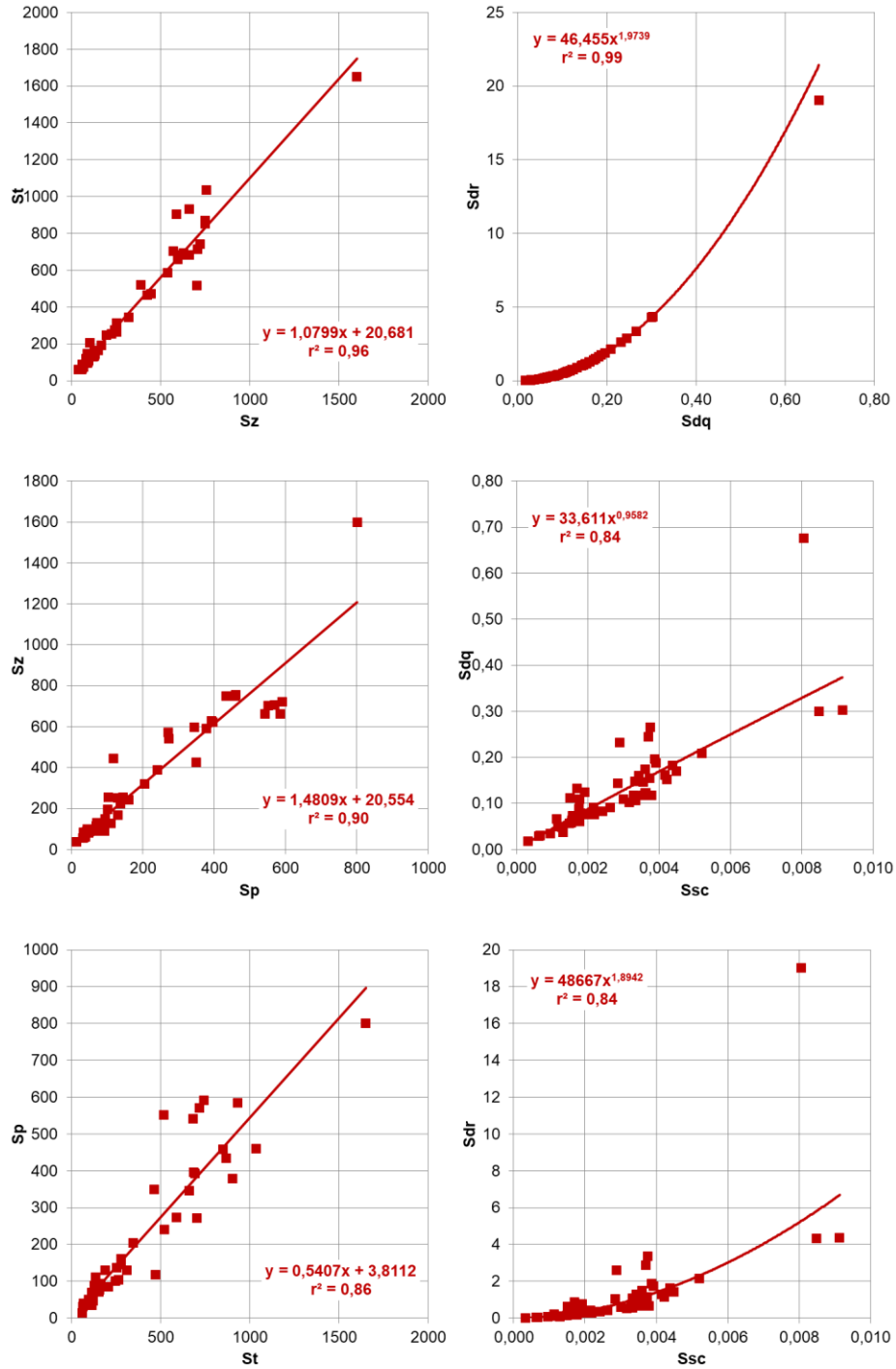


Figura 4.32 Mejores relaciones entre los parámetros de ondulación estudiados.

#### 4.2.2 Relación entre la resistencia al deslizamiento y cada uno de los parámetros superficiales

4.2.2.1 Correlación entre la resistencia al deslizamiento y cada parámetro superficial de rugosidad elegido: parámetros con los que se obtienen los mejores ajustes.

4.2.2.1.1 Ensayo con las 52 muestras originales

- i) Relación de la resistencia al deslizamiento con los parámetros representativos del perfil de rugosidad.

En la figura 7.2 del Apartado 7.2.2 se muestran las gráficas obtenidas al representar, para el conjunto de 52 modelos originales elegidos, la relación entre la resistencia al deslizamiento, expresada como [PTV/100], y los correspondientes valores de cada uno de los trece parámetros de rugosidad antes indicados. Dichas representaciones se presentan ordenadas por coeficientes de correlación decrecientes. En todos los casos, el mejor ajuste se ha obtenido con líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.15 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.15 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto 52 muestras originales.**

Rz	Rt	$\Delta q$	Rq	Rpm	Ra	$\Delta a$	Rk	$I_0$	Rp	Rz <sub>ISO</sub>	RPC	RSm
0,74	0,73	0,70	0,69	0,69	0,68	0,66	0,65	0,65	0,62	0,61	0,24	0,16

En la Figura 4.33 se muestra las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación correspondientes a los parámetros **Rz**, **Rt** y  **$\Delta q$** .

Los valores de los coeficientes de correlación resultantes son del mismo orden que los mejores obtenidos por otros investigadores (*Chang, W.R. 1998, 2000, 2003, Chang, W.R. et al., 2010, Kim, I.J. 2013*).

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación (Figura 4.33).

$$[\text{PTV}/100] = 0,2454 \cdot \ln(\text{Rz}) - 0,1554 \quad (4.8)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,2484 \cdot \ln(\text{Rt}) - 0,1814 \quad (4.9)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,3169 \cdot \ln(\Delta q) + 0,9416 \quad (4.10)$$

4.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

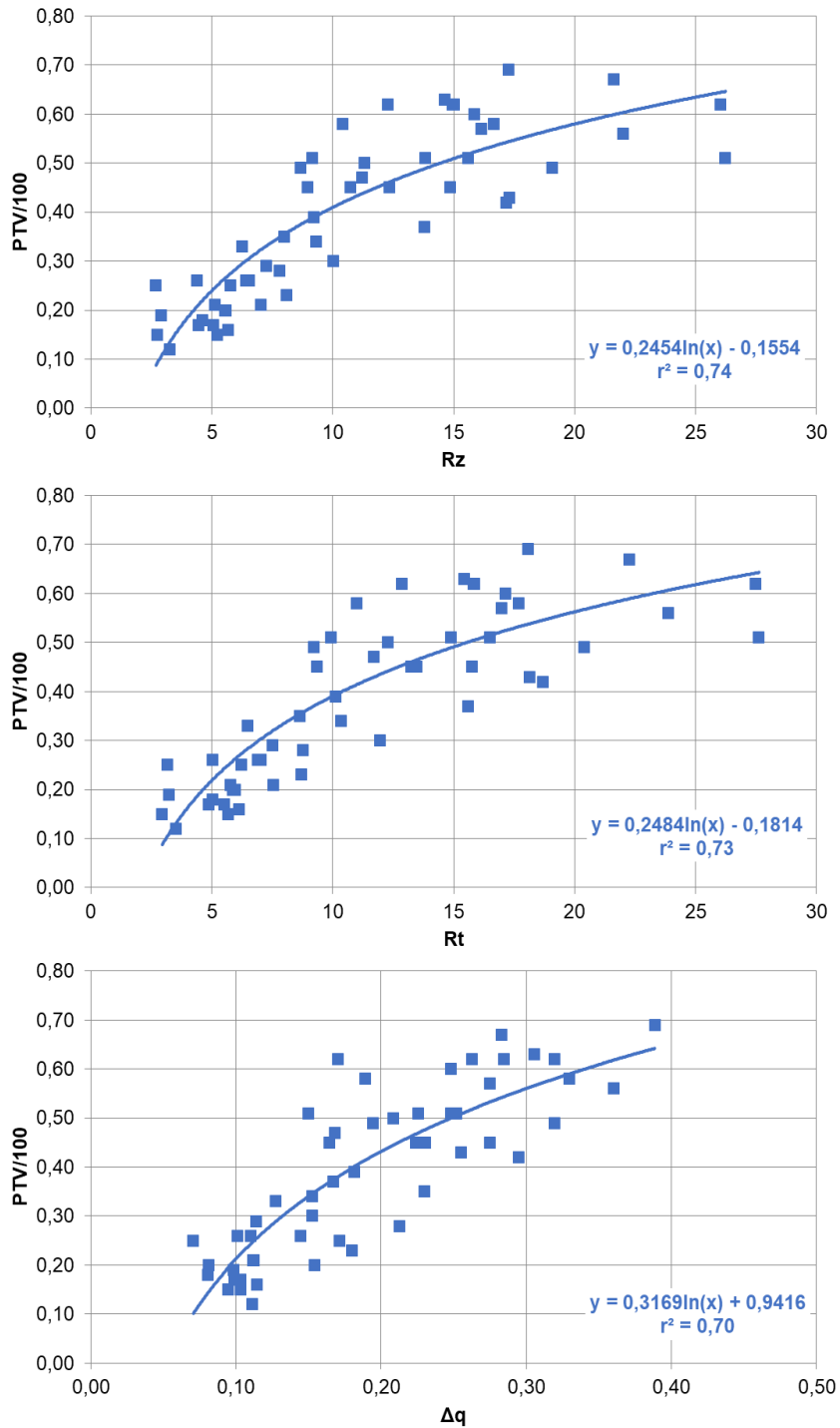


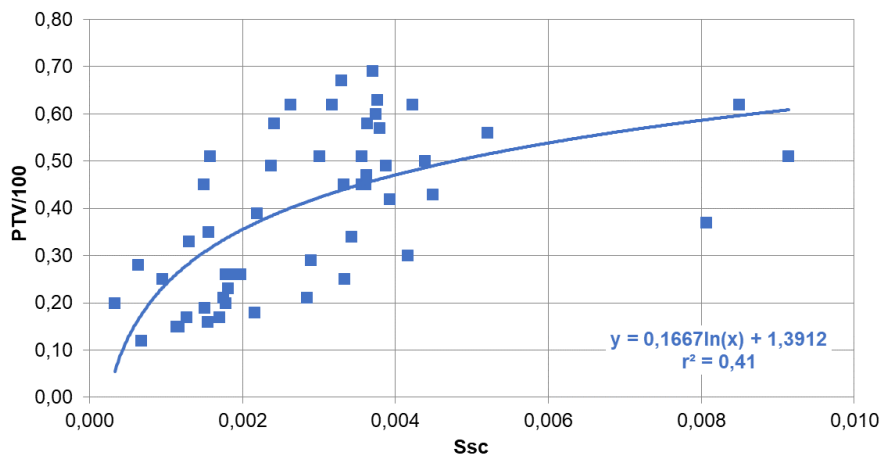
Figura 4.33 Relación entre  $[PTV/100]$  y los parámetros de rugosidad (52 muestras).

- ii) Relación de la resistencia al deslizamiento con los parámetros representativos del perfil de ondulación.

En la figura 7.3 (Apartado 7.2.2) se muestran las gráficas obtenidas al representar, para el conjunto de 52 modelos originales elegidos, la relación entre la resistencia al deslizamiento, expresada como  $[PTV/100]$ , y los correspondientes valores de los seis parámetros representativos del perfil de ondulación antes indicados. Dichas representaciones se presentan ordenadas por coeficientes de correlación decrecientes. En todos los casos, el mejor ajuste se ha obtenido con líneas de regresión de tipo logarítmico.

Los coeficientes de correlación resultantes fueron, salvo en el caso de la representación correspondiente al parámetro  $S_{sc}$  ( $r^2 = 0,41$ ), inferiores a 0,25, siendo tres de ellos inferiores a 0,06. Por esta razón no se consideró oportuno hacer referencia, en este Apartado, a la ecuación de ninguna de las líneas de regresión obtenidas.

En la Figura 4.34 se muestra la representación para la que se obtuvo mejor coeficiente de correlación:



**Figura 4.34** Relación entre  $[PTV/100]$  y el parámetro de ondulación  $S_{sc}$  (52 muestras).

A la vista de los resultados obtenidos al representar conjuntamente los valores de la resistencia al deslizamiento de los 52 modelos elegidos frente al de cada uno de los respectivos parámetros superficiales elegidos, se pensó en repetir dichas representaciones separando los modelos estudiados primero en dos conjuntos, separándolos por el tipo de perfil, y luego considerando los cinco grupos por separado.

En uno y otro caso solo se obtuvieron las representaciones gráficas correspondientes a los trece parámetros del perfil de rugosidad estudiados, dados los bajos valores del coeficiente de correlación obtenidos en las representaciones efectuadas al utilizar los parámetros representativos del perfil de ondulación.

4.2.2.1.2 Ensayo con las 22 muestras incluidas en los grupos 1 y 2

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.4 (Apartado 7.2.2), en orden de mejor a peor coeficiente de correlación. También para este conjunto de modelos, los mejores ajustes se obtuvieron con líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.16 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.16 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupos 1 y 2.**

Rz	Rt	Rpm	Rq	Ra	Rp	Rk	Rz <sub>ISO</sub>	Δq	l <sub>0</sub>	Δa	RSm	RPc
0,82	0,82	0,79	0,76	0,72	0,65	0,64	0,59	0,56	0,53	0,44	0,25	0,23

En la Figura 4.35 se muestran las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad **Rz, Rt y Rpm**.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación (Figura 4.35).

$$[PTV/100] = 0,3472 \cdot \ln(Rz) - 0,3551 \quad (4.11)$$

$$[PTV/100] = 0,3566 \cdot \ln(Rt) - 0,4008 \quad (4.12)$$

$$[PTV/100] = 0,3269 \cdot \ln(Rpm) + 0,0603 \quad (4.13)$$

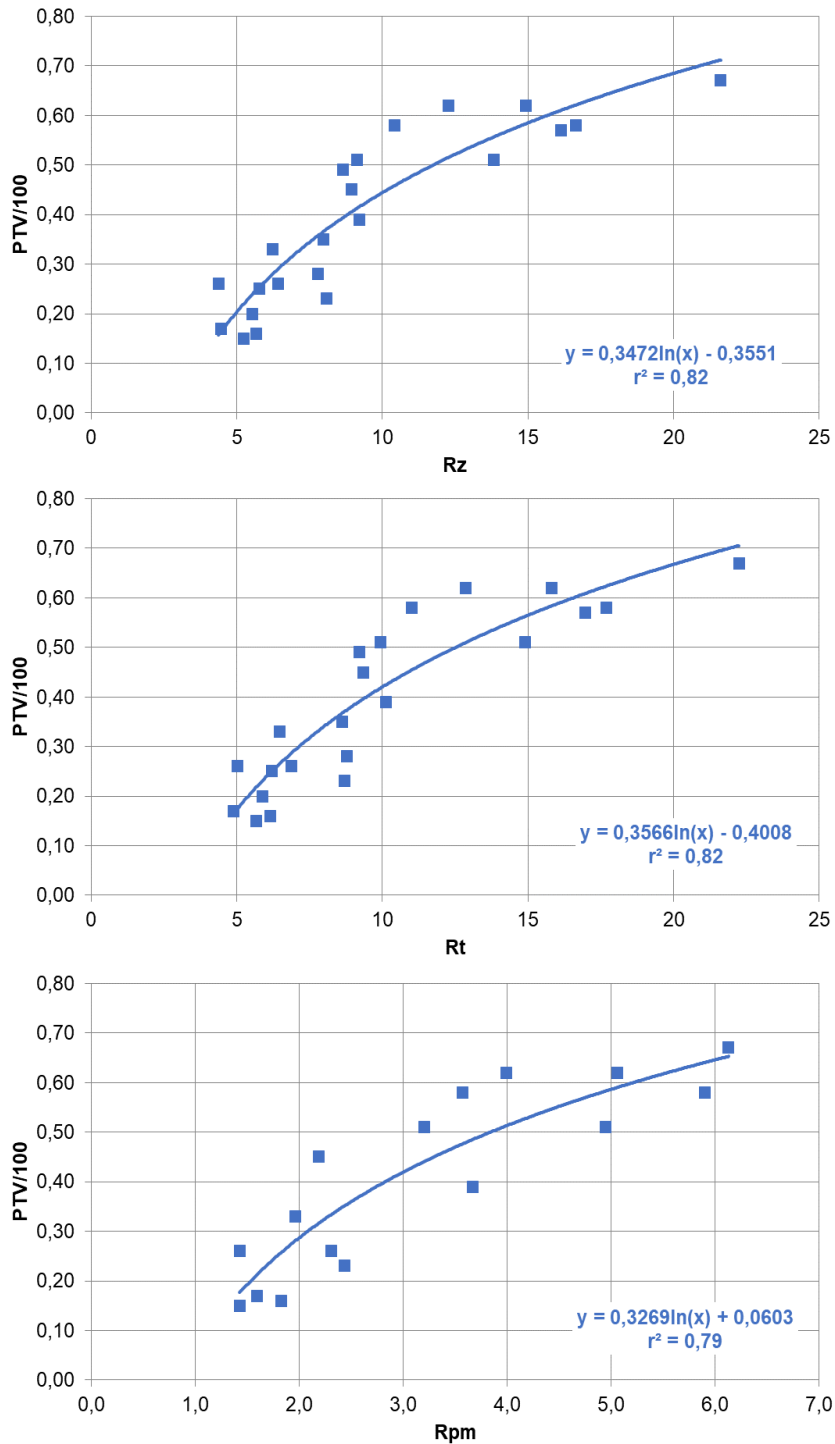


Figura 4.35 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupos 1 y 2).

4.2.2.1.3 Ensayo con las 30 muestras incluidas en los grupos 3 a 5

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.5 (Apartado 7.2.2), en orden de mejor a peor coeficiente de correlación. También para este conjunto de modelos, los mejores ajustes se obtuvieron con líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.17 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.17 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupos 3 a 5.**

$\Delta a$	$\Delta q$	Rz	Rt	$I_0$	Ra	Rk	Rpm	Rq	Rz <sub>ISO</sub>	Rp	RPC	RSm
0,83	0,82	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,73	0,66	0,63	0,28	0,16

En la Figura 4.36 se muestran las representaciones correspondientes a los tres mejores ajustes obtenidos.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad  $\Delta a$ ,  $\Delta q$ , y  $Rz$ .

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación (Figura 4.36).

$$[PTV/100] = 0,2994 \cdot \ln(\Delta a) + 1,0119 \quad (4.14)$$

$$[PTV/100] = 0,3093 \cdot \ln(\Delta q) + 0,9301 \quad (4.15)$$

$$[PTV/100] = 0,2165 \cdot \ln(Rz) - 0,104 \quad (4.16)$$

Si se comparan los mejores valores de los coeficientes de correlación que se muestran en la Tabla 4.15 con los de la Tabla 4.16 y Tabla 4.17, se aprecia una notable mejora en los ajustes obtenidos al separar en dos grupos, atendiendo a la naturaleza del perfil de los modelos estudiados, las representaciones graficas que muestran la dependencia de [PTV/100] respecto a los diferentes parámetros de rugosidad.



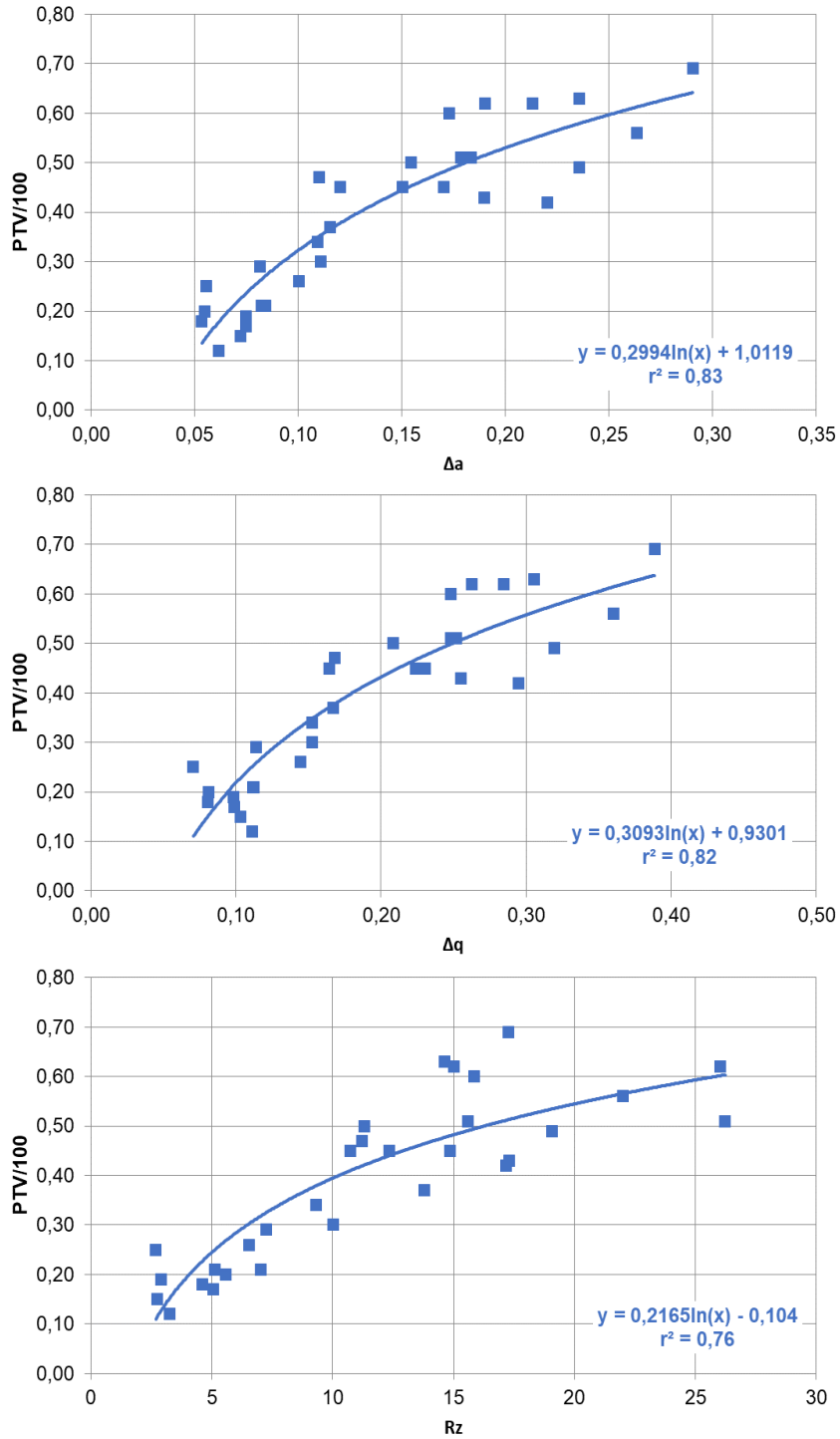


Figura 4.36 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupos 3 a 5).

4.2.2.1.4 Ensayo con las muestras de cada grupo por separado.

A la vista de la mejora de los valores de los coeficientes de correlación obtenidos en los Apartados 4.2.2.1.2 y 4.2.2.1.3, al agrupar los modelos de superficie estudiados en dos conjuntos diferentes, atendiendo al tipo de perfil, se pensó en la posibilidad de mejorar aún más los ajustes, estudiando por separado cada uno de los cinco grupos de modelos considerados.

En este Apartado los resultados obtenidos se expondrán para cada grupo por separado. Para cada Grupo se mostrará solamente las tres representaciones gráficas para cuyas líneas de regresión se ha obtenido el mejor coeficiente de correlación. Como se verá, los mejores ajustes, con los datos de los Grupos 1 y 3, se han obtenido con líneas de regresión rectas, mientras que en el caso de los grupos 2, 4 y 5 los mejores ajustes se han obtenido con líneas de regresión de tipo logarítmico.

**i) GRUPO 1**

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.6 (Apartado 7.2.2), en orden de mejor a peor coeficiente de correlación. Los mejores ajustes se han obtenido mediante líneas de regresión rectas.

En la Tabla 4.18 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.18 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupo 1.**

$\Delta a$	$\Delta q$	$l_0$	Rz	Rt	Rq	Ra	Rk	Rz <sub>ISO</sub>	Rp	RSm	RPc	RPm
0,93	0,90	0,90	0,86	0,82	0,70	0,69	0,51	0,19	0,14	0,02	0,00	-

En la Figura 4.37 se muestran las tres mejores representaciones obtenidas para los modelos de superficie encuadrados en el Grupo 1.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad  $\Delta a$ ,  $\Delta q$ , y  $l_0$ .

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

$$[PTV/100] = 1,7366 \cdot \Delta a + 0,0268 \quad (4.17)$$

$$[PTV/100] = 1,333 \cdot \Delta q + 0,0177 \quad (4.18)$$

$$[PTV/100] = 7,7694 \cdot l_0 - 7,6538 \quad (4.19)$$

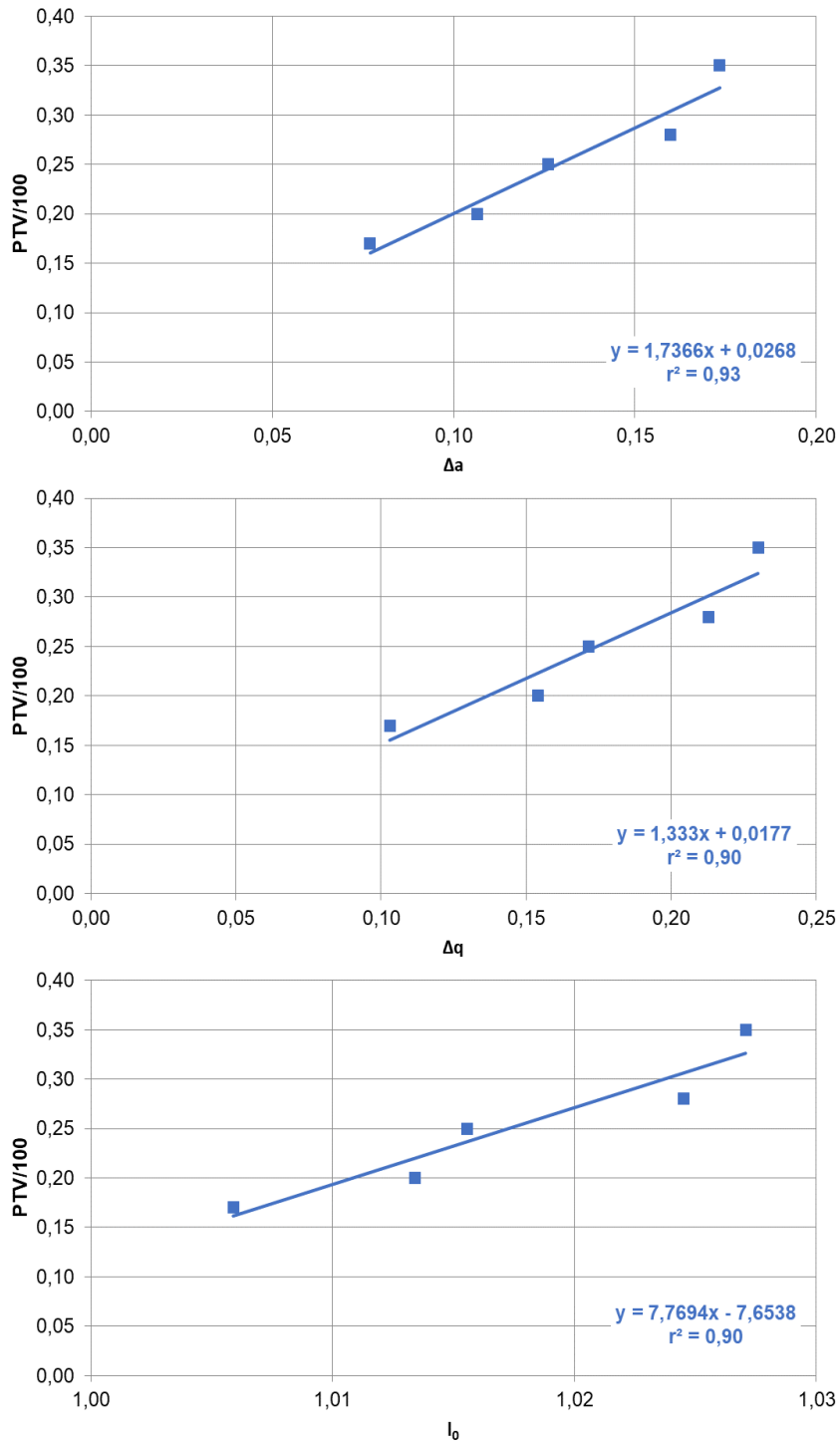


Figura 4.37 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupo 1).

**ii) GRUPO 2**

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.7 (Apartado 7.2.2), en orden de mejor a peor coeficiente de correlación. El mejor ajuste se ha obtenido mediante líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.19 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.19 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupo 2.**

Rz	Rt	Rpm	Rq	Ra	Rp	$\Delta q$	Rk	$I_0$	$\Delta a$	Rz <sub>ISO</sub>	RSm	RPc
0,79	0,78	0,77	0,71	0,66	0,66	0,64	0,60	0,55	0,54	0,51	0,12	0,10

En la Figura 4.38 se muestran las tres mejores representaciones obtenidas para los modelos de superficie encuadrados en el grupo 2.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad **Rz, Rt y Rpm**.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

$$[PTV/100] = 0,3361 \cdot \ln(Rz) - 0,3227 \quad (4.20)$$

$$[PTV/100] = 0,3469 \cdot \ln(Rt) - 0,3702 \quad (4.21)$$

$$[PTV/100] = 0,3189 \cdot \ln(Rpm) + 0,072 \quad (4.22)$$

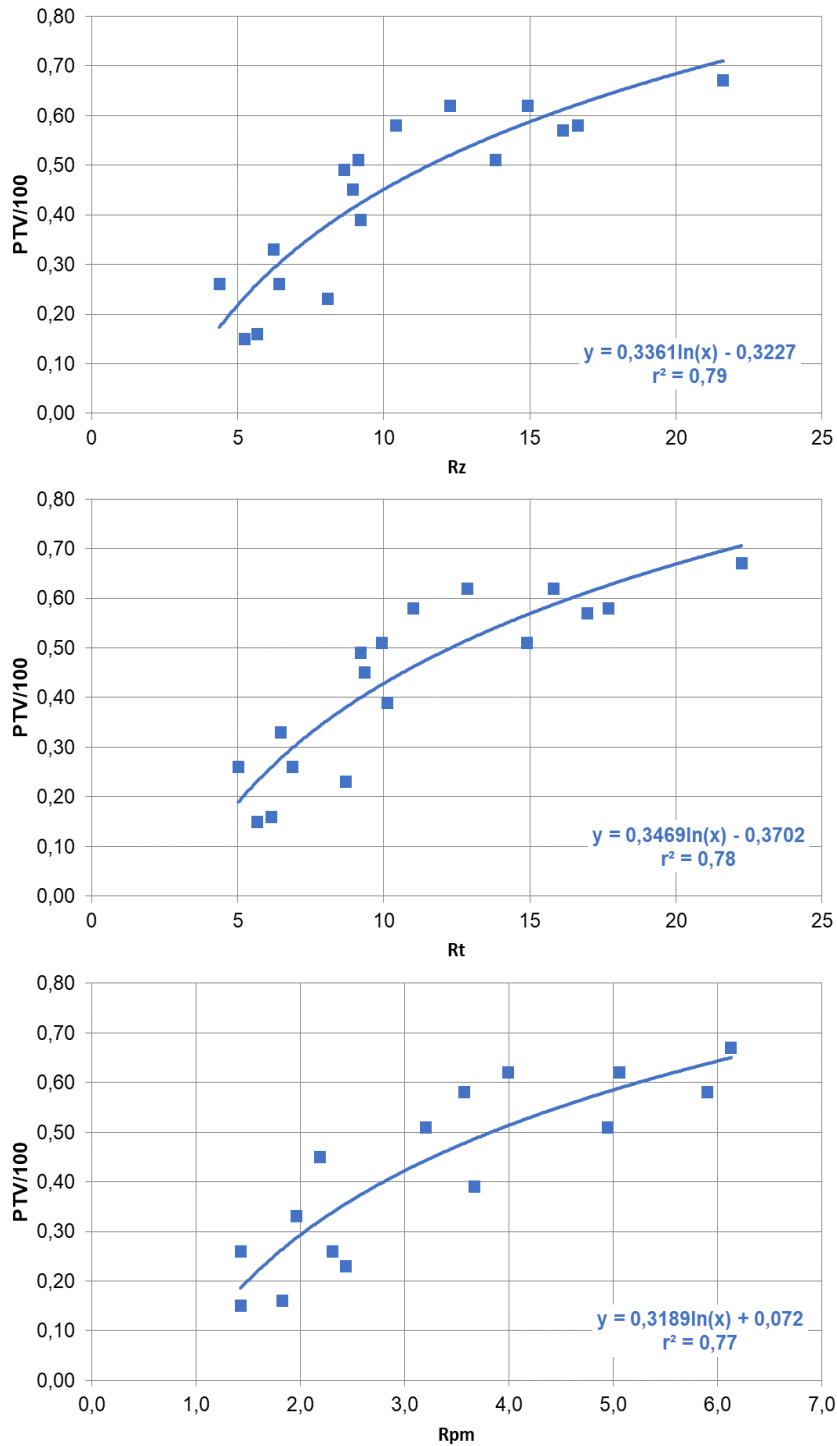


Figura 4.38 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupo 2).

**iii) GRUPO 3**

En la Tabla 4.20 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.8 (Apartado 7.2.2), en orden de coeficiente de correlación decreciente. El mejor ajuste se ha obtenido mediante líneas de regresión rectas.

En la Tabla 4.20 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.20 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupo 3.**

Rq	Ra	Rt	Rz	Rp	Rk	Rpm	Rz <sub>ISO</sub>	Δa	I <sub>0</sub>	Δq	RPc	RSm
0,88	0,87	0,86	0,86	0,86	0,85	0,84	0,82	0,73	0,72	0,71	0,39	0,34

En la Figura 4.39 se muestran las tres mejores representaciones obtenidas para los modelos de superficie encuadrados en el grupo 3.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad **Rq**, **Ra** y **Rt**.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

$$[PTV/100] = 0,1387 \cdot Rq + 0,0914 \quad (4.23)$$

$$[PTV/100] = 0,1793 \cdot Ra + 0,0928 \quad (4.24)$$

$$[PTV/100] = 0,0282 \cdot Rt + 0,066 \quad (4.25)$$

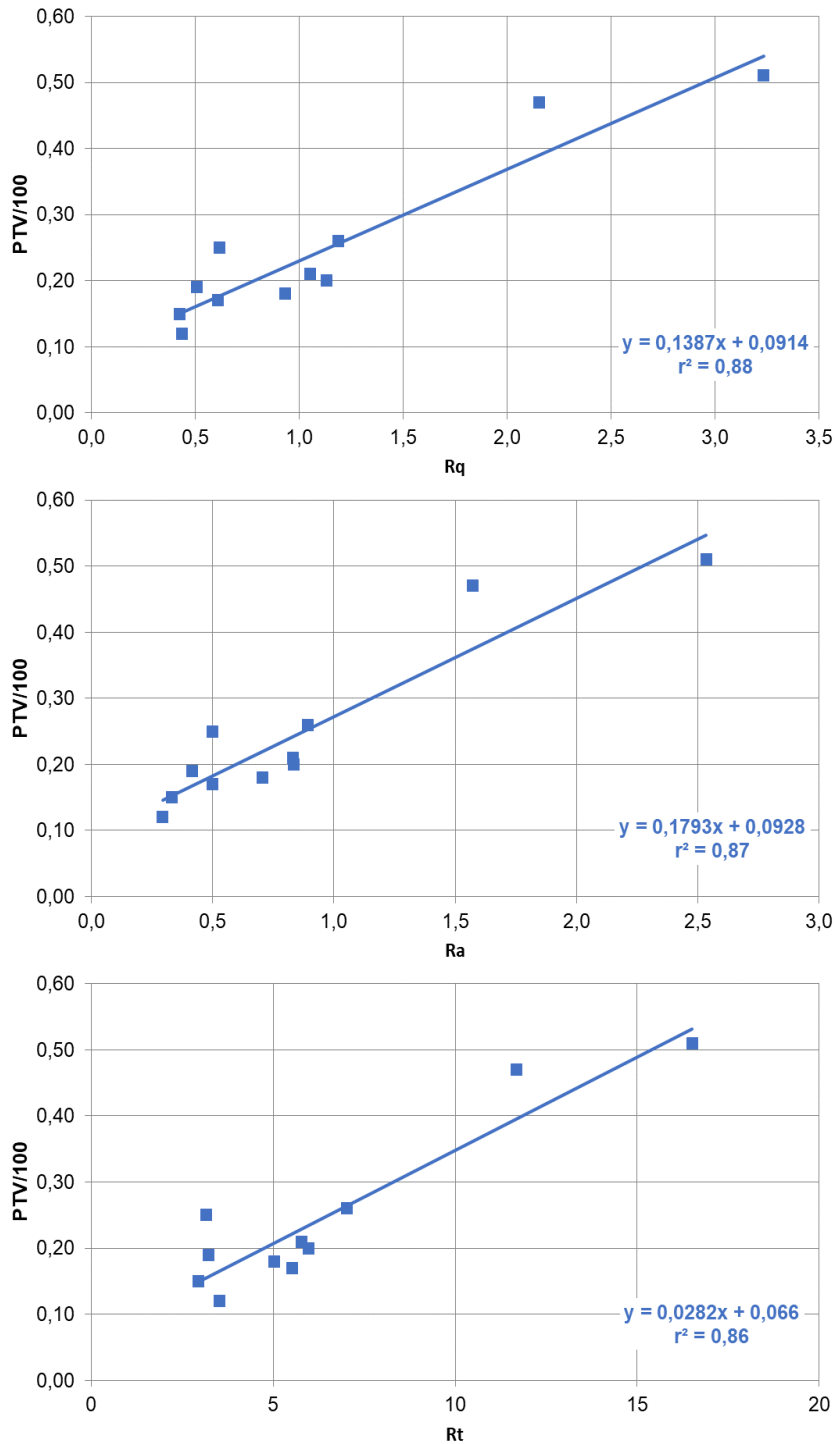


Figura 4.39 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupo 3).

**iv) GRUPO 4**

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.9 (Apartado 7.2.2), en orden de coeficiente de correlación decreciente. En este caso, el mejor ajuste se ha obtenido mediante líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.21 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.21 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupo 4.**

Rp	$\Delta q$	Rz <sub>ISO</sub>	$\Delta a$	Rz	Rt	Rq	Ra	Rk	l <sub>0</sub>	Rpm	RPC	RSm
0,66	0,64	0,63	0,62	0,59	0,59	0,58	0,57	0,57	0,52	0,43	0,09	0,00

En la Figura 4.40 se muestran las tres mejores representaciones obtenidas para los modelos de superficie encuadrados en el Grupo 4.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad **Rp**,  **$\Delta q$**  y **Rz<sub>ISO</sub>**.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

$$[PTV/100] = 0,2096 \cdot \ln(Rp) + 0,0185 \quad (4.26)$$

$$[PTV/100] = 0,2778 \cdot \ln(\Delta q) + 0,8707 \quad (4.27)$$

$$[PTV/100] = 0,1729 \cdot \ln(Rz_{ISO}) + 0,0853 \quad (4.28)$$



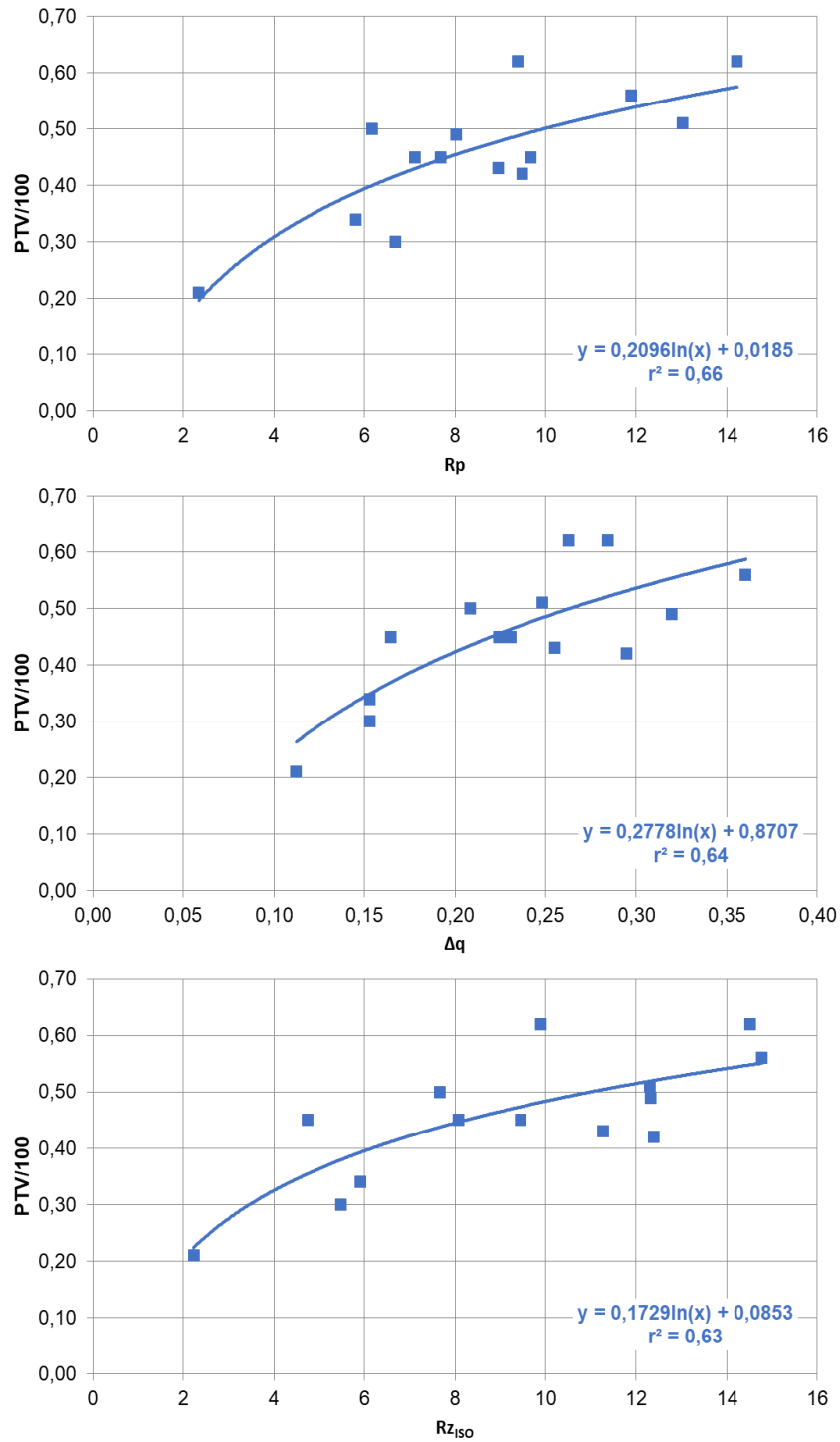


Figura 4.40 Relación entre [PTV/100] y los parámetros de rugosidad (Grupo 4).

**v) GRUPO 5**

Las representaciones graficas correspondientes se muestran en la figura 7.109 (Apartado 7.2.2), en orden de coeficiente de correlación decreciente. En este caso, el mejor ajuste se ha obtenido mediante líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Tabla 4.22 se muestran, en sentido descendente, los valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos en los ajustes efectuados para los trece parámetros de rugosidad preseleccionados.

**Tabla 4.22 Valores de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos. Orden de prelación. Conjunto de muestras grupo 5.**

$\Delta q$	$\Delta a$	$l_0$	Rz	RSm	Rt	Ra	Rq	Rk	Rz <sub>ISO</sub>	RPc	Rp	Rpm
0,96	0,96	0,84	0,70	0,65	0,62	0,47	0,44	0,44	0,37	0,22	0,16	0,00

En la Figura 4.41 se muestran las tres mejores representaciones obtenidas para los modelos de superficie encuadrados en el Grupo 5.

Como puede apreciarse, los mejores ajustes se obtuvieron con los parámetros de rugosidad  $\Delta q$ ,  $\Delta a$  y  $l_0$ .

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres representaciones para las que se obtuvo mejor coeficiente de correlación.

$$[PTV/100] = 0,3519 \cdot \ln(\Delta q) + 1,0429 \quad (4.29)$$

$$[PTV/100] = 0,3316 \cdot \ln(\Delta a) + 1,1193 \quad (4.30)$$

$$[PTV/100] = 6,6824 \cdot \ln(l_0) + 0,2879 \quad (4.31)$$

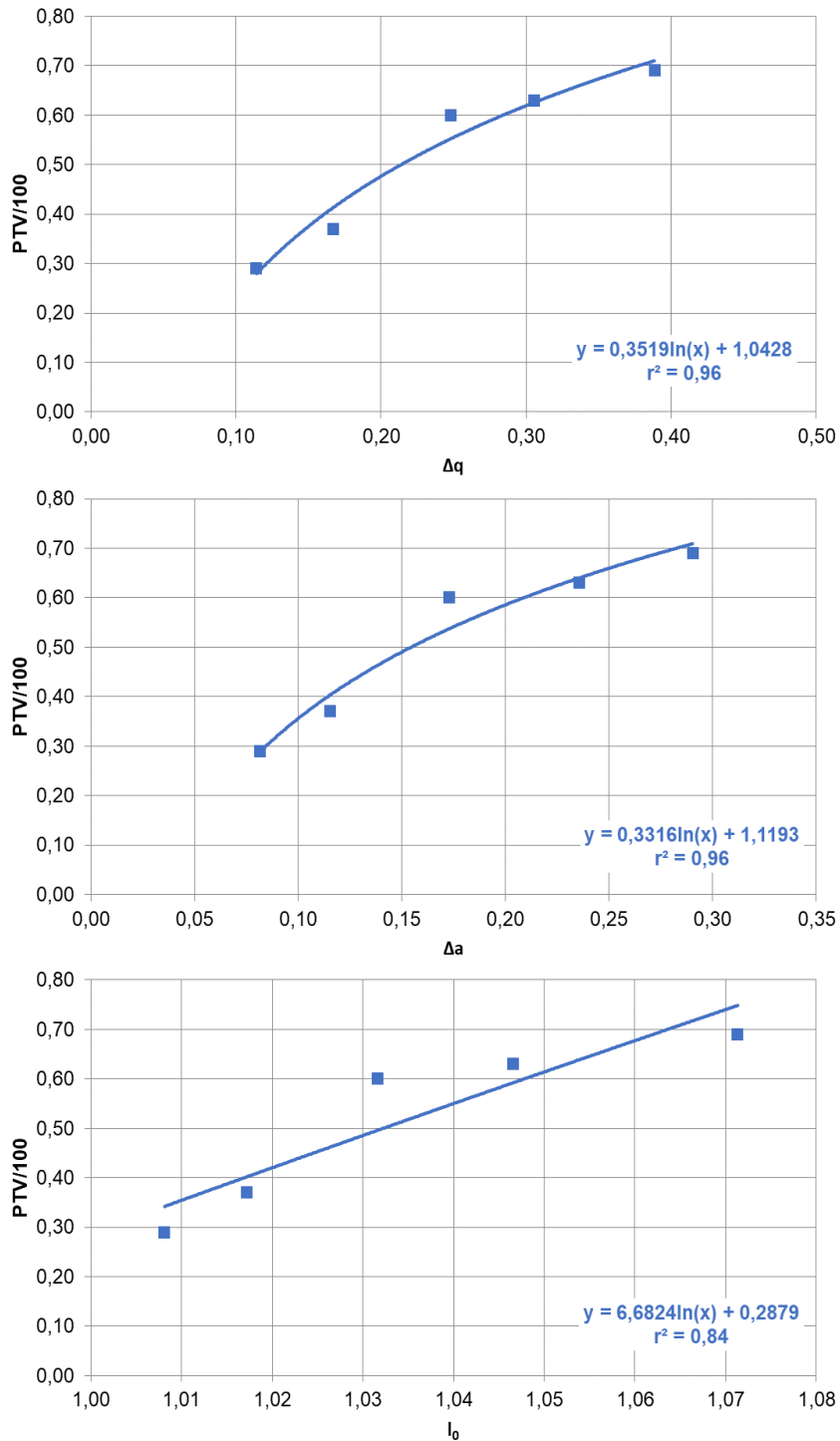


Figura 4.41 Relación entre  $[PTV/100]$  y los parámetros de rugosidad (Grupo 5).

4.2.2.2 Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados mediante las mejores correlaciones obtenidas.

En este Apartado se exponen los resultados obtenidos al utilizar las ecuaciones obtenidas para reproducir los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento, obtenidos para los 52 modelos de superficie estudiados, partiendo del conocimiento de los valores de los parámetros de rugosidad respectivos.

Dichos resultados se muestran en gráficos donde se comparan los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con los correspondientes valores determinados experimentalmente.

4.2.2.2.1 Ensayo con las 52 muestras originales

En este caso, la mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido mediante la correlación (4.10), en función del parámetro  $\Delta q$ . En este caso 12 de los valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10 (Ver Tabla 7.6 en el Apartado 7.2.3)

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.42 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

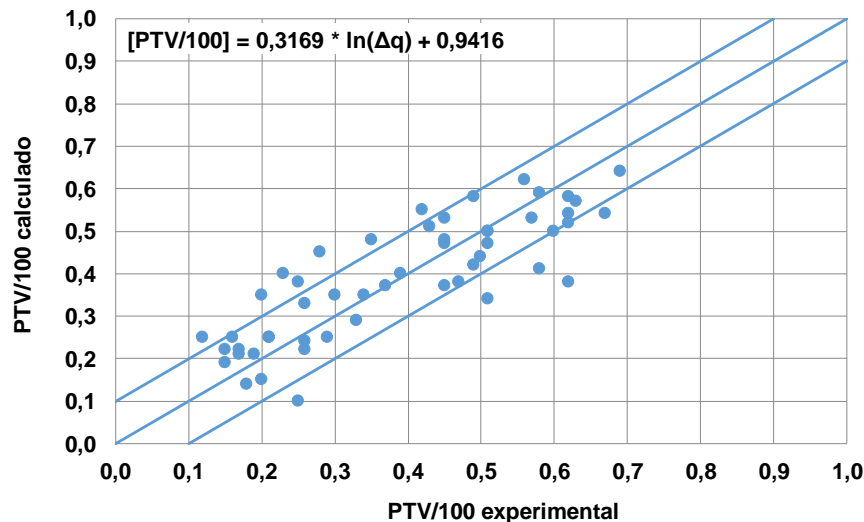
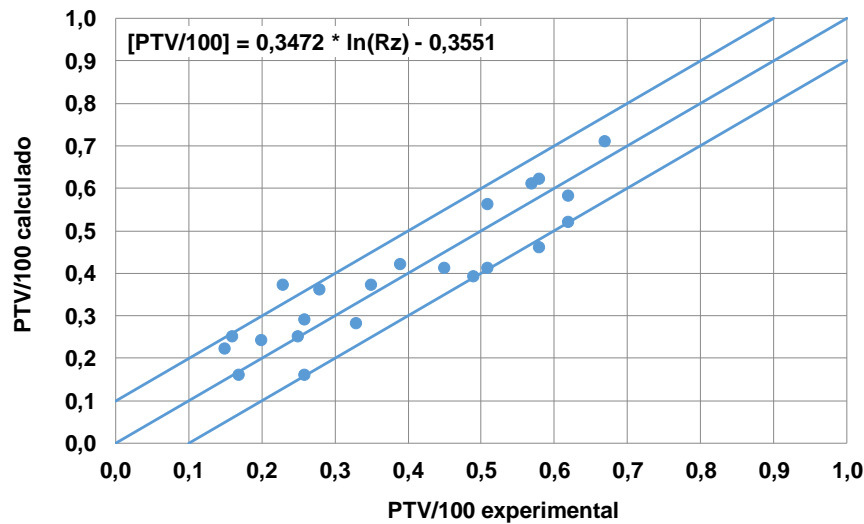


Figura 4.42 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.10) y los correspondientes experimentales.

## 4.2.2.2.2 Ensayo con las 22 muestras incluidas en los grupos 1 y 2.

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.11), en función del parámetro  $Rz$ . En este caso *solo* 2 de los valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10 (Ver Tabla 7.7 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.43 se han representado los valores calculados frente a los experimentales



**Figura 4.43** Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.11) y los correspondientes experimentales.

## 4.2.2.2.3 Ensayo con las 30 muestras incluidas en los grupos 3 a 5.

Con este conjunto de datos, la mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.15), en función del parámetro  $\Delta q$ . En este caso *solo* 3 de los valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10 (Ver tabla 7.9 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.44 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

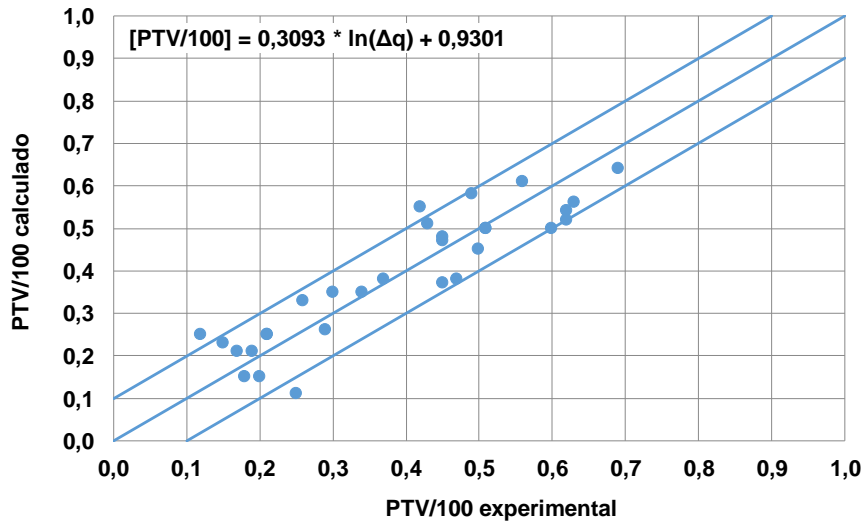


Figura 4.44 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.15) y los correspondientes experimentales.

4.2.2.2.4 Ensayo con las muestras de cada grupo por separado

**i) GRUPO 1**

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.17), en función del parámetro  $\Delta a$ . En este caso ninguno de los valores calculados se ha diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,02 (Ver Tabla 7.11 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.45 se han representado los valores calculados frente a los experimentales, como puede apreciarse la concordancia es excelente.

**ii) GRUPO 2**

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.20), en función del parámetro  $Rz$ . En este caso solo 2 de los valores calculados se ha diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10 (Ver Tabla 7.12 en el Apartado 7.2.3)

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.46 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

**i) GRUPO 3**

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.23), en función del parámetro  $Rq$ . En este caso ninguno de los valores calculados se ha diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,08 (Ver Tabla 7.13 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.47 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

**ii) GRUPO 4**

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.28), en función del parámetro  $Rz_{iso}$ . En este caso solo 1 de los valores calculados se ha diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10 (Ver tabla 7.14 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.48 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

**iii) GRUPO 5**

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.29), en función del parámetro  $\Delta q$ . En este caso ninguno de los valores calculados se ha diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,05 (Ver Tabla 7.15 en el Apartado 7.2.3).

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.49 se han representado los valores calculados frente a los experimentales.

Como comentario final cabría añadir que, utilizando las ecuaciones seleccionadas en este apartado para cada grupo, en solo 3 de las 52 muestras estudiadas, los valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos superiores a 0,10.

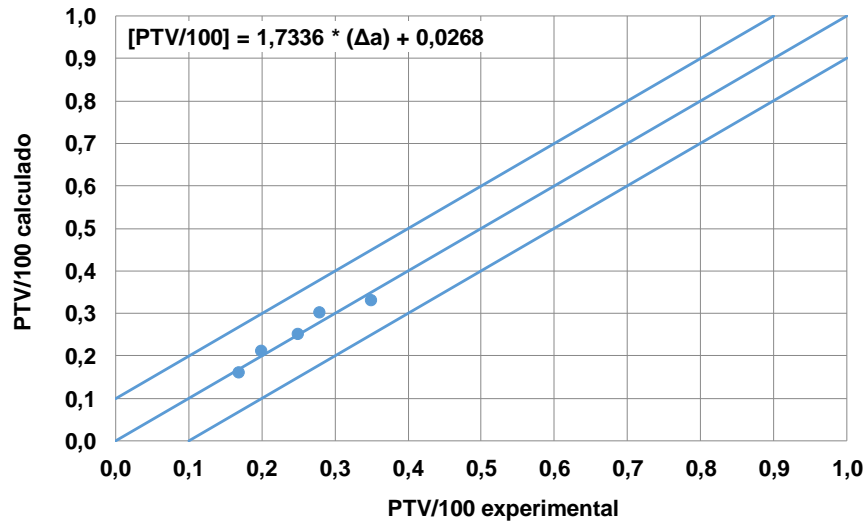


Figura 4.45 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.17) y los correspondientes experimentales.

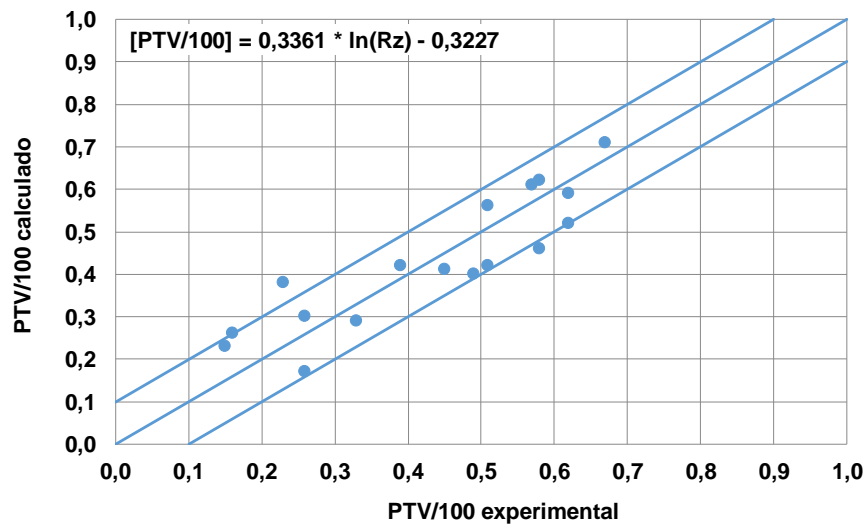


Figura 4.46 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.20) y los correspondientes experimentales.



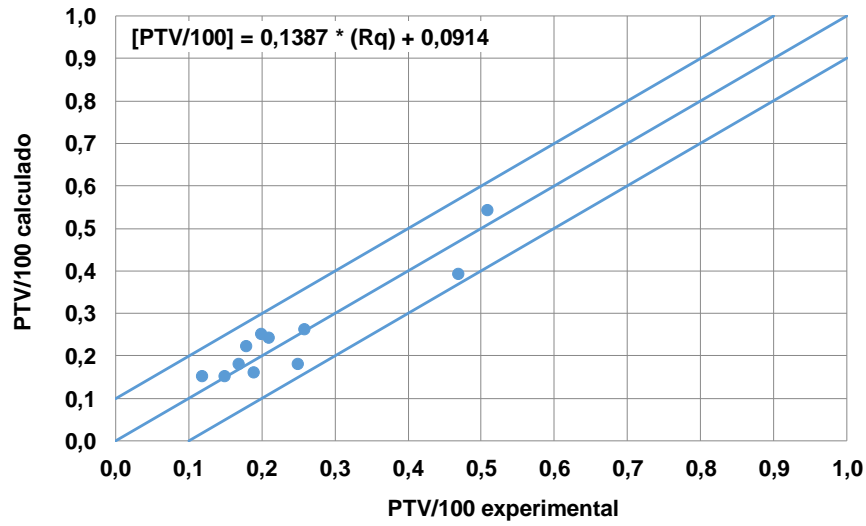


Figura 4.47 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.23) y los correspondientes experimentales.

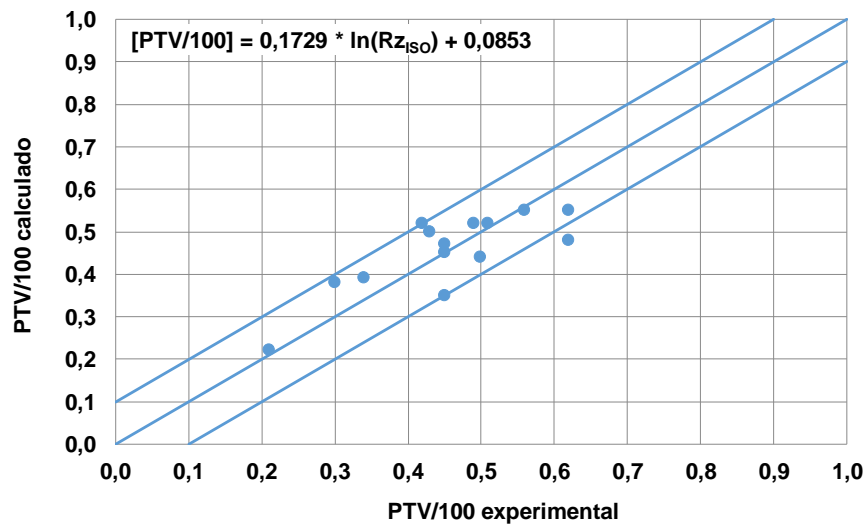


Figura 4.48 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.28) y los correspondientes experimentales.

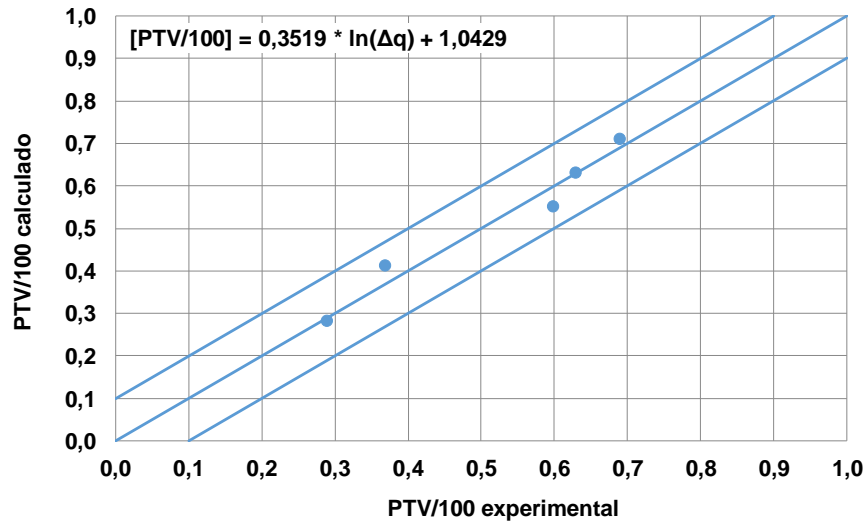


Figura 4.49 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.29) y los correspondientes experimentales.

#### 4.2.2.3 Aplicación de las correlaciones a los resultados obtenidos con varias muestras duplicadas.

Para realizar el estudio relacionado con el desgaste por uso peatonal o acelerado que se expone en el Apartado 4.3 se han utilizado 13 muestras duplicadas de algunos de los 52 modelos de pavimento cerámico estudiados en el apartado 4.2.2. La relación de los modelos estudiados y los respectivos valores de la resistencia al deslizamiento ([PTV/100]), así como los de los parámetros de rugosidad de las muestras originales (sin desgastar) se muestran en la Tabla 4.23.

Al disponer de esta información adicional, se consideró de interés ver como encajarían, en las representaciones gráficas de la Figura 4.43 y Figura 4.44, los valores de [PTV/100] correspondientes a estas muestras, calculados mediante las ecuaciones (4.11) y (4.15), a partir de los correspondientes valores de los parámetros de rugosidad  $Rz$  para los Grupos 1 y 2 y  $\Delta q$  para los Grupos 3 a 5 que se detallan en la Tabla 4.23.

**Tabla 4.23. Valores de la resistencia al deslizamiento y de los correspondientes parámetros de rugosidad elegidos. Muestras adicionales duplicadas.**

Muestra	PTV/100	Ra $\mu\text{m}$	Rz $\mu\text{m}$	Rt $\mu\text{m}$	Rq $\mu\text{m}$	Rz <sub>ISO</sub> $\mu\text{m}$	Rpm $\mu\text{m}$	Rp $\mu\text{m}$
2.14.DL0	0,59	1,3	10	11	1,8	6,0	3,8	7,4
2.14.DP0	0,55	1,3	11	12	1,9	6,3	3,9	7,8
2.16.DL0-1	0,32	0,59	6,3	6,5	0,92	3,3	2,0	4,3
2.16.DL0-2	0,32	0,54	5,3	5,5	0,80	2,9	1,7	3,6
2.16.DP0	0,32	0,47	5,7	5,9	0,79	3,0	1,8	4,0
2.17.DL0	0,24	0,73	5,7	6,2	1,0	3,1	1,6	3,5
2.19.DL0	0,49	1,5	10	11	2,0	5,4	3,7	7,1
2.19.DP0	0,47	1,2	9,2	9,9	1,7	5,3	3,4	6,4
3.30.DL0	0,20	0,75	5,2	5,7	1,0	3,1	1,9	3,8
3.32.DL0	0,18	0,89	6,0	6,5	1,2	4,0	1,7	3,0
4.35.DL0	0,40	1,8	10	11	2,2	7,2	3,5	5,4
5.50.DL0	0,59	2,3	13	15	2,9	8,0	4,6	7,7
5.51.DL0	0,41	2,2	15	16	3,2	6,0	5,4	11

**Tabla 4.23 Cont. Valores de la resistencia al deslizamiento y de los correspondientes parámetros de rugosidad elegidos. Muestras adicionales duplicadas.**

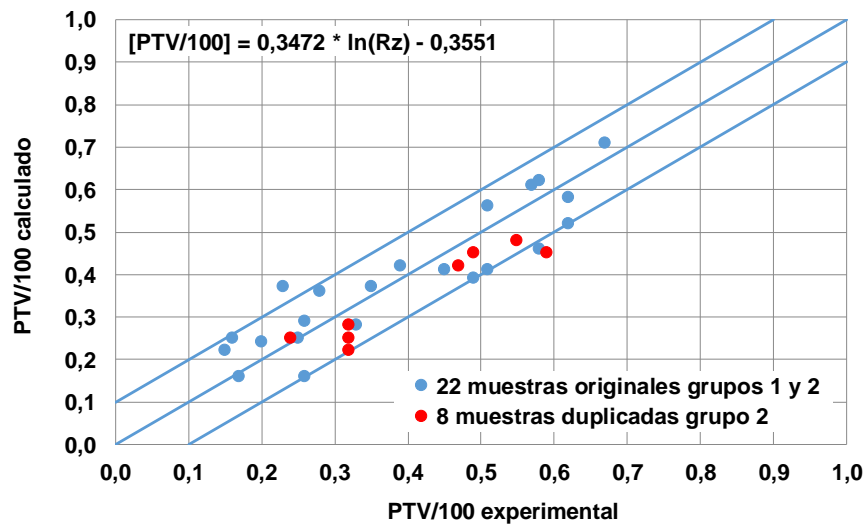
Muestra	PTV/100	RPc picos/cm	RSm mm/pico	$\Delta a$ rad	$\Delta q$ rad	$I_0$	Rk
2.14.DL0	0,59	153	0,072	0,13	0,22	1,021	3,8
2.14.DP0	0,55	207	0,054	0,14	0,21	1,023	3,4
2.16.DL0-1	0,32	254	0,042	0,079	0,13	1,009	1,5
2.16.DL0-2	0,32	231	0,047	0,069	0,11	1,007	1,5
2.16.DP0	0,32	253	0,042	0,068	0,12	1,007	1,2
2.17.DL0	0,24	202	0,054	0,075	0,11	1,006	2,3
2.19.DL0	0,49	134	0,085	0,11	0,17	1,015	4,6
2.19.DP0	0,47	128	0,085	0,10	0,16	1,016	4,0
3.30.DL0	0,20	130	0,083	0,058	0,087	1,004	2,4
3.32.DL0	0,18	185	0,060	0,096	0,14	1,009	3,0
4.35.DL0	0,40	164	0,064	0,17	0,22	1,025	6,0
5.50.DL0	0,59	113	0,095	0,14	0,20	1,023	7,4
5.51.DL0	0,41	85	0,13	0,11	0,16	1,015	5,3

En el caso de las muestras pertenecientes los grupos 1 y 2, la mejor reproducción de los resultados experimentales se obtuvo con la ecuación (4.11), en función del parámetro **Rz**. Los valores obtenidos para las 8 muestras duplicadas pertenecientes al grupo 2 se detallan en la Tabla 7.8 del Apartado 7.2.3.

En el caso de las muestras pertenecientes a los grupos 3 a 5, la mejor reproducción de los resultados experimentales se obtuvo con la ecuación (4.15), en función del parámetro  $\Delta q$ . Los valores obtenidos para las 5 muestras duplicadas se detallan en la Tabla 7.10 del Apartado 7.2.3.

Las parejas de valores así calculadas se han representado en la Figura 4.50 y Figura 4.51 junto con las correspondientes a los de las 52 muestras originales. En dichas figuras, los marcadores correspondientes a los 52 modelos originales estudiados en el Apartado 4.2.2 se han representado de color azul y los marcadores correspondientes a las 13 muestras duplicadas adicionales se han representado de color rojo.

Como puede apreciarse, los 13 puntos representativos de las muestras duplicadas encajan bien dentro de los márgenes preestablecidos.



**Figura 4.50 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.11) y los correspondientes experimentales para las muestras de los Grupos 1 y 2.**

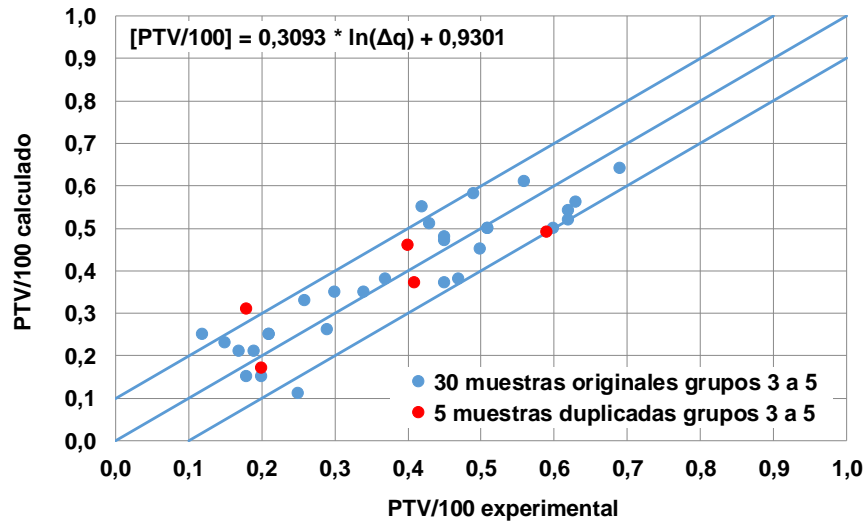


Figura 4.51 Comparación entre los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.15) y los correspondientes experimentales para las muestras de los Grupos 3 a 5.

### 4.2.3 Relación entre la resistencia al deslizamiento y un conjunto de parámetros de rugosidad autoseleccionados por el método utilizado.

#### 4.2.3.1 Procedimiento a utilizar

Viendo la influencia que tenía, por separado, cada uno de los parámetros de rugosidad estudiados sobre el valor de la resistencia al deslizamiento, se pensó en ensayar un procedimiento en el que se considerara la dependencia de esta propiedad de un conjunto de dichos parámetros superficiales. Para ello, se utilizó un software basado en las técnicas de minería de datos. En el apartado 7.3 del Apéndice se describe dicha herramienta y sus principios de funcionamiento.

#### 4.2.3.2 Ecuaciones obtenidas

El procedimiento elegido se ha aplicado en primer lugar a las 52 muestras originales conjuntamente. A continuación, se ha aplicado a las muestras de los Grupos 1 y 2 y a las de los Grupos 3 a 5 separadamente. No se ha aplicado

a las de cada grupo por separado porque, en algunos casos, no se disponía de suficientes muestras para ello.

#### 4.2.3.2.1 Ensayo con las 52 muestras originales

En la Figura 7.13 del Apartado 7.3 se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el mencionado procedimiento.

En este caso, para estimar el valor de la resistencia al deslizamiento medida como [PTV/100], el método ha seleccionado un total de 7 variables (parámetros de rugosidad): **Rq**, **I<sub>0</sub>**, **Δa**, **Rz<sub>ISO</sub>**, **Rp**, **Rz**, **RPc** y ha fragmentado el conjunto de datos disponibles en 3 subconjuntos en función del valor del parámetro **Rz** proponiendo las siguientes ecuaciones:

Para valores de **Rz ≤ 5,716**:

$$[PTV/100] = -0,0557 \cdot Rq + 1,1619 \cdot I_0 + 1,0759 \cdot \Delta a - 0,0125 \cdot Rz_{ISO} + 0,0259 \cdot Rp + 0,0076 \cdot Rz - 0,0002 \cdot RPc - 1,0244 \quad (4.32)$$

Para valores de **5,716 < Rz ≤ 8,373**:

$$[PTV/100] = -0,0557 \cdot Rq + 1,4968 \cdot I_0 + 1,0759 \cdot \Delta a - 0,0125 \cdot Rz_{ISO} + 0,0259 \cdot Rp + 0,0076 \cdot Rz - 0,0002 \cdot RPc - 1,338 \quad (4.33)$$

Para valores de **Rz > 8,373**:

$$[PTV/100] = -0,0458 \cdot Rq + 2,9761 \cdot I_0 + 0,8847 \cdot \Delta a - 0,0275 \cdot Rz_{ISO} + 0,0378 \cdot Rp + 0,0063 \cdot Rz - 0,0001 \cdot RPc - 2,7246 \quad (4.34)$$

Dado que realizar la estimación con 3 ecuaciones distintas y un total de 7 variables parecía bastante complejo, se decidió separar las muestras en dos conjuntos, atendiendo a su perfil, tal como se operó en el apartado 4.2.2.

#### 4.2.3.2.2 Ensayo con las 22 muestras incluidas en los grupos 1 y 2.

En la Figura 7.14 del Apartado 7.3 se muestran los resultados obtenidos tras aplicar la metodología elegida.

En este caso, el procedimiento ha seleccionado un total de 4 parámetros de rugosidad (**Ra**, **Δq**, **Rp** y **RSm**) y una sola ecuación.

$$[PTV/100] = -0,2936 \cdot Ra + 2,9161 \cdot \Delta q + 0,0508 \cdot Rp + 4,9311 \cdot RSm - 0,3443 \quad (4.35)$$

## 4.2.3.2.3 Ensayo con las 30 muestras incluidas en los grupos 3 a 5.

En la Figura 7.15 del Apartado 7.3 se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el software de estimación.

En este caso, la herramienta ha seleccionado un total de 4 parámetros de rugosidad (**Ra**, **Δa**, **Rz<sub>ISO</sub>** y **Rp**) y una sola ecuación.

$$[PTV/100] = -0,055 \cdot Ra + 2,4826 \cdot \Delta a - 0,0302 \cdot Rz_{ISO} + 0,0528 \cdot Rp + 0,0151 \quad (4.36)$$

4.2.3.3 *Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados a partir de las ecuaciones seleccionadas por el procedimiento estadístico empleado*

## 4.2.3.3.1 Ensayo con las 52 muestras originales

En la Tabla 7.16 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante las ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34), dependiendo del valor del parámetro Rz de cada una de las 52 piezas originales. En la Figura 4.52 se han representado los valores de [PTV/100] calculados frente a los obtenidos experimentalmente.

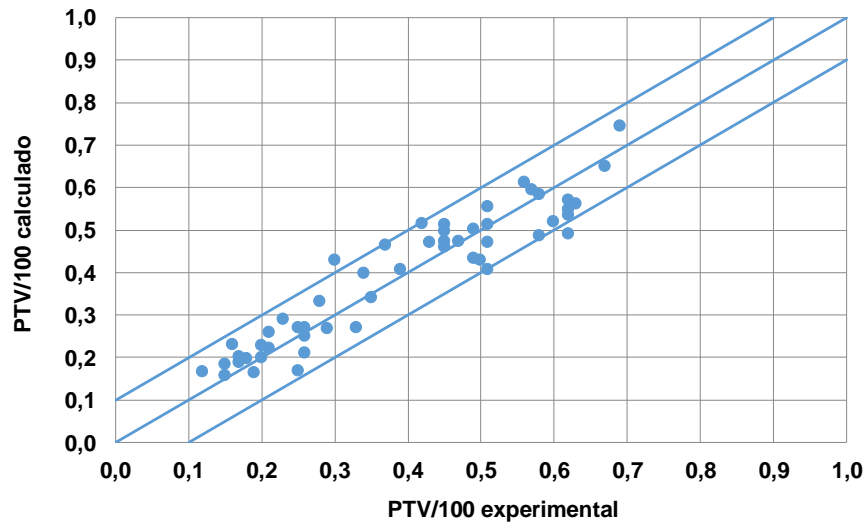
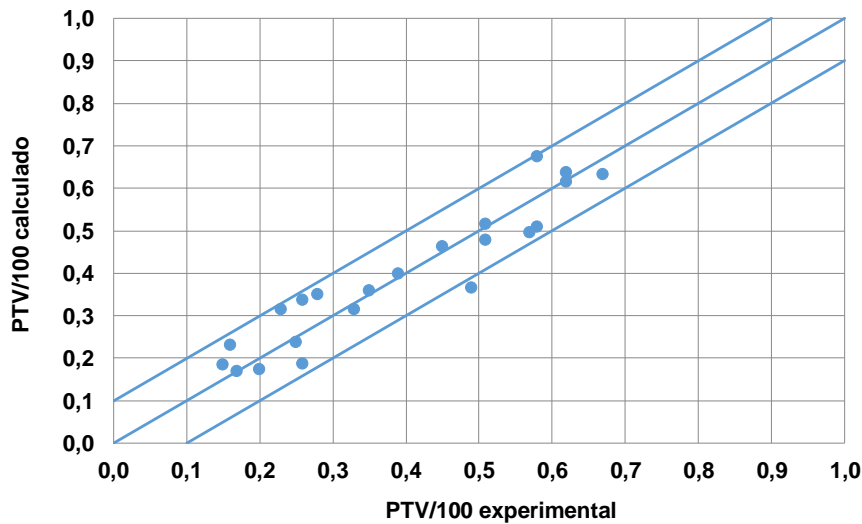


Figura 4.52 Relación entre los valores de [PTV/100] experimentales y calculados mediante las ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34).

Como puede apreciarse, tanto en la Tabla 7.16 del apartado 7.2.3 como en la Figura 4.52, la concordancia entre los valores calculados mediante la ecuación (4.8) y los experimentales es bastante buena, ya que *solo 2 valores* de [PTV/100] calculados difieren en más de 0,1, en valor absoluto, de los respectivos valores experimentales. Este resultado mejora sensiblemente el obtenido en el apartado 4.2.2.2.1.

#### 4.2.3.3.2 Ensayo con las 22 muestras incluidas en los grupos 1 y 2.

En la Tabla 7.17 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.35). En la Figura 4.53 se han representado los valores de [PTV/100] calculados frente a los obtenidos experimentalmente.



**Figura 4.53** Relación entre los valores de [PTV/100] experimentales y calculados mediante la ecuación (4.35).

En este caso, *un solo valor* de [PTV/100] calculado difiere en más de 0,10, en valor absoluto, de los respectivos datos experimentales.

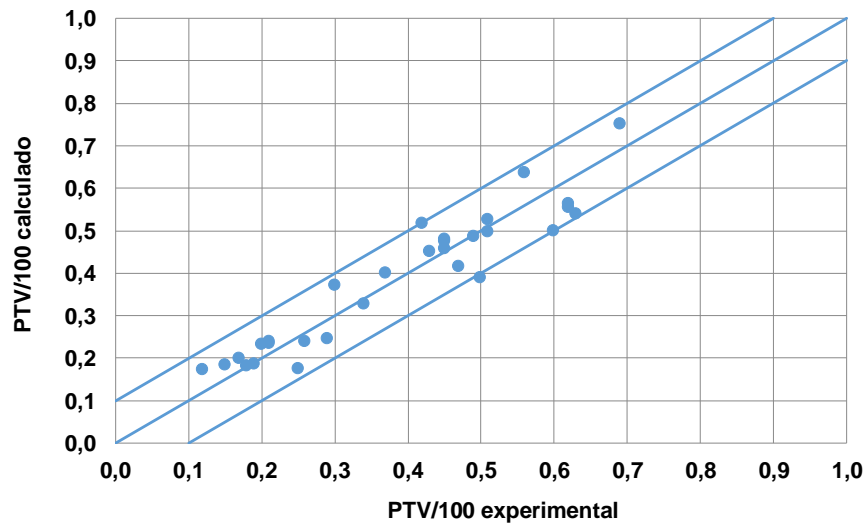
#### 4.2.3.3.3 Ensayo con las 30 muestras incluidas en los grupos 3 a 5.

En la Tabla 7.18 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.36). En la Figura



4.54 se han representado los valores de  $[PTV/100]$  calculados frente a los obtenidos experimentalmente.

Como puede apreciarse en la Figura 4.54, en este caso también *un solo valor* de  $[PTV/100]$  calculado difiere en más de 0,10, en valor absoluto, de los respectivos datos experimentales.



**Figura 4.54** Relación entre los valores de  $[PTV/100]$  experimentales y calculados mediante la ecuación (4.36).

En resumen, de los resultados obtenidos se infiere que la única ventaja de aplicar el método estadístico separando los modelos estudiados en dos conjuntos, tal como se ha ensayado, respecto a considerarlos conjuntamente, deriva del hecho de que solo se utilizan dos ecuaciones {(4.35) y (4.36)} y seis parámetros de rugosidad ( $R_a$ ,  $\Delta q$ ,  $R_p$ ,  $R_{Sm}$ ,  $\Delta a$  y  $R_{z_{ISO}}$ ), en el primer caso, en lugar de tres ecuaciones {(4.32), (4.33) y (4.34)} y siete parámetros de rugosidad ( $R_q$ ,  $l_0$ ,  $\Delta a$ ,  $R_{z_{ISO}}$ ,  $R_p$ ,  $R_z$  y  $RP_c$ ), en el segundo, ya que en ambas circunstancias solo dos valores de  $[PTV/100]$  calculado difieren en más de 0,10, en valor absoluto, de los respectivos datos experimentales.

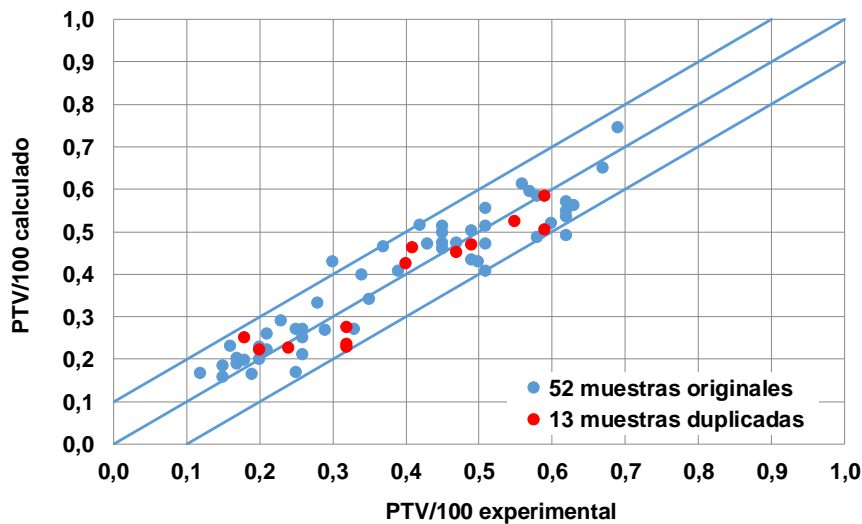
#### 4.2.3.4 Aplicación de las correlaciones a los resultados obtenidos con varias muestras duplicadas

También se consideró de interés ver como encajarían, en las representaciones gráficas de la Figura 4.52, Figura 4.53 y Figura 4.54, los

valores de [PTV/100] correspondientes a las muestras originales duplicadas, calculados mediante las ecuaciones (4.32) a (4.36).

#### 4.2.3.4.1 Ensayo con las 52 muestras originales.

En la Tabla 7.19 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante las ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34). En la Figura 4.55 se han representado los valores de [PTV/100] calculados frente a los obtenidos experimentalmente de todas las muestras estudiadas. Los marcadores azules corresponden a las muestras de los 52 modelos inicialmente considerados y los de color rojo a las 13 muestras de los modelos duplicados.

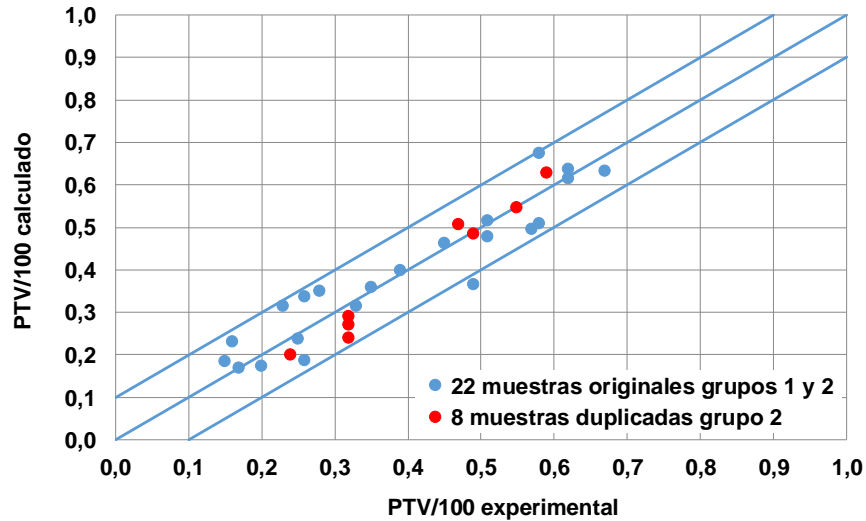


**Figura 4.55** Relación entre los valores de [PTV/100] experimentales y calculados mediante las ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34).

#### 4.2.3.4.2 Ensayo con las 22 muestras incluidas en los grupos 1 y 2.

En la Tabla 7.20 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.35). En la Figura 4.56 se han representado los valores de [PTV/100] calculados frente a los obtenidos experimentalmente. Los marcadores azules corresponden a las

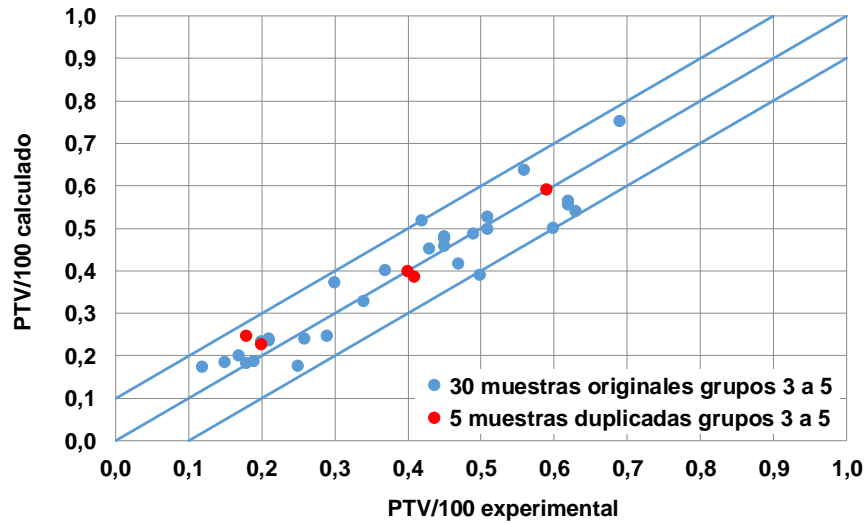
muestras de los 22 modelos inicialmente considerados y los de color rojo a las 8 muestras de los modelos duplicados



**Figura 4.56** Relación entre los valores de [PTV/100] experimentales y calculados mediante la ecuación (4.35).

#### 4.2.3.4.3 Ensayo con las 30 muestras incluidas en los grupos 3 a 5.

En la Tabla 7.21 del apartado 7.2.3 se muestran los valores de [PTV/100] experimentales y los calculados, mediante la ecuación (4.36). En la Figura 4.57 se han representado los valores de [PTV/100] calculados frente a los obtenidos experimentalmente. Los marcadores azules corresponden a las muestras de los 30 modelos inicialmente considerados y los de color rojo a las 5 muestras de los modelos duplicados.



**Figura 4.57** Relación entre los valores de [PTV/100] experimentales y calculados mediante la ecuación (4.36).

Como puede apreciarse en la Figura 4.55, Figura 4.56 y Figura 4.57, los 13 valores calculados de [PTV/100], correspondientes a los 13 modelos duplicados, calculados por una u otra vía, encajan perfectamente dentro del margen de error de  $\pm 0,10$  que se viene considerando.

### 4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

La evaluación de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos cerámicos se efectúa habitualmente sobre muestras del producto tal como sale de fábrica, por tanto, la única información de que se dispone acerca de sus propiedades antideslizantes suele corresponder al momento en que se colocan.

Ahora bien, el tránsito de personas, sobre un pavimento instalado, va produciendo un desgaste en la superficie que se traduce, normalmente, en una disminución progresiva de su resistencia al deslizamiento (*Derler, S. et al. 2005, Strautins, C.J., 2008, Bowman, R., 2010, Engels, M., 2016*). Esta disminución, que suele ser bastante acentuada al principio, se va reduciendo con el tiempo, tendiendo asintóticamente a un valor prácticamente constante. A modo de ejemplo, en la Figura 4.56, se muestra la evolución de la resistencia al deslizamiento (medida con el péndulo de fricción) a lo largo del proceso de desgaste por tránsito peatonal real, correspondiente a una muestra de pavimento cerámico (muestra 4.37), colocado en una de las puertas de acceso al edificio del Instituto de Tecnología Cerámica. La magnitud N representa el número de personas que han transitado sobre la muestra de pavimento considerada (ver Apartado 4.3.1.2.2).

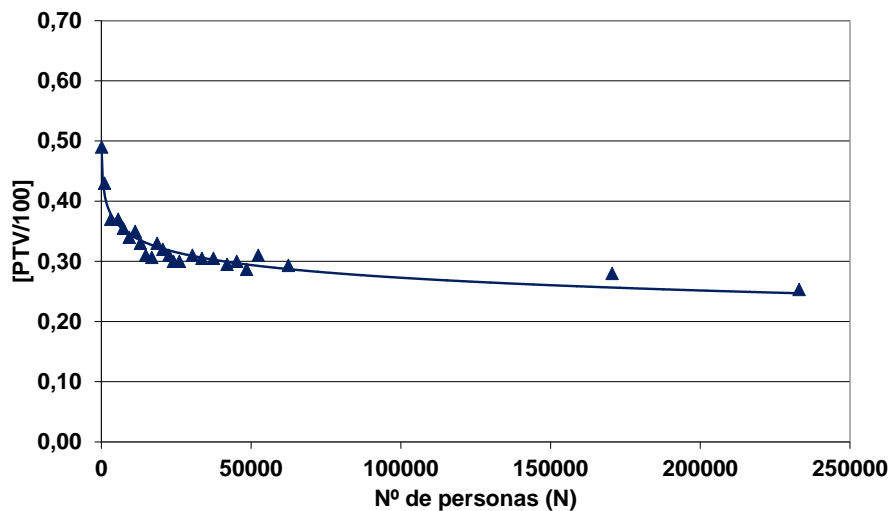


Figura 4.56 Variación de la resistencia al deslizamiento ([PTV/100]) con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N).

De acuerdo con lo que antecede, si un pavimento cerámico experimenta una importante disminución de su resistencia al deslizamiento tras su colocación, como consecuencia del tránsito peatonal, puede llegar a adquirir, en un corto espacio de tiempo, unas características antideslizantes inadecuadas para su uso en el lugar donde está ubicado.

Por estas razones, se hace imprescindible disponer de una metodología que permita predecir, a escala de laboratorio y mediante un procedimiento que se pueda desarrollar en un reducido espacio de tiempo, la forma en que evolucionará la resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico una vez instalado, como consecuencia del desgaste producido por tránsito peatonal real.

En la bibliografía consultada (*Derler, S. et al. 2005, Strautins, C.J., 2008, Kuisma, R, 2009, Bowman, R., 2010, Engels, M., 2016*) se ha encontrado información acerca de dispositivos y métodos para provocar el desgaste acelerado en superficies de materiales sólidos.

Ahora bien, el desgaste que se produce mediante dichos procedimientos no ha sido contrastado ni relacionado con el que se produce por tránsito peatonal real. Por ello, los resultados que se obtienen con su aplicación no permiten predecir, de modo fiable, la forma en que evolucionarán las propiedades superficiales de un pavimento instalado, a lo largo del espacio de tiempo transcurrido desde su colocación. Por otra parte, operan con probetas de material demasiado pequeñas para poder medir su resistencia al deslizamiento por los métodos normalizados, a lo largo del proceso de desgaste.

Por todo ello, se pensó poner a punto un procedimiento (dispositivo de desgaste y metodología de uso) que, a escala de laboratorio, permitiera desgastar rápidamente la superficie de probetas de piezas de pavimento cerámico, mediante un mecanismo lo más parecido posible al que origina el desgaste por tránsito peatonal real. Este dispositivo tenía que operar con probetas que tuvieran el tamaño adecuado para poder ir midiendo su resistencia al deslizamiento a lo largo del proceso de abrasión, a fin de poder relacionar la evolución de dicha propiedad con la intensidad del desgaste.

De acuerdo con lo que antecede, en lo que sigue, se resume el trabajo que se ha realizado para poner a punto un equipo de laboratorio que simule, en un corto espacio de tiempo, el desgaste que se produce, debido al tránsito de personas, en la superficie de un pavimento cerámico y que opere con muestras de material de tamaño adecuado para poder medir su resistencia al deslizamiento.

Parte del estudio realizado a consistido en contrastar los cambios que experimenta la resistencia al deslizamiento de varios modelos de baldosas, al someterlas a desgaste por tránsito peatonal y por el procedimiento de laboratorio desarrollado, con la finalidad de aproximar la forma en que operan

ambos. Los resultados obtenidos en este estudio han permitido encontrar una relación entre las magnitudes con las que se mide la intensidad del desgaste originado por uno y otro procedimiento: el número de personas que ha transitado sobre una muestra, por un lado, y el número de ciclos de desgaste a los que se la ha sometido, por el otro.

Finalmente se han evaluado los cambios que el desgaste, originado por tránsito peatonal o a escala de laboratorio, va produciendo, simultánea y progresivamente, en la resistencia al deslizamiento y en la topografía de la superficie de las muestras un conjunto de modelos de pavimento, con la intención de tratar de relacionarlos. El conocimiento generado, en esta parte del trabajo, podría ser muy útil para diseñar la cara vista de piezas de pavimento cerámico, con vistas a tratar de reducir el deterioro de sus prestaciones antideslizantes con el uso.

#### **4.3.1 Puesta a punto del equipo y de la metodología para simular el desgaste por tránsito peatonal a escala de laboratorio**

##### *4.3.1.1 Características del equipo y condiciones de ensayo*

Como se ha indicado anteriormente, en la actualidad no hay métodos reconocidos oficialmente que permitan simular, en un corto espacio de tiempo, las variaciones que experimentará la resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico, por tránsito peatonal real, a largo plazo.

Los métodos de ensayo de laboratorio que se vienen empleando para simular la evolución de la estructura superficial de un pavimento cerámico, por tránsito peatonal, utilizan los cambios de brillo que experimenta la superficie expuesta a la abrasión, como criterio de evaluación del grado de avance del proceso de desgaste.

Por otra parte, los equipos que se usan para la finalidad indicada, como se ha indicado anteriormente, suelen operar con probetas cuyo tamaño es demasiado pequeño para poder ir midiendo la resistencia al deslizamiento por los procedimientos habituales (péndulo de fricción, rampa o tribómetro dinámico, en cualquiera de sus formas), paralelamente al avance del proceso de desgaste. Por tanto, es imprescindible que el equipo a diseñar pueda operar con piezas de tamaño adecuado para poder efectuar dichas medidas. En la Tabla 4.24 se detalla el tamaño mínimo de las probetas a utilizar en los equipos normalizados que se emplean para medir la resistencia al deslizamiento de pavimentos cerámicos.

**Tabla 4.24. Tamaño mínimo de las muestras a emplear por los métodos normalizados de medida de la resistencia al deslizamiento.**

Método	Superficie de ensayo (cm <sup>2</sup> )
Péndulo de fricción	7,6 x 12,6
Rampa	60 x 120
Tribómetros	19 x 57

Para diseñar del dispositivo de desgaste se ha partido, en cierto modo, de la metodología desarrollada por Strautins (*Strautins, C.J., 2008*). El método propuesto por este investigador se basa en el uso de una máquina de ensayo de lavabilidad y desgaste, utilizada en el sector de pinturas, acondicionada para provocar el desgaste de baldosas cerámicas. Esta máquina está provista de una navicilla de fricción de movimiento lineal, a la que se pueden fijar distintos materiales (estropajos) capaces de originar diferente grado de abrasión sobre la muestra a tratar.

En el diseño del equipo de laboratorio y en el desarrollo del método operatorio del mismo, ha resultado fundamental la experiencia y conocimientos adquiridos en el Instituto de Tecnología Cerámica (*Silva, G. et al. 2004, 2006*), como consecuencia de su colaboración en la puesta a punto del método de desgaste propuesto en la *Norma UNE 138001 IN* "Resistencia al desgaste por tránsito peatonal de pavimentos cerámicos. Recomendaciones para la selección en función del uso previsto".

El equipo diseñado se ha descrito a grandes rasgos en el apartado 3.2.3.2. En lo que sigue, se resume el trabajo realizado con el fin de acercar, en lo posible, el mecanismo por el que dicho equipo produce la abrasión en la superficie de las piezas de pavimento, al modo en que dicha abrasión se desarrolla por tránsito peatonal real, tras su instalación.

Los ensayos previos se encaminaron a elegir el material abrasivo a utilizar en los cabezales del equipo, la durabilidad de las propiedades abrasivas de dicho material, la presión que debían ejercer los cabezales sobre las muestras a tratar y la velocidad de desplazamiento de la cinta transportadora de las muestras. Todo ello para establecer las características de los componentes del equipo y las condiciones a las que debían realizarse los ensayos, para asegurar su reproducibilidad.

En los ensayos realizados en la fase previa del trabajo, se utilizó el *brillo* como propiedad representativa de los cambios que se iban produciendo en la superficie tratada, siguiendo el criterio propuesto por la Norma *UNE 138001 IN* (Resistencia al desgaste por uso peatonal en pavimentos cerámicos). Al tomar esta decisión se partió del supuesto de que la evolución del brillo y la de la resistencia al deslizamiento debían estar relacionados, por depender ambas



propiedades de los cambios experimentados por la superficie del material durante el proceso de abrasión.

Una vez establecidas las condiciones a las que debía operar el equipo de laboratorio diseñado, se compararon los resultados obtenidos al desgastar la superficie de un pavimento cerámico de propiedades adecuadas (con acabado pulido y un brillo inicial muy alto), utilizando dicho equipo y mediante la aplicación de la Norma *UNE 138001 IN*, con el fin de contrastar su funcionamiento.

#### 4.3.1.1.1 Influencia del material abrasivo de los porta-muelas del cabezal

La naturaleza y características del material abrasivo con el que se deben equipar los porta-muelas del cabezal que producen el desgaste del material a tratar es muy importante, si se tiene en cuenta la intención de que el equipo simule, en lo posible, el mecanismo por el que se produce el desgaste por tránsito peatonal.

Se ensayaron los materiales abrasivos siguientes (Figura 4.57):

- Cepillo tipo lija
- Cepillo de SiC
- Estropajo comercial



**Figura 4.57 Materiales abrasivos utilizados: a) cepillo tipo lija, b) cepillo de SiC, c) estropajo comercial.**

De los tres materiales abrasivos ensayados, se consideró que el estropajo comercial era el más adecuado ya que su utilización producía, en la superficie de las baldosas cerámicas, una evolución del brillo muy parecida a la que se originaba al aplicar la metodología propuesta por la Norma *UNE 138001 IN*. Este resultado era bastante lógico, ya que el estropajo comercial está conformado, en parte, con partículas de cuarzo cuya distribución granulométrica, que se muestra en la Figura 4.58, es muy parecida a la de las partículas de dicho mineral que se emplean en el método de desgaste normalizado *UNE 138001 IN*.

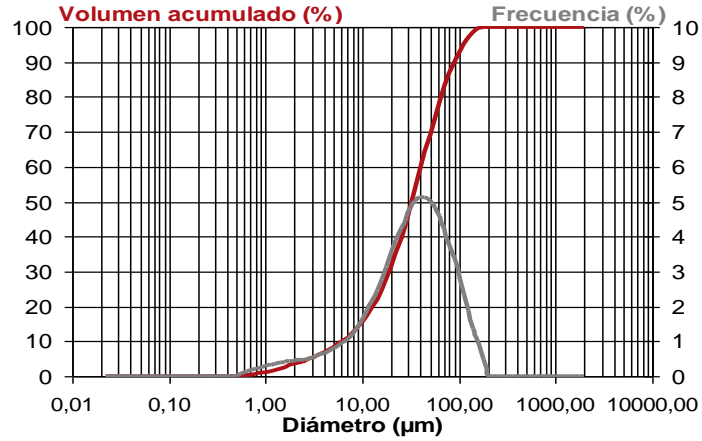


Figura 4.58 Distribución granulométrica de las partículas de cuarzo contenidas en el estropajo calcinado.

4.3.1.1.2 Influencia de la presión del cabezal

Para comprobar la influencia de esta variable de operación se efectuaron varias pruebas, ensayando diferentes presiones del cabezal sobre la superficie de las baldosas y midiendo, en cada una de ellas, la evolución del brillo con el tiempo de contacto entre el cabezal y la baldosa a lo largo de las sucesivas pasadas de ésta por debajo del mismo. En la Figura 4.59 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución del brillo con el tiempo de contacto para dos presiones de cabezal diferentes.

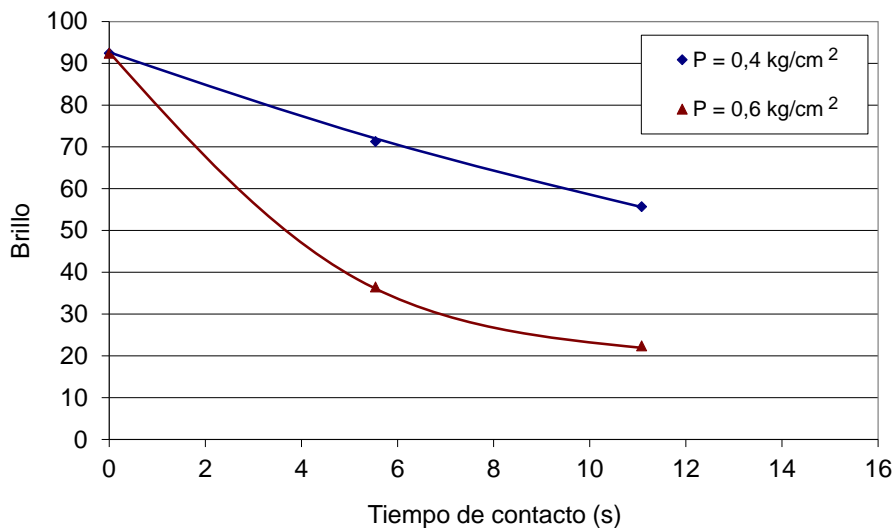


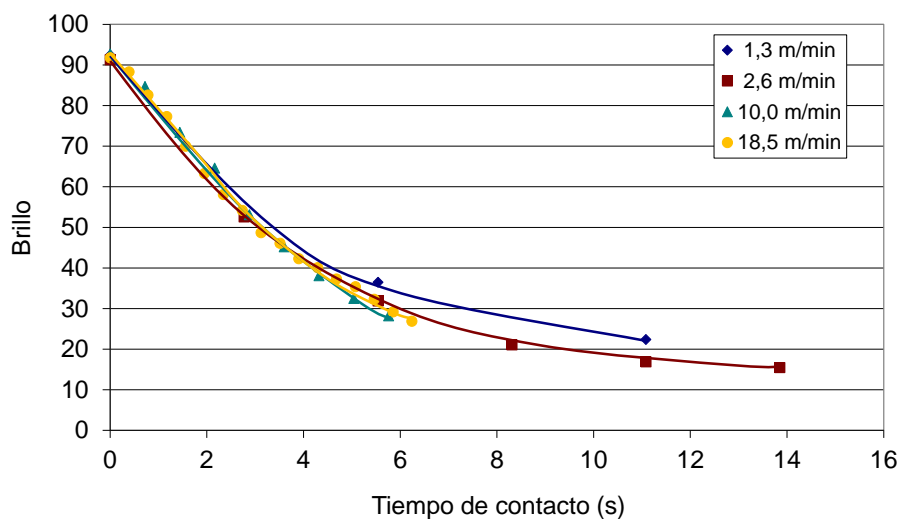
Figura 4.59 Brillo superficial en función del tiempo de contacto a diferentes presiones de cabezal.

Como puede apreciarse, la presión que ejerce el cabezal, en el intervalo de presiones considerado, es una variable de operación que tiene una considerable influencia sobre el desgaste que produce el equipo en la superficie de la baldosa que se trata.

#### 4.3.1.1.3 Influencia de la velocidad de avance de las baldosas

Otra de las variables de operación del equipo que, en principio, se consideró que podía afectar al desgaste generado, era la velocidad de avance de la cinta que transportaba las baldosas por debajo del cabezal.

Se realizaron ensayos a cuatro velocidades distintas. Los resultados obtenidos se han representado en la Figura 4.60, en la forma: brillo frente al tiempo de contacto muela-baldosa. Como puede apreciarse, en el intervalo de velocidades de la cinta transportadora ensayado, los cambios en el valor de esta variable de operación afectan poco a los resultados. Se podría seleccionar una velocidad u otra en función de si se necesita evaluar el desgaste a más largo o corto plazo de uso.



**Figura 4.60** Variación del brillo superficial con el tiempo de contacto, a diferentes velocidades de avance de la muestra.

#### 4.3.1.1.4 Durabilidad de las propiedades abrasivas del estropajo elegido

Otro importante factor a tener en cuenta es el tiempo durante el cual el estropajo seleccionado mantiene invariables sus propiedades abrasivas. Para determinarlo, se realizaron dos series de ensayos a las condiciones de presión del cabezal y velocidad de avance: en una, se cambiaba el estropajo de las

muestras por otro nuevo, después de cada pasada del material por el cabezal de desgaste (en adelante “etapa de desgaste”); en la otra, se mantenía el mismo estropajo a lo largo de todo el proceso de desgaste. Los resultados obtenidos se muestran en la representación gráfica de la Figura 4.61.

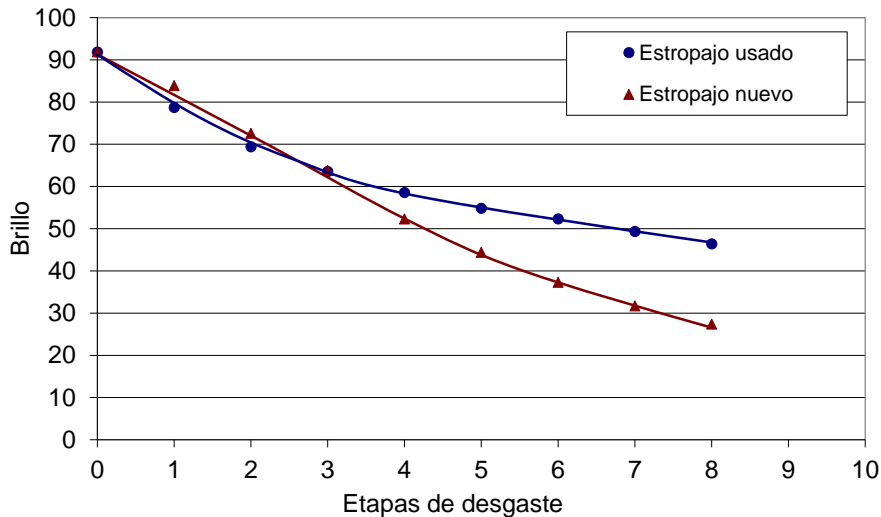


Figura 4.61 Evolución del brillo con el número de etapas de desgaste.

De esta representación gráfica se deduce que el estropajo utilizado mantiene su capacidad abrasiva prácticamente invariable durante cada tres pasadas del material (etapas de desgaste) por el cabezal del equipo. A partir de las tres pasadas va perdiendo efectividad progresivamente. Por tanto, habría que renovarlo periódicamente, al menos, cada tres etapas de desgaste.

#### 4.3.1.1.5 Condiciones de ensayo seleccionadas

Tras el estudio realizado sobre la influencia de cada una de las variables de operación que se consideraron más importantes, se llevó a cabo un ajuste progresivo de las mismas hasta lograr reproducir, con el equipo diseñado, los resultados que se obtenían al aplicar la metodología propuesta por la Norma UNE 138001 IN. Las condiciones de operación seleccionadas se detallan en la Tabla 4.25 y el estudio comparativo entre los resultados obtenidos con el equipo puesto a punto y los obtenidos aplicando la Norma indicada se exponen en el Apartado siguiente.

**Tabla 4.25. Condiciones de operación seleccionadas.**

Presión ejercida por el cabezal	0,4 kg/cm <sup>2</sup>
Velocidad de giro del cabezal	226 rpm
Velocidad de la cinta transportadora de la muestra	18,5 m/min
Longitud de muela	145 mm
Contenido en cuarzo del abrasivo (estropajo)	85% cuarzo
Tamaño medio de las partículas del abrasivo (estropajo)	45 μm
Renovación del elemento abrasivo (estropajo)	Cada 3 etapas de desgaste

#### 4.3.1.2 Efectividad del equipo de laboratorio diseñado para simular el desgaste por tránsito peatonal real

##### 4.3.1.2.1 Comparación con la evolución del brillo obtenida al aplicar el método de desgaste de la Norma UNE 138001 IN.

En primer lugar, operando a las condiciones que se detallan en la Tabla 4.25, se procedió a comparar los resultados que se obtenían, utilizando el equipo y metodología desarrollados y el procedimiento de simulación del desgaste propuesto en la Norma UNE 138001 IN, al aplicarlos sobre muestras de un mismo pavimento cerámico brillante, especialmente elegido para estos ensayos.

Los resultados obtenidos se muestran en las representaciones gráficas de la Figura 4.62, en las que se ha utilizado como magnitud representativa de la intensidad de la abrasión, el número de etapas de desgaste, en el caso del equipo de laboratorio diseñado, y el número de revoluciones, en el de la Norma UNE 138001 IN.

En dichas representaciones se ha utilizado el valor del brillo, resultante de la aplicación de uno y otro procedimiento de abrasión, como criterio comparativo para relacionar los valores de dichas magnitudes, a lo largo del proceso de desgaste de la superficie del pavimento ensayado. De modo que, para ajustar la escala superior del eje de abscisas, en la que se muestran los valores del número de etapas de desgaste a que se ha sometido la superficie de la pieza de pavimento ensayada, a la escala inferior del gráfico, se han hecho coincidir lo mejor posible, los valores del brillo obtenidos por uno y otro procedimiento.

Como puede apreciarse en la Figura 4.62, el equipo diseñado produce un desgaste (pérdida de brillo), sobre la pieza de pavimento cerámico ensayada, prácticamente coincidente con el resultante de aplicar la Norma UNE 138001 IN.

Si se cumplen las condiciones que se detallan en la Tabla 4.25, puede concluirse que el equipo construido y la metodología empleada permiten

simular adecuadamente, a escala de laboratorio, la abrasión que se produce por tránsito peatonal real.

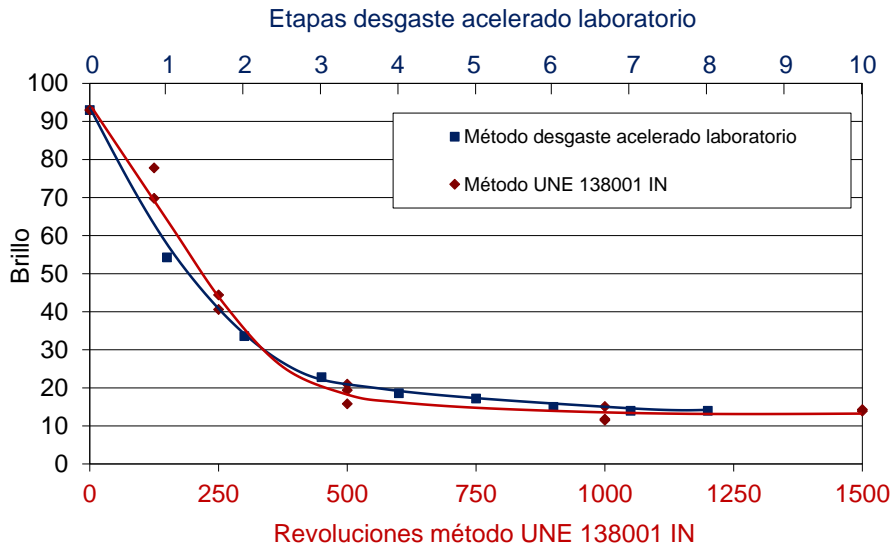


Figura 4.62 Comparación entre los resultados obtenidos por el método de desgaste acelerado desarrollado y por el método UNE 138001 IN.

#### 4.3.1.2.2 Comparación con la evolución del PTV en piezas sometidas a desgaste por tránsito peatonal real.

En el estudio cuyos resultados se han expuesto en el apartado anterior, se ha llegado a la conclusión de que el equipo de laboratorio diseñado y la metodología puesta a punto parecen simular satisfactoriamente el proceso de desgaste por tránsito peatonal, en base a la evolución del brillo.

A fin de comprobar la idoneidad del equipo y procedimiento desarrollados para reproducir la evolución que experimenta la *resistencia al deslizamiento* de un pavimento cerámico, cuando se desgasta por tránsito peatonal real, se consideró oportuno realizar un estudio similar al antes descrito, pero empleando como criterio comparativo el valor de dicha propiedad superficial, en lugar del brillo.

Así pues, en esta parte del trabajo se ha seguido el avance del desgaste, provocado tanto por tránsito peatonal real como mediante el equipo de laboratorio diseñado, estudiando la evolución que experimenta la resistencia al deslizamiento, en uno y otro caso, partiendo de muestras de piezas nuevas del mismo modelo de referencia. La resistencia al deslizamiento se ha determinado mediante el péndulo de fricción, según la Norma UNE-ENV 12633 Anexo A.

Los resultados obtenidos se exponen a continuación.

**a) Piezas instaladas, in situ, en “condiciones de locales exteriores”**

En el apartado 3.2.3.1.1 se describe el procedimiento que se ha utilizado para provocar el desgaste en piezas del modelo de referencia 4.37 por tránsito peatonal real. Muestras de pavimento cerámico del modelo de referencia 4.37 se colocaron en dos entradas del edificio del ITC, que se denominarán Acceso Norte y Acceso Sur, sometiéndolas a desgaste por tránsito peatonal. Los resultados de la variación de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste, expresada como número de personas que han transitado sobre el pavimento instalado (N) se muestran en la Tabla 4.26 y se han representado en la Figura 4.63, en la que los marcadores rojos corresponden a los resultados obtenidos en las muestras ubicadas en el acceso Sur y los azules a las muestras situadas en el acceso Norte. Como puede apreciarse, la evolución de la resistencia al deslizamiento, en las muestras de pavimento colocadas en ambas puertas de acceso, es prácticamente coincidente.

**Tabla 4.26. Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] con la intensidad del tránsito peatonal real (N). Modelo de referencia 4.37.**

Nº de personas (N) Acceso Sur	[PTV/100]	Nº de personas (N) Acceso Norte	[PTV/100]
0	0,49	0	0,49
1097	0,43	1035	0,43
3292	0,38	3105	0,37
5887	0,40	5585	0,37
7750	0,38	7309	0,36
9906	0,36	9313	0,34
12250	0,38	11276	0,35
14096	0,36	13048	0,33
15649	0,33	14835	0,31
17402	0,33	16821	0,31
19282	0,36	18622	0,33
21478	0,34	20536	0,32
23732	0,34	22549	0,31
25347	0,33	24040	0,30
27497	0,34	26035	0,30
32129	0,32	30392	0,31
35276	0,33	33577	0,31
39639	0,30	37433	0,31
44177	0,31	41947	0,30
47583	0,32	45222	0,30
51088	0,30	48470	0,29
55417	0,32	52390	0,31
67656	0,31	62452	0,29
213528	0,28	170558	0,28
281184	0,25	233010	0,25

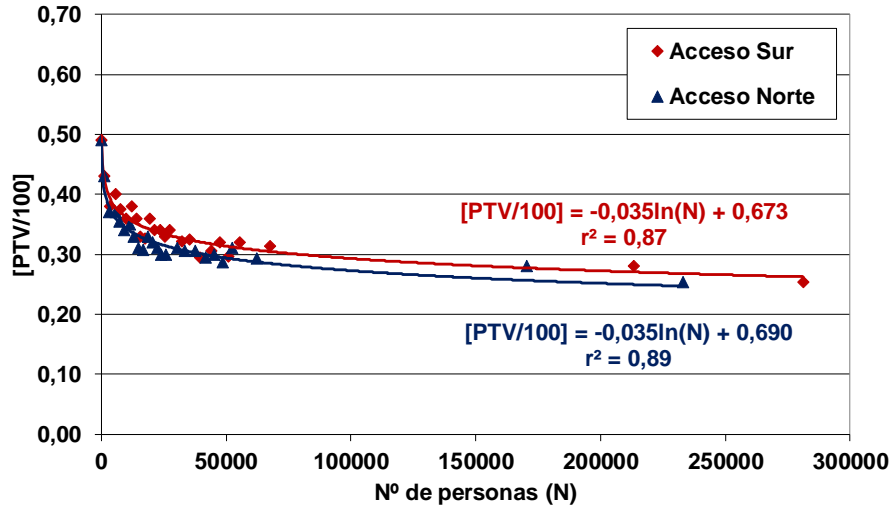


Figura 4.63 Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] con la intensidad del tránsito peatonal real (N). Modelo de referencia 4.37.

Al tratar de obtener una correlación sencilla entre los datos experimentales de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] y la intensidad del desgaste (N), se obtuvieron ajustes con valores del coeficiente de regresión ( $r^2$ ) muy elevados, tanto mediante líneas de regresión de tipo logarítmico, como de tipo potencial, en el intervalo de valores de la intensidad del desgaste estudiado:  $N \leq 300000$ .

Con líneas de regresión de tipo logarítmico de la forma:

$$[PTV/100] = -A \cdot \ln(N) + B \quad (4.37)$$

resultaron para  $r^2$ , los valores 0,87 y 0,89 para las muestras ubicadas en el acceso Sur y en el acceso Norte respectivamente (Figura 4.63). Estos valores fueron algo más altos que los obtenidos con líneas de regresión de tipo potencial, de la forma:

$$[PTV/100] = A \cdot N^B \quad (4.38)$$

Para poder realizar el ajuste que condujo a las líneas de regresión con mejores coeficientes de correlación, en uno y otro caso, se tuvo que suponer que el valor inicial de [PTV/100] correspondía a una intensidad de circulación de personas de  $N=1000$ , en lugar de a  $N=0$ . Las ecuaciones obtenidas (Figura 4.63) permiten, en este caso, reproducir con bastante exactitud los datos experimentales de [PTV/100], para valores de N iguales o mayores que 1000.



Una baldosa original de la misma muestra de referencia 4.37 se sometió a desgaste utilizando el equipo de laboratorio diseñado y la metodología descrita en el apartado 4.3.1.1.

Los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos, en función de la intensidad del desgaste, expresado en número de etapas de paso de las muestras a través del dispositivo de desgaste (etapas de desgaste), se detallan en la Tabla 4.27. A efectos comparativos, junto con los resultados obtenidos en el equipo de laboratorio, se muestran los valores correspondientes al desgaste por tránsito peatonal de una de las localizaciones estudiadas “in situ” (en este caso el “Acceso Sur”) que se había detallado en la Tabla 4.26. Unos y otros datos experimentales se han ubicado en dicha tabla de forma que coincidan prácticamente los respectivos valores de la resistencia al deslizamiento [PTV/100]. Tal y como se puede observar, el desgaste que se produce en una etapa de tratamiento en el equipo de laboratorio equivale aproximadamente al que resulta del tránsito real de 10.000 personas.

En la figura 4.64 se han representado las dos series de datos, ajustando la escala de abscisas superior respecto a la inferior, con arreglo a la equivalencia observada, que se ha mencionado en el párrafo anterior. Como puede apreciarse, las representaciones respectivas prácticamente coinciden, lo cual confirma la validez de la citada equivalencia, al menos en lo que se refiere al comportamiento del modelo 4.37.

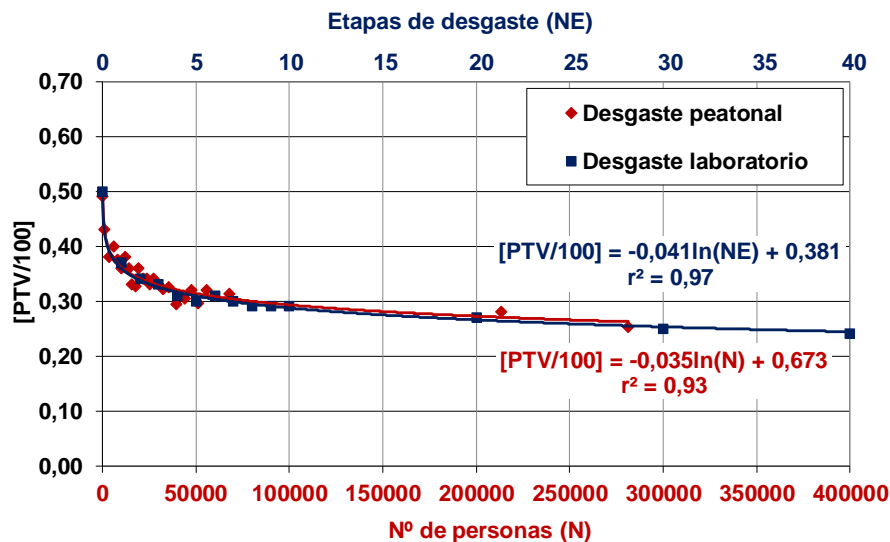


Figura 4.64 Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100], en el modelo de referencia 4.37, con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

**Tabla 4.27. Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] de la muestra 4.37 con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).**

Tránsito peatonal		Desgaste laboratorio	
Nº de personas (N)	[PTV/100]	Etapas desgaste (NE)	[PTV/100]
0	0,49	0	0,50
1097	0,43	-	-
3292	0,38	-	-
5887	0,40	-	-
7750	0,38	-	-
9906	0,36	1	0,37
12250	0,38	-	-
14096	0,36	-	-
15649	0,33	-	-
17402	0,33	-	-
19282	0,36	2	0,34
21478	0,34	-	-
23732	0,34	-	-
25347	0,33	-	-
27497	0,34	-	-
32129	0,32	3	0,33
35276	0,33	-	-
39639	0,30	4	0,31
44177	0,31	-	-
47583	0,32	-	-
51088	0,30	5	0,30
55417	0,32	6	0,31
67656	0,31	7	0,30
-	-	8	0,29
-	-	9	0,29
-	-	10	0,29
213528	0,28	20	0,27
281184	0,25	30	0,25
-	-	40	0,24

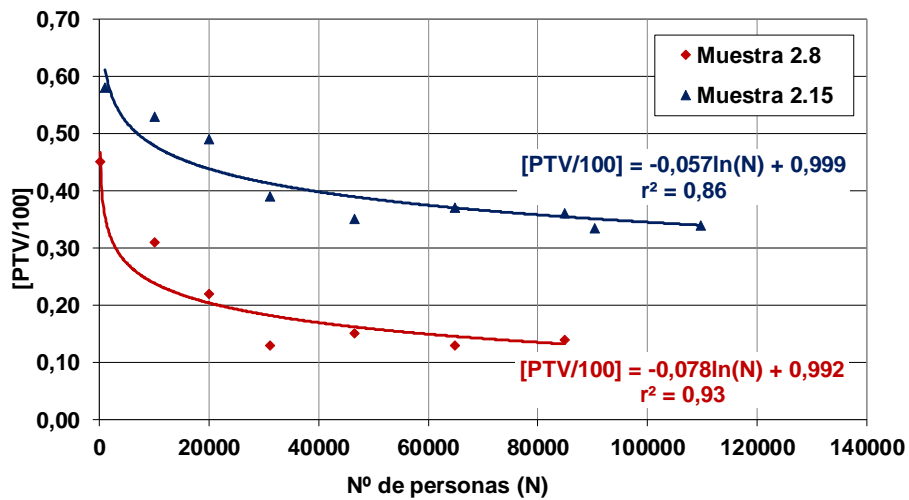
**b) Piezas instaladas “in situ”, en “condiciones de uso interior” en un local con acceso directo al exterior**

En el apartado 3.2.3.1.2 se ha descrito el procedimiento empleado y la ubicación elegida para colocar las piezas a estudiar que, en este caso, fueron de los modelos de referencia 2.8 y 2.15.

Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 4.28 y se han representado, en la forma [PTV/100] frente a N, en la Figura 4.65.

**Tabla 4.28. Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] de las muestras de los modelos de referencia 2.8 y 2.15 con la intensidad del tránsito peatonal (N).**

Nº de personas (N)	[PTV/100] Muestra 2.8	[PTV/100] Muestra 2.15
0	0,45	0,58
10082	0,31	0,53
19982	0,22	0,49
31032	0,13	0,39
46579	0,15	0,35
64797	0,13	0,37
84838	0,14	0,36
90381	-	0,34
109825	-	0,34



**Figura 4.65 Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal real (N). Modelos de referencia 2.8 y 2.15.**

Las representaciones gráficas de la Figura 4.65 se han podido ajustar mediante ecuaciones análogas a la (4.37) aunque, en este caso, se obtuvieron

#### 4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

valores del coeficiente de regresión ( $r^2$ ) algo menores: 0,93 para la muestra del modelo 2.8 y 0,86 para la del modelo 2.15. Como puede apreciarse en las representaciones de dicha figura, algunos marcadores, correspondientes a datos experimentales obtenidos en el tramo inicial de las mismas, están situados un poco por encima de la curva de regresión respectiva. En cambio, las curvas de regresión se ajustan bien a los resultados correspondientes a los valores de la intensidad de desgaste (N) más altos estudiados. Este comportamiento garantiza la efectividad de su uso para reproducir la evolución, a largo plazo (valores de N del orden de 110.000 o mayores) de la resistencia al deslizamiento del pavimento cerámico para el que se han deducido.

Tal y como se había hecho en el apartado anterior, una baldosa original de las muestras de referencia 2.8 y 2.15 se sometió a desgaste utilizando el equipo de laboratorio diseñado y la metodología descrita en el apartado 4.3.1.1.

En la Tabla 4.29 y Tabla 4.30, junto con los resultados obtenidos en el equipo de laboratorio, se muestran los valores de los datos de desgaste por tránsito peatonal obtenidos para los modelos de referencia 2.8 y 2.15 respectivamente.

**Tabla 4.29. Variación del valor medio de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] de las muestras del modelo de referencia 2.8 con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).**

Tránsito peatonal		Desgaste laboratorio	
Nº de personas (N)	[PTV/100]	Etapas desgaste (NE)	[PTV/100]
0	0,45	0	0,45
10082	0,31	1	0,25
19982	0,22	2	0,20
31032	0,13	3	0,18
46579	0,15	4	-
64797	0,13	6	0,16
84838	0,14	8	-
90381	-	9	0,15
109825	-	10	-
-	-	12	0,15

**Tabla 4.30. Variación del valor medio de la resistencia al deslizamiento [PTV/100] de las muestras del modelo de referencia 2.15 con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).**

Tránsito peatonal		Desgaste laboratorio	
Nº de personas (N)	[PTV/100]	Etapas desgaste (NE)	[PTV/100]
0	0,58	0	0,59
10082	0,53	1	-
19982	0,49	2	0,46
31032	0,39	3	-
46579	0,35	4	0,42
64797	0,37	6	0,37
84838	0,36	8	0,33
90381	0,34	9	-
109825	0,34	10	0,32
-	-	12	0,31

En la Figura 4.66 y Figura 4.67 se han representado las dos series de datos de las tablas anteriores, ajustando la escala de abscisas superior respecto a la inferior, con arreglo a la equivalencia aproximada entre NE y N mencionada anteriormente ( $N \cong 10000 * NE$ ). Como puede apreciarse, las representaciones correspondientes a los datos obtenidos por desgaste en el equipo de laboratorio y por tránsito peatonal prácticamente coinciden, lo cual confirma la validez de la citada equivalencia, al menos en lo que se refiere al comportamiento de los modelos 4.37, 2.8, y 2.15: Esta conclusión se confirmará más adelante, al estudiar el comportamiento de otros modelos de pavimento cerámico (apartado 4.3.2.3).

Como puede apreciarse en la Figura 4.66 y Figura 4.67, las representaciones de [PTV/100] frente al número de etapas de desgaste (NE), correspondientes a los datos obtenidos en el equipo de laboratorio, se han podido ajustar bien, a líneas de regresión de ecuación análoga a la (4.37):

$$[PTV/100] = -A * \ln(NE) + B \quad (4.39)$$

(siendo NE el número de etapas de desgaste) con coeficientes de regresión ( $r^2$ ) de 0,97 para el modelo 4.37, 0,94 para el modelo 2.8, y 0,96 para el modelo 2.15. Para realizar el ajuste se ha supuesto que el valor inicial de [PTV/100] correspondía a la intensidad de desgaste que se produciría en el valor ficticio de  $NE=0,1$  en lugar de a  $NE=0$ .

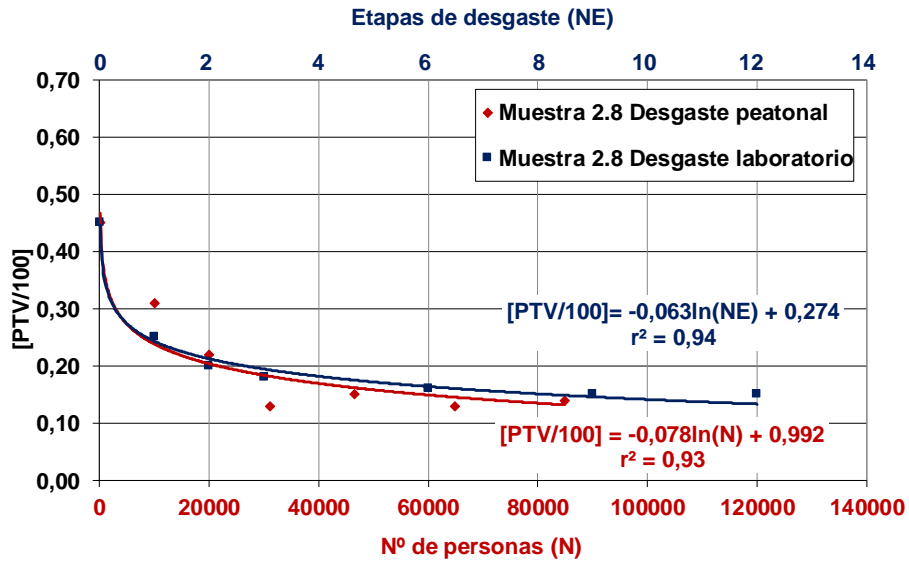


Figura 4.66 Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100], en el modelo de referencia 2.8, con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).

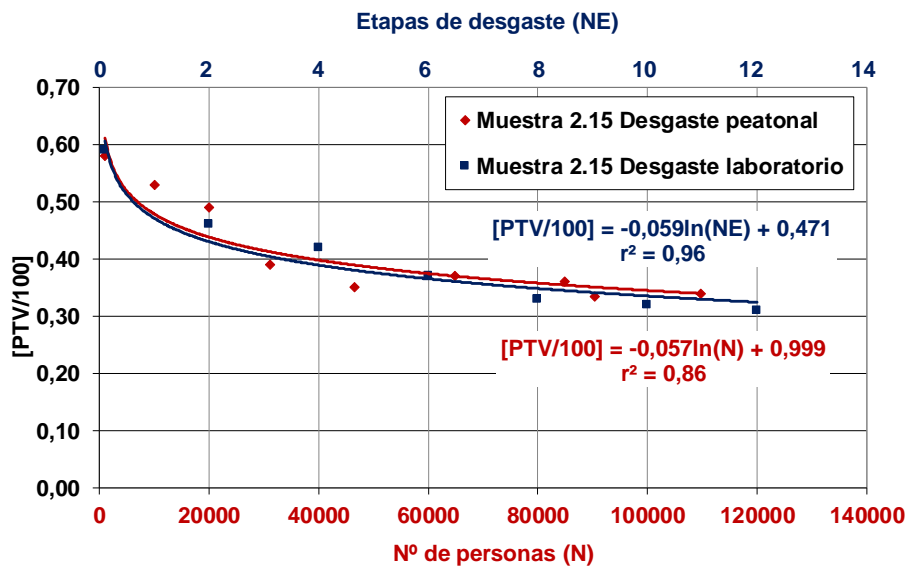


Figura 4.67 Variación de la resistencia al deslizamiento [PTV/100], en el modelo de referencia 2.15, con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal (N) y en el equipo de laboratorio (NE).

De cuanto antecede se deduce que, tanto en el caso de desgaste por tránsito peatonal real, como en el de desgaste con el equipo de laboratorio, las gráficas obtenidas al representar la evolución del valor de la resistencia al deslizamiento frente a la magnitud representativa de la intensidad del desgaste, en los tres modelos de pavimento estudiados, se pueden ajustar bastante bien mediante líneas de regresión de tipo logarítmico, de la forma general:

$$Rd = -A*\ln(ID) + B \quad (4.40)$$

En esta ecuación, Rd representa la resistencia al deslizamiento e (ID) la magnitud que mide la intensidad del tránsito peatonal, expresada en número de personas transitadas realmente (N), o en número de etapas de desgaste del equipo de laboratorio (NE). Los valores de los parámetros A y B, en uno y otro caso, deben estar relacionados, en cierto modo, con la naturaleza y topografía de la superficie del pavimento y con la magnitud (Rd) que se emplee para expresar la resistencia al deslizamiento, que dependerá del procedimiento de medida de dicha propiedad que se utilice. En nuestro caso se ha usado la magnitud que resulta de realizar las medidas con el péndulo de fricción, expresada como [PTV/100].

#### 4.3.1.2.3 Repetibilidad de las medidas efectuadas con el equipo de ensayo a escala de laboratorio

Finalmente, con la intención de comprobar la reproducibilidad de las medidas efectuadas con el equipo de ensayo a escala de laboratorio, dos muestras diferentes de pavimento cerámico de cada uno de los modelos de referencia originales 2.12 y 2.15 se sometieron a desgaste con dicho equipo, midiendo la resistencia al deslizamiento después de cada etapa de desgaste. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4.31 y se muestran en la representación gráfica de la Figura 4.68.

**Tabla 4.31. Variación de los valores de [PTV/100], de las dos muestras de cada uno de los modelos 2.12 y 2.15, con las etapas de desgaste con el equipo de laboratorio.**

Etapas	2.12	2.12-2	2.15	2.15-2
0	0,61	0,61	0,59	0,56
1	0,39	0,38	-	-
2	0,34	0,36	0,46	0,44
3	0,33	0,34	-	-
4	-	-	0,42	0,40
6	0,29	0,30	0,37	0,37
8	-	-	0,33	0,33
9	0,27	0,28	-	-
10	-	-	0,32	0,32
12	0,25	0,26	0,31	0,31
15	0,22	0,24	-	-
18	0,22	0,23	-	-
21	0,21	0,22	-	-

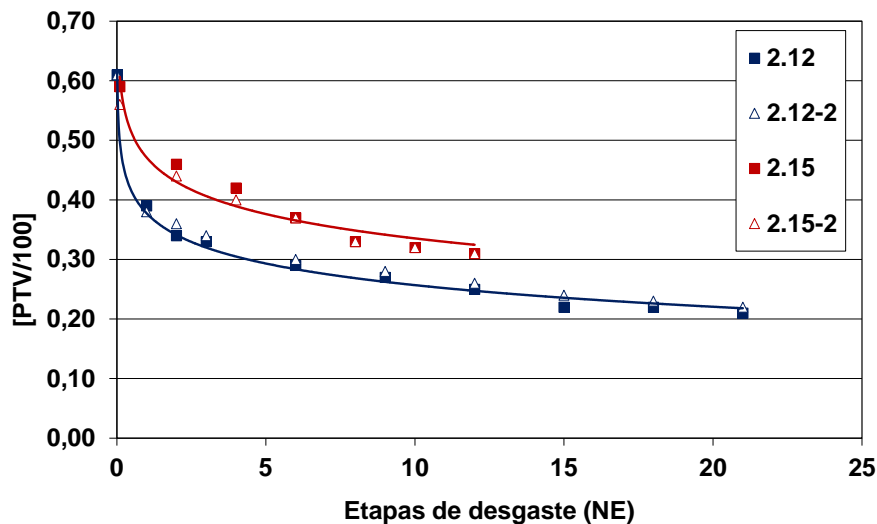


Figura 4.68 Evaluación de la reproducibilidad de las medidas efectuadas con el equipo de desgaste de laboratorio.

### 4.3.2 Evolución de la resistencia al deslizamiento con el progresivo desgaste superficial

#### 4.3.2.1 Piezas sometidas a desgaste por tránsito peatonal real

En la Tabla 4.32 y Tabla 4.33 se muestra la evolución que experimenta la resistencia al deslizamiento ([PTV/100]), con la intensidad del tránsito peatonal, en los diferentes modelos de superficie de pavimento cerámico estudiados, encuadrados en los Grupos 1 a 4. Dicha evolución se ha plasmado en las representaciones gráficas que se muestran en las figuras 4.69 a 4.71.

En las representaciones obtenidas para los modelos de referencia con topografía más rugosa y con mayor resistencia inicial al deslizamiento, parece apreciarse una disminución más acentuada de dicha propiedad con la intensidad del desgaste que en los modelos lisos y de menor rugosidad inicial.



**Tabla 4.32. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia de los Grupos 1 y 2, al desgastarlas “in situ” por tránsito peatonal.**

Personas (N)	1.5	2.8	2.10	2.12	2.14	2.15	2.16	2.19	2.20	2.21	2.22
0	0,17	0,45	0,39	0,62	0,55	0,58	0,32	0,47	0,26	0,16	0,15
5543	-	-	-	0,49	-	-	-	-	-	-	-
10082	0,16	0,31	0,31	-	-	0,53	-	-	0,21	0,14	0,14
18218	-	-	-	-	0,39	-	0,20	0,34	-	-	-
19982	0,14	0,22	0,31	-	-	0,49	-	-	0,20	0,15	0,12
24987	-	-	-	0,34	-	-	-	-	-	-	-
25952	-	-	-	-	0,36	-	0,17	0,31	-	-	-
30524	-	-	-	-	0,35	-	0,17	0,30	-	-	-
31032	0,11	0,13	0,24	-	-	0,39	-	-	0,16	0,14	0,10
36066	-	-	-	-	0,36	-	0,17	0,30	-	-	-
46579	0,11	0,15	0,22	-	-	0,35	-	-	0,15	0,12	0,09
55511	-	-	-	-	0,36	-	0,17	0,31	-	-	-
64797	-	0,13	0,23	-	-	0,37	-	-	0,16	-	0,10
84838	-	0,14	0,21	-	-	0,36	-	-	0,15	-	0,10
90381	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-	-	-
109825	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-	-	-

**Tabla 4.33. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia de los Grupos 3 y 4, al desgastarlas “in situ” por tránsito peatonal.**

Personas (N)	3.23	3.24	3.31	4.38	4.39	4.41	4.47	4.49
0	0,47	0,56	0,51	0,49	0,34	0,45	0,56	0,62
5543	0,42	0,53	-	-	-	0,38	-	-
10082	-	-	0,47	0,42	0,34	-	0,54	0,57
19982	-	-	0,42	0,41	0,30	-	0,52	0,53
24987	0,36	0,52	-	-	-	0,38	-	-
31032	-	-	0,34	0,33	0,27	-	0,45	0,46
46579	-	-	0,30	0,34	0,27	-	0,44	0,46
64797	-	-	0,30	0,36	0,26	-	0,43	0,47
84838	-	-	0,29	-	0,26	-	0,42	0,47
90381	-	-	0,29	0,36	-	-	0,40	0,47
109825	-	-	0,28	0,34	-	-	0,41	0,47

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

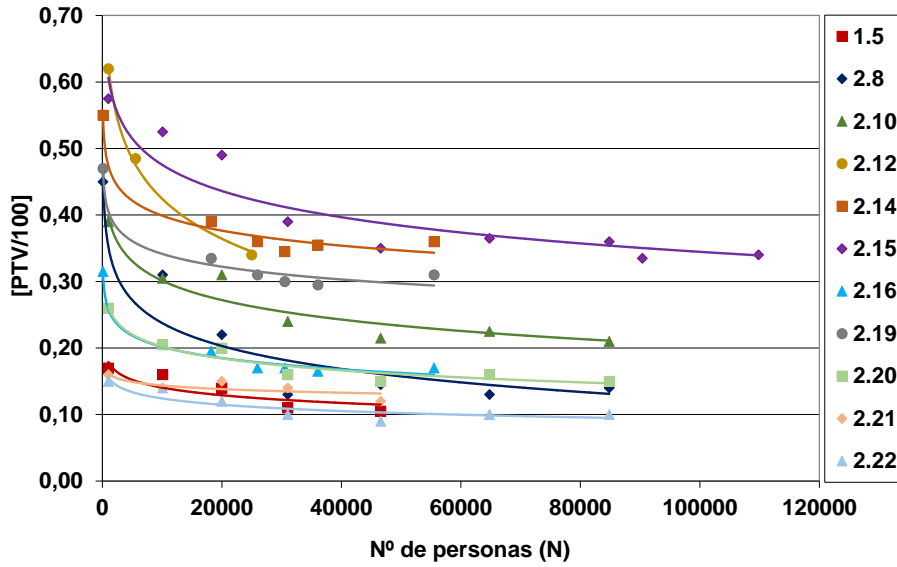


Figura 4.69 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en los Grupos 1 y 2.

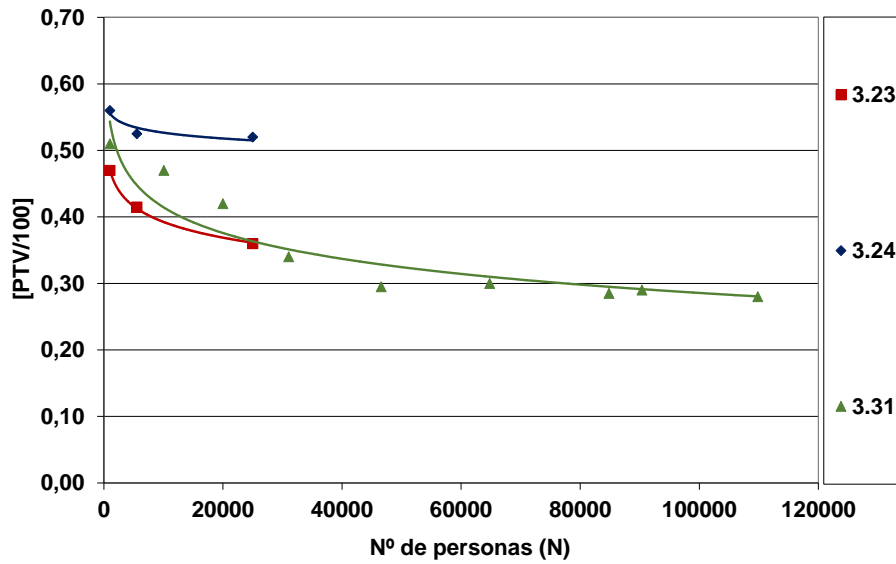
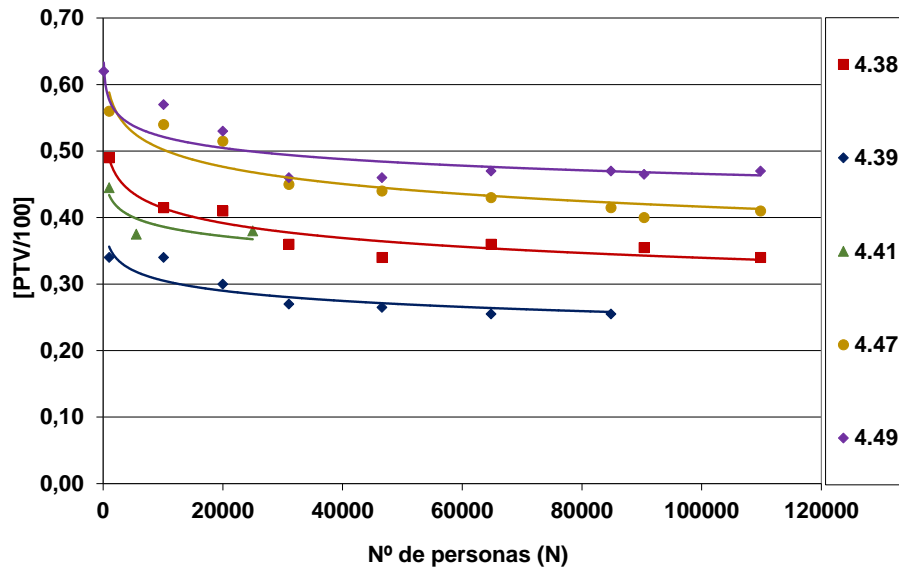


Figura 4.70 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 3.



**Figura 4.71** Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 4.

Como puede apreciarse en las tres figuras anteriores, en todos los casos, dichas representaciones tienden asintóticamente a un valor prácticamente constante y se ajustan bastante bien, en el intervalo de valores de  $N$  estudiado, a líneas de regresión de la forma de la ecuación (4.37), según se desprende de los valores de los coeficientes de correlación resultantes del ajuste de los datos experimentales respectivos, mediante dicha ecuación (Tabla 4.34). Aunque debe ponerse de manifiesto que, en algunas de las representaciones obtenidas, los marcadores correspondientes a valores de  $N \leq 30000$ , quedan un poco por encima de las respectivas curvas de regresión.

En la Tabla 4.34 se muestran los valores del coeficiente de regresión ( $r^2$ ) y de los parámetros A y B de la ecuación (4.37) al aplicarla a los resultados experimentales obtenidos para los diferentes modelos de superficie estudiados.

#### 4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

**Tabla 4.34. Valores del coeficiente de correlación ( $r^2$ ) y de los parámetros A y B de la ecuación (4.37) obtenidos. Ensayos de desgaste por tránsito peatonal.**

Muestra	[PTV/100] <sub>0</sub>	$r^2$	A	B
1.5	0,17	0,74	0,016	0,292
2.8	0,45	0,93	0,078	0,992
2.10	0,39	0,91	0,042	0,690
2.12	0,62	0,99	0,085	1,216
2.14	0,55	0,96	0,052	0,907
2.15	0,58	0,86	0,057	0,999
2.16	0,32	0,97	0,039	0,585
2.19	0,47	0,96	0,045	0,775
2.20	0,26	0,93	0,026	0,442
2.21	0,16	0,64	0,008	0,215
2,22	0,15	0,80	0,014	0,250
3.23	0,47	0,99	0,034	0,704
3.24	0,56	0,90	0,013	0,644
3.31	0,51	0,87	0,056	0,930
4.37	0,49	0,89	0,035	0,690
4.38	0,49	0,92	0,032	0,712
4.39	0,34	0,77	0,022	0,507
4.41	0,45	0,77	0,021	0,581
4.47	0,56	0,84	0,037	0,845
4.49	0,62	0,86	0,037	0,879

#### 4.3.2.2 Piezas sometidas a desgaste acelerado en el laboratorio

Utilizando el equipo de desgaste acelerado en laboratorio, se trataron diferentes modelos de superficie de piezas cerámicas, la mayoría coincidentes con los estudiados en el apartado anterior, al objeto de evaluar la evolución de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste, expresada, en este caso, como número de etapas de desgaste (NE).

En las tablas 4.35 a 4.38 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes modelos ensayados.

En las figuras 4.72 a 4.75 se ha representado la evolución de [PTV/100] con la intensidad del desgaste (etapas de desgaste) para cada una de las muestras de los modelos de referencia ensayados. Las representaciones resultantes son similares a las obtenidas en el estudio descrito en el apartado anterior, adaptándose bien a la ecuación (4.39). Como puede apreciarse, prácticamente todas las curvas de regresión obtenidas se ajustan mejor a los datos experimentales, en el tramo de valores de  $NE \leq 3$  (equivalente aproximadamente a  $N \leq 30000$  en tránsito peatonal) que en el caso de desgaste por tránsito peatonal.

**Tabla 4.35. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia encuadrados en el Grupo 2, al desgastarlas en el equipo de laboratorio.**

Etapas	2.8	2.10	2.12	2.14	2.15	2.16	2.17	2.19	2.20
0	0,45	0,38	0,61	0,53	0,59	0,32	0,24	0,49	0,25
1	0,25	0,31	0,39	0,35	-	-	-	0,31	0,19
2	0,20	0,27	0,34	0,29	0,46	-	-	0,28	0,17
3	0,18	0,25	0,33	0,26	-	0,16	0,19	0,26	0,15
4	-	-	-	0,25	0,42	-	-	-	-
5	-	-	-	0,24	-	-	-	0,26	-
6	0,16	0,23	0,29	-	0,37	0,12	0,17	-	0,14
7	-	-	-	-	-	-	-	0,26	-
8	-	-	-	0,24	0,33	-	-	-	-
9	0,15	0,22	0,27	-	-	0,10	0,17	0,25	0,13
10	-	-	-	-	0,32	-	-	-	-
11	-	-	-	0,22	-	-	-	0,24	-
12	0,15	0,20	0,25	-	0,31	0,10	0,16	-	0,12
14	-	-	-	0,20	0,00	0,10	-	0,23	-
15	-	0,19	0,22	-	-	-	0,16	-	-
17	-	-	-	0,19	-	-	-	0,22	-
18	-	-	0,22	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	0,19	-	-	-	0,22	-
21	-	-	0,21	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	0,19	-	-	-	-	-

**Tabla 4.36. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia encuadrados en el Grupo 3, al desgastarlas en el equipo de laboratorio.**

Etapas	3.23	3.24	3.30	3.31	3.32
0	0,48	0,56	0,20	0,46	0,18
1	0,34	0,58	-	0,36	-
2	0,30	0,57	-	0,34	-
3	0,29	0,58	0,16	0,32	0,16
6	0,26	0,58	0,15	0,29	0,15
9	0,24	0,57	0,13	0,25	0,13
12	0,24	0,56	0,13	0,23	0,13
15	-	-	0,13	-	0,13

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

**Tabla 4.37. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia encuadrados en el Grupo 4, al desgastarlas en el equipo de laboratorio.**

Etapas	4.35	4.38	4.39	4.41	4.47	4.49
0	0,40	0,46	0,36	0,42	0,56	0,65
1	-	0,44	0,35	0,37	0,50	0,57
2	-	0,43	0,33	0,36	0,45	0,57
3	0,36	0,41	0,33	0,35	0,44	0,54
4	-	-	-	-	-	0,53
5	-	-	-	-	-	0,54
6	0,35	0,42	0,32	0,30	0,41	0,54
7	-	-	-	-	-	0,53
8	-	-	-	-	-	0,50
9	0,34	0,39	0,31	0,29	0,41	0,52
10	-	-	-	-	-	0,51
11	-	-	-	-	-	0,49
12	0,30	0,38	0,31	0,28	0,39	0,49
13	-	-	-	-	-	0,49
15	0,30	0,38	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	0,48
18	0,30	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0,48
22	-	-	-	-	-	0,48
25	-	-	-	-	-	0,45
28	-	-	-	-	-	0,46
31	-	-	-	-	-	0,45

**Tabla 4.38. Variación de [PTV/100] en muestras de los modelos de referencia encuadrados en el Grupo 5, al desgastarlas en el equipo de laboratorio.**

Etapas	5.50	5.51
0	0,59	0,41
2	0,38	0,34
4	0,36	0,35
6	0,33	0,34
8	-	0,34
9	0,30	-
10	-	0,33
12	0,28	0,32
14	-	0,32
15	0,26	-
18	0,26	-
21	0,24	-
24	0,24	-
27	0,22	-
30	0,22	-
33	0,21	-
36	0,20	-
39	0,19	-
42	0,19	-

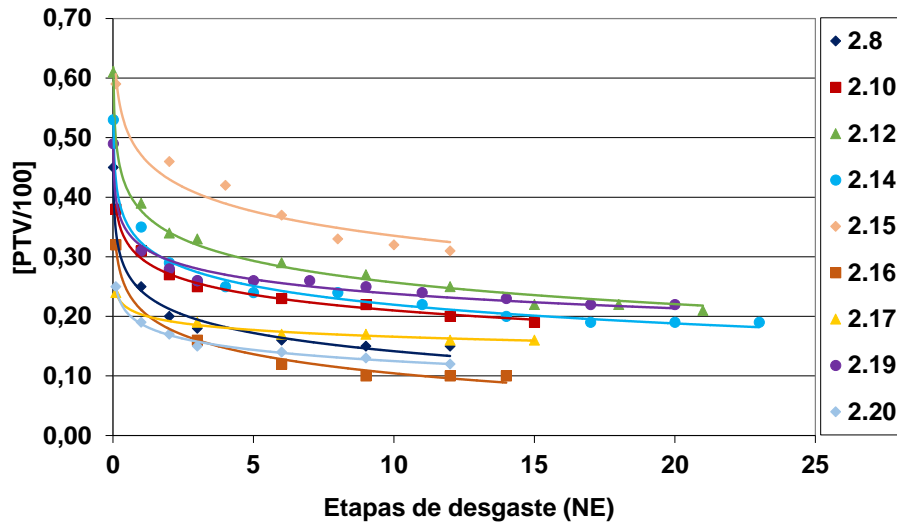


Figura 4.72 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 2.

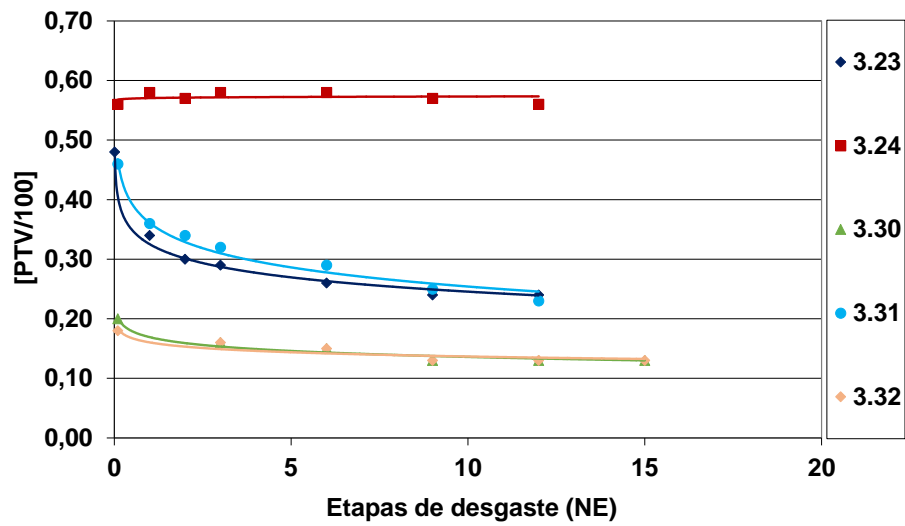


Figura 4.73 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 3.

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

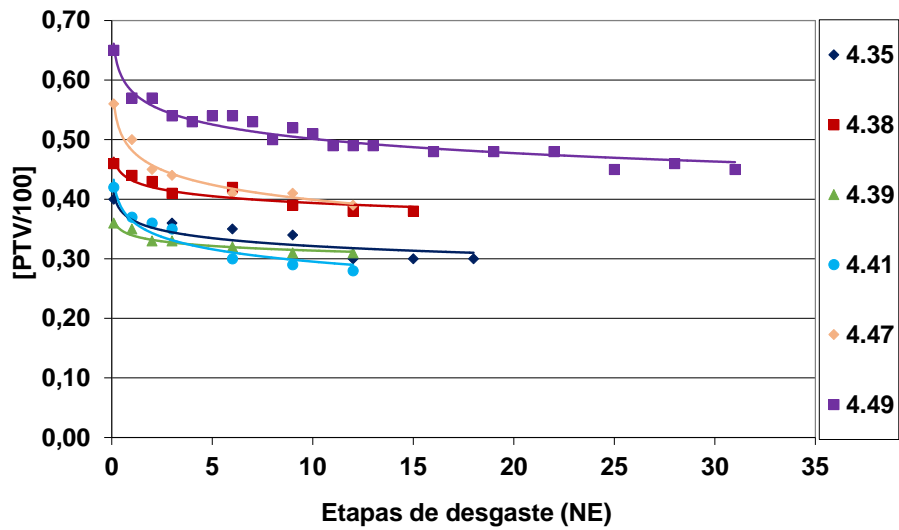


Figura 4.74 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 4.

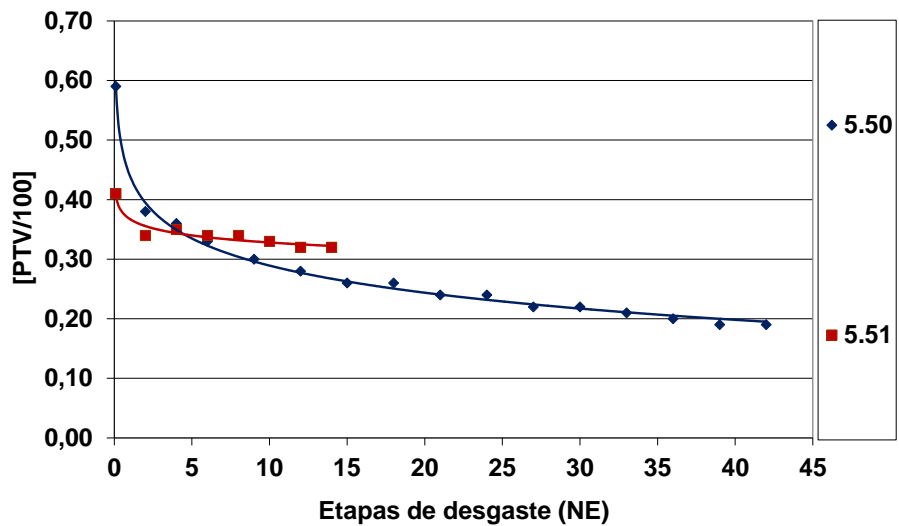


Figura 4.75 Evolución de la resistencia al deslizamiento, con la intensidad del desgaste (N), en los modelos de pavimento encuadrados en el Grupo 5.



En la Tabla 4.39 se muestran los valores del coeficiente de regresión ( $r^2$ ) y de los parámetros A y B de la ecuación (4.39), obtenidos al aplicarla a los resultados experimentales obtenidos para los diferentes modelos de superficie estudiados.

Al comparar los valores del coeficiente de regresión obtenidos (Tabla 4.34 y Tabla 4.39) a partir de las representaciones gráficas anteriores (figuras 4.64 a 4.75), se observa que la ecuación de tipo logarítmico propuesta se ajusta mejor (coeficientes de regresión mayores), en casi todos los casos, a los datos experimentales representativos de la variación de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste, cuando la abrasión de las baldosas cerámicas se realiza con el equipo de laboratorio que cuando se efectúa por tránsito peatonal real. Este resultado no es de extrañar ya que el equipo de laboratorio realiza la abrasión de la superficie de las muestras de pavimento en condiciones prácticamente invariables. En cambio, el desgaste por tránsito peatonal real del pavimento cerámico instalado se produce en condiciones variables (con mayor o menor humedad, con presencia variable de contaminantes sólidos abrasivos, diferente peso de las personas que transitan, etc.) a lo largo del prolongado periodo de uso.

**Tabla 4.39. Valores del coeficiente de correlación ( $r^2$ ) y de los parámetros A y B de la ecuación (4.39) obtenidos. Ensayos de desgaste con el equipo de laboratorio.**

Muestra	[PTV/100] <sub>0</sub>	$r^2$	A	B
2.8	0,45	0,94	0,063	0,274
2.10	0,39	0,99	0,038	0,298
2.12	0,61	0,98	0,071	0,417
2.14	0,53	0,96	0,061	0,356
2.15	0,59	0,95	0,059	0,471
2.16	0,32	0,99	0,046	0,211
2.17	0,24	0,99	0,016	0,203
2.19	0,49	0,91	0,047	0,343
2.20	0,25	0,99	0,027	0,187
3.23	0,48	0,98	0,051	0,351
3.30	0,20	0,96	0,014	0,169
3.31	0,46	0,98	0,046	0,361
3.32	0,18	0,86	0,010	0,160
4.35	0,40	0,82	0,019	0,366
4.37	0,50	0,97	0,041	0,381
4.38	0,49	0,93	0,017	0,430
4.39	0,36	0,92	0,011	0,340
4.41	0,42	0,93	0,030	0,364
4.47	0,56	0,98	0,036	0,482
4.49	0,65	0,94	0,035	0,581
5.50	0,59	1,00	0,066	0,440
5.51	0,41	0,93	0,017	0,368

4.3.2.3 Comparación de los resultados obtenidos por desgaste acelerado y por tránsito peatonal.

De las representaciones de la Figura 4.64, Figura 4.66, y Figura 4.67 (apartado 4.3.1.2.2), se obtuvo la conclusión de que el desgaste producido durante una etapa en el equipo de laboratorio era prácticamente equivalente al originado por el tránsito real de 10.000 personas.

Con la intención de confirmar esta equivalencia, se han comparado varias representaciones de la variación del [PTV/100] con la intensidad del desgaste, obtenidas por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el laboratorio, correspondientes a varios modelos de pavimento cerámico ensayados, tomando como criterio comparativo el anteriormente indicado.

En la mayor parte de los casos, como puede apreciarse en las Figuras 4.76 a 4.83, se obtienen representaciones prácticamente coincidentes utilizando dicho criterio de equivalencia, por lo que puede concluirse que el desgaste producido en una etapa del equipo de laboratorio diseñado puede considerarse prácticamente equivalente al originado por el tránsito real de 10.000 personas.

También puede observarse que las curvas correspondientes a las superficies de perfil plano con mayor o menor rugosidad (grupo 2) se acoplan perfectamente al desgaste real mientras que las que presentan cierta ondulación o relieve pueden diferir ligeramente de las curvas obtenidas en condiciones reales. Aun así, el procedimiento acelerado de laboratorio es capaz de realizar una buena aproximación del desgaste real que se va a producir sobre cualquier tipo de superficie.

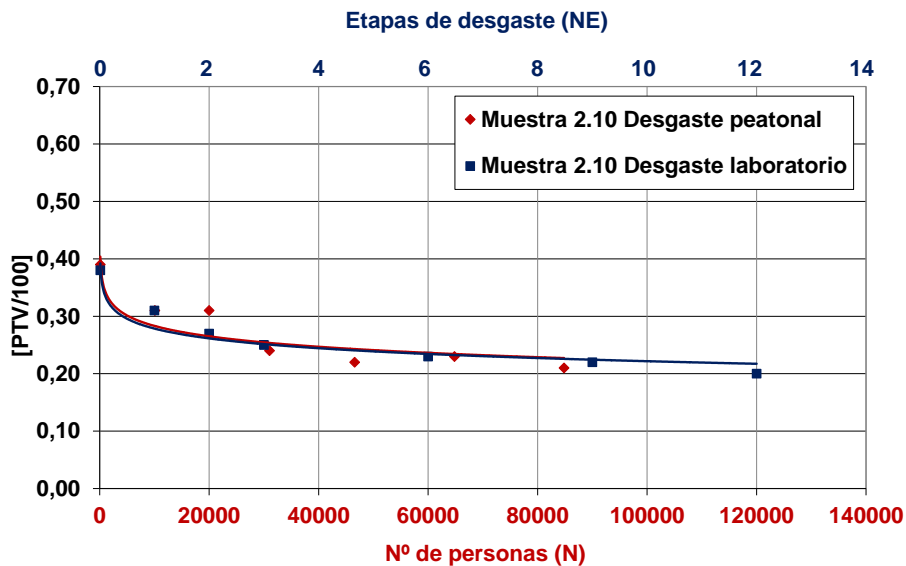


Figura 4.76 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 2.10).

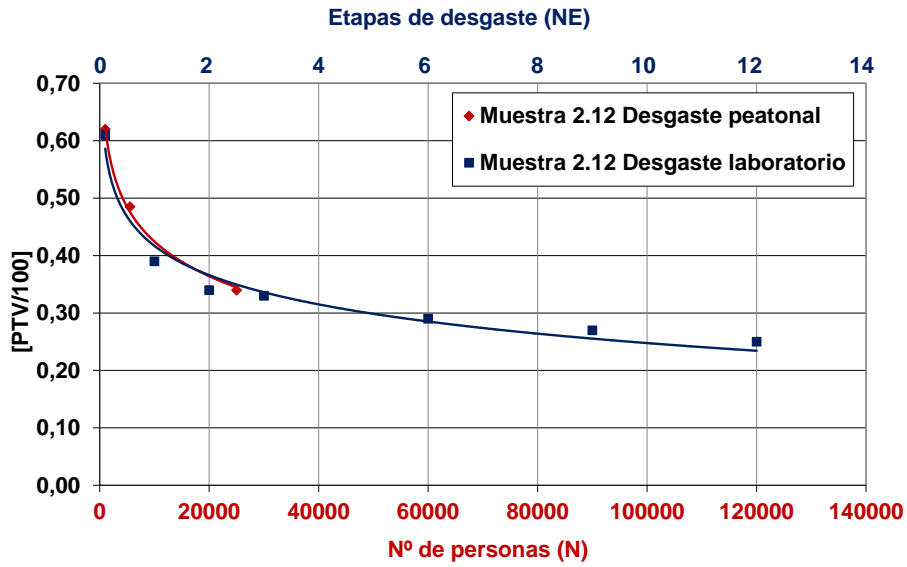


Figura 4.77 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 2.12).

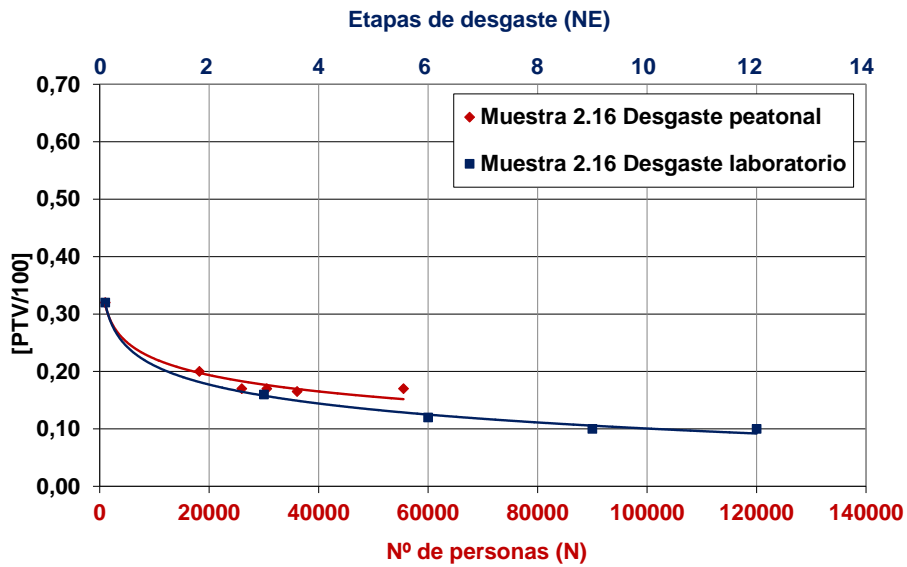


Figura 4.78 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 2.16).

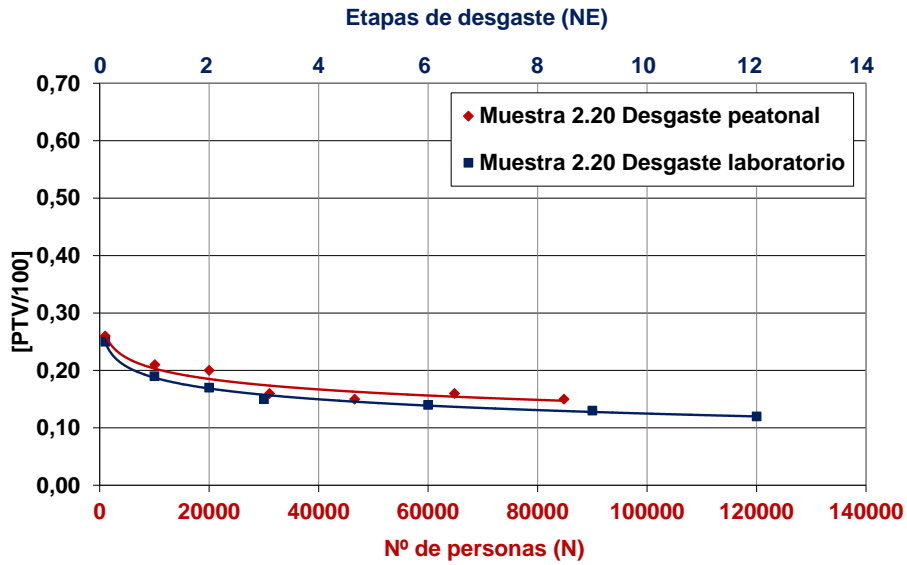


Figura 4.79 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 2.20).

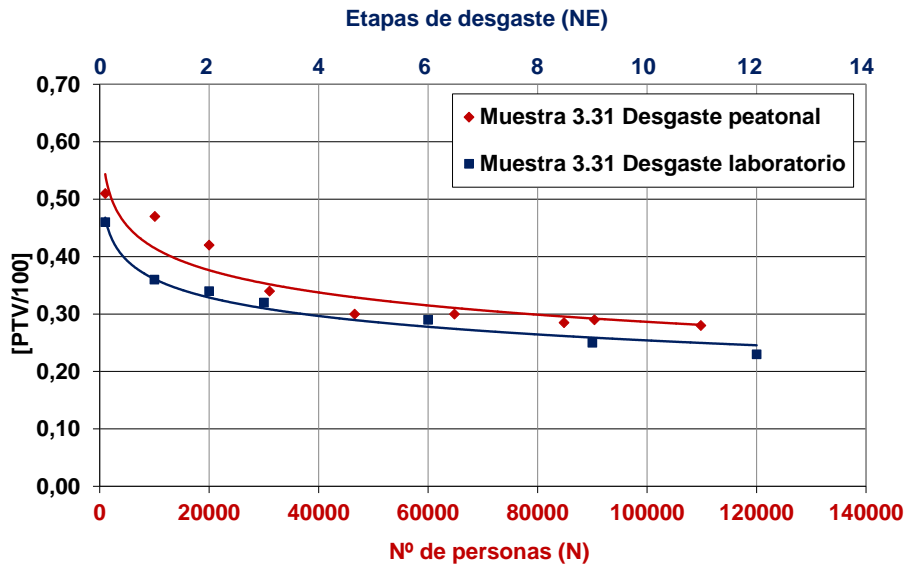


Figura 4.80 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 3.31).

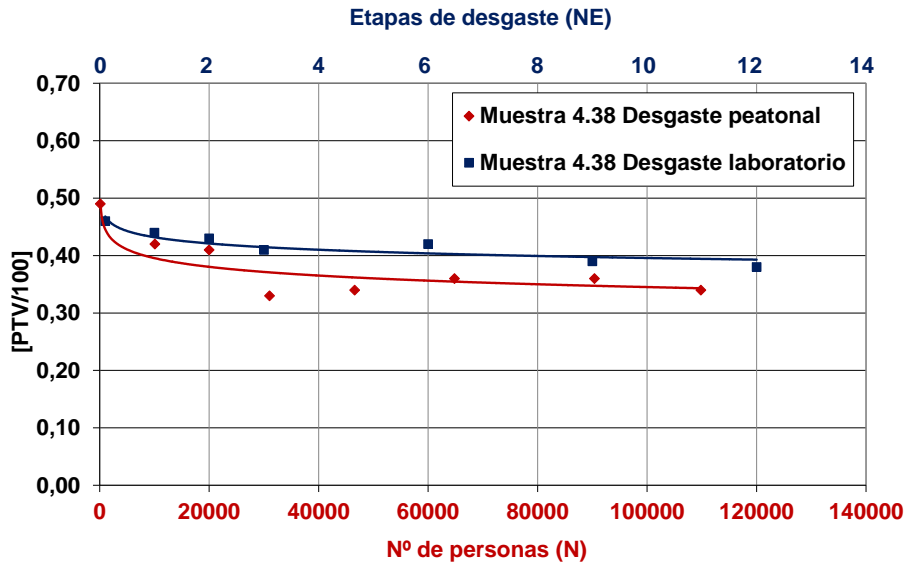


Figura 4.81 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 4.38).

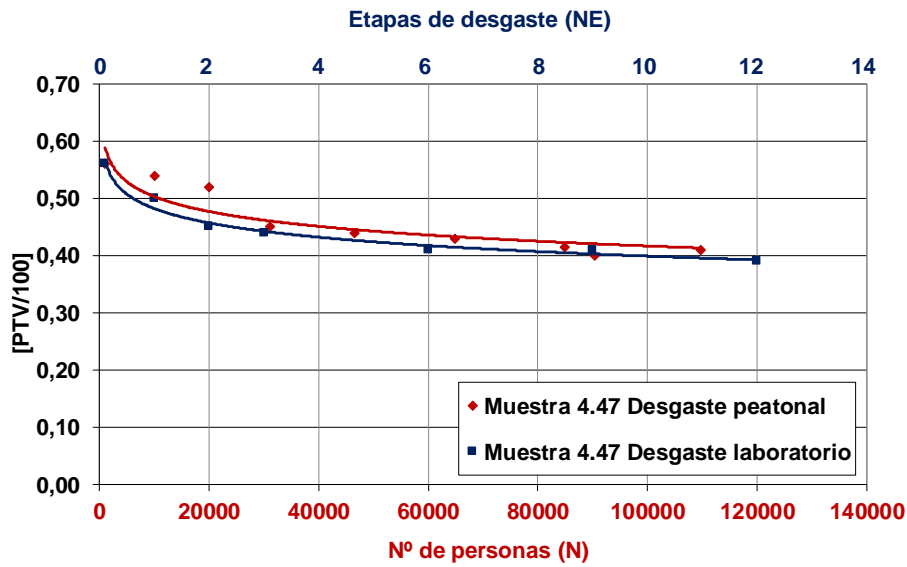


Figura 4.82 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 4.47).

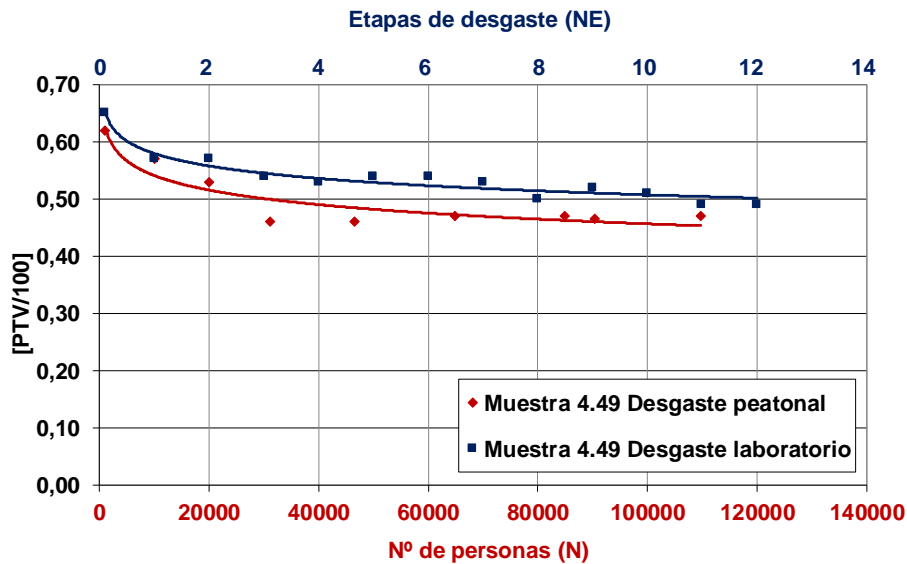


Figura 4.83 Equivalencia entre los resultados obtenidos por tránsito peatonal y por desgaste acelerado en el equipo de laboratorio (muestra 4.49).

#### 4.3.2.4 Relación entre los valores de los parámetros A y B de las ecuaciones (4.37) y (4.39) con la naturaleza y topografía de la superficie.

Al final del apartado 4.3.1.2.2 se ha sugerido que, dado que las ecuaciones (4.37) y (4.39) se adaptan bastante bien a las representaciones de  $[PTV/100]$  frente a N o NE, los valores de los parámetros A y B de dicha ecuación podrían estar relacionados, de algún modo, con la naturaleza y topografía superficial del pavimento para el que se han obtenido.

Al estudiar la posible relación de dichos parámetros con algunas propiedades de la superficie de las piezas ensayadas, se han encontrado correspondencias interesantes con: la durabilidad de las propiedades antideslizantes idóneas (mayor o menor rapidez con que se reduce la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste), con el valor inicial de la resistencia al deslizamiento ( $[PTV/100]_0$ ) y con algunos de los parámetros de rugosidad más representativos de las piezas estudiadas.

Los resultados obtenidos se exponen a continuación.

#### 4.3.2.4.1 Relación del parámetro A con la durabilidad de las propiedades antideslizantes.

De la simple observación de las representaciones gráficas de las figuras 4.66 a 4.80, se deduce que cuanto mayor es su pendiente, para cualquier valor de N o de NE en la zona inicial, más rápidamente disminuye la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste.

Si para generalizar se parte de la ecuación (4.40), derivando respecto a la intensidad del desgaste (ID) resulta:

$$\left[ \frac{d(Rd)}{d(ID)} \right]_{(ID)} = \frac{-A}{(ID)} \quad (4.41)$$

según esta ecuación, existe una relación directa entre la pendiente de las representaciones de Rd ([PTV/100] en este caso) frente a (ID) y el parámetro A, para cualquier valor de la intensidad del desgaste.

En consecuencia, las representaciones que tengan valores más altos del parámetro A, corresponderán a modelos de pavimento cerámico en los que debe producirse una más rápida disminución de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste.

Para tratar de comprobar esta aseveración, se procedió del modo que se describe a continuación.

Partiendo de la información experimental que se muestra en las Tablas 4.32 y 4.33, con la que se han confeccionado las representaciones de las Figuras 4.69 a 4.71, correspondientes al desgaste por tránsito peatonal, se determinó la disminución que había experimentado el valor de [PTV/100], desde el inicio del proceso de desgaste hasta que habían transitado 90000 peatones, valor de N para el cual, en la mayoría de los casos, se alcanzaba un valor prácticamente constante de la resistencia al deslizamiento.

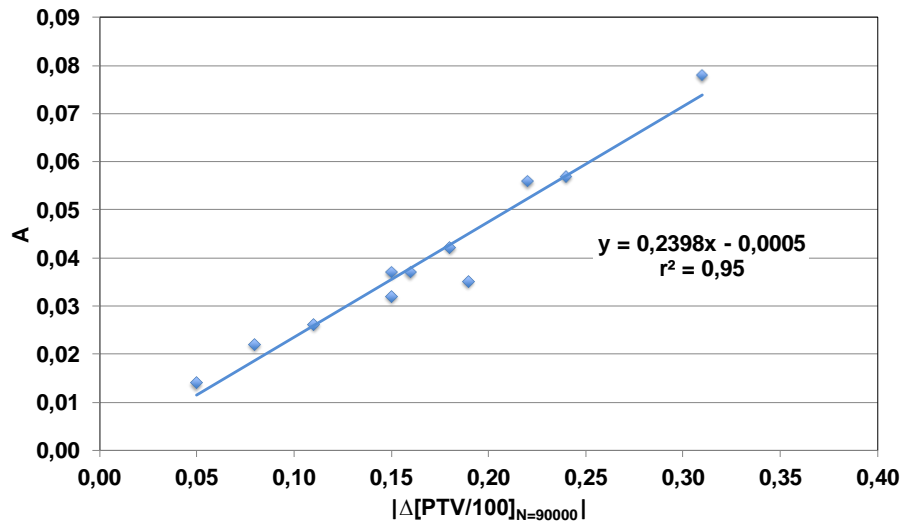
Otro tanto se hizo con los valores las Tablas 4.35 a 4.38 a partir de las que se han confeccionado las representaciones de las Figuras 4.72 a 4.75, correspondientes al desgaste con el dispositivo de laboratorio, a lo largo de NE=9 etapas de desgaste, que equivalen aproximadamente al tránsito de 90000 peatones.

Los valores de la variación de la resistencia al deslizamiento ( $\Delta$ [PTV/100]) experimentada por las piezas estudiadas, debida a la citada intensidad del desgaste, se detalla en la Tabla 4.40 y Tabla 4.41, junto con los respectivos valores del parámetro A y la referencia del modelo de pieza correspondiente.

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

**Tabla 4.40. Valores de  $\Delta[PTV/100]_{N=90000}$  y del parámetro A de la ecuación (4.37). Ensayos de desgaste por tránsito peatonal.**

Muestra	$[PTV/100]_0$	$[PTV/100]_{90000}$	A	$\Delta[PTV/100]_{N=90000}$
1.5	0,17	-	0,016	-
2.8	0,45	0,14	0,078	0,31
2.10	0,39	0,21	0,042	0,18
2.12	0,62	-	0,085	-
2.14	0,55	-	0,052	-
2.15	0,58	0,34	0,057	0,24
2.16	0,32	-	0,039	-
2.19	0,47	-	0,045	-
2.20	0,26	0,15	0,026	0,11
2.21	0,16	-	0,008	-
2,22	0,15	0,10	0,014	0,05
3.23	0,47	-	0,034	-
3.24	0,56	-	0,013	-
3.31	0,51	0,29	0,056	0,22
4.37	0,49	0,30	0,035	0,19
4.38	0,49	0,34	0,032	0,15
4.39	0,34	0,26	0,022	0,08
4.41	0,45	-	0,021	-
4.47	0,56	0,40	0,037	0,16
4.49	0,62	0,47	0,037	0,15

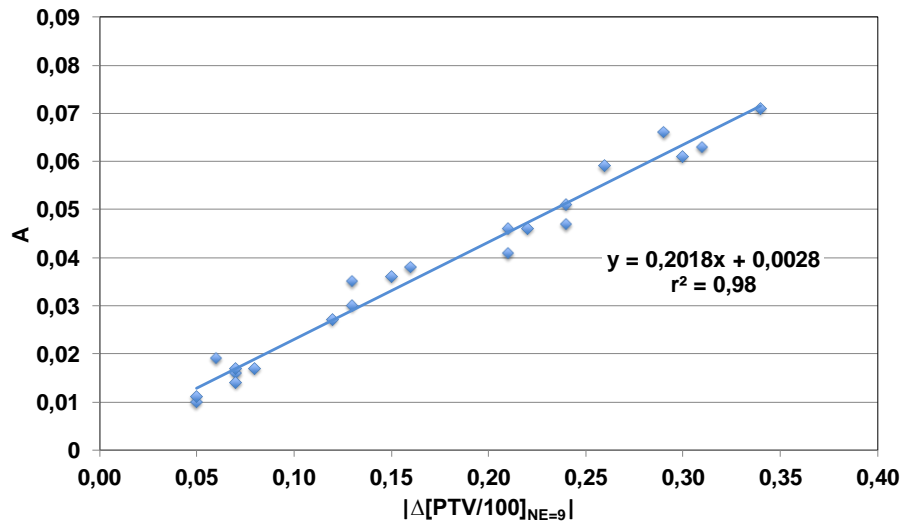


**Figura 4.84 Representación de los valores del parámetro A de la ecuación (4.37) frente a los correspondientes de  $\Delta[PTV/100]_{N=90000}$ .**



**Tabla 4.41. Valores de  $\Delta[\text{PTV}/100]_{\text{NE}=9}$  y del parámetro A de la ecuación (4.39). Ensayos de desgaste con el equipo de laboratorio.**

Muestra	$[\text{PTV}/100]_0$	$[\text{PTV}/100]_9$	A	$\Delta[\text{PTV}/100]_{\text{NE}=9}$
2.8	0,45	0,14	0,063	0,31
2.10	0,39	0,22	0,038	0,17
2.12	0,61	0,27	0,071	0,34
2.14	0,53	0,23	0,061	0,30
2.15	0,59	0,33	0,059	0,26
2.16	0,32	0,10	0,046	0,22
2.17	0,24	0,17	0,016	0,07
2.19	0,49	0,25	0,047	0,24
2.20	0,25	0,13	0,027	0,12
3.23	0,48	0,24	0,051	0,24
3.30	0,20	0,13	0,014	0,07
3.31	0,46	0,25	0,046	0,21
3.32	0,18	0,13	0,010	0,05
4.35	0,40	0,34	0,019	0,06
4.37	0,50	0,29	0,041	0,21
4.38	0,49	0,39	0,017	0,10
4.39	0,36	0,31	0,011	0,05
4.41	0,42	0,29	0,030	0,13
4.47	0,56	0,41	0,036	0,15
4.49	0,65	0,52	0,035	0,13
5.50	0,59	0,30	0,066	0,29
5.51	0,41	0,33	0,017	0,08



**Figura 4.85 Representación de los valores del parámetro A de la ecuación (4.39) frente a los correspondientes de  $\Delta[\text{PTV}/100]_{\text{NE}=9}$ .**

En la Figura 4.84 y Figura 4.85 se han representado los valores del parámetro A frente a los correspondientes de  $\Delta[PTV/100]$ , correspondientes a los ensayos por tránsito peatonal y a los ensayos efectuados con el dispositivo de laboratorio respectivamente.

Como puede apreciarse, los valores representados se ajustaron muy bien a líneas de regresión rectas que pasan prácticamente por el origen de los ejes de coordenadas.

Las representaciones obtenidas corroboran el aserto enunciado anteriormente, en el sentido de que *los valores más altos del parámetro A, corresponden a modelos de pavimento cerámico en los que se produce una más rápida disminución de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste.*

#### 4.3.2.4.2 Relación del parámetro B con la resistencia al deslizamiento inicial $[PTV/100]_0$

Se ha encontrado una buena relación lineal entre el parámetro B de las ecuaciones (4.37) y (4.39) y la resistencia al deslizamiento inicial de las piezas estudiadas. En la Figura 4.86 y Figura 4.87 se muestra gráficamente dicha relación, en el caso de las piezas desgastadas por tránsito peatonal y en las abrasionadas con el dispositivo de laboratorio respectivamente. Los datos representados se muestran en la Tabla 4.34 y Tabla 4.39.

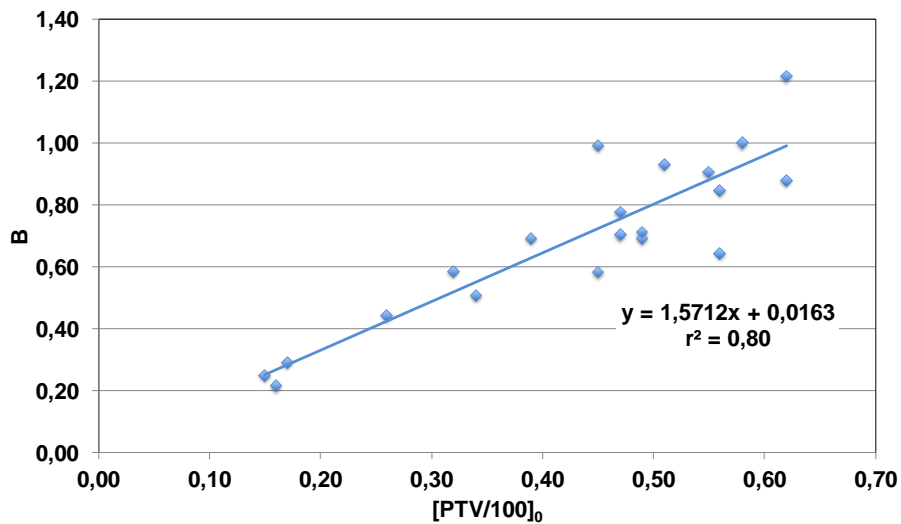
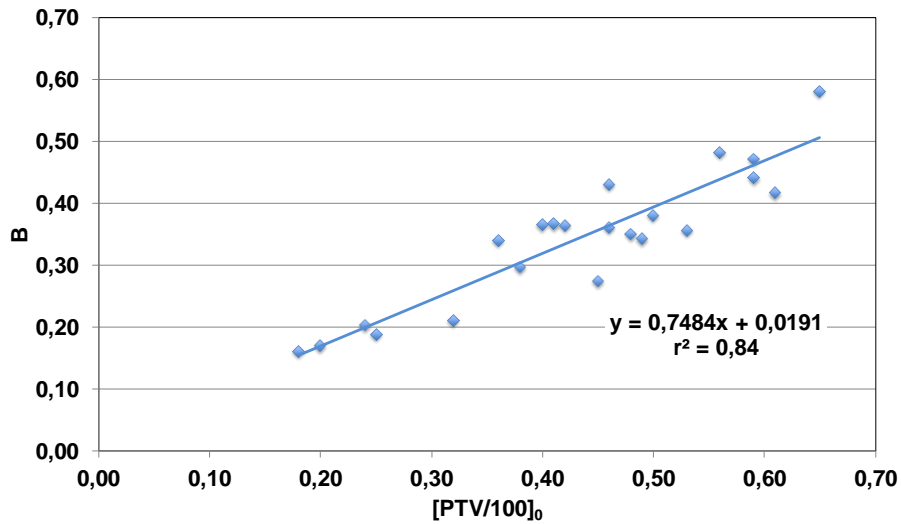


Figura 4.86 Representación de los valores del parámetro B de la ecuación (4.37) frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_0$ . Piezas desgastadas por tránsito peatonal.



**Figura 4.87** Representación de los valores del parámetro B de la ecuación (4.39) frente a los correspondientes de  $[PTV/100]_0$ . Piezas desgastadas en el equipo de laboratorio.

Como puede apreciarse, el valor del parámetro B es tanto mayor cuanto más alto es el valor inicial de la resistencia al deslizamiento de los modelos de superficie estudiados. En ambas representaciones, las líneas de regresión rectas pasan casi por el origen de coordenadas.

#### 4.3.2.4.3 Relación del parámetro B con los parámetros de rugosidad.

Se ha estudiado la posible relación entre los valores de los parámetros A y B que se muestran en la Tabla 4.34 y Tabla 4.39 y los respectivos parámetros de rugosidad superficial que se han considerado más representativos (tabla 7.22 del Apéndice), como consecuencia del estudio hasta ahora realizado.

Las mejores correlaciones se han obtenido, con líneas de regresión de tipo logarítmico, entre B y el parámetro superficial  $\Delta q$ , para los datos correspondientes a las piezas desgastadas por tránsito peatonal real, y entre B y los parámetros superficiales  $R_t$  y  $R_z$  para las piezas desgastadas con el equipo de laboratorio. A efectos comparativos, se han realizado las representaciones de B respecto a estos tres parámetros correspondientes al tránsito peatonal (Figura 4.88) y a desgaste acelerado de laboratorio (Figura 4.89).

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

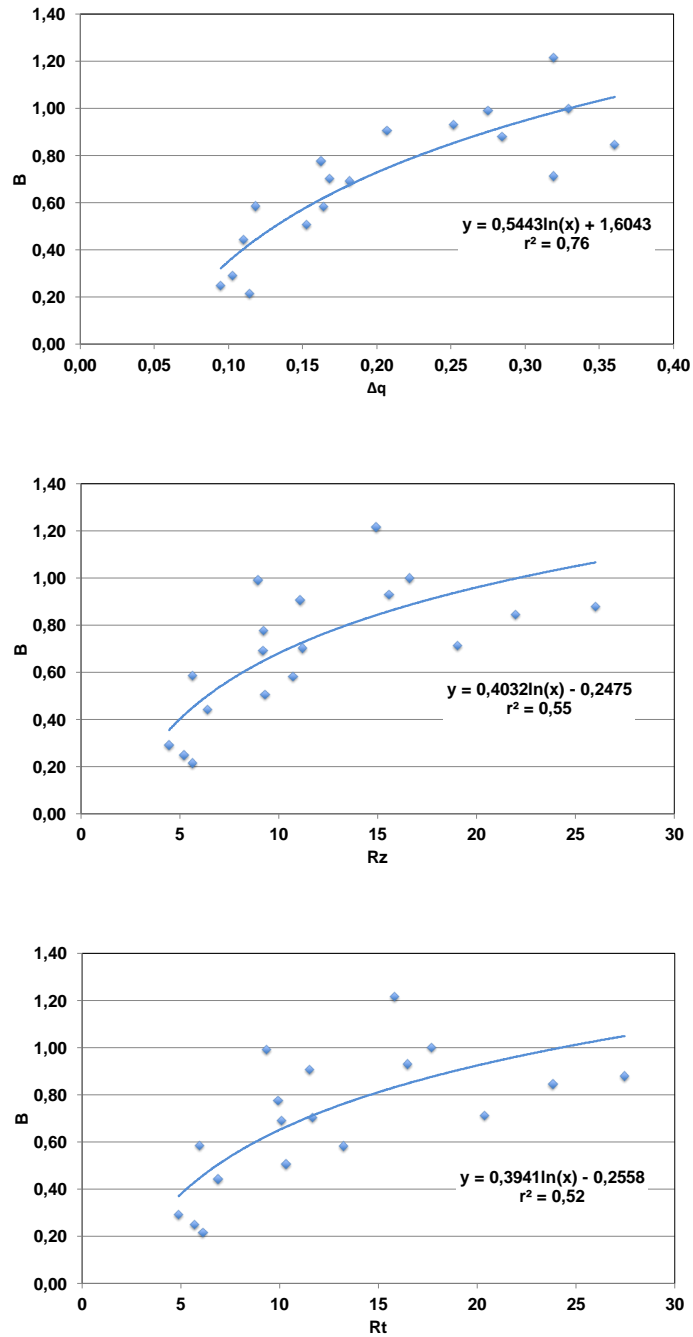
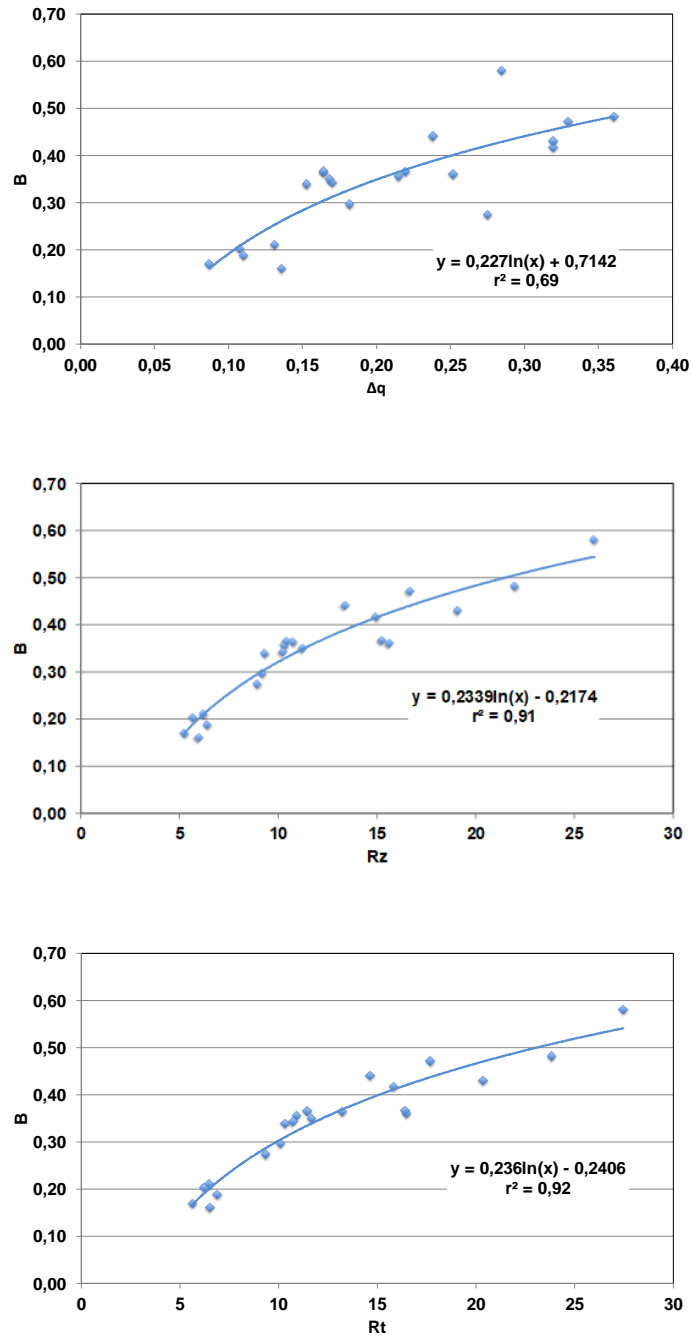


Figura 4.88 Representación de los valores del parámetro  $B$  de la ecuación (4.37) frente a los correspondientes de  $\Delta q$ ,  $Rz$  y  $Rt$ . Piezas desgastadas por tránsito peatonal.



**Figura 4.89** Representación de los valores del parámetro  $B$  de la ecuación (4.39) frente a los correspondientes de  $\Delta q$ ,  $Rz$  y  $Rt$ . Piezas desgastadas en el equipo de laboratorio.

### 4.3.3 Influencia del desgaste sobre los parámetros de rugosidad

#### 4.3.3.1 Estudio preliminar

Con la finalidad de disponer de información preliminar acerca de las alteraciones que se producen en la topografía de la superficie de las piezas de cerámica, como consecuencia del desgaste por abrasión, se ha elegido uno de los modelos originales de pavimento antideslizante de perfil plano con acabado rugoso, concretamente el de número de referencia 2.8 de esta Memoria.

Para evaluar dichos cambios, se ha determinado la resistencia al deslizamiento y se ha caracterizado la topografía de la muestra original y de las muestras que resultan al someterla a una y dos etapas de desgaste consecutivas con el equipo de laboratorio. Se procuró que ambas etapas correspondieran a la zona inicial de la curva de desgaste, donde la disminución de la resistencia al deslizamiento es más acentuada, para apreciar mejor las posibles diferencias.

Los parámetros que más se modificaron, como consecuencia del desgaste, fueron los más directamente relacionados con la altura y forma de los picos y con la distribución de la rugosidad. En la Tabla 4.42 se muestran los valores de la resistencia al deslizamiento ([PTV/100]), de la muestra original y de las dos muestras parcialmente desgastadas, así como los correspondientes de los parámetros de rugosidad que habían experimentado una mayor variación.

**Tabla 4.42. Valores resistencia al deslizamiento y de los parámetros rugosidad que más se modifican con el desgaste.**

Etapa de desgaste (N)	0	1	2
<b>PTV/100</b>	0,45	0,31	0,22
<b>Ra (µm)</b>	1,3	0,91	0,89
<b>Rz (µm)</b>	8,9	5,5	5,4
<b>Rt (µm)</b>	9,4	6,0	5,8
<b>Rq (µm)</b>	1,7	1,1	1,1
<b>Rk</b>	3,8	2,9	2,8
<b>Rz<sub>iso</sub> (µm)</b>	6,4	4,2	4,1
<b>Rpm (µm)</b>	2,2	1,9	1,9
<b>Rp (µm)</b>	3,8	2,7	2,7
<b>Δa (rad)</b>	0,21	0,10	0,10
<b>Δq (rad)</b>	0,28	0,14	0,13
<b>I<sub>0</sub></b>	1,036	1,010	1,009

En los mapas topográficos que se muestran en la Figura 4.90 se puede apreciar, por el cambio de coloración de la imagen, la evolución, con el desgaste, de la altura de los picos en las muestras estudiadas.

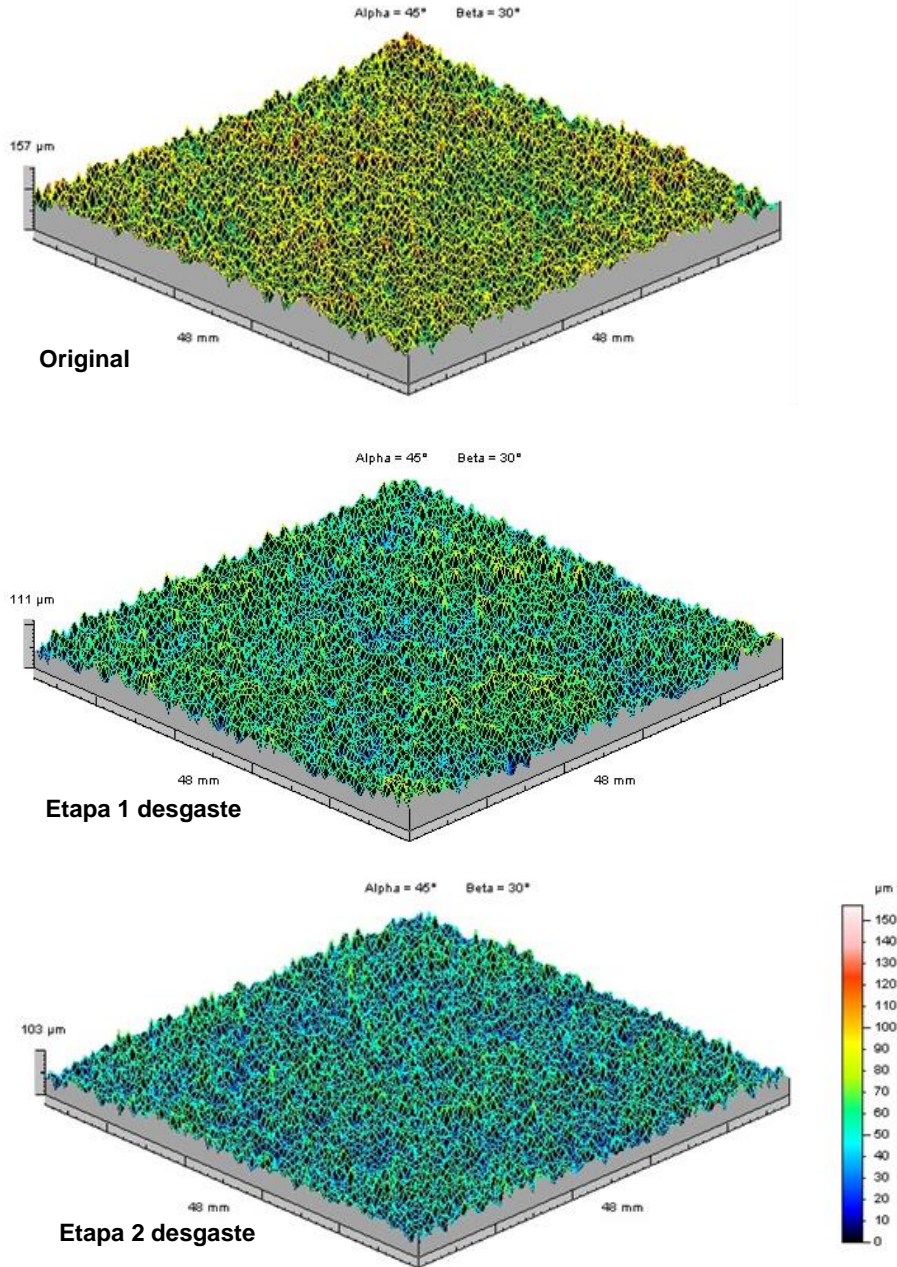


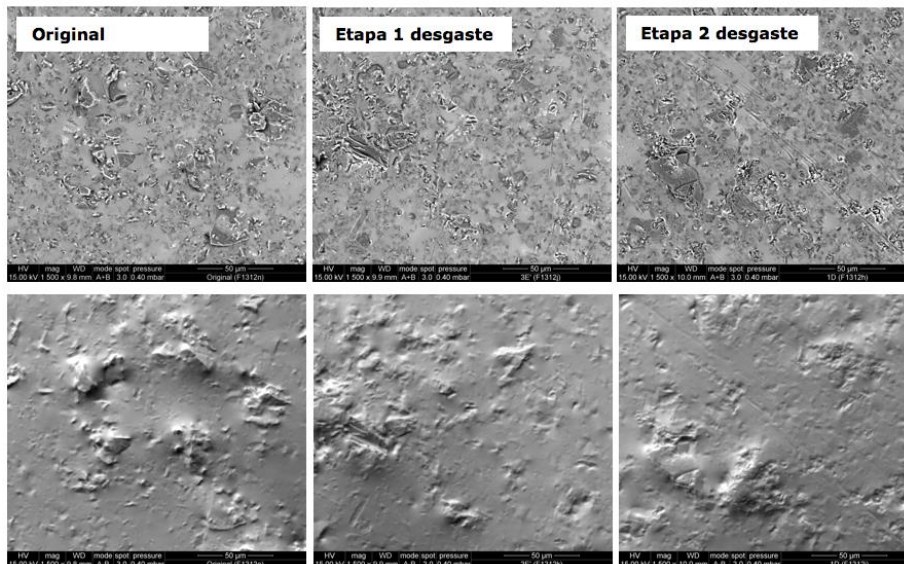
Figura 4.90 Evolución con el desgaste de la topografía de la muestra estudiada.

#### 4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

Por otra parte, en las microfotografías de la Figura 4.91 se muestran las imágenes obtenidas, con la señal de electrones retro dispersados en el microscopio electrónico de barrido (MEB), de las tres muestras estudiadas.

En dicha figura, las microfotografías de la parte superior corresponden a la suma de la señal recibida por los dos sectores del detector (A+B) que, aun cuando reduce la contribución topográfica, permite apreciar la aparición de rayas y descondados a medida que se va desgastando la superficie.

Las microfotografías de la parte inferior corresponden a la diferencia de la señal recibida por los dos sectores del detector (A-B) que proporciona la información topográfica. En estas imágenes puede apreciarse cualitativamente como se va rebajando la rugosidad inicial, a pesar de generarse rayas o desprendimientos de pequeñas porciones de la superficie.



**Figura 4.91 Evolución del aspecto de la superficie de la muestra estudiada como consecuencia del desgaste.**

#### 4.3.3.2 Evolución de la resistencia al deslizamiento y los parámetros de rugosidad con la intensidad del desgaste

En lo que sigue se informa de los resultados obtenidos al estudiar la evolución, con la progresión del desgaste, del valor de los trece parámetros de rugosidad que se han considerado más representativos ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_k$ ,  $R_{ziso}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_p$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta q$ ,  $l_0$ ,  $RP_c$  y  $RS_m$ ) correspondientes a varias muestras diferentes de modelos de pavimento referenciados en la Tabla 3.1. Los modelos se han elegido tratando de abarcar el más amplio abanico posible de texturas



superficiales. Varias de estas muestras se han sometido a desgaste por tránsito peatonal y otras se han tratado con el equipo de laboratorio.

En la tabla 7.22 del Apéndice se muestra el número de referencia de las muestras de los modelos de pavimento estudiados, así como la evolución de su resistencia al deslizamiento [PTV/100] y la de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste, expresada en función del número de personas transitadas (N), independientemente de la abrasión se haya realizado por tránsito peatonal real o en el equipo de laboratorio. Las muestras en cuya referencia se ha incluido una L han sido tratadas en el equipo de laboratorio. Las muestras en cuya referencia se ha incluido una P se han desgastado por tránsito peatonal real. En los casos en que el desgaste se ha efectuado con el equipo de laboratorio, el equivalente en personas transitadas se ha calculado mediante la relación aproximada  $N=10000*NE$ .

Los resultados obtenidos, para ocho de los modelos elegidos, se han representado en la forma [Parámetro de rugosidad] frente a N, en las gráficas que se muestran en las Figuras 4.92 a 4.99. En estas figuras se ha introducido los datos de evolución de la resistencia al deslizamiento, en cada caso, a efectos comparativos. Cinco de los modelos elegidos para estas representaciones se han desgastado por tránsito peatonal real y tres en el equipo de laboratorio.

#### 4.3.3.2.1 Muestras desgastadas por tránsito peatonal

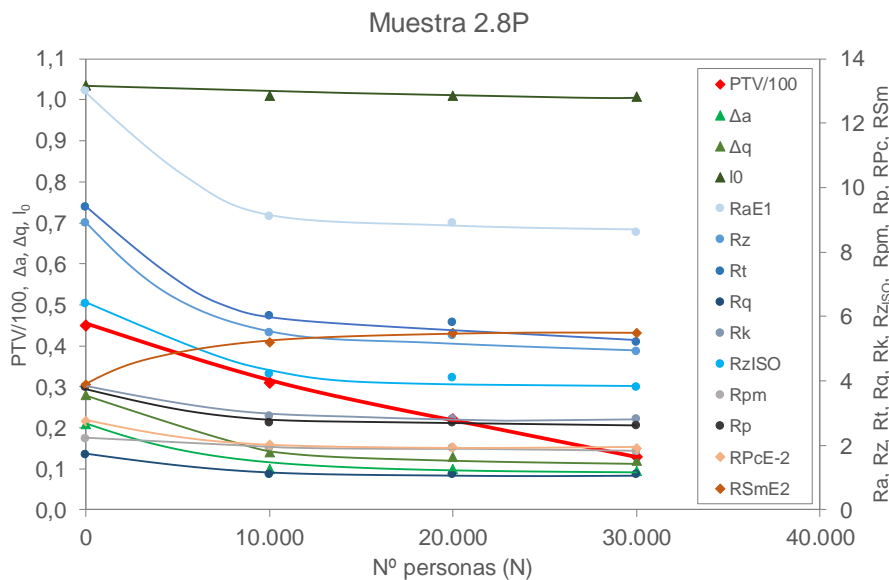


Figura 4.92 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal. Modelo 2.8.

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

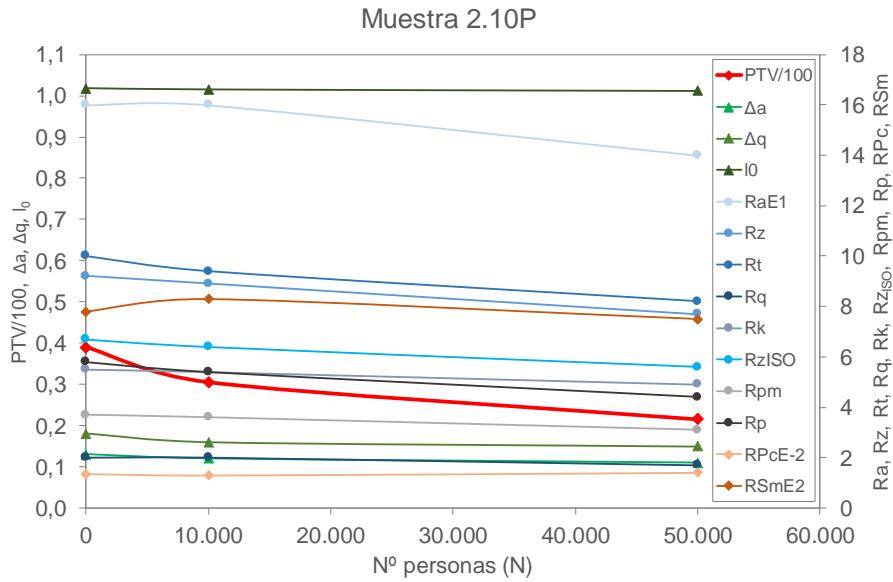


Figura 4.93 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal. Modelo 2.10.

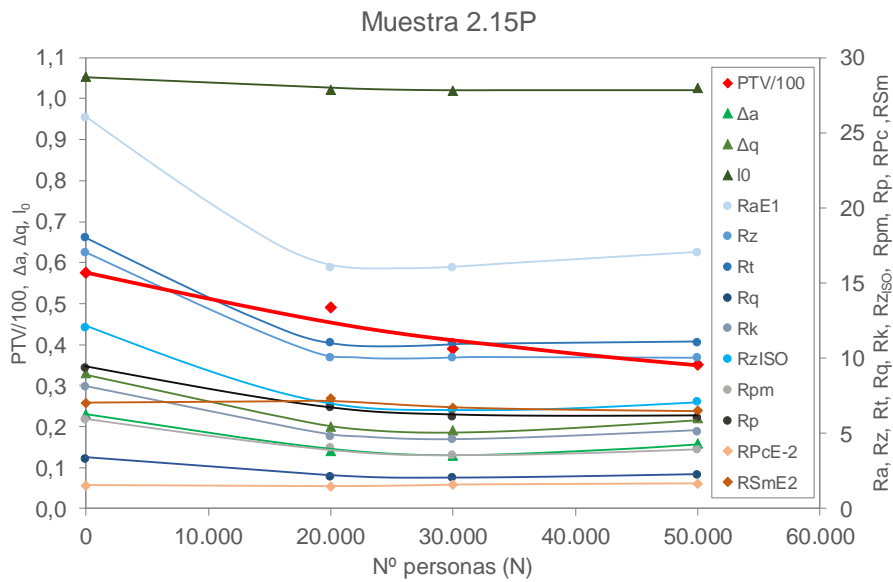


Figura 4.94 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal. Modelo 2.15.

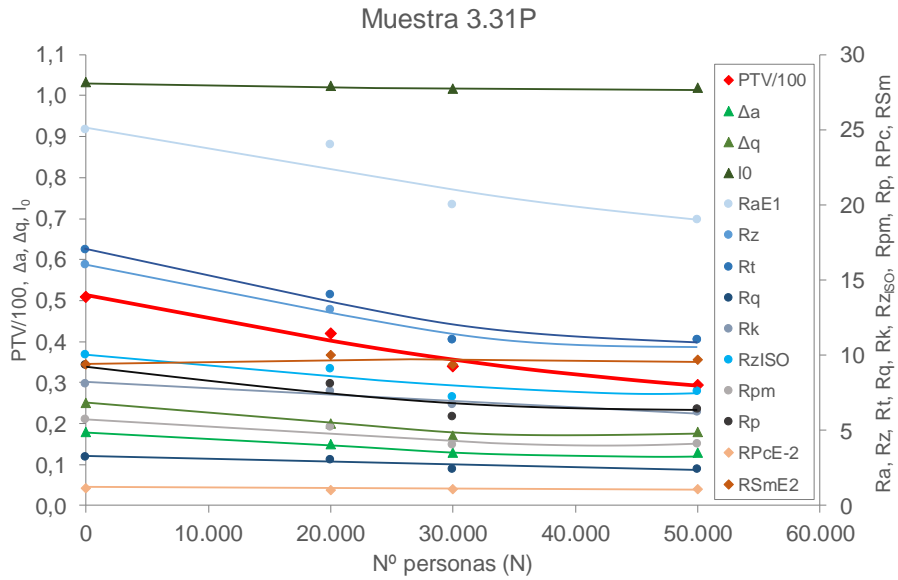


Figura 4.95 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal. Modelo 3.31.

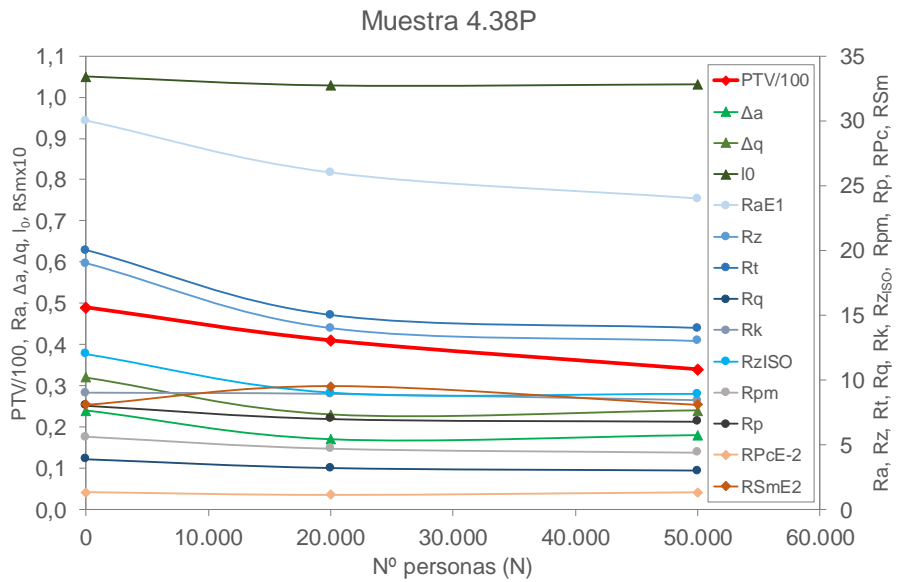


Figura 4.96 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste por tránsito peatonal. Modelo 4.38.

4.3.3.2.2 Muestras desgastadas con el equipo de laboratorio

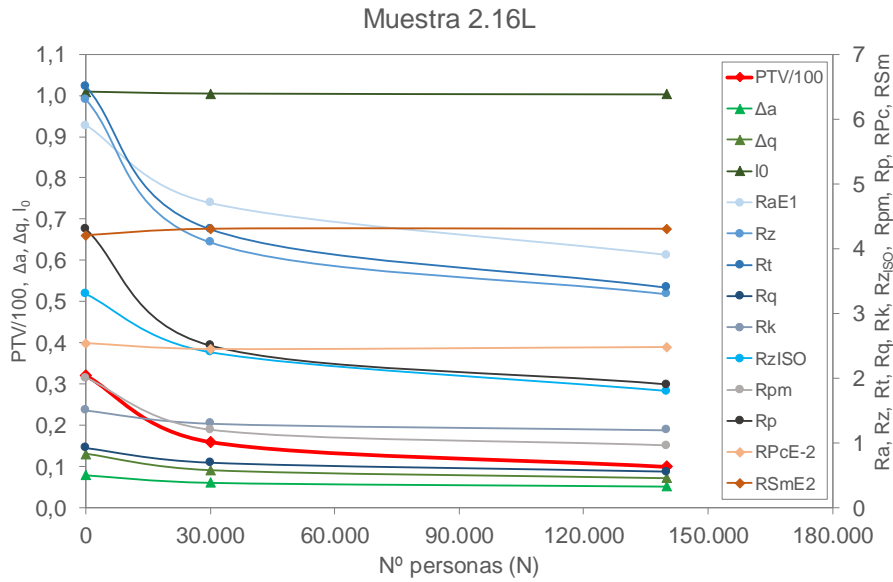


Figura 4.97 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste en el equipo de laboratorio. Modelo 2.16.

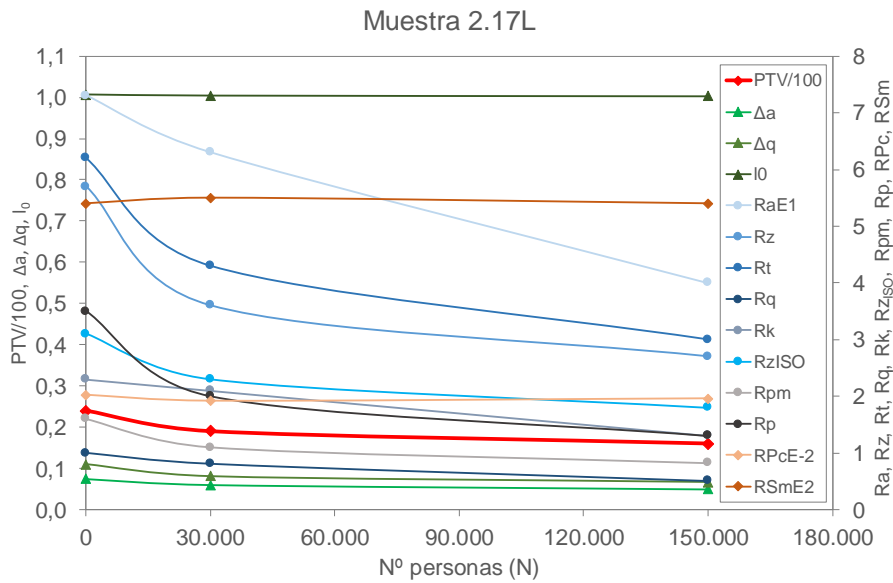
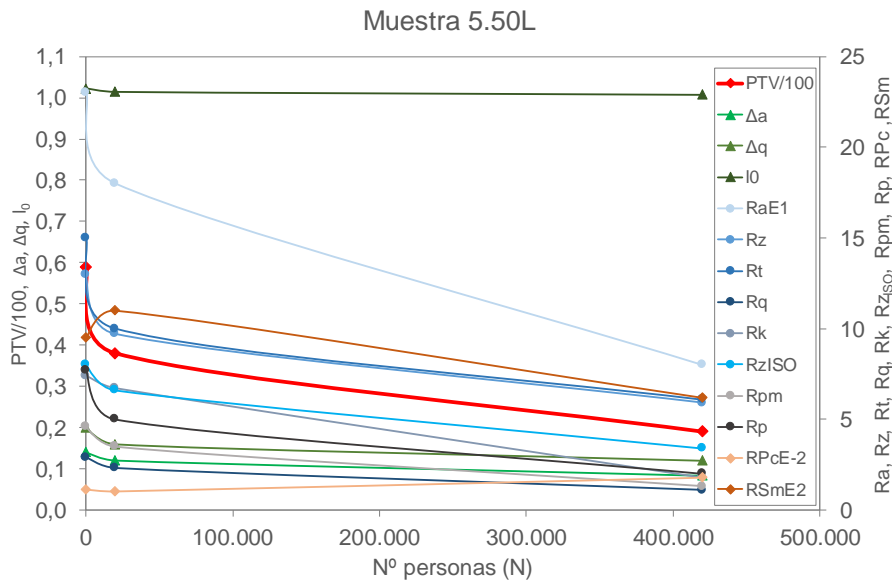


Figura 4.98 Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste en el equipo de laboratorio. Modelo 2.17.



**Figura 4.99** Variación de los parámetros de rugosidad elegidos con la intensidad del desgaste en el equipo de laboratorio. Modelo 5.50.

En todas las representaciones de las figuras anteriores se observa un cierto paralelismo, en lo referente a la evolución provocada por el desgaste, de los parámetros Ra, Rz, Rt, Rq, Rz<sub>ISO</sub> por un lado, y la de los parámetros Rk, Rp y Rpm o la de  $\Delta a$  y  $\Delta q$ , por otro.

Esta circunstancia indica que, no solo existe cierta coincidencia entre los valores de dichas parejas de parámetros de rugosidad en la superficie de los modelos originales, tal como se puso de manifiesto en el Apartado 4.2.1, sino que su comportamiento, a lo largo del proceso de desgaste, también guarda una estrecha relación.

Por otra parte, conviene resaltar el comportamiento de los parámetros I<sub>0</sub>, R<sub>Pc</sub> y R<sub>Sm</sub>. El valor de I<sub>0</sub> y R<sub>Pc</sub> prácticamente no resulta afectado por el desgaste. El valor de R<sub>Sm</sub> presenta un comportamiento diferente aumentando, en mayor o menor medida, durante las etapas iniciales del desgaste para después disminuir ligeramente.

Finalmente se considera interesante poner de manifiesto que se aprecia, en casi todas las representaciones, cierto paralelismo entre el comportamiento o forma de la curva representativa de PTV/100 frente a N y la correspondiente a Ra, Rz, Rt, Rq, Rz<sub>ISO</sub> y Rp frente a N.

4.3.3.3 Influencia de la intensidad del desgaste sobre la relación entre la resistencia al deslizamiento y algunos parámetros de rugosidad.

Partiendo de los datos que se muestran en la tabla 7.22 del Apéndice, en las Figuras 4.100 a 4.107 se han representado los valores de [PTV/100] frente a los respectivos de cada uno de los siete parámetros de rugosidad elegidos, para tres valores de la intensidad del desgaste: los correspondientes a N=20.000; N=30.000 y N=50.000 personas, de tránsito peatonal real (o equivalentes al número de etapas si el desgaste se realiza en el dispositivo de laboratorio), junto con el inicial (para N=0).

Las líneas de tendencia resultantes muestran la variación de la resistencia al deslizamiento con cada uno de los parámetros de rugosidad estudiados, para los tres valores de la intensidad del desgaste estudiados.

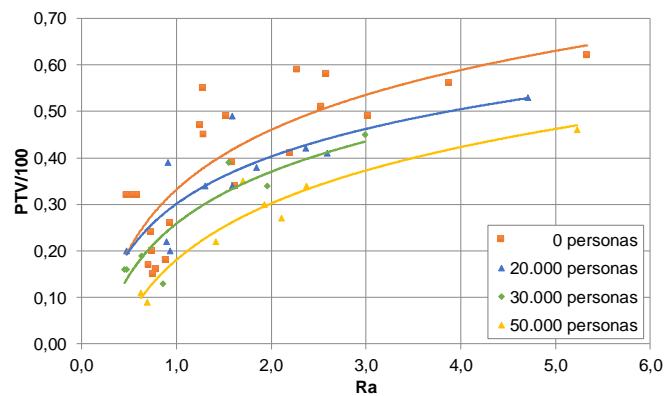


Figura 4.100 Variación de [PTV/100] con Ra a diferentes etapas de desgaste.

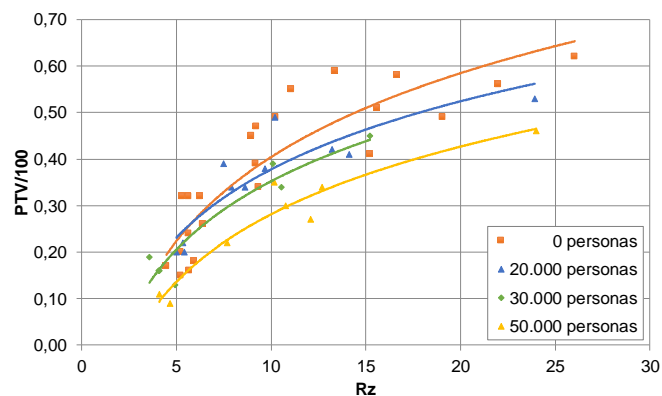


Figura 4.101 Variación de [PTV/100] con Rz a diferentes etapas de desgaste.

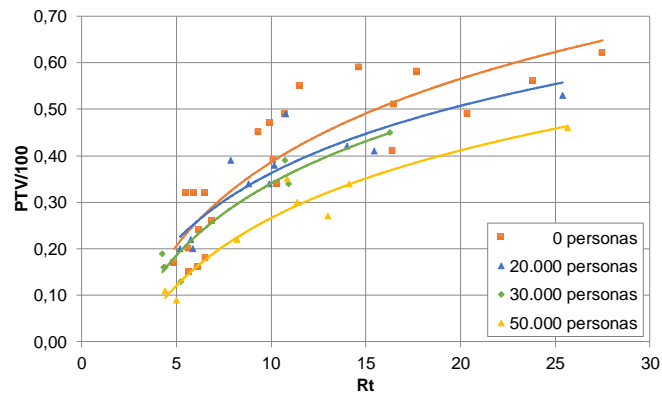


Figura 4.102 Variación de  $[PTV/100]$  con  $R_t$  a diferentes etapas de desgaste.

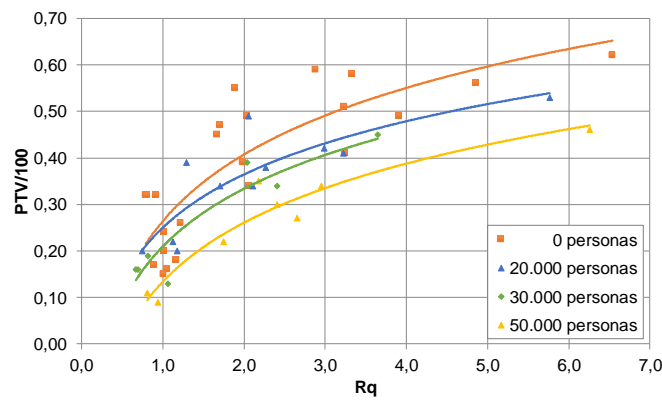


Figura 4.103 Variación de  $[PTV/100]$  con  $R_q$  a diferentes etapas de desgaste.

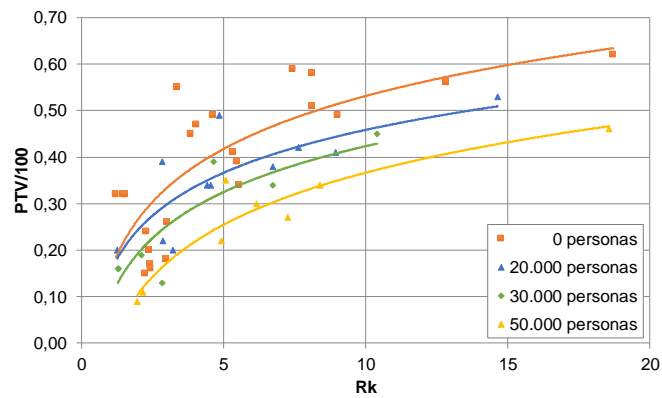


Figura 4.104 Variación de  $[PTV/100]$  con  $R_k$  a diferentes etapas de desgaste.

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

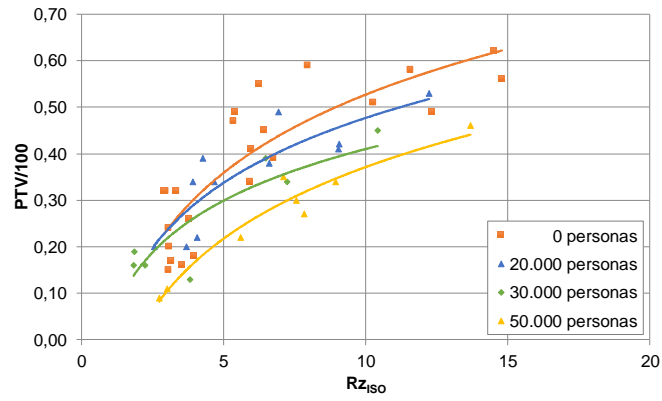


Figura 4.105 Variación de [PTV/100] con  $Rz_{ISO}$  a diferentes etapas de desgaste.

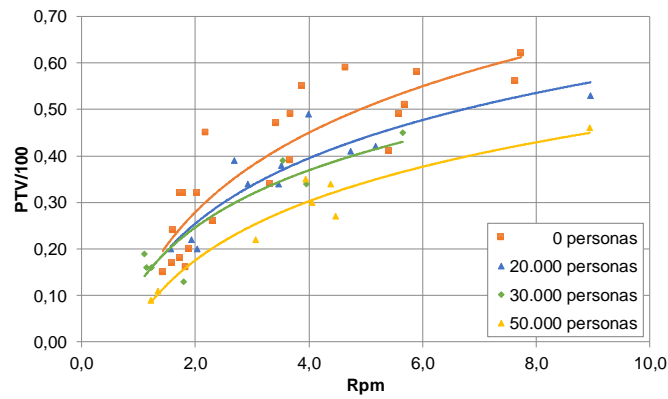


Figura 4.106 Variación de [PTV/100] con  $Rpm$  a diferentes etapas de desgaste.

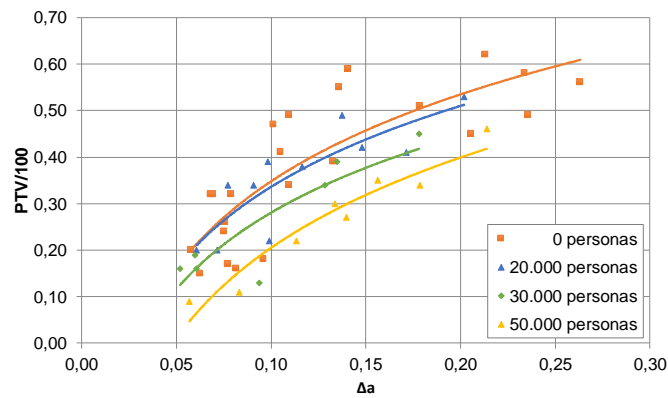


Figura 4.107 Variación de [PTV/100] con  $\Delta a$  a diferentes etapas de desgaste.



Como puede apreciarse, las curvas de [PTV/100] frente a los diferentes parámetros de rugosidad, se van desplazando, en todos los casos, hacia el eje de abscisas, a medida que aumenta la intensidad del desgaste. Es decir que, para un determinado valor de cualquiera de los parámetros de rugosidad estudiados, el valor de la resistencia al deslizamiento va disminuyendo a medida que aumenta la intensidad del desgaste.

#### **4.3.4 Relación entre la resistencia al deslizamiento de las muestras desgastadas y cada uno de los parámetros superficiales.**

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la resistencia al deslizamiento va disminuyendo, para cualquier valor de los parámetros de rugosidad estudiados, a medida que mayor es la intensidad del desgaste. Por tanto, si en una representación gráfica de [PTV/100] frente a cualquiera de dichos parámetros se incluyen datos correspondientes a muestras sometidas a diferentes intensidades de desgaste, necesariamente se ha de producir una cierta dispersión de los correspondientes marcadores.

A pesar de ello, teniendo en cuenta que, para un modelo dado, la máxima variación de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste, en la mayor parte de los casos no excedía de 0,2 (ver las representaciones gráficas del apartado 4.3.2), se decidió estudiar la posibilidad de obtener una correlación entre [PTV/100] y alguno de los parámetros de rugosidad, para el conjunto de las 37 muestras resultantes del desgaste que figuran en la Tabla 7.22 del Apéndice. Los resultados obtenidos se detallan a continuación.

##### **4.3.4.1 Ensayo con el conjunto de las 37 muestras desgastadas**

En la Tabla 7.22 del Apéndice se muestran los valores de la resistencia al deslizamiento medida como [PTV/100] junto con los correspondientes valores de los trece parámetros de rugosidad elegidos en el apartado 4.2, de las muestras sometidas a desgaste tanto peatonal como de laboratorio. A partir de dichos datos, se han representado los valores de PTV/100 frente a los diferentes parámetros de rugosidad de la misma forma que se hizo en el apartado 4.2.2. También, en este caso, el mejor ajuste se ha obtenido con líneas de regresión de tipo logarítmico.

En la Figura 4.108 se muestra, a modo de ejemplo, las representaciones correspondientes a los tres parámetros de rugosidad (**R<sub>p</sub>**, **R<sub>pm</sub>** y **R<sub>t</sub>**) para los que se ha obtenido mejor coeficiente de correlación.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres mejores representaciones obtenidas (Figura 4.108):

$$[\text{PTV}/100] = 0,1861 \cdot \ln(R_p) + 0,0146 \quad (4.42)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,1748 \cdot \ln(R_{pm}) + 0,1161 \quad (4.43)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,1996 \cdot \ln(R_t) - 0,1353 \quad (4.44)$$

Siguiendo la pauta marcada en el apartado 4.2, se trató de mejorar los ajustes obtenidos separando las muestras en dos conjuntos, tomando como criterio la planaridad de los correspondientes modelos originales. A continuación, se describen los resultados obtenidos al representar por separado, en la forma descrita en el Apartado anterior, los datos correspondientes a las muestras desgastadas de los modelos originales encuadrados en los Grupos 1 y 2 y las pertenecientes a los grupos 3 a 5.

#### 4.3.4.2 Ensayo con las muestras de los modelos originales de perfil plano (grupos 1 y 2)

En la Figura 4.109 se muestra, a modo de ejemplo, las representaciones correspondientes a los tres parámetros de rugosidad (**R<sub>p</sub>**, **R<sub>t</sub>** y **R<sub>z</sub>**) para los que se ha obtenido mejor coeficiente de correlación

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres mejores representaciones obtenidas:

$$[\text{PTV}/100] = 0,1965 \cdot \ln(R_p) + 0,0061 \quad (4.45)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,2386 \cdot \ln(R_t) - 0,1932 \quad (4.46)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,23 \cdot \ln(R_z) - 0,1602 \quad (4.47)$$

Como puede apreciarse en la Figura 4.109, en este caso, han empeorado los valores de los coeficientes de correlación obtenidos respecto a los resultantes al considerar todas las muestras conjuntamente.

#### 4.3.4.3 Ensayo con las muestras de los modelos originales de perfil ondulado o con relieve (grupos 3 a 5)

En la Figura 4.110 se muestra, a modo de ejemplo, las representaciones correspondientes a los tres parámetros de rugosidad (**R<sub>q</sub>**, **R<sub>pm</sub>** y **R<sub>a</sub>**) para los que se ha obtenido mejor coeficiente de correlación

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las tres mejores representaciones obtenidas:

$$[\text{PTV}/100] = 0,1923 \cdot \ln(R_q) + 0,1649 \quad (4.48)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,1873 \cdot \ln(R_{pm}) + 0,0874 \quad (4.49)$$

$$[\text{PTV}/100] = 0,1842 \cdot \ln(R_a) + 0,214 \quad (4.50)$$

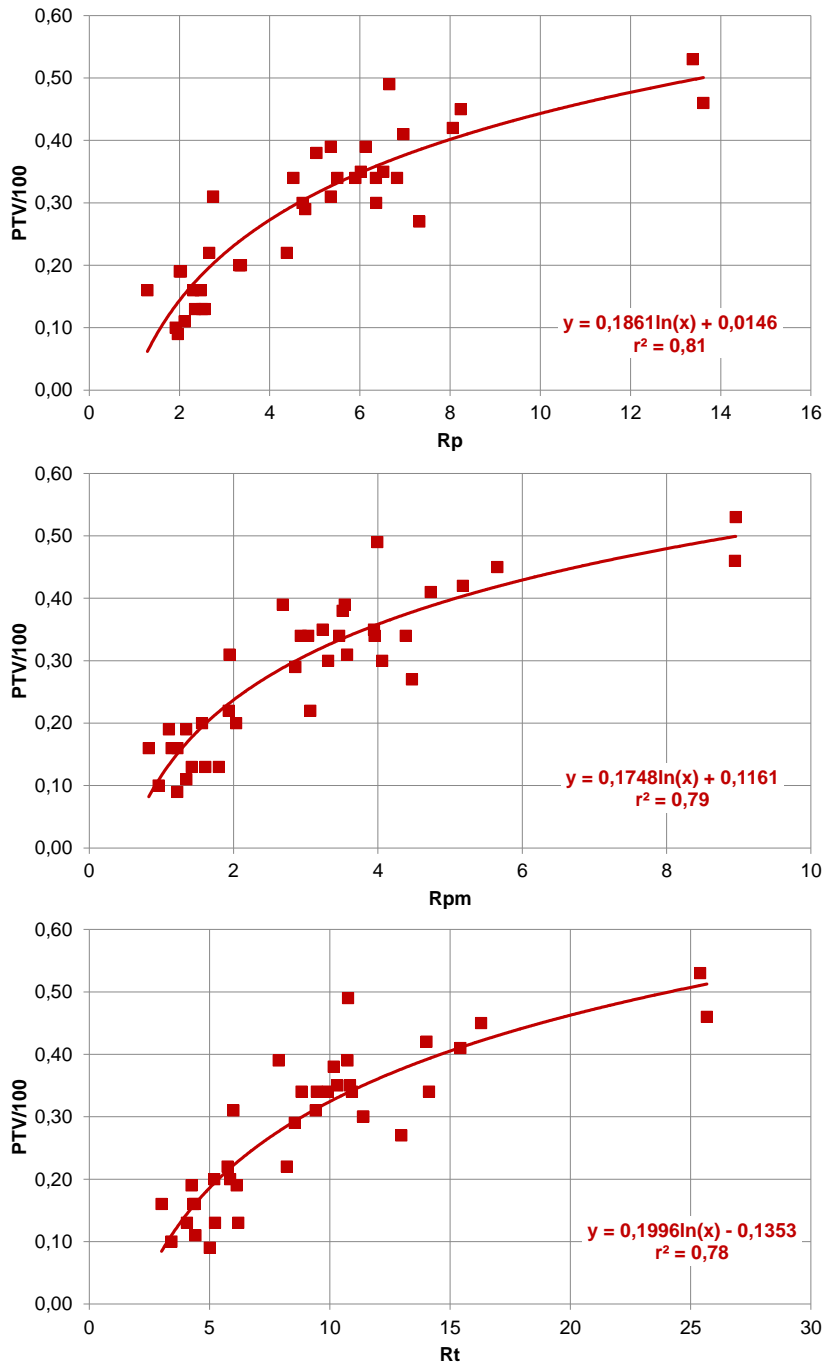


Figura 4.108 Variación de la resistencia al deslizamiento con los respectivos valores de los parámetros de rugosidad en las 37 muestras desgastadas.

4.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

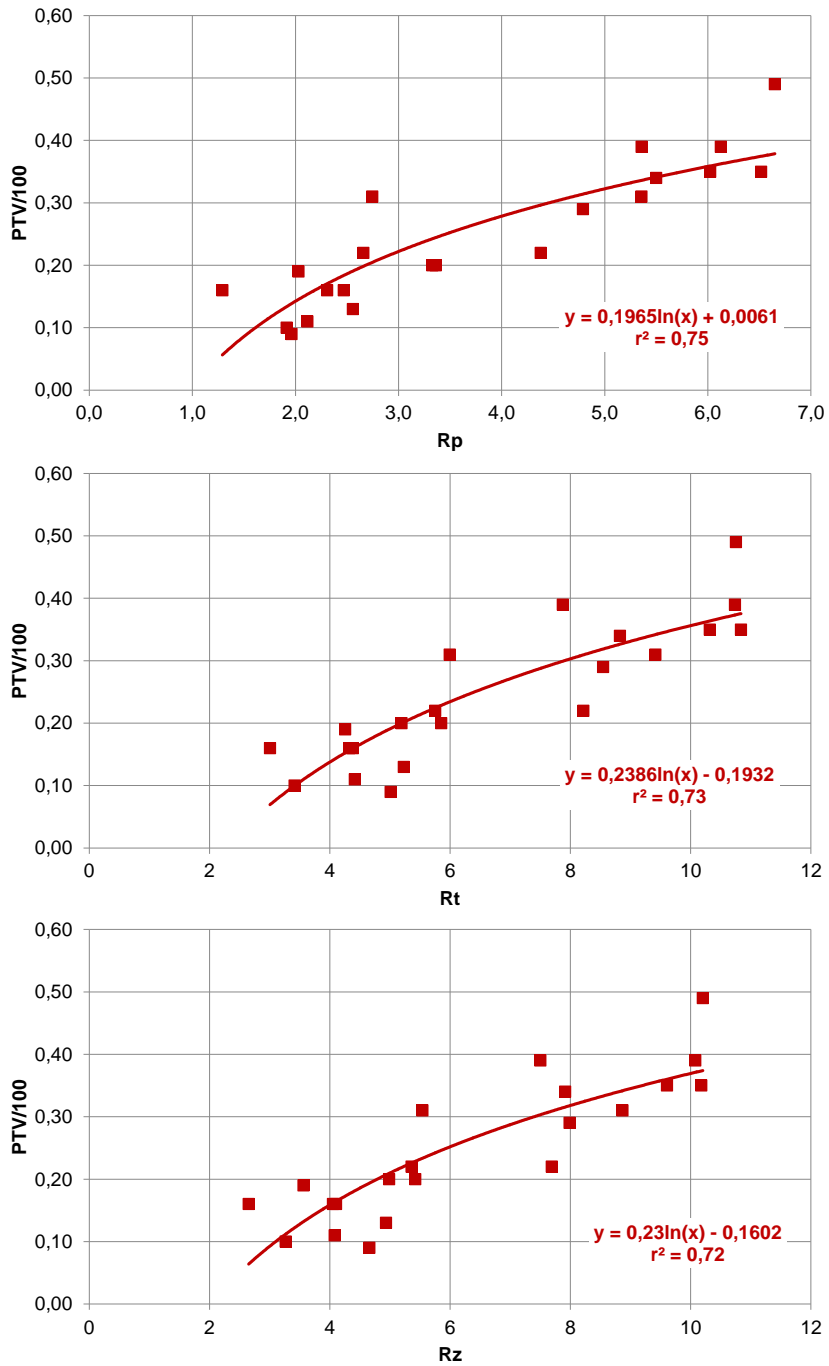


Figura 4.109 Variación de la resistencia al deslizamiento con los respectivos valores de los parámetros de rugosidad en las 21 muestras desgastadas de los grupos 1 y 2.

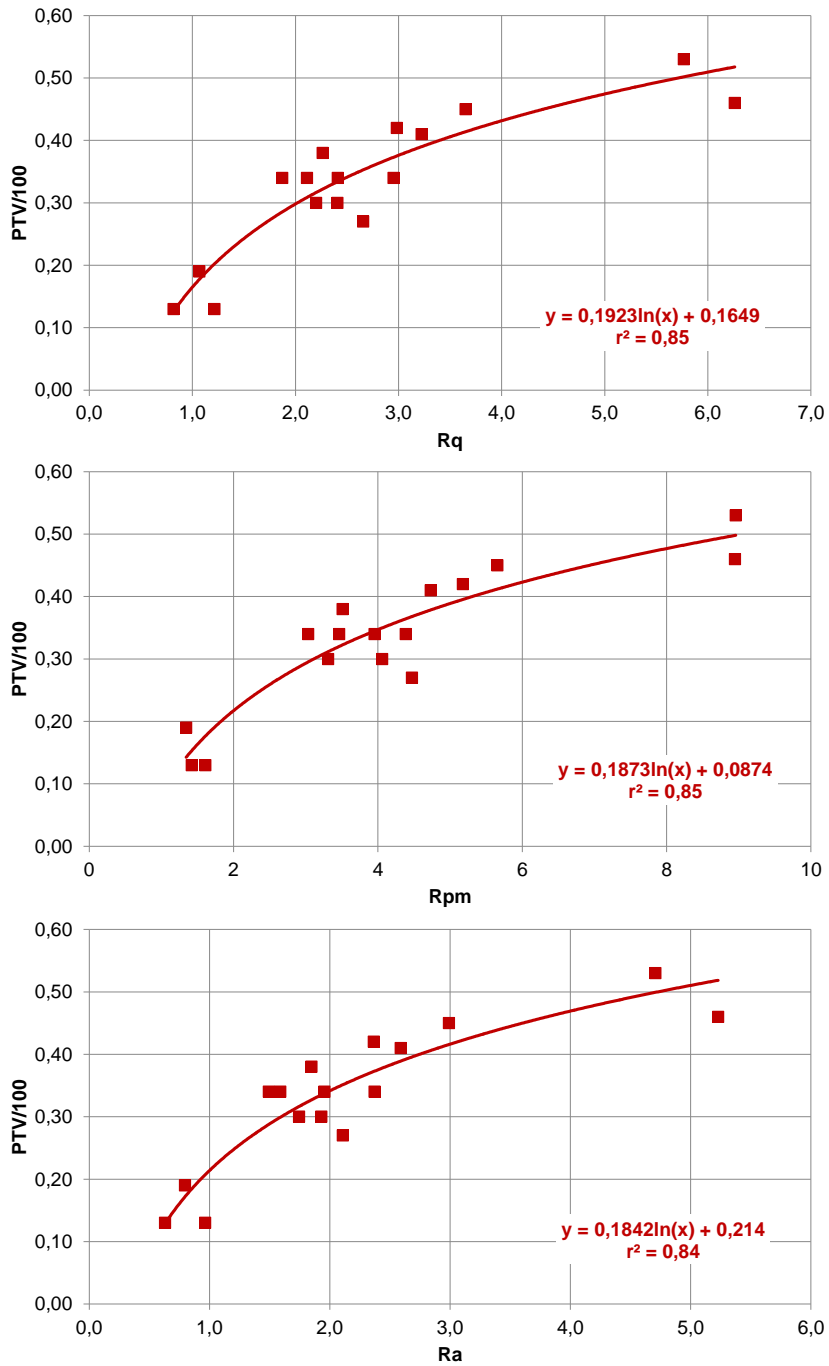


Figura 4.110 Variación de la resistencia al deslizamiento con los respectivos valores de los parámetros de rugosidad en las 16 muestras desgastadas de los grupos 3 a 5.

En este caso (ver Figura 4.110) han mejorado sensiblemente los valores de los coeficientes de correlación de los mejores ajustes obtenidos respecto a los resultantes en el apartado 4.3.4.1.

#### 4.3.5 Comparación entre los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento y los calculados mediante las correlaciones seleccionadas.

En este apartado, utilizando los datos experimentales y los correspondientes calculados de la resistencia al deslizamiento de las superficies desgastadas y los valores respectivos de los parámetros de rugosidad, se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4.2.2.2.

##### 4.3.5.1 Ensayo con las 37 muestras desgastadas

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido mediante la ecuación (4.43), en función del parámetro Rpm. En este caso 2 de los 37 valores calculados (5,4%) se han diferenciado de los correspondientes experimentales en un valor absoluto superior a 0,10, como puede apreciarse en la tabla 7.23 del apartado 7. Apéndice y en la Figura 4.111 en la que, a efectos comparativos, se han representado los valores calculados de [PTV/100] frente a los respectivos experimentales.

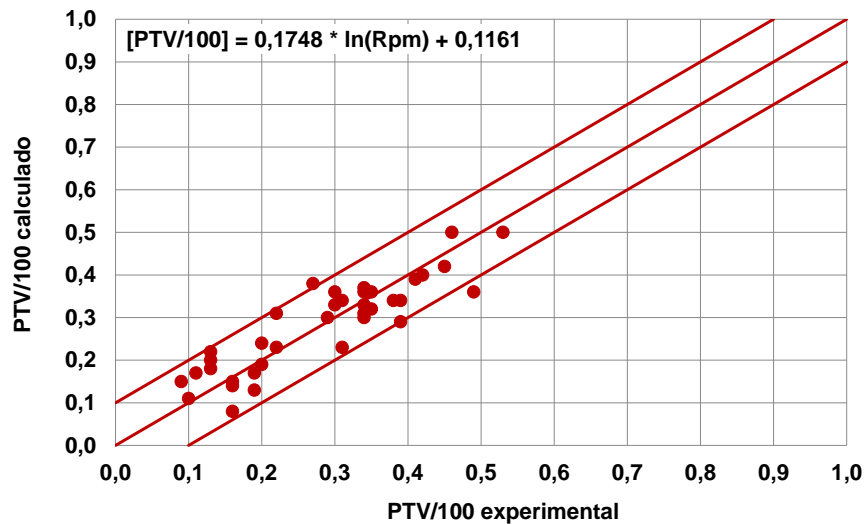


Figura 4.111 Representación de los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.43) frente a los respectivos experimentales.

#### 4.3.5.2 Ensayo con las muestras de los modelos originales encuadrados en los grupos 1 y 2

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido con la ecuación (4.46), en función del parámetro  $R_t$ . En este caso solo 1 de los 21 valores calculados (4,7%) se han diferenciado de los correspondientes experimentales en un valor absoluto superior a 0,10 (Ver en la tabla 7.24 del apartado 7. Apéndice.)

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.112 se han representado los valores calculados de [PTV/100] frente a los respectivos experimentales.

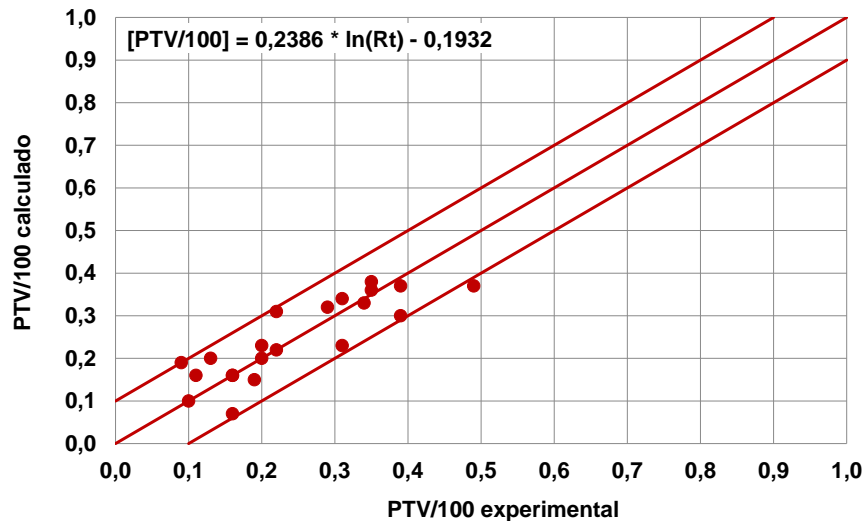


Figura 4.112 Representación de los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.46) frente a los respectivos experimentales. (Modelos originales de los Grupos 1 y 2).

#### 4.3.5.3 Ensayo con las muestras de los modelos originales encuadrados en los grupos 3 a 5

La mejor reproducción de los resultados experimentales se ha obtenido mediante la correlación (4.48), en función del parámetro  $R_q$ . En este caso los 16 valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos inferiores a 0,08 (en la tabla 7.25 del apartado 7. Apéndice.)

A efectos ilustrativos, en la Figura 4.113 se han representado los valores calculados de [PTV/100] frente a los correspondientes experimentales.

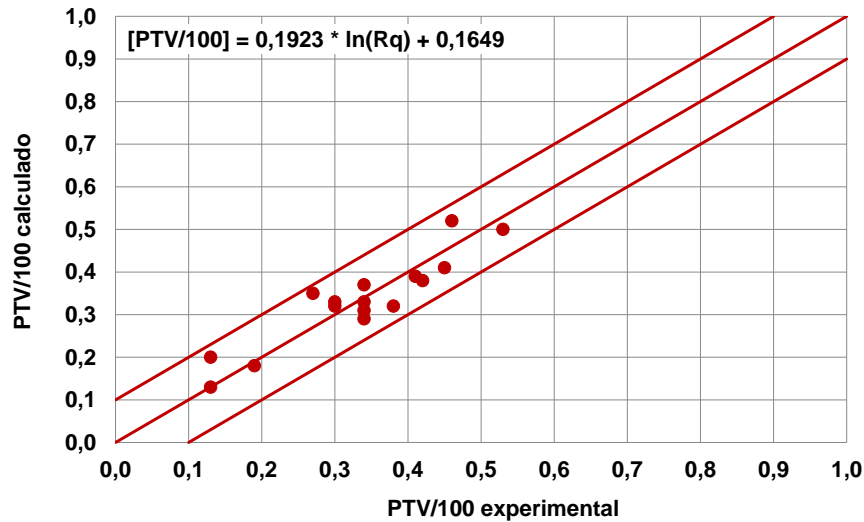


Figura 4.113 Representación de los valores de la resistencia al deslizamiento calculados con la ecuación (4.48) frente a los respectivos experimentales. (Modelos originales de los Grupos 3 a 5).

A la vista de los resultados obtenidos con la utilización de las ecuaciones (4.46) y (4.48), obtenidas en los Apartados 4.3.4.2 y 4.3.4.3, para reproducir los valores experimentales de [PTV/100], apenas se ha mejorado en un solo valor respecto a los valores calculados con la ecuación (4.43) seleccionada en el Apartado 4.3.4.1.

#### 4.3.6 Aplicación de la metodología empleada en el Apartado 4.2.3 a los resultados obtenidos con las 37 muestras desgastadas referenciadas en el Apartado 4.3.

Utilizando el procedimiento descrito en el Apartado 4.2.3 se han obtenido las siguientes ecuaciones que predicen el valor de PTV/100 a partir de varios parámetros de rugosidad, autoseleccionados por el propio procedimiento.

Para valores de  $R_p \leq 2,608$ :

$$[PTV/100] = 8,6568 I_o + 0,0169 R_p + 0,6096 R_{Sm} - 0,0188 R_k - 8,5777 \quad (4.51)$$

Para valores de  $2,608 < R_p \leq 4,452$ :

$$[PTV/100] = 9,638 I_o + 0,0169 R_p + 0,6096 R_{Sm} - 0,0188 R_k - 9,5511 \quad (4.52)$$



Para valores de  $R_p > 4,452$ :

$$[PTV/100] = 4,6383 I_o + 0,026 R_p + 0,525 R_{Sm} - 0,0162 R_k - 4,4846 \quad (4.53)$$

En la tabla 7.26 del apartado 7. Apéndice se muestran los valores de  $[PTV/100]$  experimentales y los calculados, mediante las ecuaciones (4.51), (4.52) y (4.53), de las 37 muestras desgastadas. En la Figura 4.114 se han representado los valores de  $[PTV/100]$  calculados frente a los obtenidos experimentalmente.

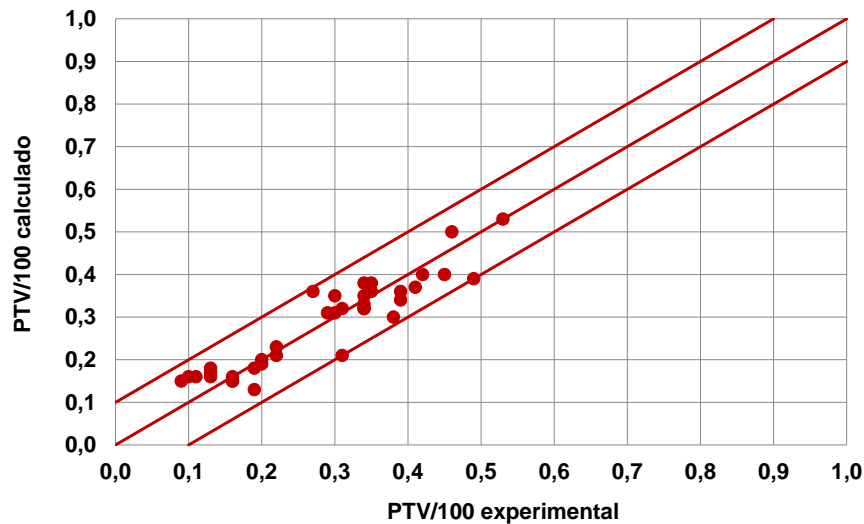


Figura 4.114 Relación entre los valores de  $[PTV/100]$  experimentales y calculados.

Como puede apreciarse en las citadas tabla y figura, todos los valores calculados se han diferenciado de los correspondientes experimentales, en valores absolutos inferiores a 0,1.



## **5. Conclusiones**



## 5.1 Estudio comparativo de los diferentes métodos de medida de la resistencia al deslizamiento

1. Los resultados de las medidas de la resistencia al deslizamiento efectuadas, en presencia de agua potable y utilizando caucho liso de dureza IRHD 57 como elemento deslizador, tanto si se realizan con el péndulo de fricción (expresadas como  $[PTV/100]$ ) como si se realizan en la rampa (expresadas como  $\tan \alpha$ ) o con el tribómetro dinámico del calzado (expresadas como  $DCOF$ ), son bastante coincidentes, aun cuando el principio físico en que se basa la medición que efectúa cada dispositivo sea sensiblemente diferente.
2. Los valores de la resistencia al deslizamiento, determinados con el péndulo de fricción en presencia de agua potable, comprendidos dentro del intervalo  $0,20 \leq [PTV/100] \leq 0,60$ , son algo mayores cuando el deslizador es de caucho liso de dureza IRHD 96 que si es de caucho liso de dureza IRHD 57. Fuera de este intervalo, en pavimentos con superficie muy lisa o con relieves pronunciados, los valores con el caucho liso de dureza IRHD 96 son iguales o inferiores, debido a la menor área de contacto entre la superficie y el deslizador.
3. Los ensayos realizados confirman que los valores de  $[PTV/100]$ , obtenidos utilizando deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57 y agua como contaminante, se relacionan bastante bien ( $r^2=0,89$ ) con los correspondientes valores determinados usando un deslizador análogo de dureza IRHD 96, mediante una correlación de tipo exponencial de la forma:

$$[PTV/100]_{(57)(A)} = 0,1082 e^{2,6862[PTV/100]_{(96)(A)}}$$

4. En presencia de agua con un agente humectante (SLS) y usando un elemento deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57, los valores de la resistencia al deslizamiento determinados mediante los tres procedimientos ensayados, expresados como  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ ,  $[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$ , presentan una coherencia similar a la observada con el agua potable sin aditivos.
5. Como era de esperar, los valores de la resistencia al deslizamiento, determinados por los tres procedimientos ensayados, en presencia de

agua + SLS y usando deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57, son ligeramente más bajos que los correspondientes medidos en presencia de agua potable. Se ha comprobado que existe una excelente correlación lineal entre  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$  y  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  ( $r^2= 0,996$ ), de la forma:

$$[PTV/100]_{(57)(A+SLS)} = 0,8984 [PTV/100]_{(57)(A)} + 0,0031$$

6. En general, la utilización de calzado provisto de suelas con tacos mejora la resistencia al deslizamiento. Si se comparan los valores obtenidos para  $[tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$  utilizando suelas con tacos respecto a suelas lisas, se observa un aumento de los valores. Por otro lado, como era de esperar, el uso de suelas con tacos vivos (suelas nuevas) también mejora la resistencia al deslizamiento respecto al uso de suelas con tacos redondeados (suelas algo desgastadas). En los ensayos realizados con el tribómetro del calzado se obtienen resultados análogos a los anteriores para valores de  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)} < 0,55$ . Para valores del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$  mayores que el indicado, los resultados son prácticamente coincidentes, tanto si la suela es lisa, como si está provista de cualquiera de los tipos de tacos ensayados.
  
7. Al representar los valores de la resistencia al deslizamiento  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  de diferentes modelos de pavimento cerámico, determinados con el equipo BOT-3000 que opera con un elemento deslizador de caucho SBR liso de dureza Shore A 95 en presencia de agua + SLS, frente a los correspondientes medidos mediante el péndulo de fricción con deslizador de caucho liso de dureza IRHD 57 expresados como  $[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$ , resultan curvas de regresión de tipo logarítmico ( $r^2 = 0,75$ ), con forma cualitativamente análoga a las que se obtienen al relacionar los valores de  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  con los correspondientes de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ , obtenidos en los ensayos realizados con los mismos modelos de pavimento cerámico.
  
8. Al representar los valores de  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  frente a los del  $[DCOF]_{(57)(A+SLS)}$ , obtenidos utilizando el tribómetro del calzado, resulta una representación análoga a la descrita en el apartado anterior. Esta coincidencia parece sugerir que las representaciones de los valores de la resistencia al deslizamiento, medidos con deslizador de dureza elevada (IRHD 96 y Shore A 95), frente a los correspondientes valores, obtenidos usando un deslizador de dureza IRHD 57, conducen a líneas de tendencia de tipo logarítmico cualitativamente

análogas, independientemente del procedimiento y equipo de medida empleado.

9. Los valores de la resistencia al deslizamiento determinados por los tres procedimientos ensayados, utilizando aceite como líquido contaminante, son sensiblemente más bajos que los correspondientes obtenidos usando agua o agua con humectante (SLS), lo cual era de esperar dada la elevada viscosidad del aceite.
  
10. Cuando se usa aceite como líquido contaminante, no se observan sensibles diferencias entre los valores de la resistencia al deslizamiento medidos, en lo que respecta a las muestras de los Grupos 1 a 3. En las piezas con relieve superficial acentuado y las de relieve superficial geoméricamente uniforme (Grupos 4 y 5) sí que se aprecian diferencias importantes.
  
11. Al comparar los resultados obtenidos al medir la resistencia al deslizamiento  $[PTV/100]_{(57)(A)}$  de un amplio muestrario de modelos de pavimento cerámico, mediante el péndulo de fricción, según la Norma *UNE-ENV 12633 Anexo A* vigente en España, con los determinados utilizando otros métodos y magnitudes de medida contemplados en la normativa que está en vigor en otros países, se han podido relacionar entre sí mediante líneas de regresión con coeficientes de correlación  $r^2$  que han oscilado entre 0,69 y 0,86 dependiendo del método.
  
12. Mediante las correlaciones que se mencionan en el apartado anterior, se ha podido reproducir los datos experimentales de la resistencia al deslizamiento, obtenidos para las piezas ensayadas, mediante los distintos procedimientos ensayados:  $[PTV/100]_{(96)(A)}$  (94%);  $[DCOF-BOT]_{(95)(A+SLS)}$  (81%) y  $[\tan \alpha]_{(pie\ descalzo)(A+SLS)}$  (88%), a partir de los correspondientes valores experimentales de  $[PTV/100]_{(57)(A)}$ . La estimación así obtenida se puede considerar aceptable ya que un porcentaje muy elevado de los valores calculados difieren en menos de  $\pm 0,1$  de los correspondientes experimentales (94%; 81% y 88% respectivamente). Todo ello a pesar de que dichos procedimientos difieren sensiblemente, debido a que tanto los elementos deslizadores como los medios contaminantes que utilizan son muy diferentes.

## 5.2 Estudio de la relación entre la topografía superficial y la resistencia al deslizamiento

13. Al comparar los valores de trece parámetros representativos del perfil de rugosidad ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Rq$ ,  $Rz_{ISO}$ ,  $Rpm$ ,  $Rp$ ,  $RPC$ ,  $RSm$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta q$ ,  $l_0$ , y  $Rk$ ) de los 52 modelos originales estudiados, se han observado similitudes entre los valores correspondientes de algunos de dichos parámetros, como es el caso de los conjuntos  $Ra-Rz-Rt-Rq-Rk$ ;  $Rz_{ISO}-Rpm-Rp$  y  $\Delta a-\Delta q-l_0$ . En todas las representaciones correspondientes a estos conjuntos de parámetros, se obtienen ajustes, a líneas de regresión lineal, con coeficientes de correlación del orden de 0,95 o mayores. En cambio, no se ha encontrado una relación demasiado buena entre los valores de  $RPC$  y  $RSm$  con el resto de los parámetros ensayados, aunque sí entre ellos dos, mediante líneas de regresión de tipo logarítmico o exponencial, para las que se obtienen coeficientes de correlación del orden de 0,90.

Al comparar los valores de seis parámetros representativos del perfil de ondulación ( $Sp$ ,  $St$ ,  $Sz$ ,  $S\Delta q$ ,  $Ssc$  y  $Sdr$ ) correspondientes a los 52 modelos de superficie estudiados, se han encontrado correlaciones de tipo lineal entre los parámetros  $Sp$ ,  $St$  y  $Sz$ ; con coeficientes de correlación entre 0,87 y 0,96. En cambio, los parámetros  $S\Delta q$ ,  $Ssc$  y  $Sdr$  se relacionan entre sí mejor mediante líneas de regresión de tipo potencial, para las que se obtienen coeficientes de correlación entre 0,84 y 0,99.

14. Al estudiar la relación entre el valor de la resistencia al deslizamiento, medida con el péndulo de fricción, y el de cada uno de los correspondientes parámetros de rugosidad, los mejores ajustes se han obtenido con líneas de regresión de tipo logarítmico, con coeficientes de correlación ( $r^2$ ) comprendidos entre 0,60 y 0,74 para casi todos los parámetros estudiados. Los parámetros con los que mejor se ha relacionado la resistencia al deslizamiento han sido  $Rz$ ,  $Rt$  y  $\Delta q$ . Sin embargo, cuando se ha intentado relacionar la resistencia al deslizamiento con los parámetros representativos del perfil de ondulación, los ajustes, también de tipo logarítmico, han sido mucho peores ( $r^2 < 0,41$  en todos los casos).
15. Al agrupar dichos modelos en dos conjuntos, atendiendo a la naturaleza de su perfil: plano (Grupos 1 y 2) u ondulado o con relieve (Grupos 3 a 5), se han mejorado algunas de las correlaciones obtenidas mediante líneas de regresión también de tipo logarítmico. En el conjunto formado por los grupos 1 y 2, los mejores ajustes se han obtenido respecto a los parámetros:  $Rz$  ( $r^2=0,82$ );  $Rt$  ( $r^2=0,82$ ) y



$Rpm$  ( $r^2=0,79$ ). En el conjunto constituido por los Grupos 3 a 5, los mejores ajustes se han obtenido respecto a los parámetros:  $\Delta a$  ( $r^2=0,83$ );  $\Delta q$  ( $r^2=0,82$ ) y  $Rz$  ( $r^2=0,76$ ).

16. Al estudiar la relación entre los valores de la resistencia al deslizamiento y cada uno de los respectivos parámetros de rugosidad elegidos, considerando los cinco Grupos establecidos en este trabajo por separado, se han mejorado los coeficientes de correlación de los parámetros que mejor se ajustan, en el caso de los Grupos 1, 3 y 5. Los mejores ajustes, en los diferentes grupos se han obtenido con los parámetros que se citan a continuación:
- Grupo 1: (líneas de regresión rectas)  $\Delta a$  ( $r^2=0,93$ );  $\Delta q$  ( $r^2=0,90$ ) y  $l_o$  ( $r^2=0,90$ ).
  - Grupo 2: (líneas de regresión de tipo logarítmico)  $Rz$  ( $r^2=0,79$ );  $Rt$  ( $r^2=0,78$ ) y  $Rpm$  ( $r^2=0,77$ ).
  - Grupo 3: (líneas de regresión rectas)  $Rq$  ( $r^2=0,88$ );  $Ra$  ( $r^2=0,87$ ) y  $Rt$  ( $r^2=0,86$ ).
  - Grupo 4: (líneas de regresión de tipo logarítmico)  $Rp$  ( $r^2=0,66$ );  $\Delta q$  ( $r^2=0,64$ ) y  $Rz_{ISO}$  ( $r^2=0,63$ ).
  - Grupo 5: (líneas de regresión de tipo logarítmico)  $\Delta q$  ( $r^2=0,96$ );  $\Delta a$  ( $r^2=0,96$ ) y  $l_o$  ( $r^2=0,84$ ).
17. Al utilizar las mejores correlaciones obtenidas para cada uno de los conjuntos formados por los Grupos 1 y 2 y por los Grupos 3 a 5 por separado, para calcular el valor de la resistencia al deslizamiento a partir de los valores individuales de los parámetros de rugosidad respectivos, se han reproducido los resultados experimentales de dicha propiedad superficial, con desviaciones iguales o inferiores a  $\pm 0,1$ , en 47 de los 52 modelos estudiados.
18. Al utilizar las ecuaciones de las mejores correlaciones obtenidas para cada uno de los cinco grupos considerados, por separado, para calcular el valor de la resistencia al deslizamiento a partir de los valores individuales de los parámetros de rugosidad respectivos, se han reproducido los resultados experimentales de dicha propiedad superficial, con desviaciones iguales o inferiores a  $\pm 0,1$ , en 49 de los 52 modelos ensayados.

19. Al aplicar un método estadístico para tratar de relacionar la resistencia al deslizamiento de los modelos de superficie estudiados con un conjunto de los respectivos parámetros de rugosidad, preseleccionados por el propio procedimiento empleado, se han obtenido los resultados siguientes:

- Cuando se ha aplicado a los 52 modelos originales conjuntamente, se han obtenido tres ecuaciones diferentes, dependiendo del intervalo de valores del parámetro  $Rz$  del modelo de superficie considerado, en las que participan los parámetros  $Rq$ ,  $l_0$ ,  $\Delta a$ ,  $Rz_{ISO}$ ,  $Rp$ ,  $Rz$  y  $Rpc$ .
- Cuando se han agrupado en dos conjuntos diferentes, atendiendo a la naturaleza del perfil, para el conjunto de 22 muestras con perfil plano pertenecientes a los Grupos 1 y 2, se ha obtenido una sola ecuación en función de los parámetros  $Ra$ ,  $\Delta q$ ,  $Rp$  y  $Rsm$  y para el conjunto de 30 muestras de perfil ondulado o con relieve pertenecientes a los grupos 3 a 5, se ha obtenido también una sola ecuación, en la que intervienen los parámetros  $Ra$ ,  $\Delta a$ ,  $Rz_{ISO}$ , y  $Rp$ .

20. Al comparar los valores experimentales obtenidos para la resistencia al deslizamiento y los calculados a partir de las ecuaciones seleccionadas por el procedimiento estadístico empleado, se han obtenido los siguientes resultados:

- Considerando los 52 modelos conjuntamente: Solo 2 valores de  $[PTV/100]$  calculados difieren en más de 0,1, en valor absoluto, de los respectivos valores experimentales.
- Considerando dos conjuntos: Grupos 1 y 2 y Grupos 3 a 5 por separado: Solo 2 valores de  $[PTV/100]$  calculados difieren en más de 0,1, en valor absoluto, de los respectivos valores experimentales.

De los resultados expuestos se concluye que las ecuaciones obtenidas separando los modelos estudiados en dos conjuntos, permiten calcular los valores de la resistencia al deslizamiento mediante expresiones más sencillas, utilizando menos parámetros de rugosidad para efectuar los cálculos.

### 5.3 Variación de la resistencia al deslizamiento con el desgaste superficial del pavimento

21. Se ha diseñado y puesto a punto un equipo de laboratorio y una metodología que permiten reproducir, de modo fiable y en un corto espacio de tiempo, el proceso de desgaste que experimenta la superficie de un pavimento cerámico instalado, como consecuencia del tránsito peatonal real. Este equipo opera con muestras cuyo tamaño permite la medida de la resistencia al deslizamiento a lo largo del proceso de desgaste.

22. En prácticamente la totalidad de las muestras de pavimento sometidas a abrasión por tránsito peatonal real y con el equipo de laboratorio, se ha observado una pérdida de sus prestaciones antideslizantes durante el proceso de desgaste. Esta pérdida puede llegar a ser tan importante en algunos casos, como para que, transcurridos uno o dos años de su instalación, pueda no ser ya apta para el local en el que está colocada, sobre todo si se trata de zonas de pública concurrencia y elevado tránsito.

Las muestras de perfil plano, con elevados valores iniciales de resistencia al deslizamiento, se ha observado que experimentan una mayor pérdida del valor de dicha propiedad en las etapas iniciales de desgaste, estabilizándose para intensidades de desgaste equivalentes al tránsito de aproximadamente 50.000 personas. Las muestras de perfil ondulado y con relieve parece que mantienen mejor sus prestaciones antideslizantes, a lo largo del proceso de desgaste, dependiendo del perfil original del pavimento.

23. De la comparación de los resultados obtenidos al desgastar la superficie de varios modelos de pavimento cerámico, por tránsito peatonal real y con el equipo de laboratorio, se deduce que la variación de la resistencia al deslizamiento que experimentan, como consecuencia del desgaste producido en una etapa del equipo de laboratorio desarrollado, equivale a la que sufren por el tránsito real de unas 10.000 personas.

24. La variación de la resistencia al deslizamiento que experimenta la superficie de un pavimento cerámico con la progresión del desgaste por abrasión, producido tanto por tránsito peatonal real, como mediante el equipo de laboratorio, se ajusta bien a líneas de regresión de tipo logarítmico de la forma  $Rd = -A * \ln(N) + B$ . En esta ecuación,

$Rd$  representa la resistencia al deslizamiento medida con el péndulo de fricción y  $N$  la magnitud con la que se mide la intensidad del tránsito peatonal expresada, en número de personas que han transitado o en etapas de desgaste producidas en el equipo de laboratorio.

25. El valor de los parámetros A y B de dicha ecuación depende de la naturaleza y propiedades de la superficie del pavimento y de las magnitudes que se empleen para expresar la resistencia al deslizamiento y la intensidad del desgaste. Se ha observado que el valor del parámetro A es tanto mayor, cuanto más acentuada es la disminución del valor de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste y que el parámetro B tiene un valor tanto más elevado cuanto mayor es el valor de  $Rd$  inicial ( $N=0$ ).
  
26. La ecuación de tipo logarítmico propuesta se ajusta mejor (91% de los valores de  $r^2 \geq 0,90$ ) a los datos experimentales representativos de la variación de la resistencia al deslizamiento con la intensidad del desgaste ( $N$ ), cuando la abrasión se realiza con el equipo de laboratorio que cuando se efectúa por tránsito peatonal real (70% de los valores de  $r^2 \geq 0,85$ ). Este resultado no es de extrañar ya que el equipo de laboratorio realiza la abrasión de la superficie de las muestras de pavimento en condiciones prácticamente invariables. En cambio, el desgaste por tránsito peatonal del pavimento cerámico instalado se produce en condiciones variables (con mayor o menor humedad, con presencia variable de contaminantes sólidos abrasivos, diferente peso de las personas que transitan, etc.) a lo largo del prolongado periodo de uso (varios años).
  
27. La correlación de tipo logarítmico que se obtiene para cualquier pavimento cerámico, a partir de los resultados del desgaste producido en su superficie con el equipo de laboratorio, permite predecir, con bastante exactitud, la evolución que experimentará, a largo plazo, su resistencia al deslizamiento, como consecuencia de la abrasión ocasionada por tránsito peatonal real.
  
28. Al someter a desgaste piezas de pavimento cerámico con distinto mapa topográfico, se ha observado que los parámetros superficiales que más se modifican, por efecto de la abrasión, son  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Rq$ ,  $Rz_{ISO}$ , y, en menor medida  $Rk$ ,  $Rp$ ,  $Rpm$ ,  $\Delta a$  y  $\Delta q$ .

29. El valor de  $l_0$  y  $RP_c$  prácticamente no resulta afectado por el desgaste. Sin embargo, el valor de  $RSm$  presenta un comportamiento diferente aumentando, en mayor o menor medida, durante las etapas iniciales del desgaste para después disminuir ligeramente.
30. En la mayor parte de las muestras estudiadas, se observan tendencias similares en el comportamiento del  $[PTV/100]$  frente al desgaste ( $N$ ) y el de los parámetros de rugosidad  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Rq$ ,  $Rz_{ISO}$  y  $Rp$  frente a  $N$ .
31. Al estudiar la influencia de la intensidad del desgaste sobre la relación entre la resistencia al deslizamiento y algunos parámetros de rugosidad, se ha observado que las curvas representativas del valor de  $[PTV/100]$  frente al de los respectivos parámetros se van desplazando, en todos los casos, hacia el eje de abscisas a medida que aumenta la intensidad del desgaste. Ello supone que, para un determinado valor de cualquiera de los parámetros de rugosidad estudiados, el valor de la resistencia al deslizamiento va disminuyendo a medida que mayor es la intensidad del desgaste.
32. Se han obtenido ecuaciones que relacionan la resistencia al deslizamiento medida como  $[PTV/100]$  y los correspondientes parámetros de rugosidad de 37 muestras desgastadas tanto por tránsito peatonal como en laboratorio a diferentes intensidades de desgaste.
- Con las ecuaciones obtenidas al tratar las 37 muestras estudiadas conjuntamente, los parámetros con los que se han obtenido los mejores ajustes han sido  $Rp$  ( $r^2=0,81$ ),  $Rpm$  ( $r^2=0,79$ ) y  $Rt$  ( $r^2=0,78$ ).
  - Con las ecuaciones obtenidas al separar las 37 muestras en dos conjuntos, atendiendo a la naturaleza de su perfil, se han obtenido los resultados siguientes: Para las 21 muestras de perfil plano (Grupos 1 y 2) los parámetros con los que han resultado los mejores ajustes han sido  $Rp$  ( $r^2=0,75$ ),  $Rt$  ( $r^2=0,73$ ) y  $Rz$  ( $r^2=0,72$ ). Con las 16 muestras de perfil ondulado y con relieve (grupos 3 a 5) los parámetros con los que se han obtenido los mejores ajustes han sido  $Rq$  ( $r^2=0,85$ ),  $Rpm$  ( $r^2=0,85$ ) y  $Ra$  ( $r^2=0,84$ ).

Con estas ecuaciones, partiendo de los datos experimentales de evolución del valor de dichos parámetros con la intensidad del

desgaste, se ha conseguido reproducir los correspondientes valores experimentales de la resistencia al deslizamiento (expresada como  $[PTV/100]$ ), de 37 muestras diferentes sometidas a desgaste parcial, con desviaciones inferiores a  $\pm 0,10$ , excepto en un caso.

33. Al aplicar el método estadístico de cálculo propuesto en este trabajo para calcular el valor de la resistencia al deslizamiento en función de los valores de un conjunto dado de parámetros de rugosidad, partiendo de los datos experimentales de evolución del valor de dichos parámetros con la intensidad del desgaste, se han obtenido tres ecuaciones diferentes, dependiendo del intervalo de valores del parámetro  $R_p$  de la muestra, en las que intervienen los parámetros  $l_o$ ,  $R_p$ ,  $R_{sm}$  y  $R_k$ . Mediante estas ecuaciones, se ha conseguido reproducir los valores experimentales de la resistencia al deslizamiento (expresada como  $[PTV/100]$ ), correspondientes a las 37 muestras sometidas a desgaste parcial, con desviaciones inferiores a  $\pm 0,10$ .

## **6. Futuras líneas de investigación**





Como consecuencia del conocimiento generado a partir de los resultados obtenidos en la presente tesis, se recomienda llevar a cabo las acciones que se exponen a continuación:

1. A partir del estudio comparativo entre los resultados obtenidos mediante los diferentes equipos de ensayo y normativas existentes, establecer unos requisitos y recomendaciones para la resistencia al deslizamiento de un pavimento en función del uso previsto, que abarquen a los diferentes equipos y procedimientos de medida.
2. En el caso de las baldosas cerámicas con relieve (irregular o geométrico uniforme), sería conveniente tratar de relacionar la resistencia al deslizamiento con los respectivos parámetros de rugosidad y ondulación, considerados conjuntamente, con el objetivo de encontrar mejores correlaciones que las obtenidas en este trabajo, en las que se ha considerado solo la influencia de los parámetros de rugosidad.
3. La resistencia al deslizamiento en las baldosas cerámicas, así como la retención de suciedad y la dificultad de limpieza, están relacionadas con su topografía superficial, aunque con efectos, en cierto modo, contrapuestos. Por tanto, sería conveniente obtener información adicional sobre el modo en que la topografía superficial de las baldosas está relacionada con la retención de suciedad y con la dificultad de eliminarla, con vistas a optimizar el diseño de la textura superficial idónea para obtener una buena resistencia al deslizamiento sin aumentar su retención de suciedad.
4. La duración de la resistencia al deslizamiento de un pavimento depende, tanto de la topografía de la superficie de la cara vista, como de la resistencia al desgaste del material que la constituye. Por tanto, en el caso de baldosas esmaltadas, sería conveniente realizar un estudio para tratar de obtener o seleccionar materias primas elaboradas que conduzcan a la obtención de recubrimientos vidriados con una resistencia al desgaste suficientemente alta, a fin de que mantengan sus características antideslizantes el mayor tiempo posible, una vez instaladas.
5. Tratar de evaluar el efecto que, sobre la resistencia al deslizamiento de un pavimento cerámico, provocan determinadas circunstancias existentes en el lugar donde está instalado, tales como la presencia

continuada de diferentes materiales abrasivos, o las actividades que se realizan en el local o área pavimentada, o ciertas acciones que se desarrollan periódicamente sobre las piezas instaladas, tales como actividades de mantenimiento (dispositivos, métodos y agentes de limpieza).

6. Tratar de ampliar y mejorar la oferta actual de tratamientos superficiales que se aplican, in situ, sobre pavimento cerámico instalado, para aumentar su resistencia al deslizamiento, para hacerla más duradera o para compensar las pérdidas de dicha propiedad producidas por su utilización.
  
7. Partiendo del conocimiento generado al diseñar, poner a punto y realizar ensayos con el equipo de laboratorio de desgaste acelerado empleado en esta investigación, se recomienda realizar un esfuerzo adicional para desarrollar un dispositivo de menor tamaño, más fácilmente manipulable y transportable e igualmente efectivo. Se podría partir de un dispositivo y metodología análogos a los propuestos por *Strautins*, convenientemente modificados para la finalidad deseada en este caso. Sería preciso poner a punto el nuevo equipo, procediendo en la forma descrita en este trabajo, a fin de equiparar su efectividad con el desgaste producido por tránsito peatonal real.

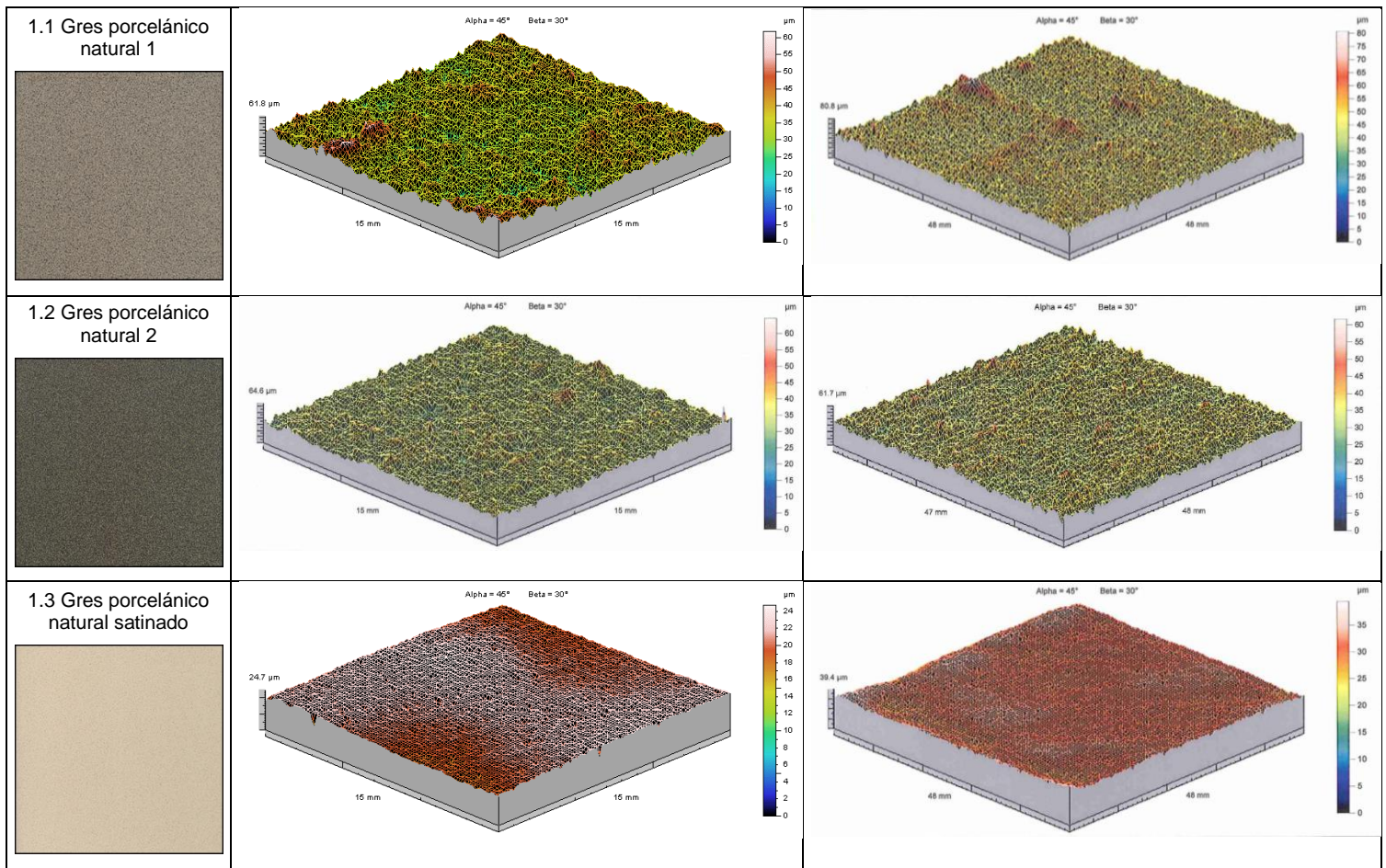
## **7. Apéndice**



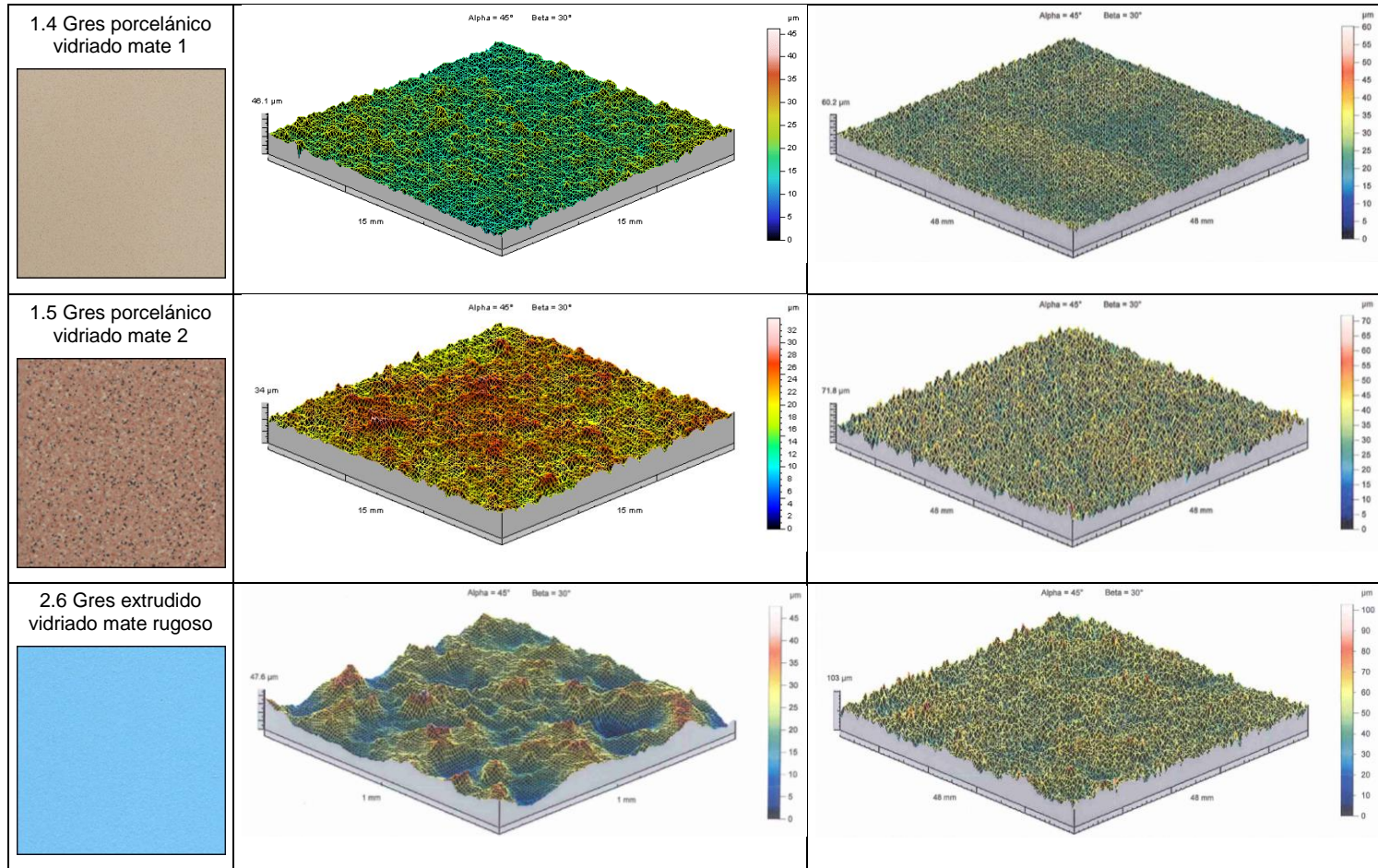
## 7.1 Muestras

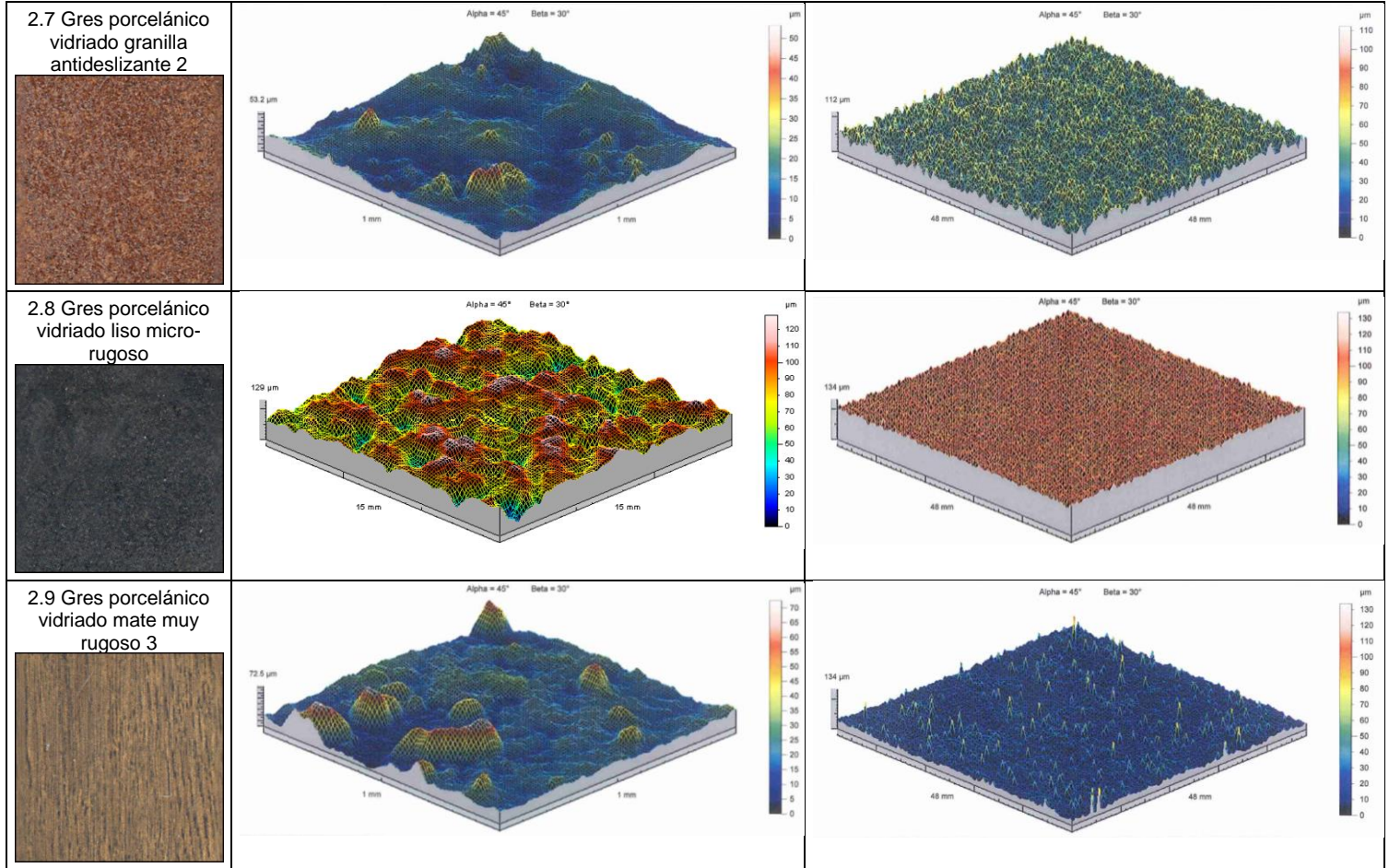


**7.1.1 Muestras seleccionadas**

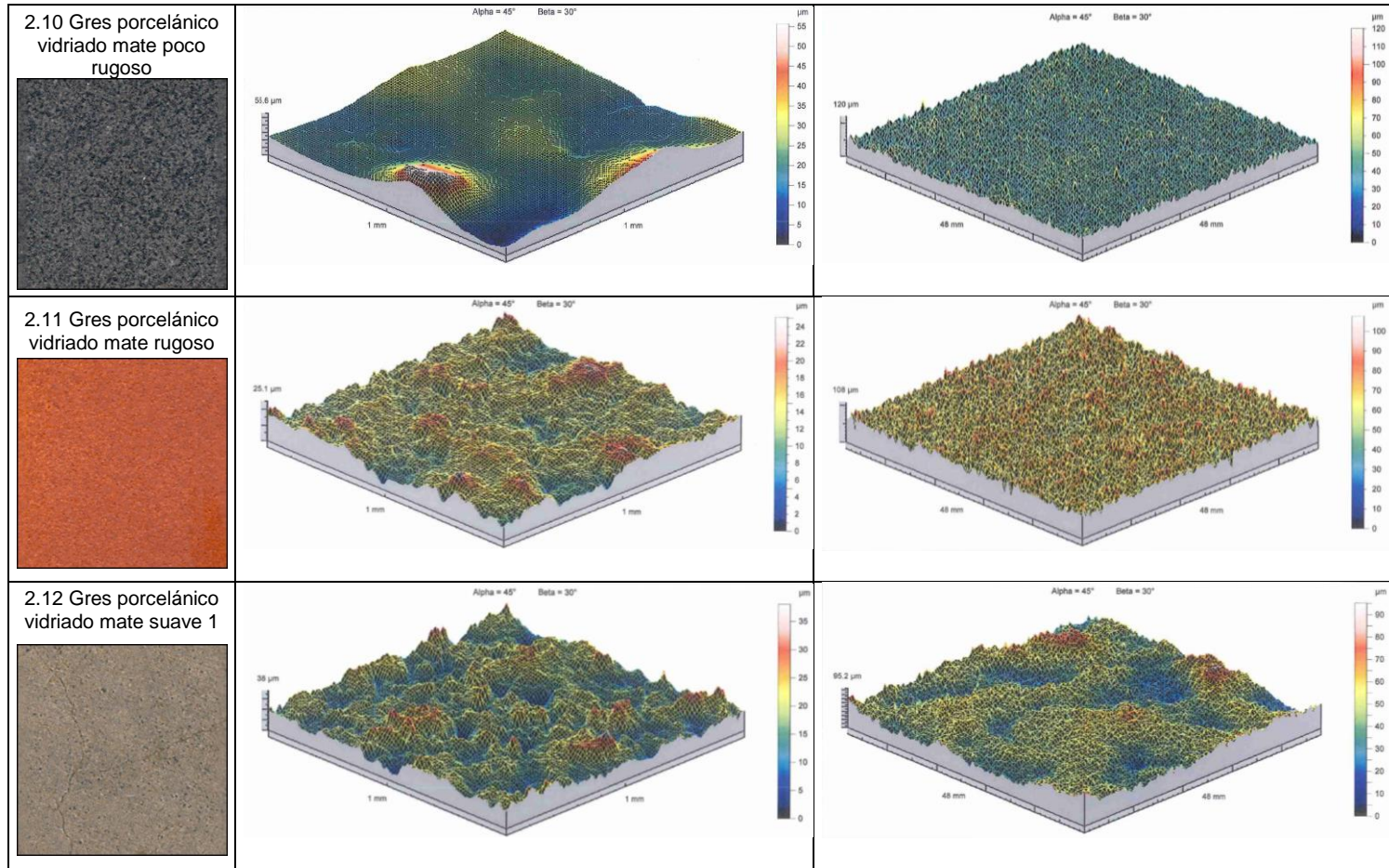


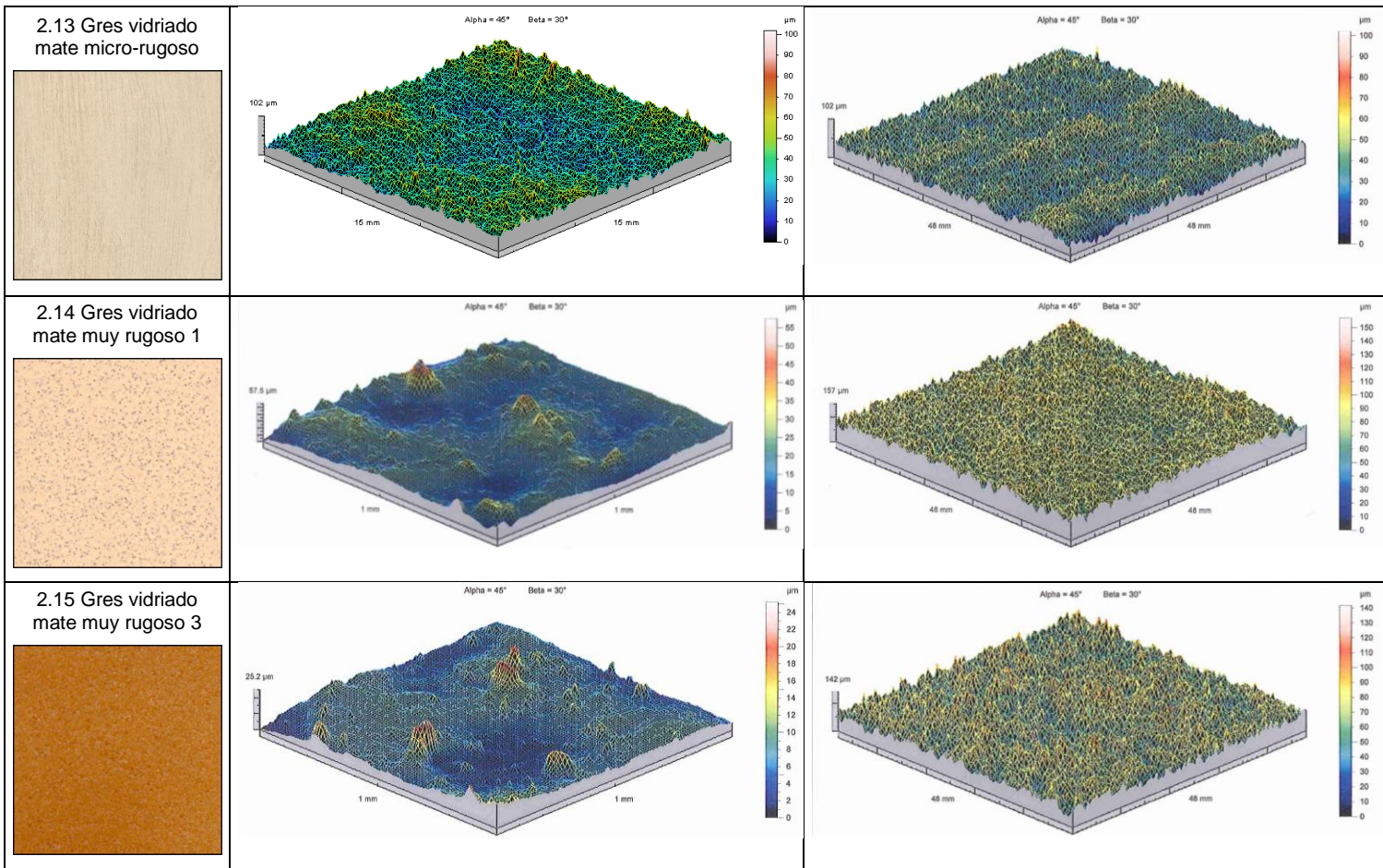




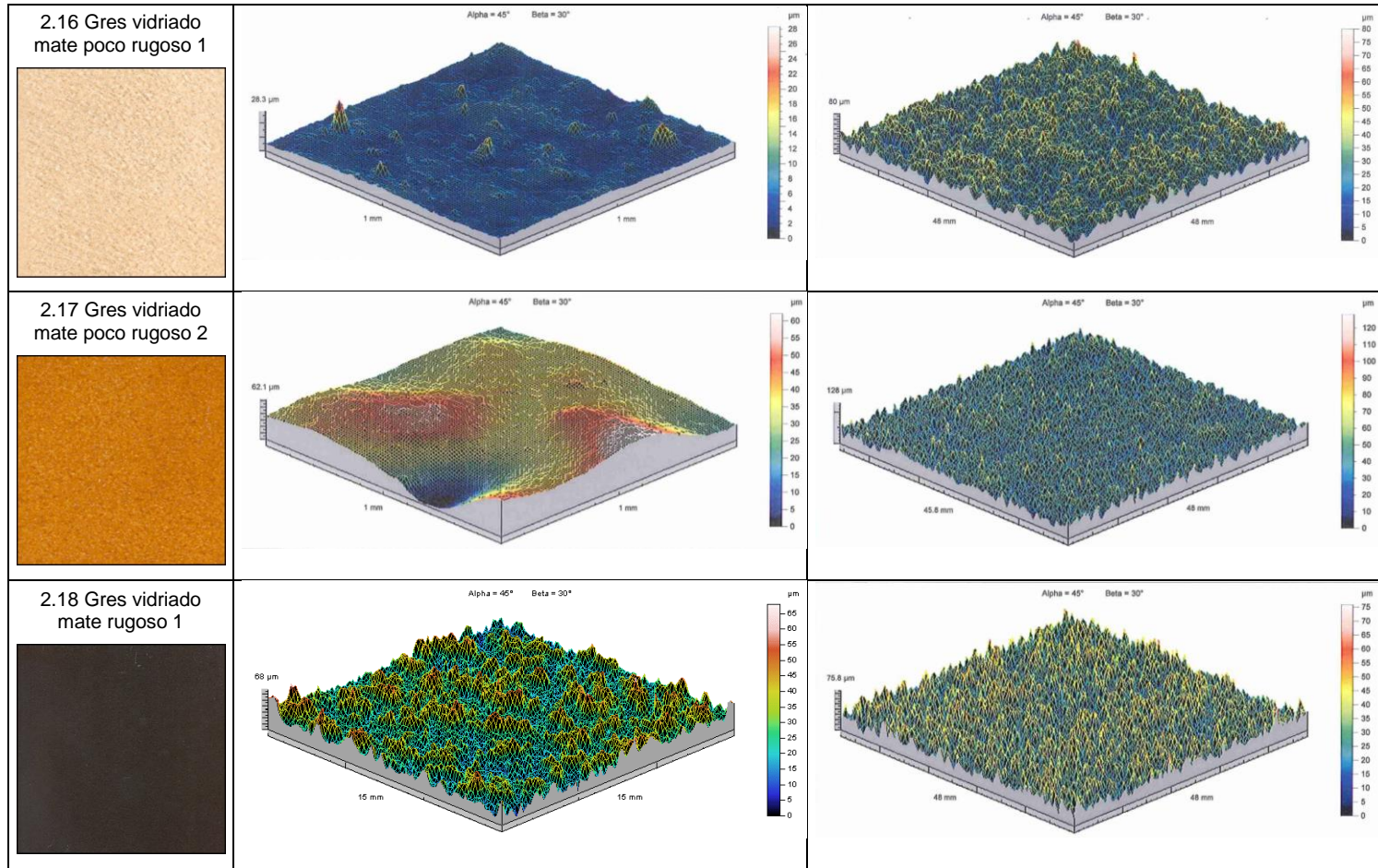


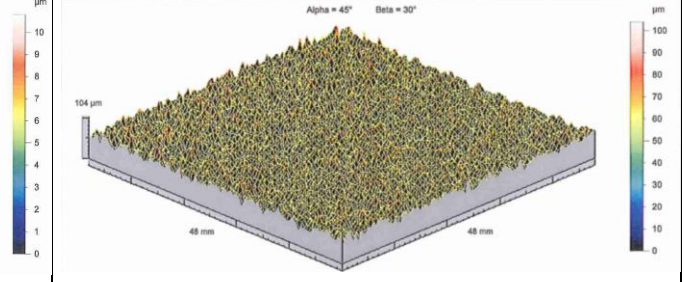
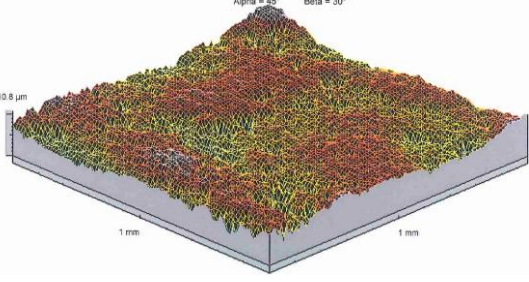
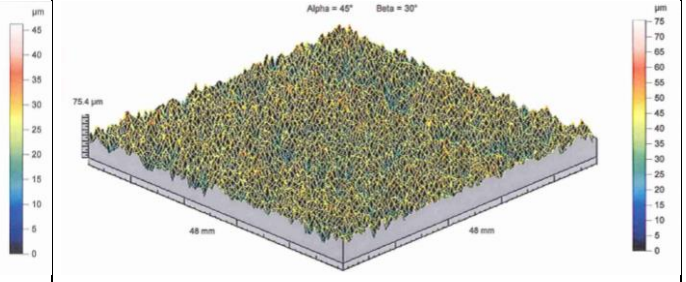
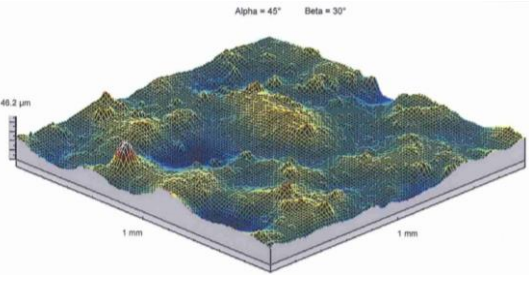
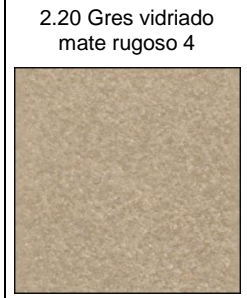
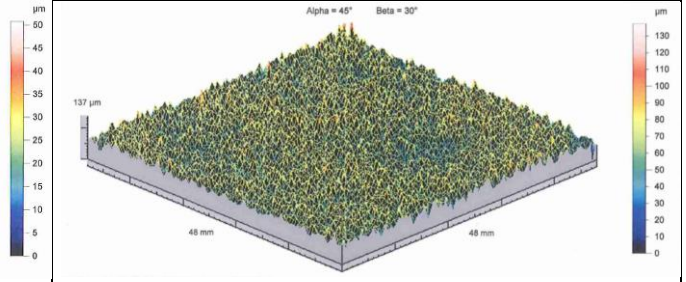
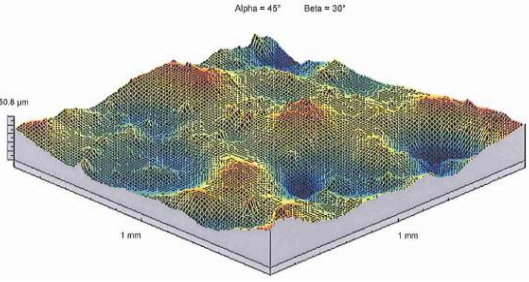
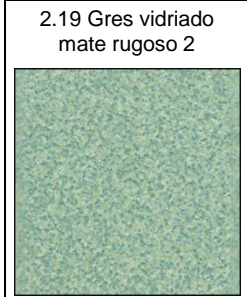




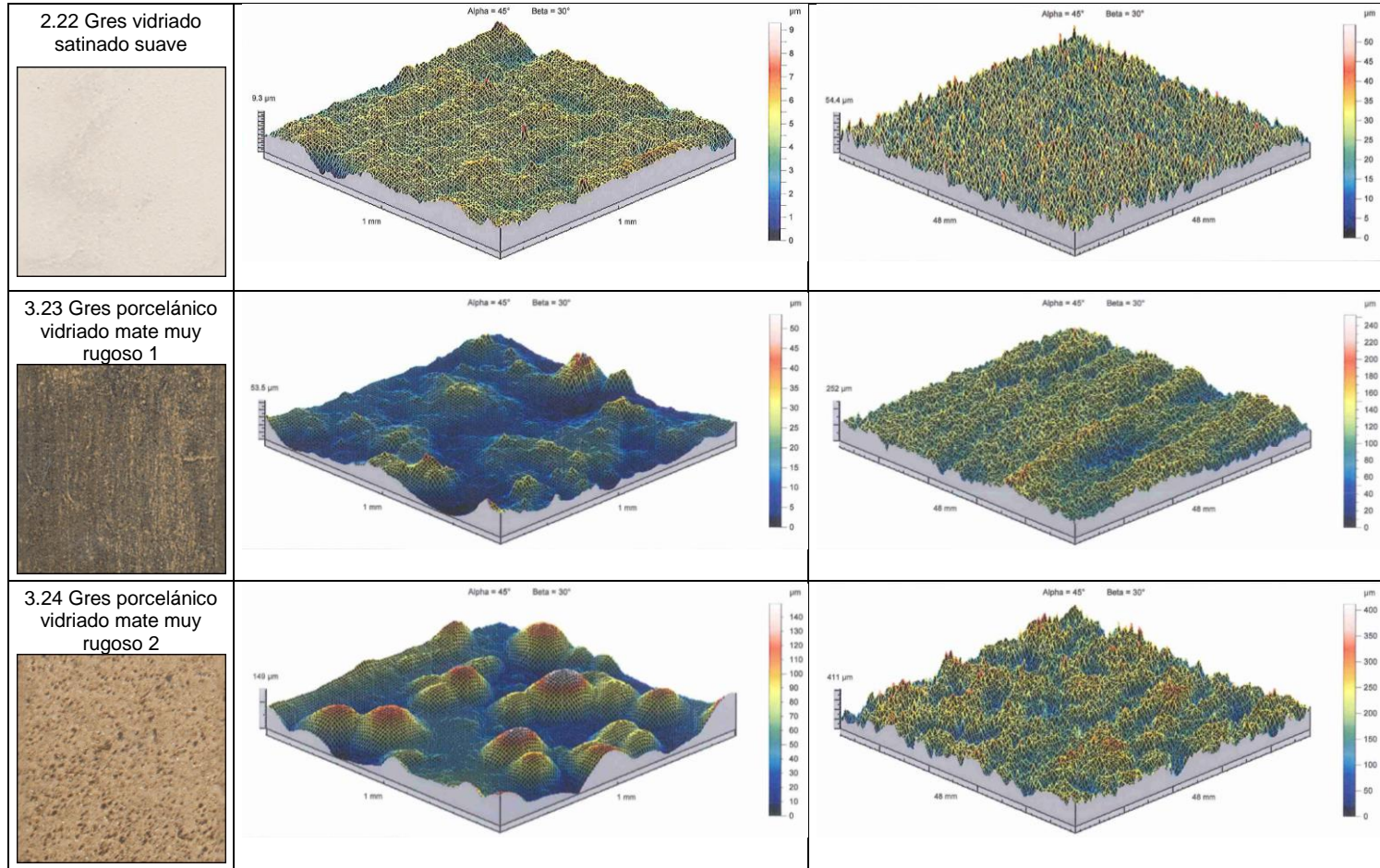


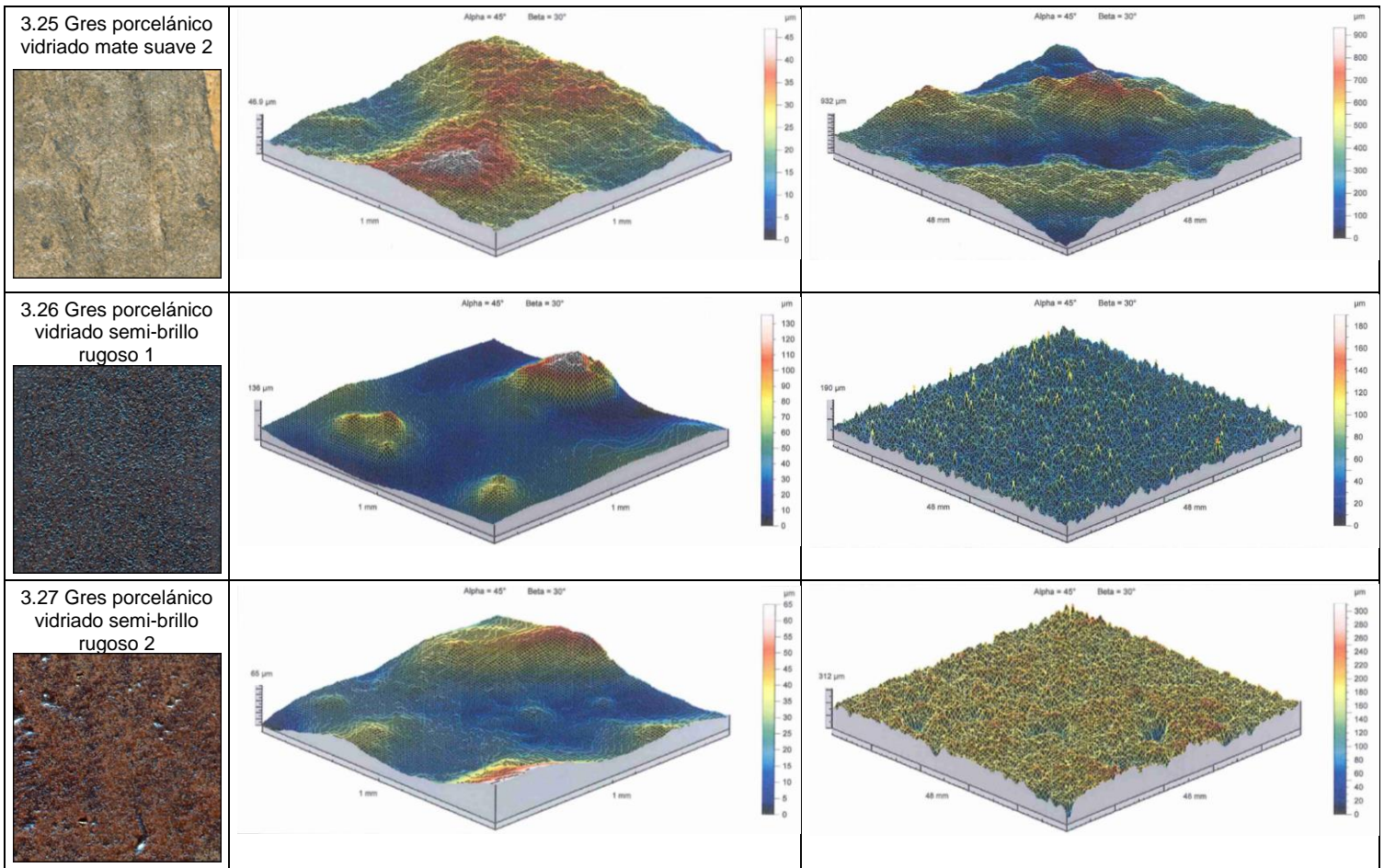






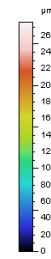
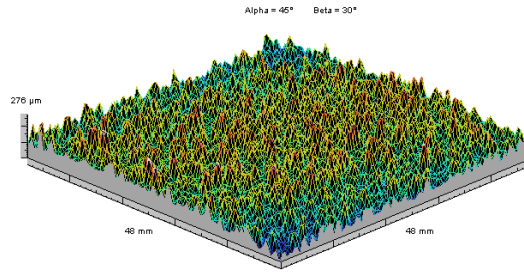
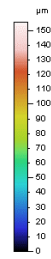
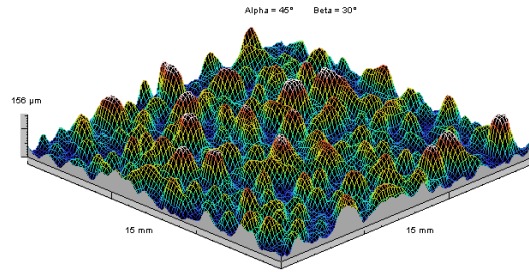
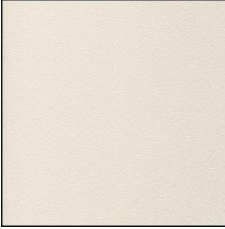




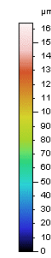
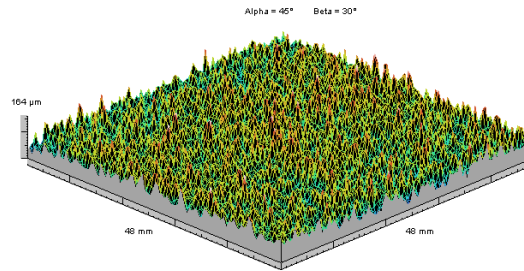
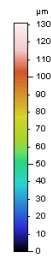
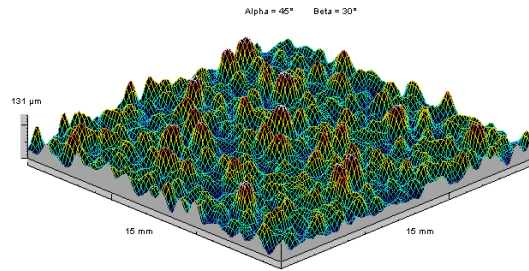
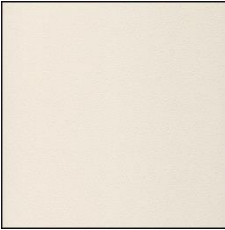




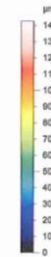
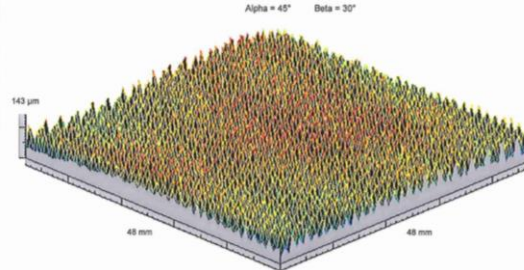
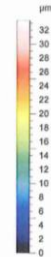
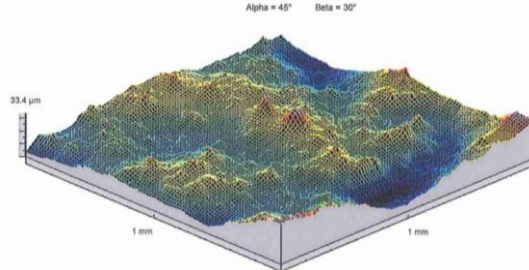
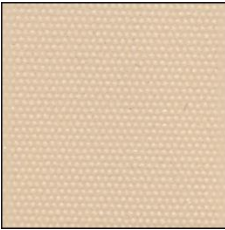
3.28 Gres vidriado granilla fina semiabierta

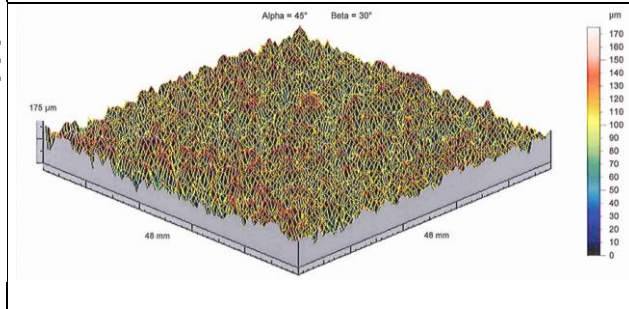
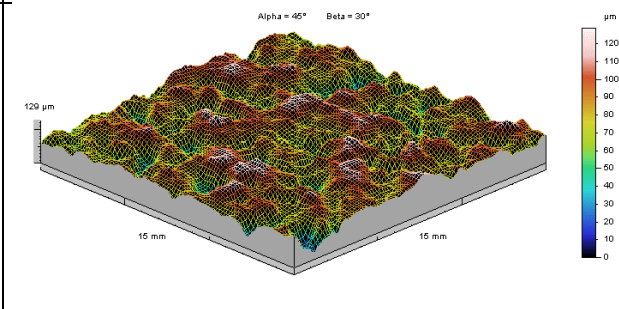
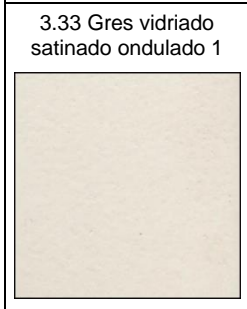
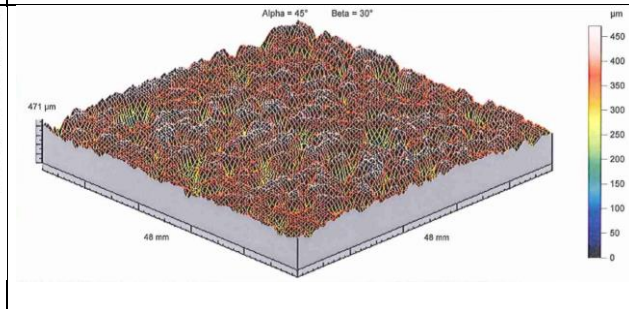
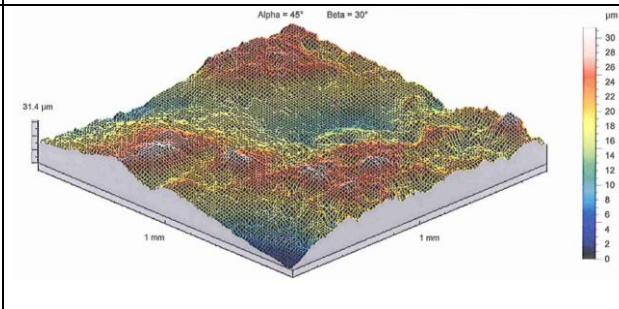
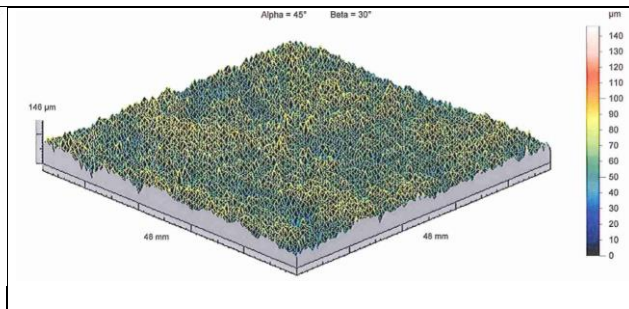
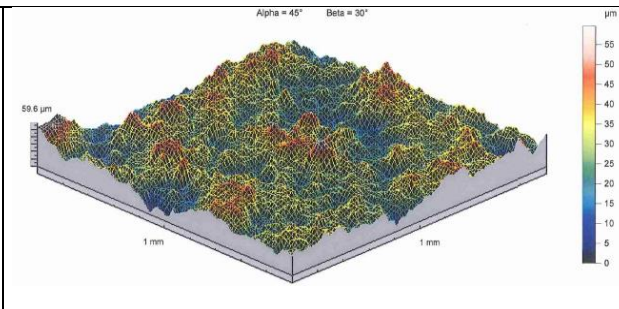


3.29 Gres vidriado granilla fina tupida

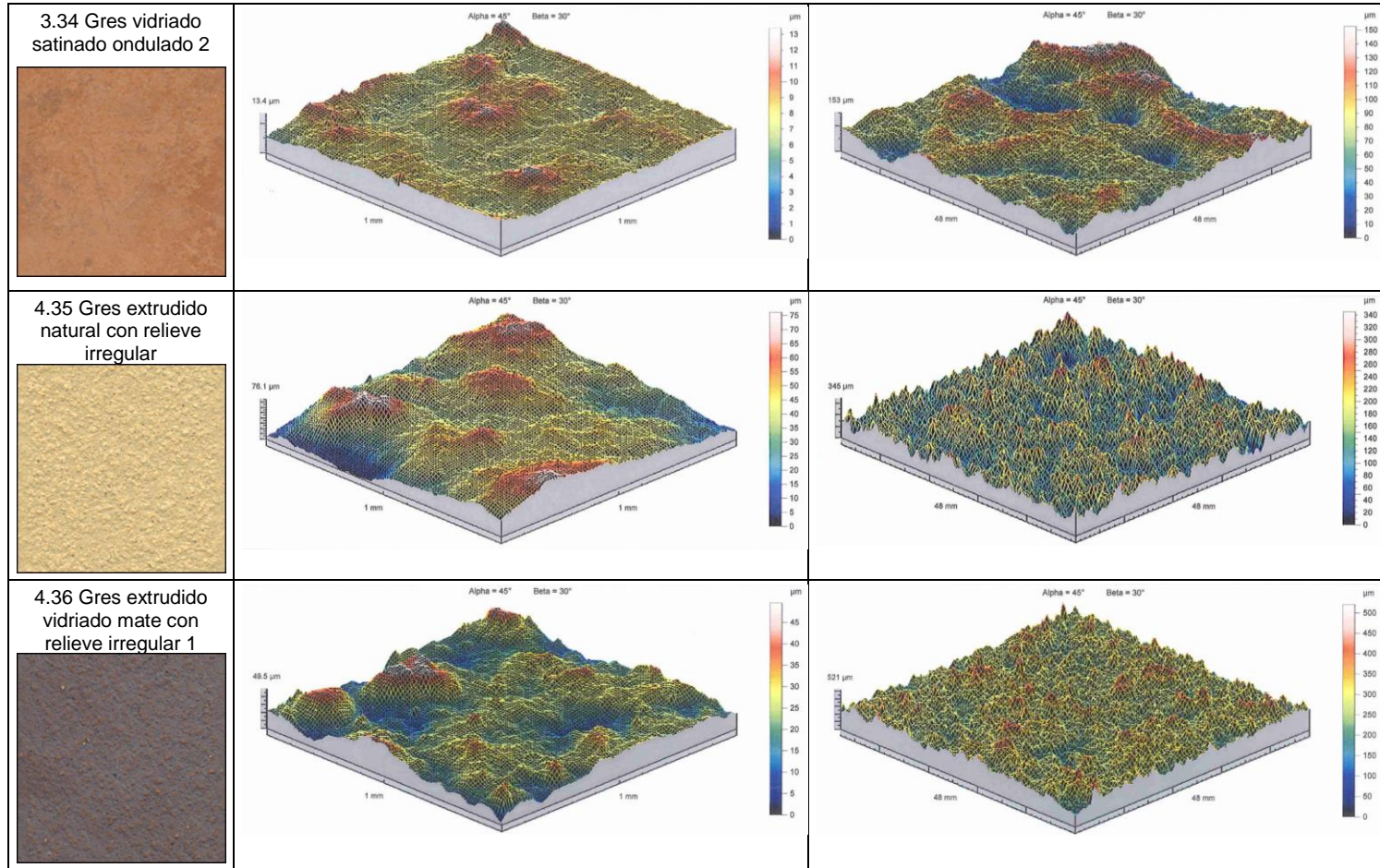




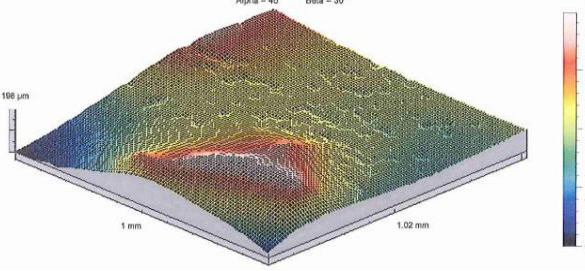
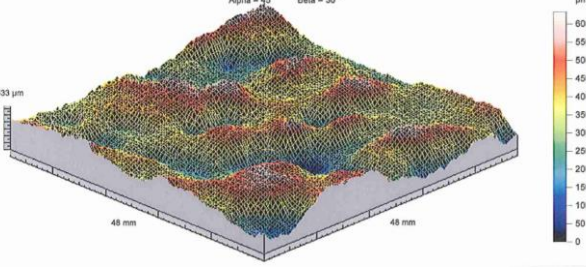

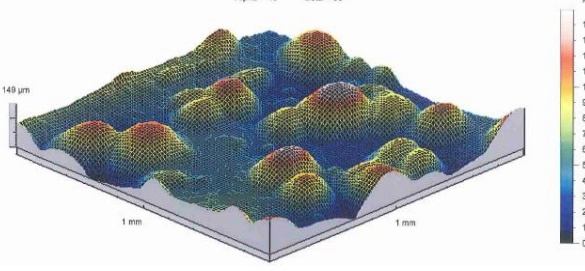
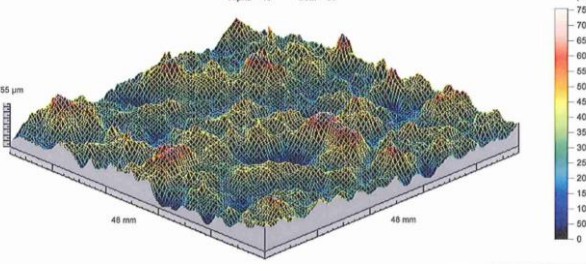
3.30 Gres vidriado granilla suave



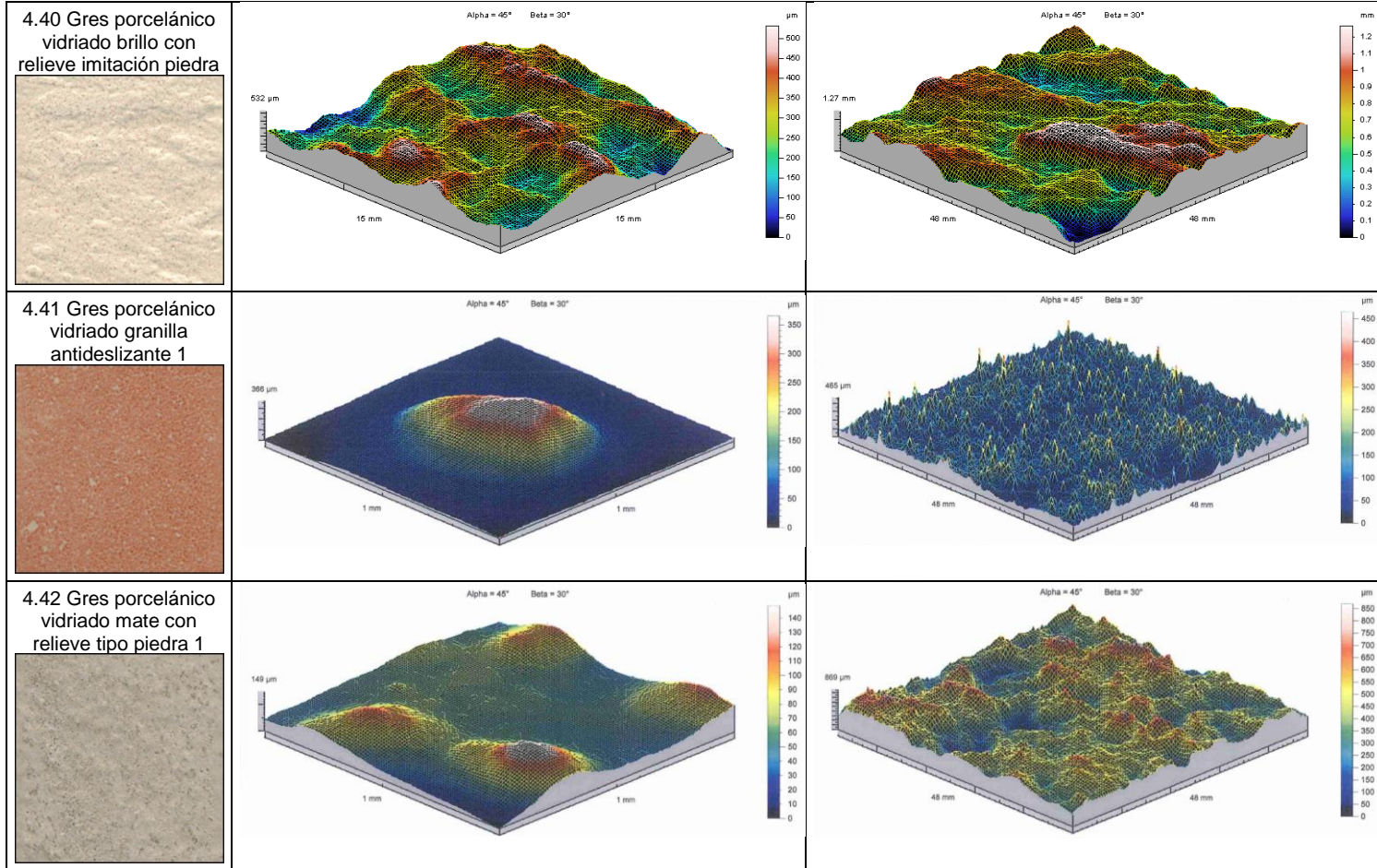




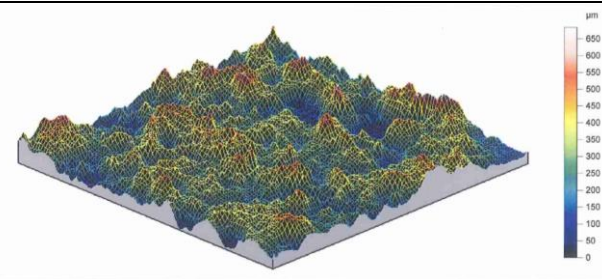
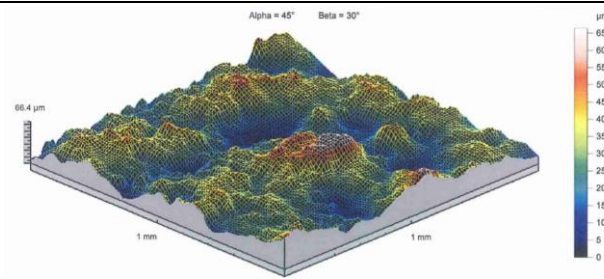


<p>4.37 Gres extrudido vidriado mate con relieve irregular 2</p> 	<p>No disponible</p>	<p>No disponible</p>
<p>4.38 Gres porcelánico natural con relieve tipo piedra 1</p> 	<p>Alpha = 45° Beta = 30°</p> 	<p>Alpha = 45° Beta = 30°</p> 
<p>4.39 Gres porcelánico natural con relieve tipo piedra 2</p> 	<p>Alpha = 45° Beta = 30°</p> 	<p>Alpha = 45° Beta = 30°</p> 

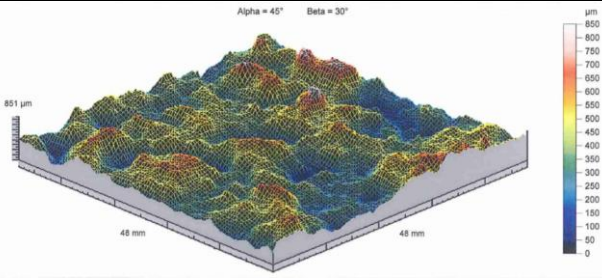
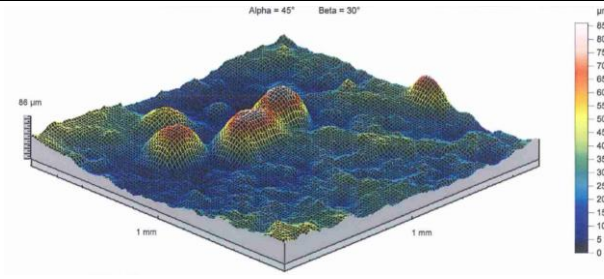




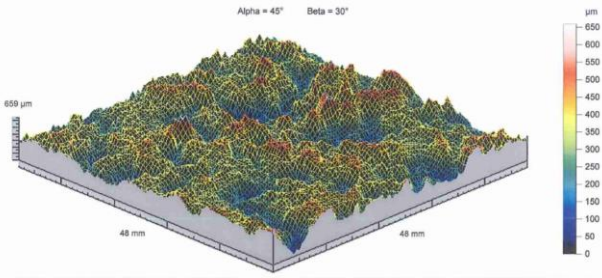
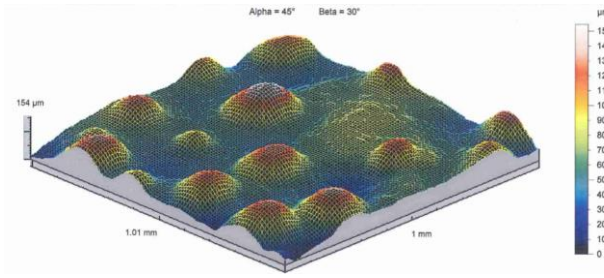
4.43 Gres porcelánico  
vidriado mate con  
relieve tipo piedra 2



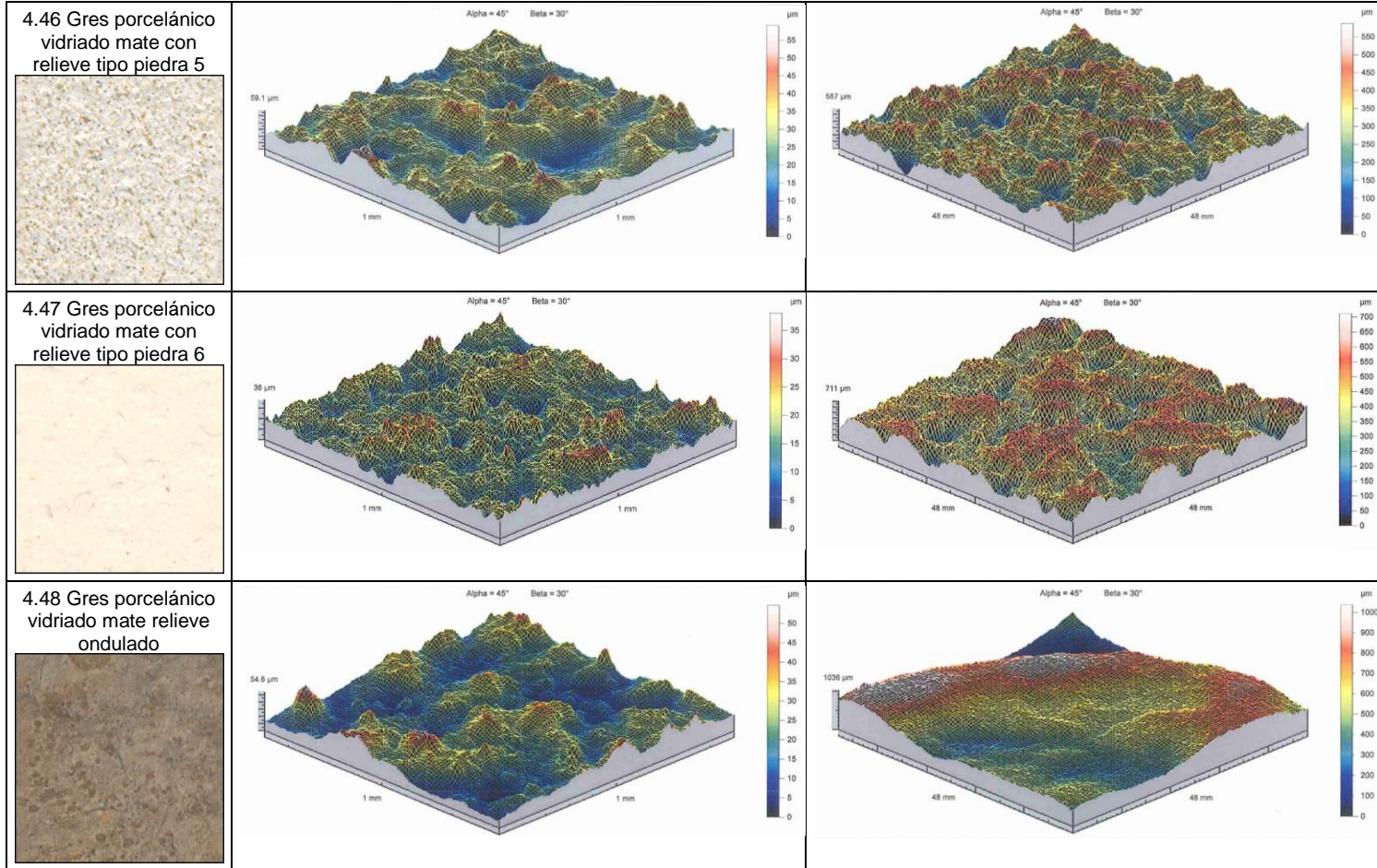
4.44 Gres porcelánico  
vidriado mate con  
relieve tipo piedra 3

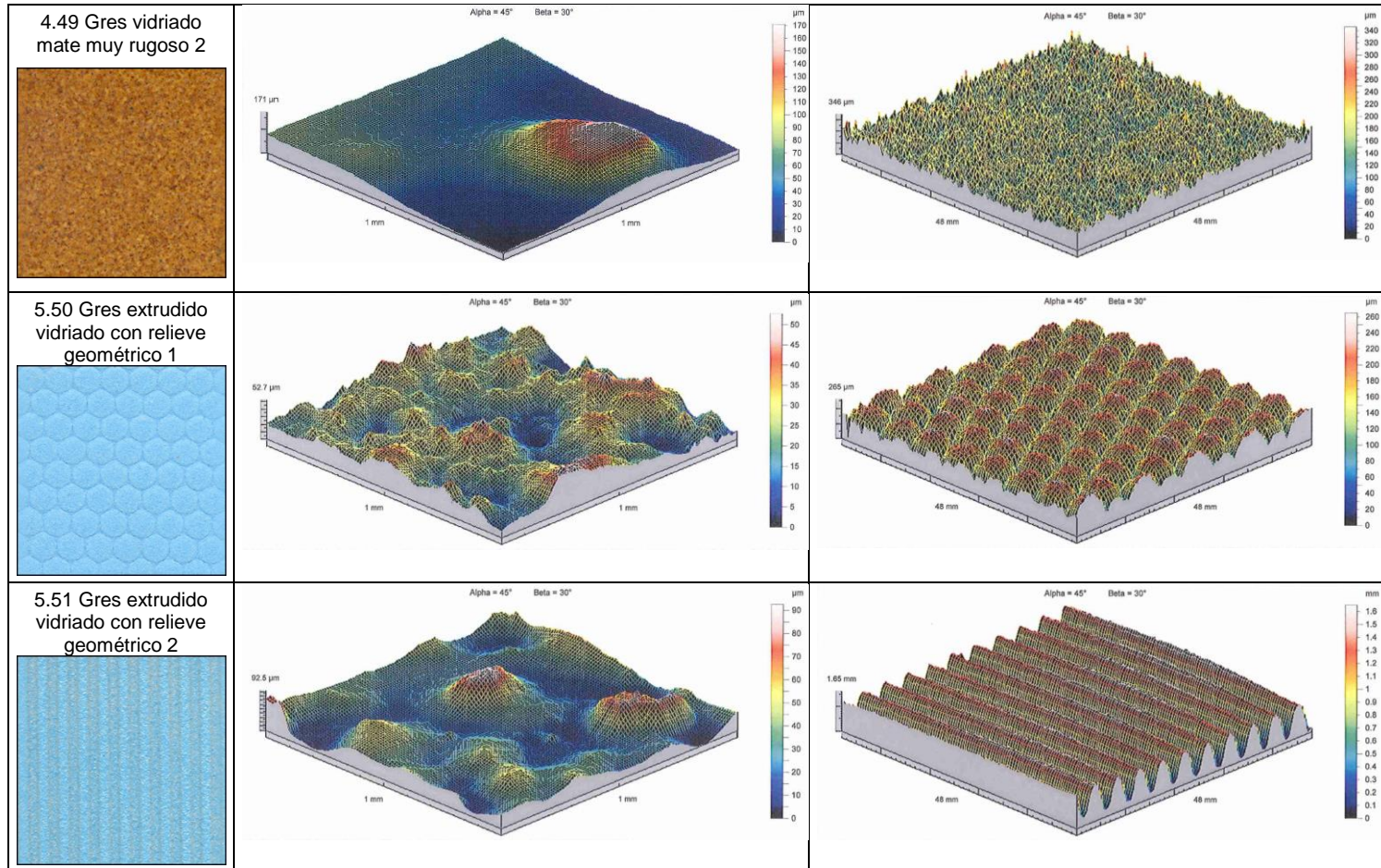


4.45 Gres porcelánico  
vidriado mate con  
relieve tipo piedra 4











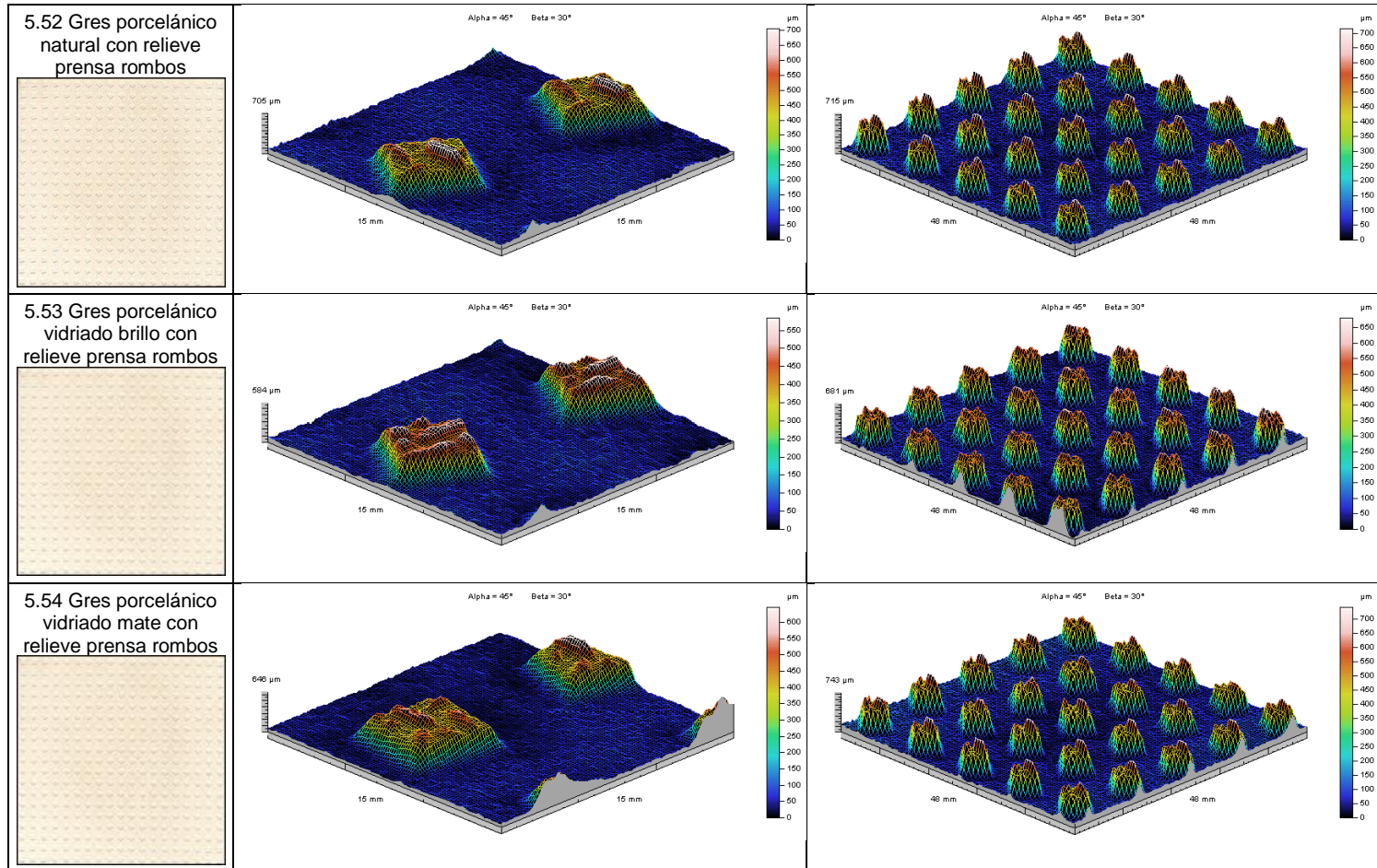


Figura 7.1 Muestras seleccionadas.



**7.1.2 Muestras industriales**



**Tabla 7.1 Piezas cerámicas industriales utilizadas en el estudio comparativo entre [PTV/100]<sub>(96)(A)</sub> y [PTV/100]<sub>(57)(A)</sub>.**

Muestra	Tipo de superficie
PI1	relieve
PI2	relieve
PI3	relieve
PI4	relieve
PI5	relieve
PI6	lisa
PI7	lisa
PI8	lisa
PI9	lisa
PI10	lisa
PI11	lisa
PI12	lisa
PI13	relieve
PI14	relieve
PI15	lisa
PI16	relieve
PI17	relieve
PI18	relieve
PI19	relieve
PI20	lisa
PI21	lisa
PI22	lisa
PI23	lisa
PI24	lisa
PI25	lisa

**Tabla 7.2 Piezas cerámicas industriales utilizadas en el estudio comparativo entre [DCOF-BOT]<sub>(95)(A+SLs)</sub> y [PTV/100]<sub>(57)(A)-</sub>**

Muestra	Tipo de superficie
PI26	lisa
PI27	lisa
PI28	lisa
PI29	lisa
PI30	lisa
PI31	lisa
PI32	lisa
PI33	relieve
PI34	lisa
PI35	lisa
PI36	lisa
PI37	lisa
PI38	lisa
PI39	lisa
PI40	lisa
PI41	relieve
PI42	lisa
PI43	lisa
PI44	lisa
PI45	relieve
PI46	lisa
PI47	relieve
PI48	relieve
PI49	lisa
PI50	lisa
PI51	lisa
PI52	lisa
PI53	lisa
PI54	lisa
PI55	lisa
PI56	lisa
PI57	lisa
PI58	lisa
PI59	lisa
PI60	lisa
PI61	lisa

**Tabla 7.3 Piezas cerámicas industriales utilizadas en el estudio comparativo entre [tanα]<sub>(pie descalzo)</sub>(A+SLS) y [PTV/100]<sub>(57)(A)</sub>.**

Muestra	Tipo de superficie
PI62	relieve
PI63	lisa
PI64	relieve
PI65	lisa
PI66	lisa
PI67	lisa
PI68	relieve
PI69	relieve
PI70	lisa
PI71	relieve
PI72	relieve
PI73	lisa
PI74	lisa
PI75	lisa
PI76	lisa
PI77	lisa
PI78	lisa
PI79	lisa
PI80	relieve
PI81	relieve
PI82	lisa
PI83	relieve
PI84	lisa
PI85	lisa
PI86	lisa
PI87	relieve
PI88	lisa
PI89	lisa
PI90	lisa
PI91	lisa
PI92	lisa
PI93	relieve
PI94	relieve
PI95	relieve
PI96	relieve
PI97	relieve
PI98	lisa
PI99	relieve
PI100	relieve
PI101	lisa
PI102	lisa
PI103	lisa
PI104	lisa
PI105	lisa
PI106	lisa
PI107	lisa
PI108	lisa
PI109	lisa
PI110	lisa
PI111	lisa
PI112	relieve





## 7.2 Parámetros de superficie



**7.2.1 Valores parámetros rugosidad y ondulación de las muestras ensayadas**



**Tabla 7.4 Parámetros superficiales de rugosidad.**

Muestra	Ra μm	Rc μm	Rz μm	Rt μm	Rq μm	Rz <sub>ISO</sub> μm	Rsk	Rpm μm	Rp μm	Pt' μm	Wt' μm	D picos	RPc picos/cm	RSm mm/pico
1.1	1,1	-	8,0	8,6	1,3	3,3	-0,49	-	2,5	22	14	25	264	0,045
1.2	0,89	-	7,8	8,8	1,1	2,9	-0,34	-	2,4	20	12	26	287	0,043
1.3	0,45	-	5,5	5,9	0,60	1,6	-3,1	-	0,98	7,6	2,6	38	410	0,030
1.4	0,67	-	5,8	6,2	0,85	2,3	-0,39	-	1,7	15	9,1	29	302	0,038
1.5	0,70	3,2	4,5	4,9	0,89	3,2	0,14	1,6	2,5	15	11	13	185	0,059
2.6	2,3	9,3	14	15	2,9	8,8	0,22	4,9	8,0	29	17	8,0	115	0,095
2.7	1,5	6,5	12	13	2,2	6,4	0,99	4,0	8,1	29	19	7,1	99	0,11
2.8	1,3	4,9	8,9	9,4	1,7	6,4	-0,38	2,2	3,8	15	8,3	16	274	0,039
2.9	2,9	12	22	22	4,0	11	0,49	6,1	12	39	20	10	146	0,075
2.10	1,6	6,8	9,2	10	2,0	6,7	0,38	3,7	5,8	25	16	9,5	135	0,078
2.11	1,1	5,6	8,1	8,7	1,5	5,7	-0,41	2,4	3,6	18	12	14	182	0,057
2.12	2,3	10	15	16	2,9	11	-0,060	5,1	7,6	24	12	13	165	0,063
2.13	2,1	-	16	17	2,6	4,8	0,96	-	5,4	39	25	15	157	0,078
2.14	1,4	5,8	10	11	1,9	5,7	1,1	3,6	7,1	41	31	12	159	0,069
2.15	2,6	11	17	18	3,3	12	0,30	5,9	9,3	42	27	11	151	0,070
2.16	0,58	3,2	6,2	6,5	0,91	3,3	1,5	2,0	4,3	15	9,7	17	227	0,049
2.17	0,63	2,8	4,4	5,0	0,85	2,8	0,59	1,4	2,9	29	22	14	198	0,055
2.18	1,0	-	8,7	9,2	1,3	3,1	0,61	-	2,8	37	30	19	226	0,060
2.19	1,5	5,7	9,1	9,9	1,9	5,3	0,38	3,2	5,8	35	25	7,4	107	0,11
2.20	0,93	4,0	6,4	6,9	1,2	3,8	0,73	2,3	4,3	22	15	9,7	133	0,084
2.21	0,78	3,6	5,7	6,1	1,1	3,5	0,39	1,8	3,6	21	15	14	184	0,059
2.22	0,75	3,2	5,2	5,7	1,0	3,1	-0,57	1,4	2,3	19	14	11	157	0,072
3.23	1,6	6,6	11	12	2,2	6,3	0,88	4,0	7,6	38	27	8,3	128	0,087
3.25	0,83	3,6	5,1	5,8	1,1	3,6	0,25	2,0	3,3	62	53	12	164	0,064
3.26	0,50	1,6	2,7	3,2	0,62	1,4	0,32	0,84	1,8	21	16	14	231	0,054
3.27	0,71	2,8	4,6	5,0	0,93	2,6	0,42	1,6	2,9	30	24	9,3	136	0,082

Tabla 7.4 Cont. Parámetros superficiales de rugosidad

Muestra	Ra μm	Rc μm	Rz μm	Rt μm	Rq μm	Rz <sub>ISO</sub> μm	Rsk	Rpm μm	Rp μm	Pt' μm	Wt' μm	D picos	RPc picos/cm	RSm mm/pico
3.28	0,50	-	5,1	5,5	0,61	1,5	0,77	-	1,3	64	60	20	289	0,065
3.29	0,42	-	2,9	3,2	0,51	1,3	-0,072	-	0,89	73	66	26	308	0,045
3.30	0,84	3,4	5,6	6,0	1,1	3,1	0,97	2,3	4,2	41	31	7,1	109	0,10
3.31	2,5	11	16	17	3,2	10	0,38	5,7	9,3	31	18	8,0	115	0,094
3.32	0,89	4,2	6,5	7,0	1,2	4,3	-0,52	1,8	2,9	30	23	15	199	0,053
3.33	0,33	-	2,7	2,9	0,42	1,2	-0,75	-	0,81	28	24	32	344	0,035
3.34	0,30	1,8	3,3	3,5	0,44	1,9	-0,088	0,81	1,5	7,1	4,2	24	318	0,035
4.35	2,1	8,6	12	13	2,7	8,1	0,13	4,5	7,1	73	54	10	144	0,075
4.36	1,9	7,9	11	12	2,4	7,7	0,20	3,9	6,2	40	27	10	144	0,074
4.38	3,0	13	19	20	3,9	12	-0,62	5,6	8,0	47	28	9,6	132	0,081
4.39	1,6	6,4	9,3	10	2,1	5,9	0,33	3,3	5,8	58	48	8,9	125	0,089
4.40	0,85	-	7,0	7,5	1,1	2,2	2,2	-	2,3	90	82	9,8	142	0,12
4.41	1,8	5,7	11	13	2,5	4,7	0,47	2,8	7,7	77	68	11	183	0,074
4.42	1,9	6,5	10	12	2,5	5,5	0,71	3,1	6,7	78	69	7,7	108	0,12
4.43	3,1	13	17	19	3,9	12	0,025	6,6	9,5	68	53	8,5	117	0,091
4.44	3,1	12	17	18	3,8	11	0,11	6,0	9,0	63	45	8,0	112	0,10
4.45	4,8	15	26	28	6,2	12	-0,0011	7,1	13	97	70	4,9	82	0,14
4.46	2,4	9,8	15	16	3,1	9,5	0,69	5,7	9,7	48	34	6,5	93	0,12
4.47	3,9	16	22	24	4,9	15	0,043	7,6	12	62	39	8,1	115	0,094
4.48	2,4	10	15	16	3,1	9,9	0,59	5,5	9,4	33	20	9,6	134	0,080
4.49	5,3	18	26	27	6,5	15	0,29	8,9	14	97	72	4,5	69	0,16
5.50	2,6	11	16	17	3,3	9,8	0,30	5,7	9,3	39	25	7,4	107	0,10
5.51	2,5	8,5	14	16	3,3	7,1	0,18	4,7	8,6	72	57	4,7	77	0,15
5.52	2,2	-	15	15	2,7	5,7	-0,76	-	4,4	45	33	15	157	0,073
5.53	0,80	-	7,3	7,5	1,0	2,0	2,5	-	2,5	34	27	11	149	0,11
5.54	2,5	-	17	18	3,0	5,9	0,17	-	6,2	41	27	19	195	0,059

**Tabla 7.4 Cont. Parámetros superficiales de rugosidad**

Muestra	$\Delta a$ rad	$\Delta q$ rad	$\lambda a$ $\mu m$	$\lambda q$ $\mu m$	$Im_0$ $\mu m$	$I_0$	$Rpk^*$	$Rpk$	$Rk$	$Rvk^*$	$Rvk$	$Mr_1$ %	$Mr_2$ %	$A_1$	$A_2$
1.1	0,17	0,23	39	37	-	1,027	1,7	1,2	3,3	4,3	2,4	8,8	85	55	181
1.2	0,16	0,21	35	34	-	1,025	2,1	1,2	2,9	4,5	1,9	9,6	86	60	129
1.3	0,11	0,15	26	24	-	1,013	0,58	0,36	1,1	4,3	1,5	7,5	81	15	141
1.4	0,13	0,17	33	31	-	1,016	1,5	0,91	2,1	3,2	1,4	10	86	47	94
1.5	0,077	0,10	57	54	0,838	1,006	1,3	0,99	2,4	1,5	1,0	10	88	53	71
2.6	0,16	0,23	92	82	0,856	1,027	4,3	3,4	7,4	4,5	3,9	11	87	195	294
2.7	0,11	0,17	92	81	0,847	1,017	5,5	4,0	4,5	3,5	3,0	13	89	278	183
2.8	0,21	0,28	49	46	0,847	1,036	1,5	1,0	3,8	3,3	2,1	8,3	84	46	172
2.9	0,21	0,28	86	87	0,869	1,043	7,9	6,9	7,5	8,4	6,7	12	84	439	611
2.10	0,13	0,18	75	69	0,848	1,018	3,3	2,4	5,5	2,3	1,8	11	90	141	106
2.11	0,13	0,18	55	51	0,847	1,017	1,7	1,4	3,4	4,0	2,5	8,6	86	63	182
2.12	0,23	0,32	62	57	0,872	1,048	3,4	2,8	7,3	5,8	4,0	9,4	87	136	271
2.13	0,20	0,27	65	59	-	1,040	6,5	4,0	7,0	4,4	3,4	12	88	232	195
2.14	0,12	0,19	70	62	0,849	1,018	5,1	3,9	3,8	3,1	2,5	14	86	284	187
2.15	0,23	0,33	69	63	0,877	1,053	5,2	3,9	8,1	5,6	4,1	13	87	258	278
2.16	0,073	0,13	48	43	0,841	1,009	3,2	2,2	1,5	1,9	1,3	11	85	119	110
2.17	0,072	0,10	55	52	0,838	1,006	1,9	1,4	2,1	1,6	1,1	13	88	98	72
2.18	0,14	0,19	44	42	-	1,020	3,6	2,1	3,4	3,0	1,9	12	88	130	121
2.19	0,096	0,15	97	81	0,844	1,013	3,2	2,5	5,1	2,8	2,4	10	86	138	194
2.20	0,076	0,11	77	69	0,839	1,007	2,9	1,9	3,0	1,5	1,3	13	89	128	82
2.21	0,082	0,11	60	57	0,839	1,007	2,3	1,6	2,4	1,8	1,3	11	86	87	96
2.22	0,063	0,095	76	68	0,838	1,005	1,1	0,88	2,2	3,0	2,2	9,8	83	49	188
3.23	0,11	0,17	90	80	0,847	1,016	5,1	3,7	4,7	2,6	2,5	13	87	251	193
3.25	0,082	0,11	63	60	0,839	1,007	1,7	1,4	2,9	1,7	1,2	9,3	89	67	75
3.26	0,056	0,071	57	56	0,836	1,004	0,86	0,87	1,8	0,95	0,90	9,6	85	50	72
3.27	0,054	0,080	83	73	0,836	1,004	1,7	1,4	2,3	1,4	1,2	11	87	92	88

Tabla 7.4 Cont. Parámetros superficiales de rugosidad.

Muestra	$\Delta a$ rad	$\Delta q$ rad	$\lambda a$ $\mu m$	$\lambda q$ $\mu m$	$Im_0$ $\mu m$	$I_0$	Rpk*	Rpk	Rk	Rvk*	Rvk	Mr <sub>1</sub> %	Mr <sub>2</sub> %	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
3.28	0,075	0,099	40	37	-	1,006	2,1	0,99	1,5	2,4	1,3	11	81	56	120
3.29	0,075	0,098	35	32	-	1,006	0,84	0,52	1,4	1,5	0,88	8,6	83	24	73
3.30	0,055	0,081	96	89	0,837	1,004	2,8	2,1	2,6	1,1	1,0	14	89	151	68
3.31	0,18	0,25	89	80	0,860	1,033	5,2	3,9	8,1	4,4	3,6	12	88	250	248
3.32	0,10	0,14	56	52	0,843	1,011	1,3	1,1	2,7	3,6	2,2	8,5	84	51	190
3.33	0,072	0,10	29	26	-	1,006	0,74	0,36	1,00	1,4	0,80	8,7	84	16	65
3.34	0,062	0,11	35	32	0,840	1,009	0,87	0,67	0,91	1,8	0,86	9,7	87	36	56
4.35	0,17	0,23	76	72	0,856	1,028	3,7	3,2	6,7	4,5	3,6	11	86	189	278
4.36	0,15	0,21	76	72	0,853	1,024	3,3	2,8	6,2	4,0	3,2	11	87	174	226
4.38	0,24	0,32	80	77	0,875	1,050	2,9	2,5	9,0	11	7,8	7,6	82	108	742
4.39	0,11	0,15	89	81	0,845	1,014	3,2	2,7	5,6	2,7	2,1	12	88	164	144
4.40	0,084	0,11	64	59	-	1,007	4,2	2,4	2,7	1,4	1,1	17	89	191	83
4.41	0,12	0,16	85	84	0,846	1,015	5,3	4,6	5,6	3,9	3,3	14	87	385	239
4.42	0,11	0,15	109	104	0,844	1,013	4,6	5,0	6,1	3,2	2,6	15	87	419	185
4.43	0,22	0,29	90	83	0,870	1,044	4,1	3,5	10	5,8	5,0	9,4	86	178	383
4.44	0,19	0,26	98	92	0,862	1,034	3,7	3,3	10	5,7	4,8	11	88	208	317
4.45	0,18	0,25	157	152	0,865	1,038	6,3	6,8	14	12	10	14	82	549	1.037
4.46	0,15	0,22	103	89	0,856	1,027	5,6	4,3	8,0	3,2	2,8	13	88	288	200
4.47	0,26	0,36	93	85	0,884	1,061	5,6	4,6	13	7,7	5,9	11	86	271	432
4.48	0,19	0,26	78	73	0,862	1,035	5,5	4,4	7,6	3,7	3,0	12	88	260	194
4.49	0,21	0,28	156	144	0,870	1,045	5,6	5,9	19	7,1	6,5	13	89	466	412
5.50	0,17	0,25	95	85	0,860	1,032	5,0	3,9	8,6	5,1	4,0	12	89	257	254
5.51	0,12	0,17	139	125	0,848	1,017	4,2	3,7	8,7	5,3	4,6	10	84	221	430
5.52	0,24	0,31	59	56	-	1,047	2,3	1,8	7,2	8,1	5,3	6,2	82	59	495
5.53	0,082	0,11	60	54	-	1,008	4,2	2,3	2,2	1,3	1,2	16	91	197	70
5.54	0,29	0,39	53	49	-	1,071	4,5	3,2	8,1	6,2	4,5	11	88	188	270



**Tabla 7.5 Parámetros superficiales de ondulación.**

Muestra	Sa μm	Sq μm	Sp μm	Sv μm	St μm	Ssk	Sku	Sz μm	SPc picos/mm <sup>2</sup>	Sds picos/mm <sup>2</sup>	Str	Sal mm	Std °
1.1	10	13	43	73	115	-0,65	3,4	81	0,0091	10,0	0,38	9,1	27
1.2	6,0	7,5	35	37	72	-0,25	2,9	58	0,0092	5,4	0,39	9,7	62
1.3	7,3	9,0	13	48	62	-1,0	3,4	38	0,00087	5,9	0,36	9,0	45
1.4	6,8	8,8	36	54	89	-0,41	4,0	60	0,0074	9,2	0,85	7,9	72
1.5	4,6	5,9	36	43	79	-0,21	4,0	61	0,10	5,6	0,75	0,51	49
2.6	6,7	8,4	51	52	103	-0,058	3,3	94	0,40	9,2	0,79	1,6	6,5
2.7	7,1	8,9	69	43	112	0,18	3,0	89	0,39	7,1	0,68	0,42	4,0
2.8	3,3	4,2	34	79	113	-0,024	5,1	84	0,11	7,3	0,74	0,35	28
2.9	4,3	6,5	110	24	134	2,7	21	126	0,62	10	0,81	0,47	22
2.10	4,3	5,5	55	59	114	0,075	3,6	91	0,27	8,4	0,68	0,49	4,0
2.11	7,7	9,8	45	62	108	-0,47	3,5	98	0,11	5,8	0,76	0,44	27
2.12	8,8	11	50	45	95	0,035	3,1	88	0,048	11	0,81	4,0	3,0
2.13	16	21	85	121	206	-1,1	5,0	103	0,19	12	0,28	6,6	45
2.14	9,8	12	70	59	129	0,082	3,2	116	0,17	4,7	0,48	0,86	28
2.15	10	13	75	60	135	0,26	3,3	124	0,42	7,7	0,86	0,84	36
2.16	6,3	7,8	40	26	66	0,22	2,8	60	0,068	2,8	0,90	0,82	28
2.17	7,3	9,3	88	40	128	0,051	3,7	120	0,22	3,7	0,75	0,39	19
2.18	17	21	92	54	145	0,73	3,2	90	0,17	7,2	0,59	8,2	45
2.19	7,3	9,2	47	72	120	-0,037	3,4	80	0,15	4,3	0,76	0,51	8,0
2.20	5,8	7,3	36	38	73	-0,19	3,0	66	0,092	6,6	0,68	2,4	18
2.21	5,5	6,9	43	52	95	-0,070	3,2	86	0,14	5,1	0,85	0,51	27
2.22	4,5	5,7	32	30	62	0,47	3,3	55	0,15	4,8	0,76	0,49	36
3.23	18	23	137	116	252	-0,25	3,6	223	0,27	6,2	0,19	1,9	45
3.25	115	143	584	348	932	0,29	3,1	661	0,0069	3,1	0,24	6,4	27
3.26	8,8	12	129	61	190	1,3	6,8	167	0,57	3,3	0,68	0,27	22
3.27	17	24	129	182	312	-1,6	9,3	253	0,093	3,2	0,75	1,7	45

Tabla 7.5 Cont. Parámetros superficiales de ondulación.

Muestra	Sa μm	Sq μm	Sp μm	Sv μm	St μm	Ssk	Sku	Sz μm	SPc picos/mm <sup>2</sup>	Sds picos/mm <sup>2</sup>	Str	Sal mm	Std °
3.28	28	37	160	116	276	0,45	3,4	243	0,19	1,5	0,25	4,7	45
3.29	16	20	94	70	164	0,68	3,5	150	0,36	1,3	0,79	0,38	45
3.30	19	23	78	65	143	0,48	2,3	131	0,44	1,9	0,81	0,43	64
3.31	8,2	11	77	79	156	-0,39	4,5	129	0,36	10,0	0,70	2,5	28
3.32	42	57	118	354	471	-1,5	6,4	445	0,0091	2,6	0,79	1,4	45
3.33	28	34	101	146	247	-0,25	2,5	196	0,021	2,2	0,38	9,5	27
3.34	18	23	71	81	153	-0,16	2,9	132	0,0061	2,2	0,56	3,6	27
4.35	34	42	205	140	345	0,40	3,2	321	0,12	4,0	0,90	1,8	45
4.36	37	47	241	280	521	0,34	3,2	388	0,18	4,6	0,84	1,8	45
4.38	79	102	379	526	904	0,28	3,5	590	0,061	6,5	0,33	3,7	23
4.39	78	99	393	301	693	0,23	3,2	627	0,040	3,5	0,78	2,8	45
4.40	165	217	552	965	1.516	-0,19	4,3	702	0,015	2,7	0,40	5,7	90
4.41	27	38	350	115	465	1,4	6,9	425	0,28	2,2	0,70	1,7	27
4.42	92	116	434	434	869	-0,14	3,2	749	0,091	2,9	0,81	4,4	34
4.43	83	103	397	287	684	0,14	2,8	621	0,036	3,6	0,60	2,7	45
4.44	102	126	459	392	851	0,19	2,8	750	0,044	3,9	0,85	3,8	45
4.45	71	88	345	314	659	-0,099	2,8	596	0,42	5,4	0,72	2,4	45
4.46	63	80	273	314	587	-0,20	3,1	540	0,033	4,0	0,71	2,6	64
4.47	88	106	272	432	704	-0,47	2,7	572	0,038	6,0	0,81	2,8	54
4.48	193	233	460	576	1.036	-0,38	2,4	756	0,019	6,6	0,20	6,0	45
4.49	22	27	145	133	278	0,19	3,1	254	0,96	7,4	0,83	0,52	27
5.50	29	36	103	162	265	-0,42	2,6	253	0,10	7,1	0,90	1,5	64
5.51	405	443	801	848	1.649	-0,060	1,5	1.599	0,0052	1,2	0,054	0,99	90
5.52	113	150	570	145	715	1,8	4,9	707	0,011	6,7	0,91	2,4	45
5.53	116	154	542	139	681	1,7	4,5	661	0,011	4,5	0,93	2,4	45
5.54	113	150	591	152	743	1,7	4,7	721	0,011	6,8	0,92	2,5	45

**Tabla 7.5 Cont. Parámetros superficiales de ondulación.**

Muestra	Sfd	SΔq μm/μm	Ssc 1/μm	Sdr %	Sk μm	Spk μm	Svk μm	Sr <sub>1</sub> %	Sr <sub>2</sub> %	Sbi	Sci	Svi
1.1	2,5	0,063	0,0016	0,20	8,5	4,4	4,8	11	89	0,53	1,3	0,16
1.2	2,4	0,029	0,00063	0,043	7,5	3,3	4,0	10	89	0,32	1,5	0,12
1.3	2,3	0,017	0,00033	0,015	0,71	0,54	0,94	17	79	3,3	1,0	0,17
1.4	2,5	0,035	0,00095	0,060	4,5	2,4	2,2	11	88	0,39	1,4	0,13
1.5	2,5	0,048	0,0013	0,11	13	5,5	5,6	11	89	0,22	1,5	0,12
2.6	2,6	0,11	0,0030	0,59	17	6,7	7,6	10	89	0,23	1,5	0,12
2.7	2,6	0,10	0,0032	0,51	21	8,6	6,8	11	91	0,17	1,6	0,10
2.8	2,5	0,056	0,0015	0,16	9,4	4,3	4,0	11	89	0,16	1,6	0,11
2.9	2,5	0,12	0,0033	0,66	9,3	12	3,5	14	89	0,065	1,4	0,076
2.10	2,6	0,076	0,0022	0,29	12	5,6	4,9	11	89	0,12	1,6	0,11
2.11	2,5	0,078	0,0018	0,30	21	6,9	13	8,6	86	0,32	1,4	0,14
2.12	2,5	0,091	0,0026	0,41	12	5,1	5,5	11	88	0,34	1,5	0,11
2.13	2,5	0,12	0,0038	0,67	14	7,7	5,0	11	91	0,37	1,1	0,17
2.14	2,5	0,082	0,0024	0,34	27	11	9,6	10	90	0,25	1,6	0,11
2.15	2,5	0,12	0,0036	0,74	30	15	10	12	91	0,26	1,7	0,10
2.16	2,5	0,037	0,0013	0,069	19	7,2	4,7	10	91	0,30	1,6	0,093
2.17	2,5	0,076	0,0020	0,28	21	9,3	9,3	9,7	89	0,13	1,5	0,12
2.18	2,5	0,083	0,0024	0,34	18	12	3,7	19	94	0,42	1,9	0,068
2.19	2,5	0,073	0,0016	0,27	21	7,9	7,5	10	91	0,29	1,6	0,11
2.20	2,5	0,061	0,0018	0,18	15	5,1	6,5	8,9	88	0,31	1,5	0,12
2.21	2,5	0,058	0,0015	0,17	16	6,5	6,8	10	89	0,22	1,5	0,12
2.22	2,5	0,049	0,0012	0,12	12	7,0	3,3	14	92	0,26	1,7	0,092
3.23	2,4	0,12	0,0036	0,75	38	17	16	11	91	0,23	1,5	0,14
3.25	2,1	0,088	0,0018	0,38	63	41	34	11	90	0,43	1,7	0,095
3.26	2,5	0,11	0,0033	0,55	23	19	5,9	15	93	0,11	1,8	0,075
3.27	2,4	0,092	0,0022	0,42	41	13	30	8,4	87	0,25	1,2	0,17

Tabla 7.5 Cont. Parámetros superficiales de ondulación.

Muestra	Sfd	SΔq μm/μm	Ssc 1/μm	Sdr %	Sk μm	Spk μm	Svk μm	Sr <sub>1</sub> %	Sr <sub>2</sub> %	Sbi	Sci	Svi
3.28	2,5	0,13	0,0017	0,88	54	52	7,4	23	96	0,40	1,8	0,10
3.29	2,5	0,11	0,0015	0,62	45	28	8,9	15	94	0,36	1,8	0,079
3.30	2,6	0,11	0,0018	0,59	32	39	3,1	34	97	0,66	1,8	0,069
3.31	2,5	0,12	0,0036	0,68	19	8,1	10	10	88	0,18	1,4	0,14
3.32	2,3	0,12	0,0019	0,76	87	27	86	6,9	81	1,1	0,98	0,19
3.33	2,3	0,066	0,0011	0,22	40	12	21	7,9	88	0,69	1,4	0,11
3.34	2,2	0,030	0,00067	0,045	21	6,3	9,1	8,3	87	0,65	1,5	0,13
4.35	2,4	0,15	0,0033	1,1	84	41	20	13	93	0,33	1,7	0,093
4.36	2,4	0,18	0,0044	1,6	88	45	22	13	93	0,29	1,7	0,098
4.38	2,3	0,20	0,0039	1,9	74	31	31	11	89	0,54	1,7	0,11
4.39	2,3	0,16	0,0034	1,3	127	59	45	12	91	0,44	1,6	0,10
4.40	2,1	0,14	0,0028	1,0	142	52	67	9,8	90	1,3	1,7	0,13
4.41	2,3	0,17	0,0036	1,5	41	68	9,8	24	94	0,14	1,9	0,078
4.42	2,2	0,16	0,0042	1,3	125	64	44	12	91	0,48	1,5	0,12
4.43	2,3	0,19	0,0039	1,7	156	73	53	11	92	0,46	1,6	0,11
4.44	2,2	0,17	0,0045	1,4	141	60	47	11	91	0,52	1,6	0,095
4.45	2,4	0,30	0,0091	4,4	140	56	45	11	91	0,44	1,5	0,12
4.46	2,3	0,15	0,0036	1,1	121	53	47	12	91	0,55	1,5	0,12
4.47	2,3	0,21	0,0052	2,1	154	41	54	6,3	90	0,93	1,3	0,12
4.48	2,2	0,15	0,0042	1,1	58	33	27	11	90	1,9	1,3	0,13
4.49	2,6	0,30	0,0085	4,3	65	27	22	11	91	0,28	1,6	0,10
5.50	2,4	0,15	0,0037	1,2	66	9,5	42	4,4	82	0,69	1,3	0,13
5.51	2,4	0,68	0,0081	19	768	25	407	0,72	62	2,2	1,3	0,040
5.52	2,3	0,27	0,0038	3,4	83	281	44	14	82	0,63	2,2	0,013
5.53	2,2	0,23	0,0029	2,6	80	302	49	14	80	0,83	2,3	0,014
5.54	2,2	0,24	0,0037	2,9	77	284	48	14	81	0,59	2,2	0,015

**7.2.2 Correlaciones PTV/100 con parámetros de superficie**



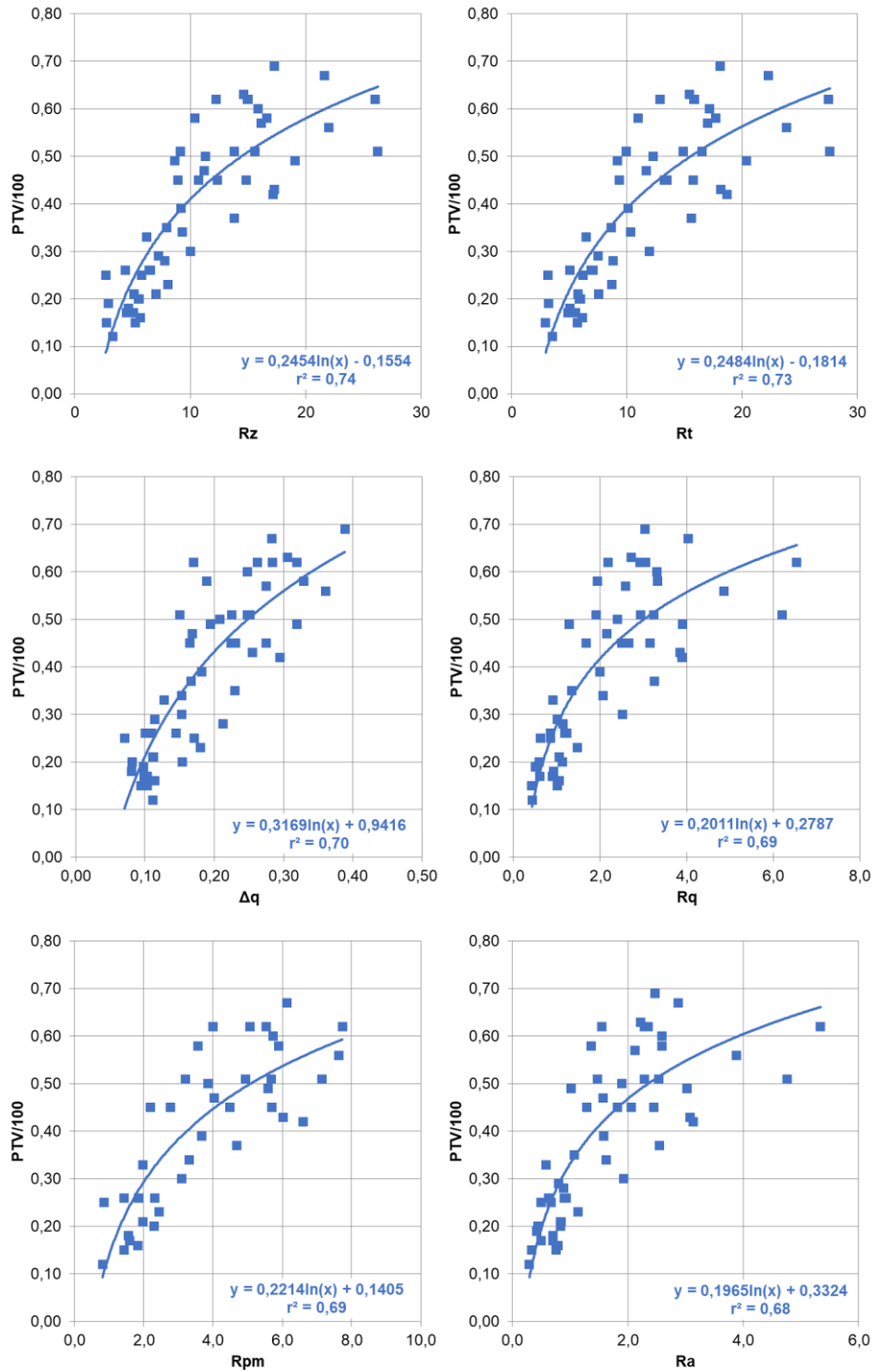


Figura 7.2 Ensayo con las 52 muestras originales. Parámetros rugosidad.

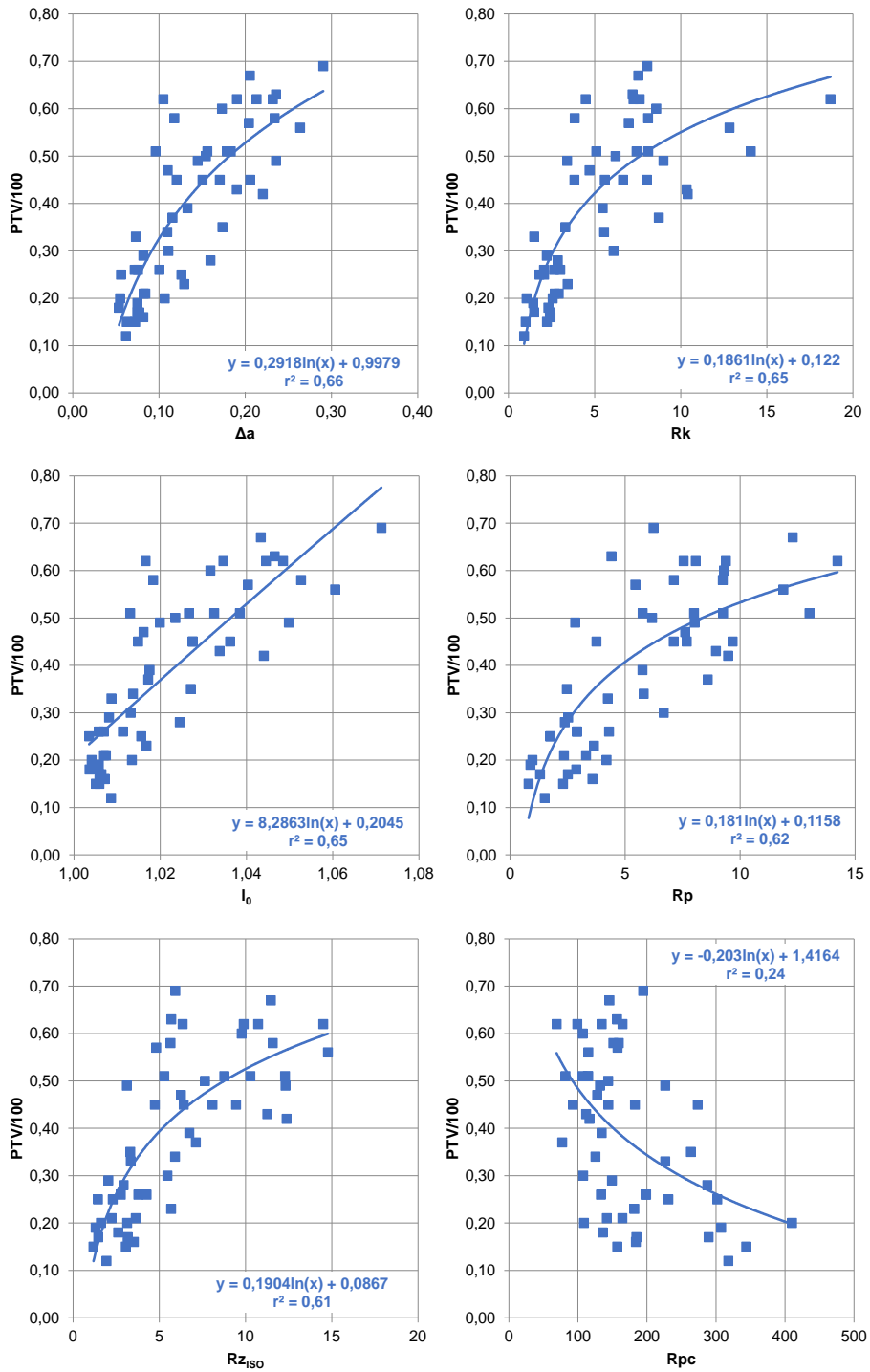


Figura 7.2 cont. Ensayo con las 52 muestras originales. Parámetros rugosidad.



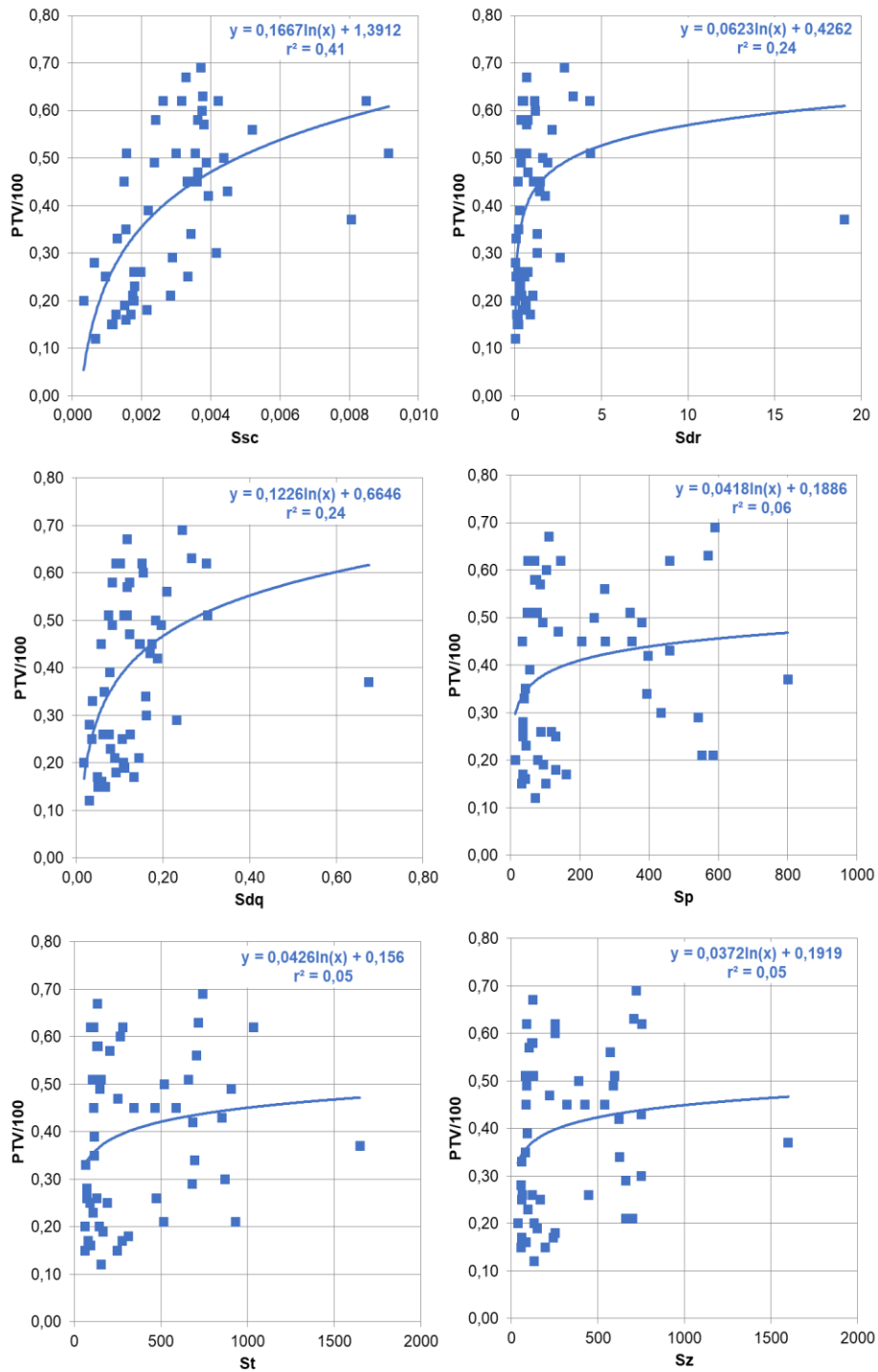


Figura 7.3 Ensayo con las 52 muestras originales. Parámetros ondulación.

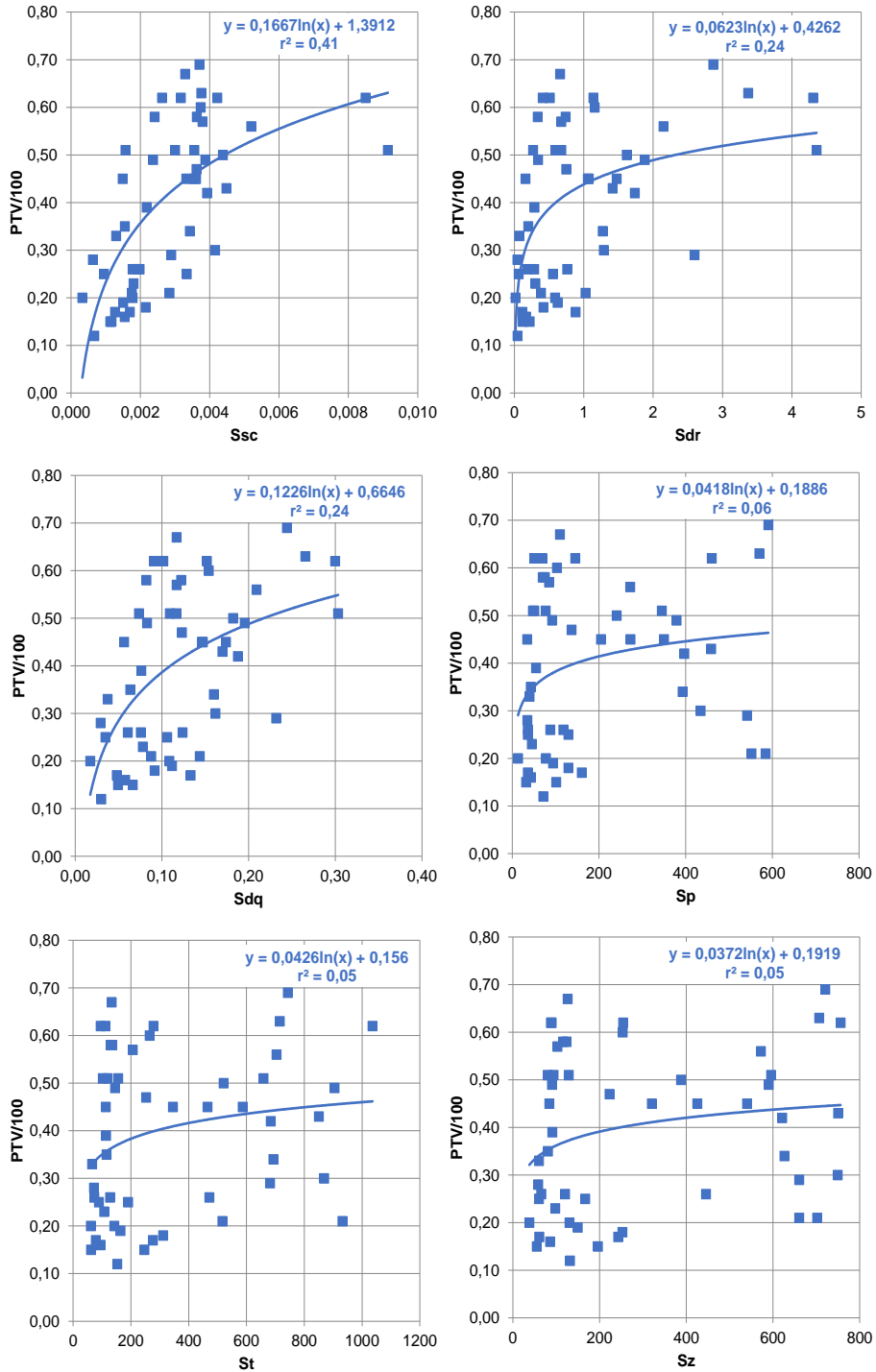


Figura 7.3 cont. Ensayo con las 52 muestras originales. Parámetros ondulación.

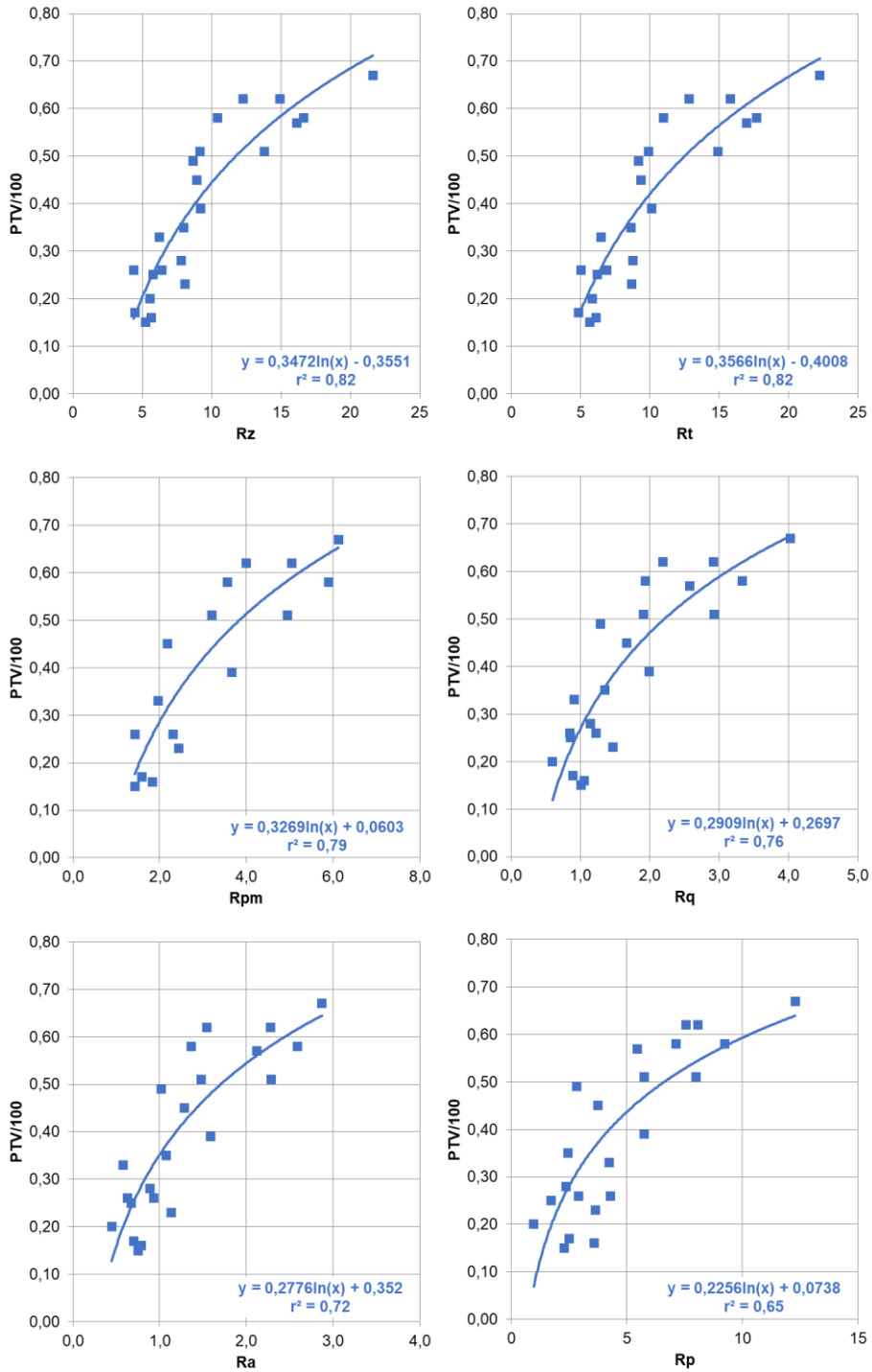


Figura 7.4 Ensayo con las muestras de los grupos 1 y 2. Parámetros rugosidad.

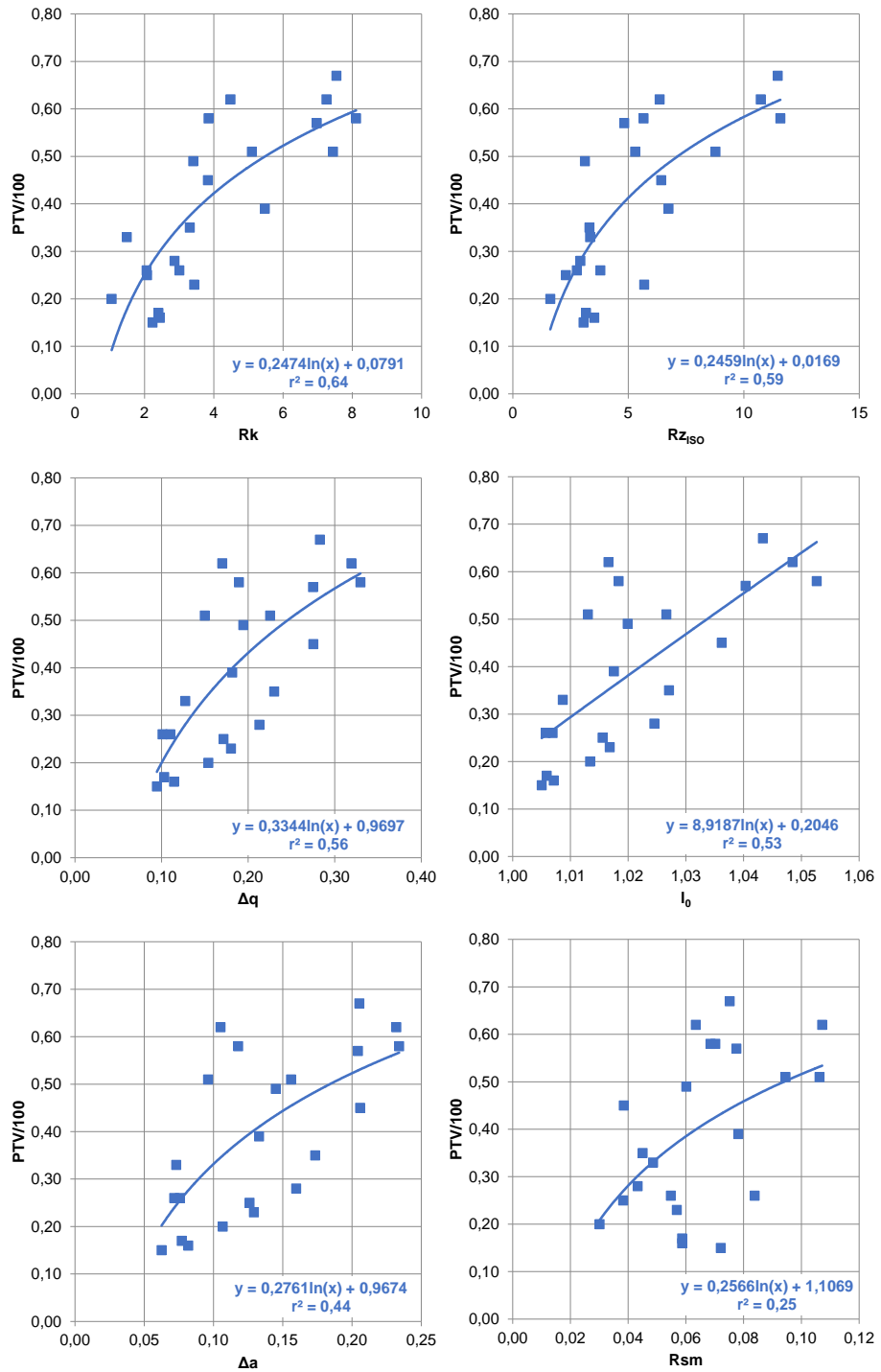


Figura 7.4 cont. Ensayo con las muestras de los grupos 1 y 2. Parámetros rugosidad.

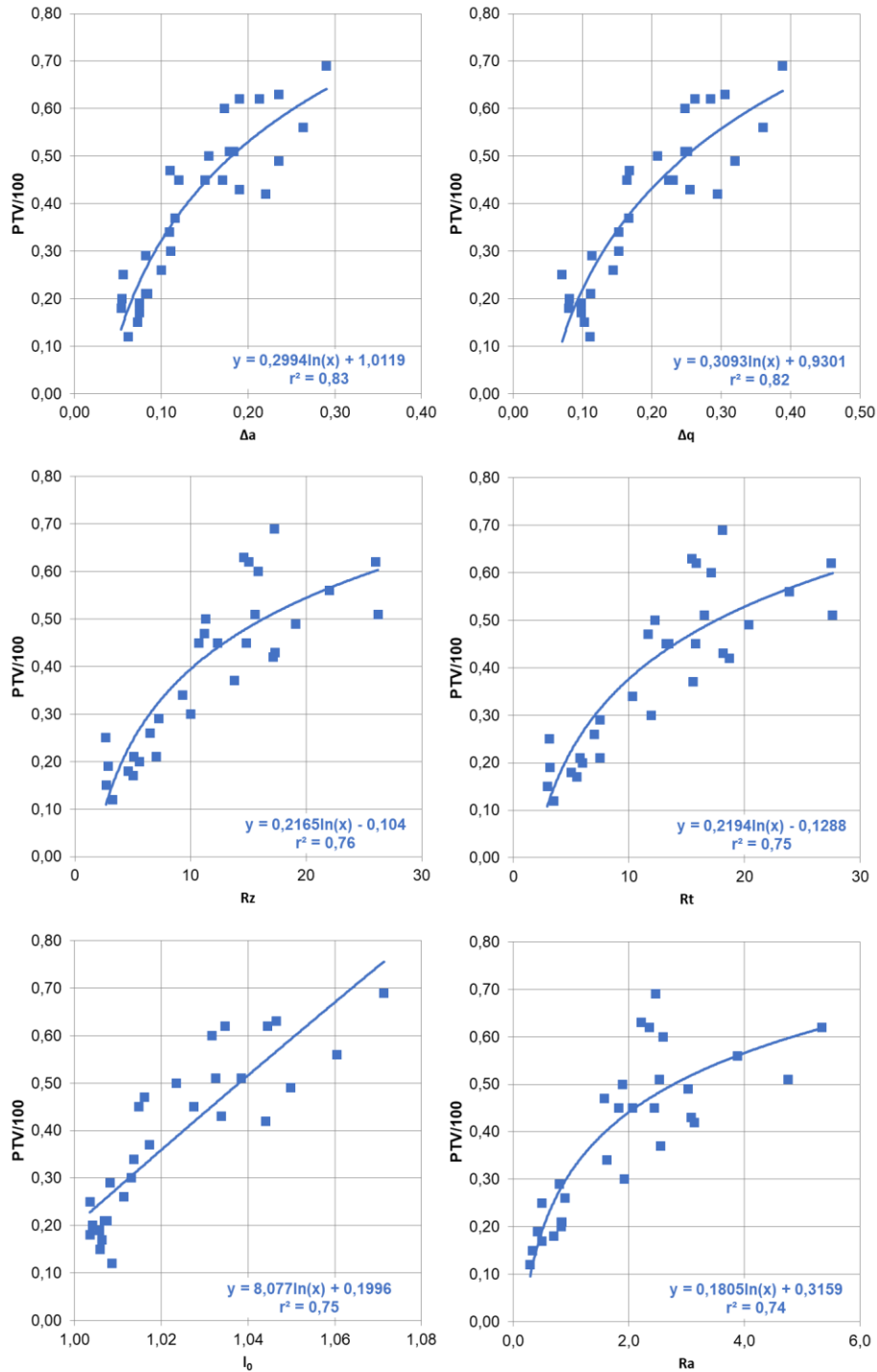


Figura 7.5 Ensayo con las muestras de los grupos 3 a 5. Parámetros rugosidad.

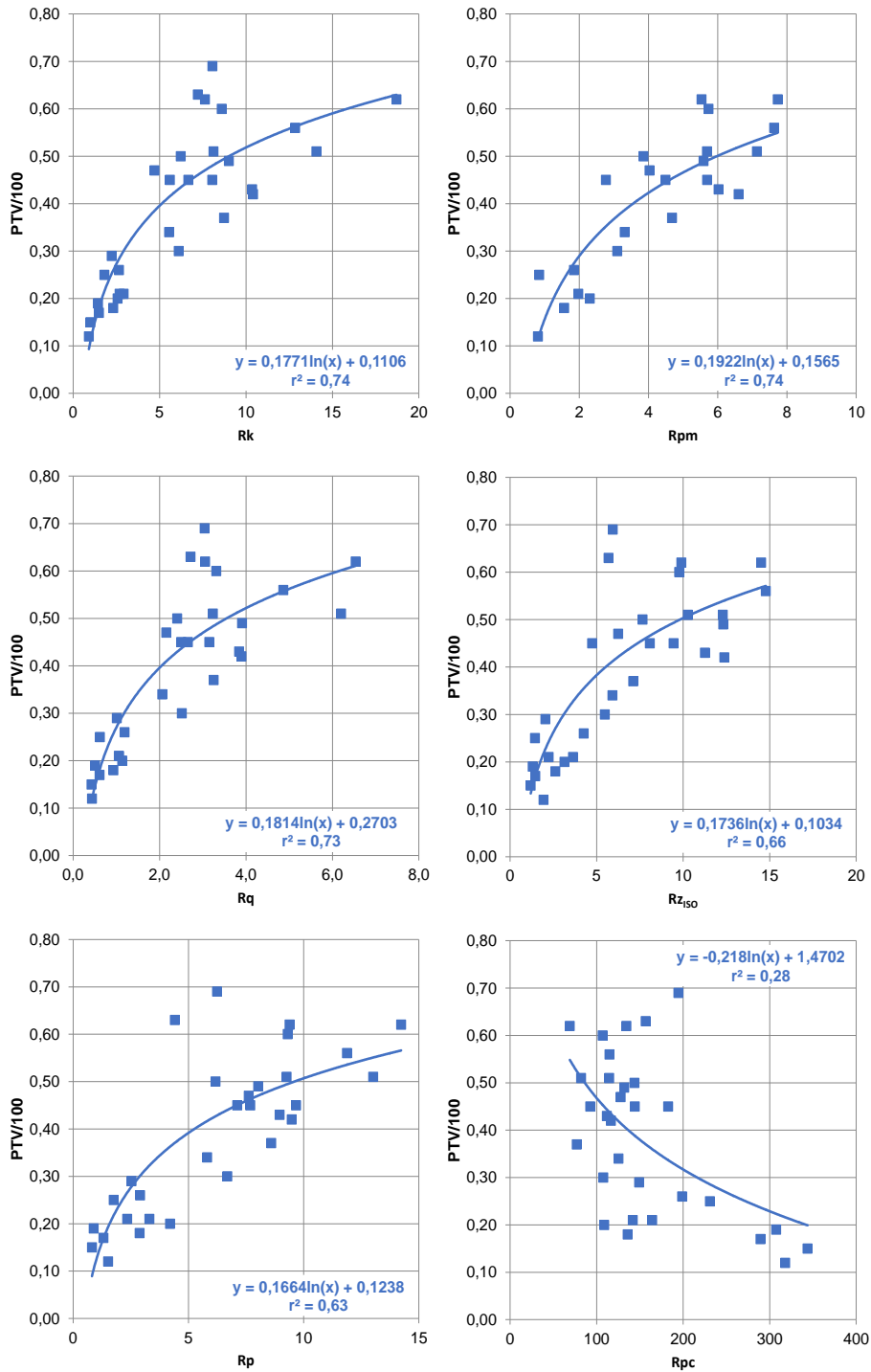


Figura 7.5 cont. Ensayo con las muestras de los grupos 3 a 5. Parámetros rugosidad.

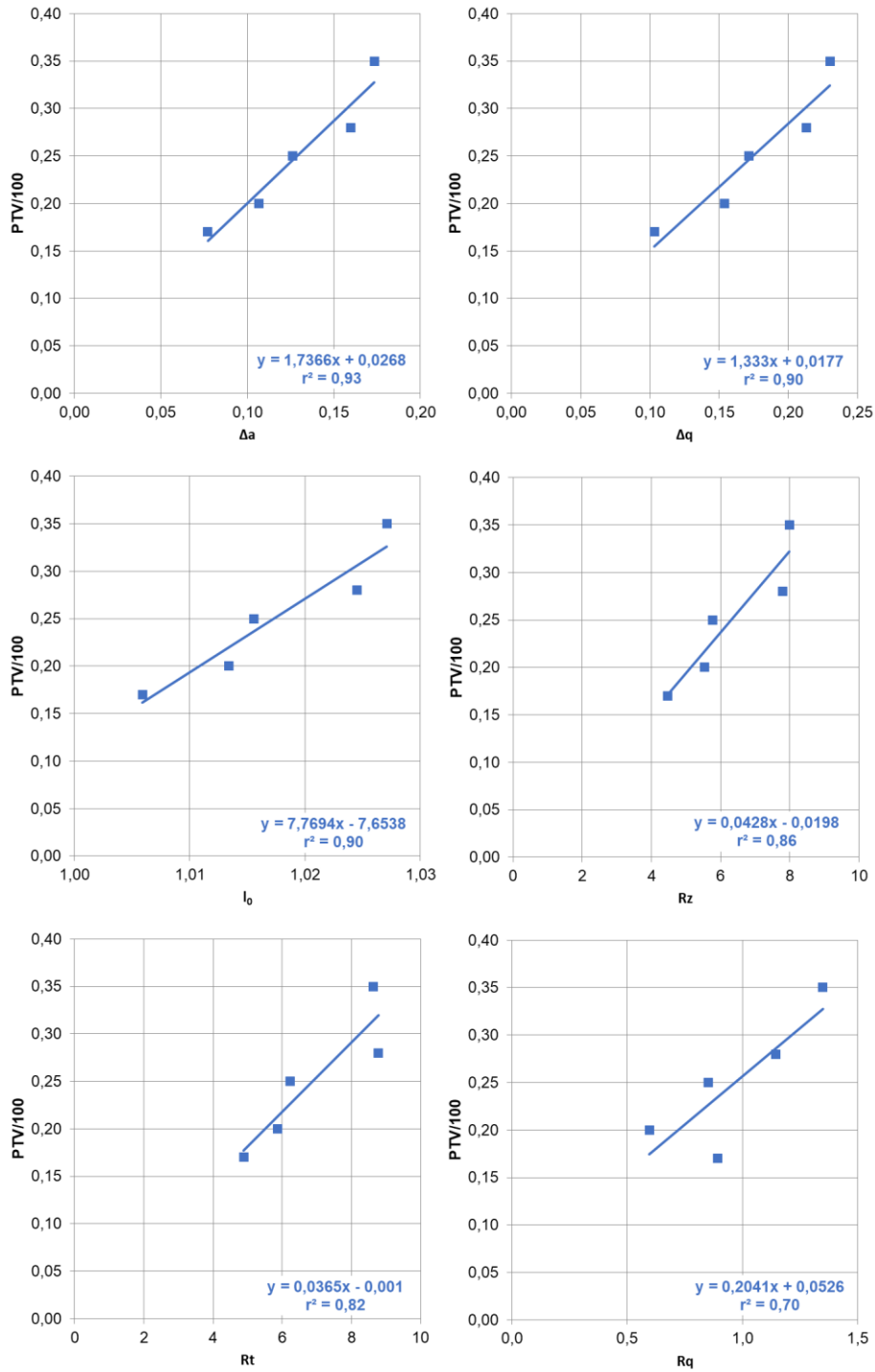


Figura 7.6 Ensayo con las muestras del grupo 1.

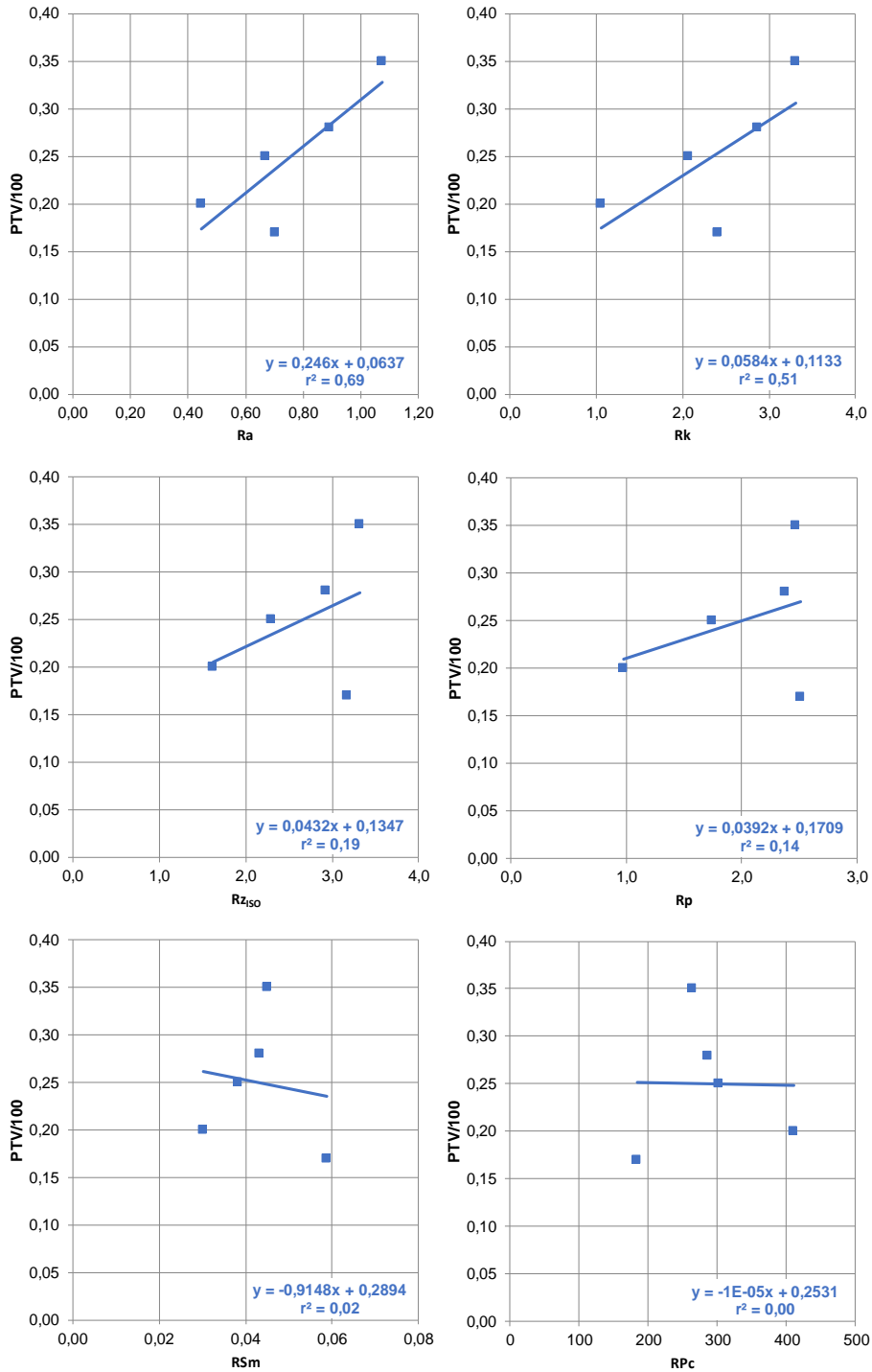


Figura 7.6 cont. Ensayo con las muestras del grupo 1.



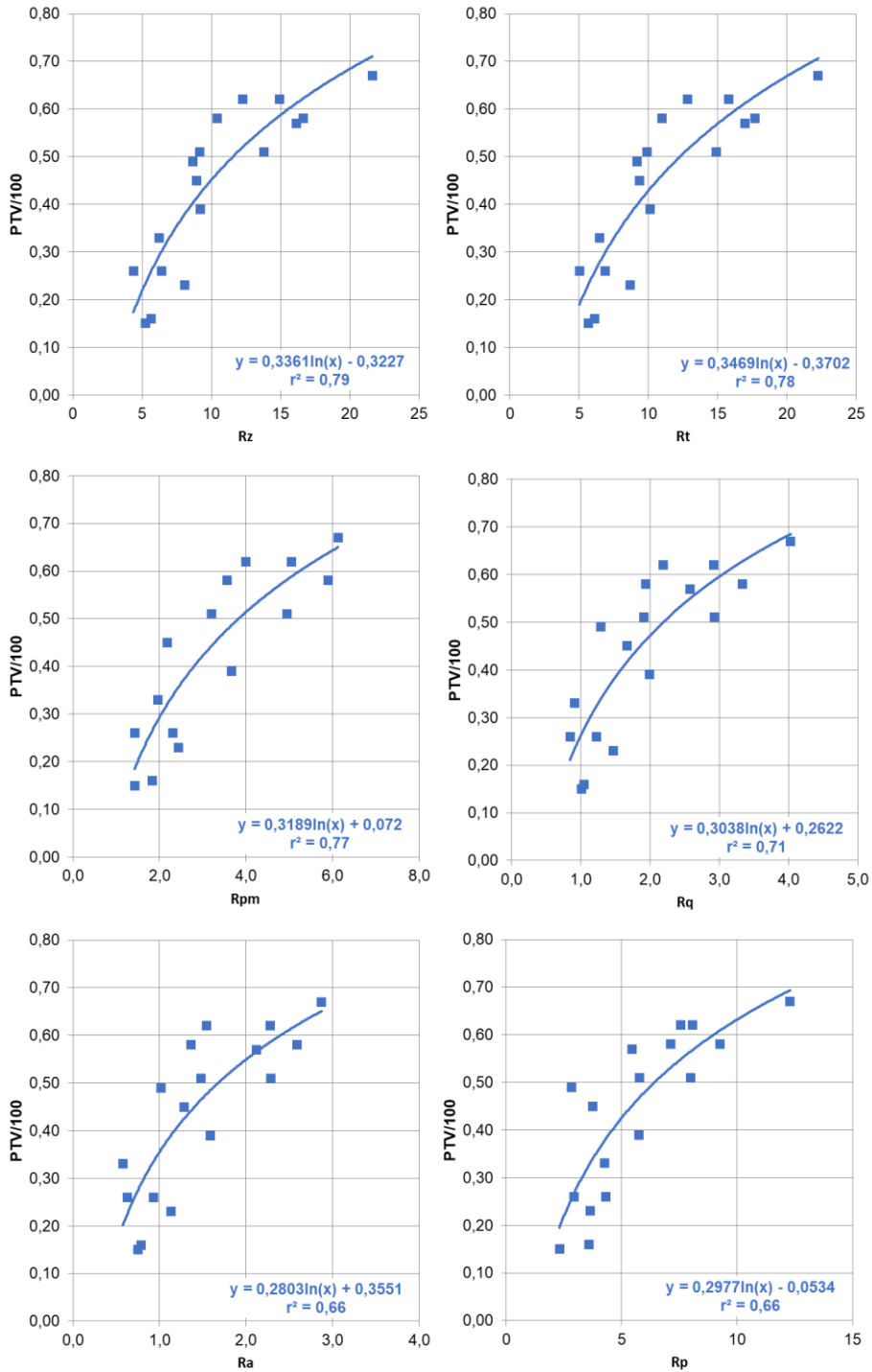


Figura 7.7 Ensayo con las muestras del grupo 2.

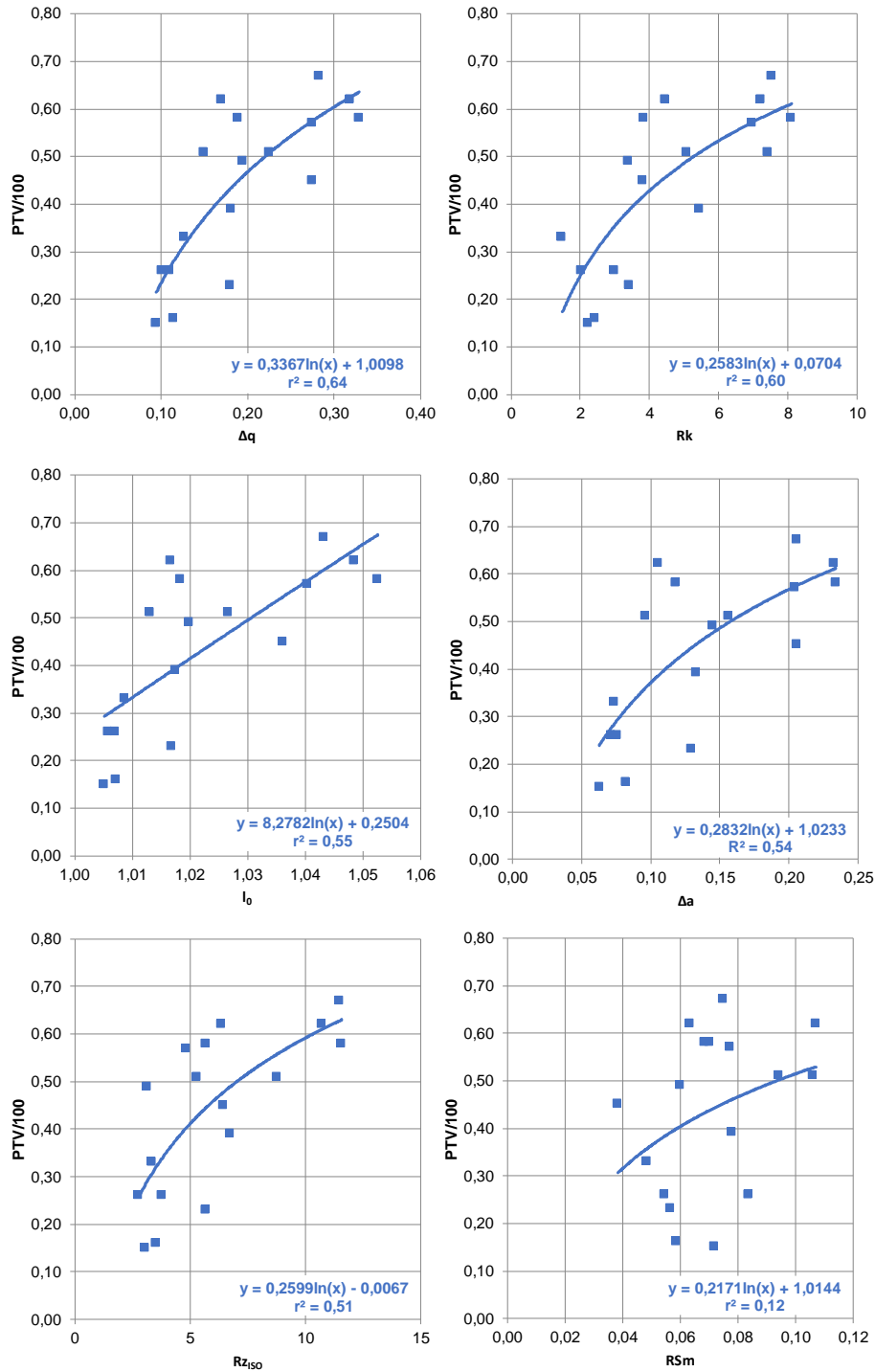


Figura 7.7 cont. Ensayo con las muestras del grupo 2.

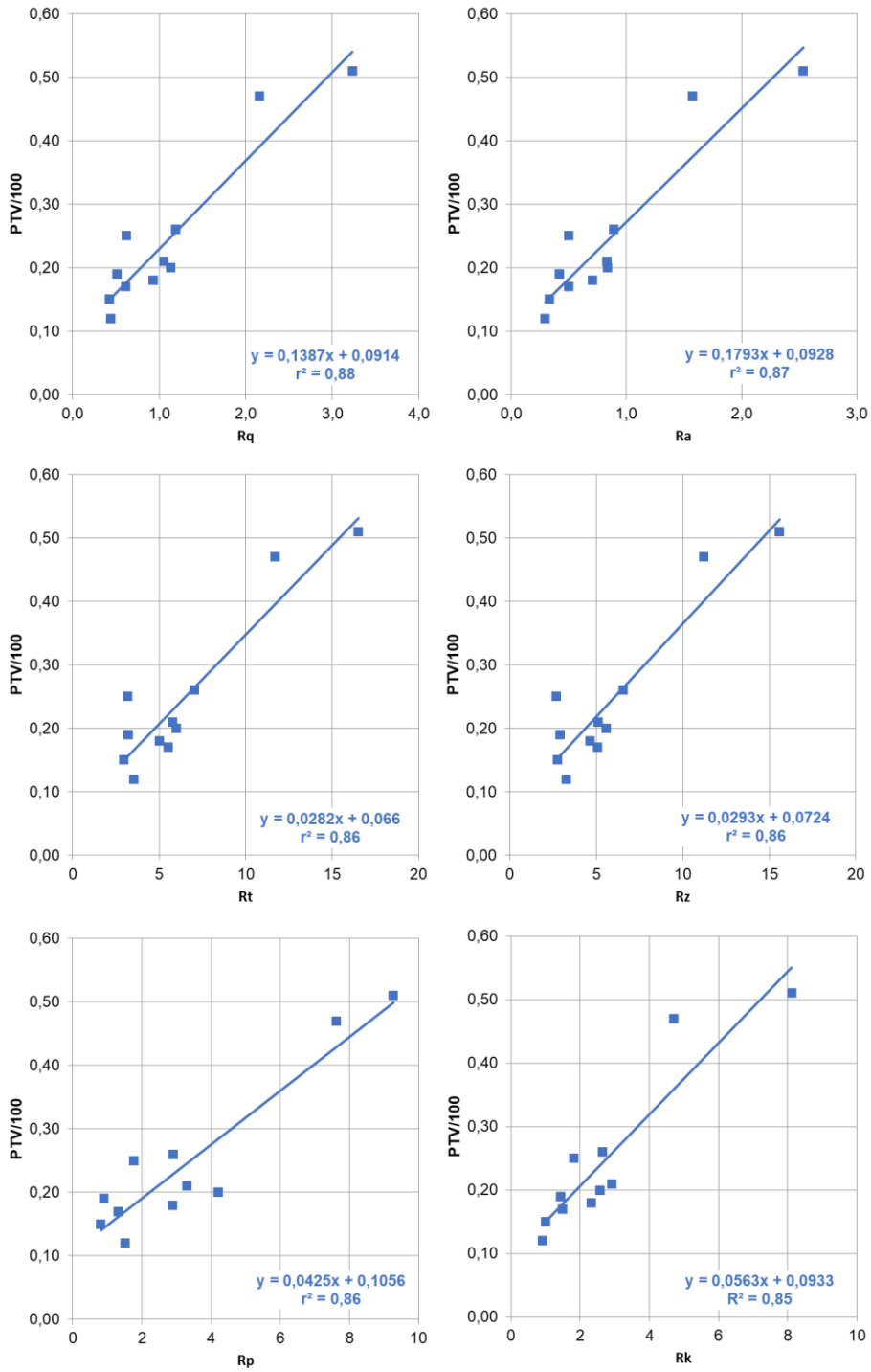


Figura 7.8 Ensayo con las muestras del grupo 3.

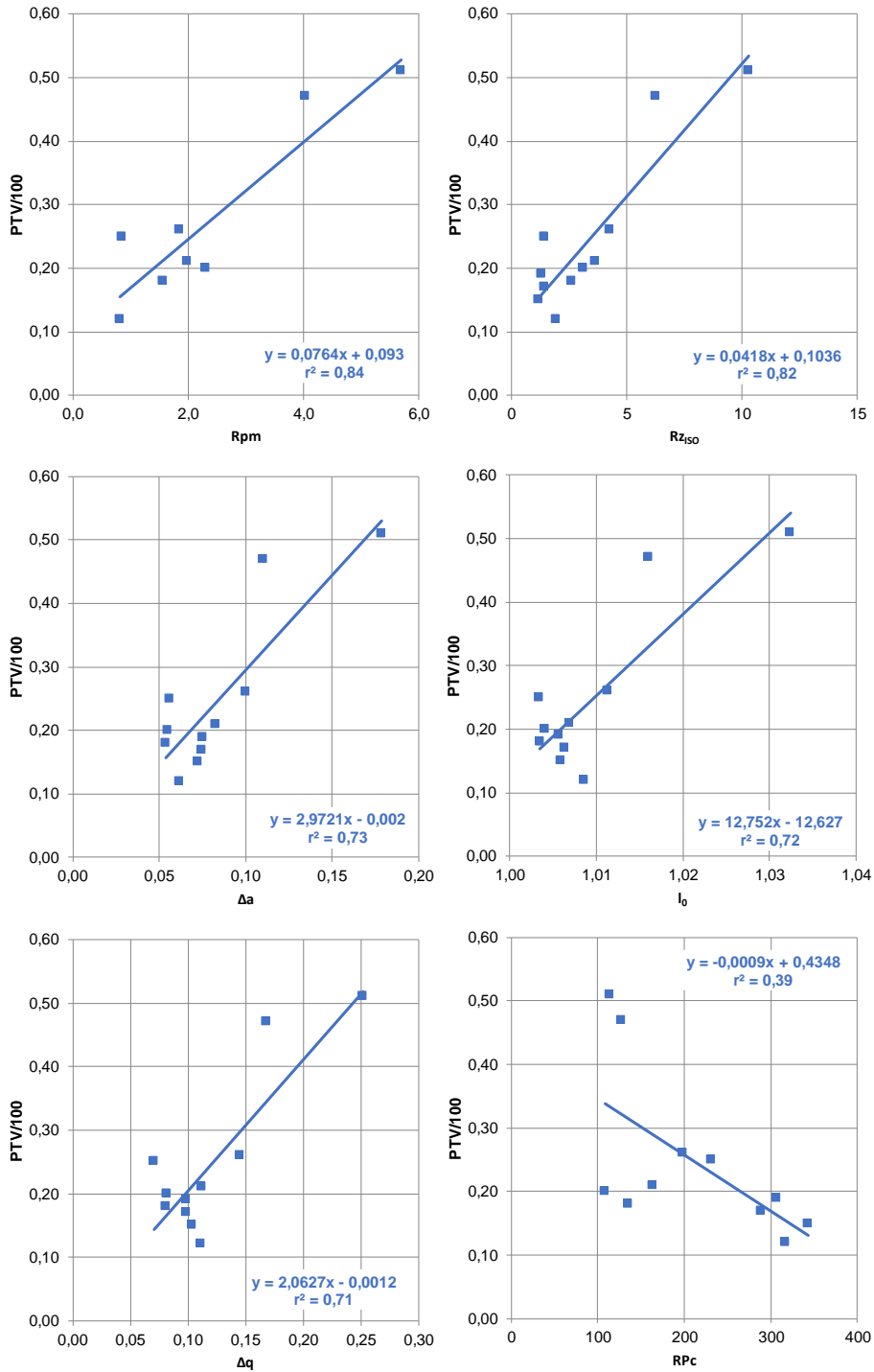


Figura 7.8 cont. Ensayo con las muestras del grupo 3.

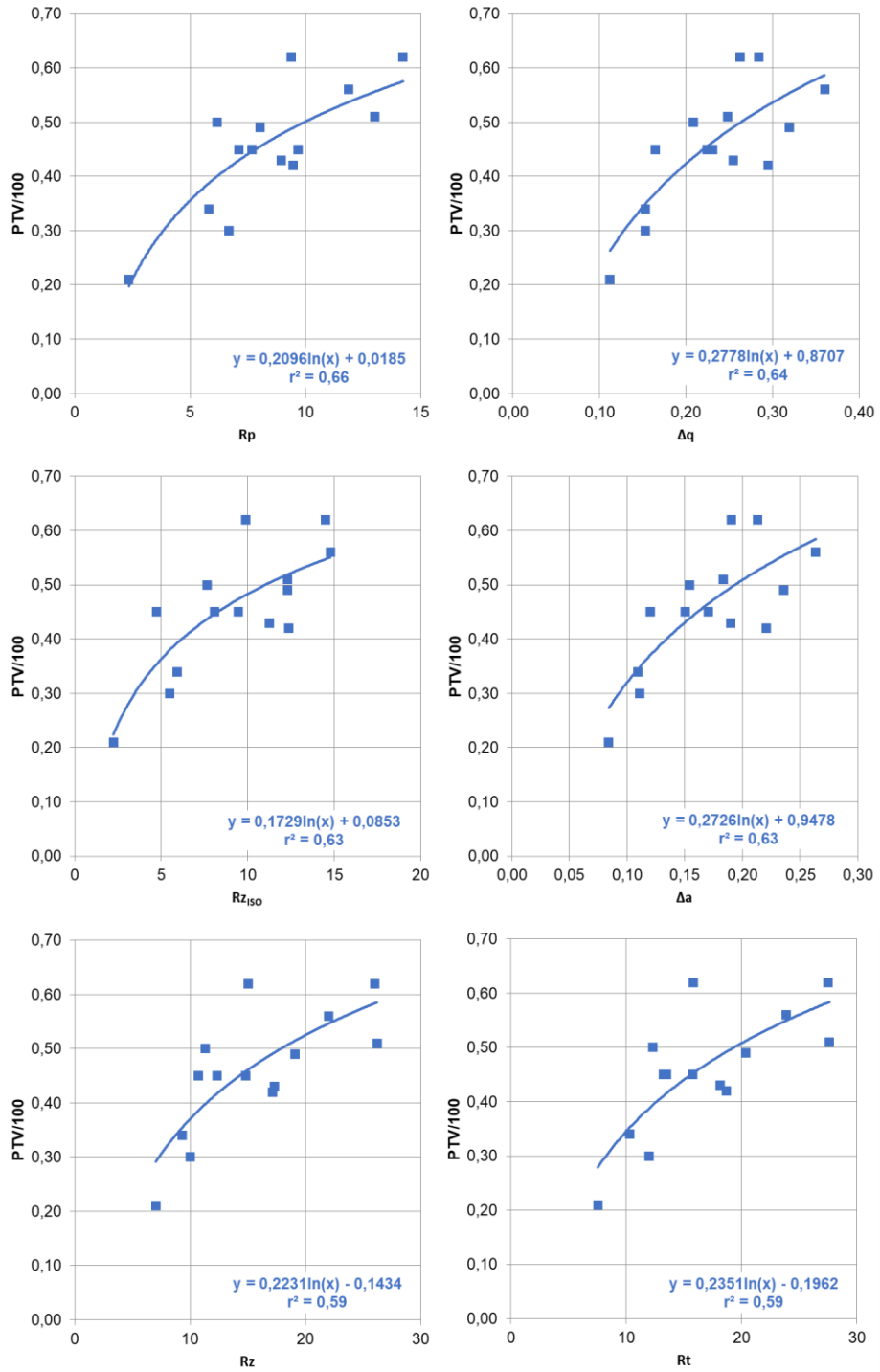


Figura 7.9 Ensayo con las muestras del grupo 4.

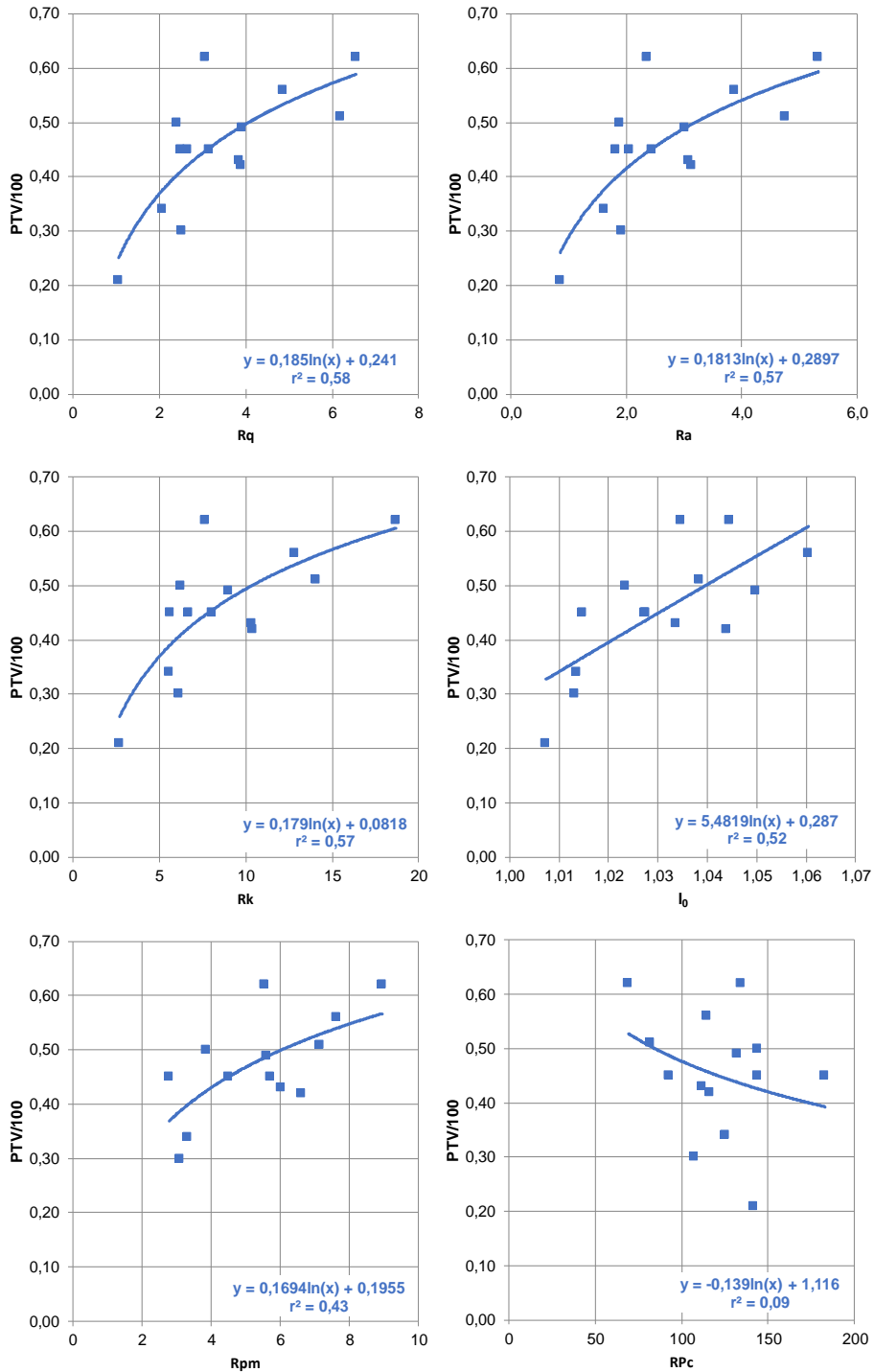


Figura 7.9 cont. Ensayo con las muestras del grupo 4.

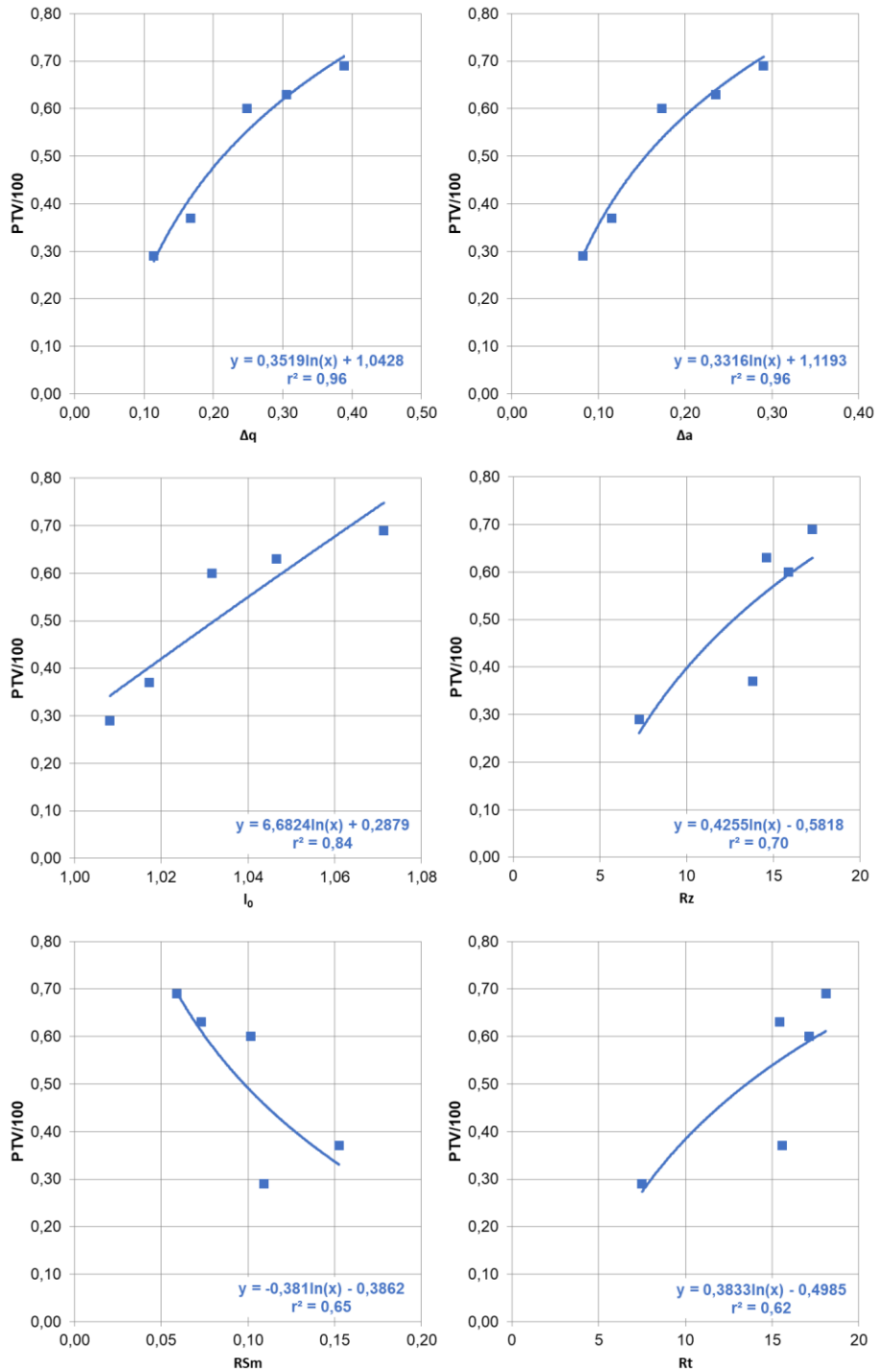


Figura 7.10 Ensayo con las muestras del grupo 5.

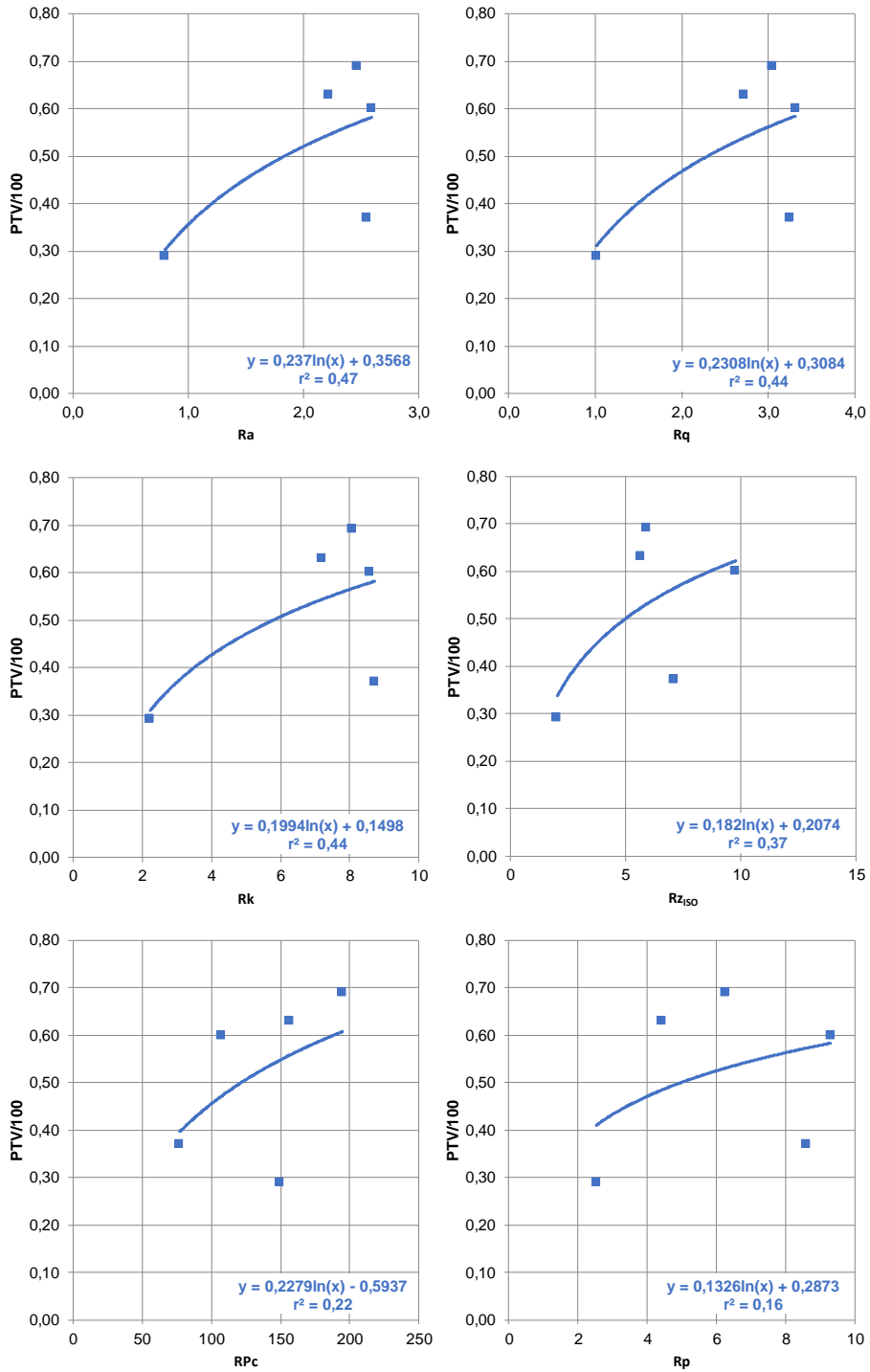


Figura 7.10 cont. Ensayo con las muestras del grupo 5.



**7.2.3 Comparación entre los valores experimentales de PTV/100 y los calculados a partir de los parámetros de rugosidad**



**Tabla 7.6 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.8), (4.9) y (4.10)). 52 muestras originales.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rz		Rt		Δq	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,35	0,00	0,35	0,00	0,48	0,13
1.2	0,28	0,35	0,07	0,36	0,08	0,45	0,17
1.3	0,20	0,26	0,06	0,26	0,06	0,35	0,15
1.4	0,25	0,27	0,02	0,27	0,02	0,38	0,13
1.5.DP0	0,17	0,21	0,04	0,21	0,04	0,22	0,05
2.6	0,51	0,49	-0,02	0,49	-0,02	0,47	-0,04
2.7	0,62	0,46	-0,16	0,45	-0,17	0,38	-0,24
2.8.DP0	0,45	0,38	-0,07	0,37	-0,08	0,53	0,08
2.9	0,67	0,60	-0,07	0,59	-0,08	0,54	-0,13
2.10.DP0	0,39	0,39	0,00	0,39	0,00	0,40	0,01
2.11	0,23	0,36	0,13	0,36	0,13	0,40	0,17
2.12	0,62	0,51	-0,11	0,50	-0,12	0,58	-0,04
2.13	0,57	0,53	-0,04	0,52	-0,05	0,53	-0,04
2.14	0,58	0,42	-0,16	0,41	-0,17	0,41	-0,17
2.15.DP0	0,58	0,53	-0,05	0,53	-0,05	0,59	0,01
2.16	0,33	0,29	-0,04	0,28	-0,05	0,29	-0,04
2.17	0,26	0,21	-0,05	0,22	-0,04	0,22	-0,04
2.18	0,49	0,37	-0,12	0,37	-0,12	0,42	-0,07
2.19	0,51	0,39	-0,12	0,39	-0,12	0,34	-0,17
2.20.DP0	0,26	0,30	0,04	0,30	0,04	0,24	-0,02
2.21.DP0	0,16	0,27	0,11	0,27	0,11	0,25	0,09
2.22.DP0	0,15	0,25	0,10	0,25	0,10	0,19	0,04
3.23	0,47	0,44	-0,03	0,43	-0,04	0,38	-0,09
3.25	0,21	0,25	0,04	0,25	0,04	0,25	0,04
3.26	0,25	0,09	-0,16	0,10	-0,15	0,10	-0,15
3.27	0,18	0,22	0,04	0,22	0,04	0,14	-0,04
3.28	0,17	0,24	0,07	0,24	0,07	0,21	0,04
3.29	0,19	0,11	-0,08	0,11	-0,08	0,21	0,02
3.30	0,20	0,27	0,07	0,26	0,06	0,15	-0,05
3.31.DP0	0,51	0,52	0,01	0,52	0,01	0,50	-0,01
3.32	0,26	0,31	0,05	0,30	0,04	0,33	0,07
3.33	0,15	0,09	-0,06	0,09	-0,06	0,22	0,07
3.34	0,12	0,14	0,02	0,13	0,01	0,25	0,13
4.35	0,45	0,46	0,01	0,46	0,01	0,48	0,03
4.36	0,50	0,44	-0,06	0,44	-0,06	0,44	-0,06
4.38.DP0	0,49	0,57	0,08	0,57	0,08	0,58	0,09
4.39.DP0	0,34	0,39	0,05	0,40	0,06	0,35	0,01
4.40	0,21	0,32	0,11	0,32	0,11	0,25	0,04
4.41	0,45	0,43	-0,02	0,46	0,01	0,37	-0,08
4.42	0,30	0,41	0,11	0,44	0,14	0,35	0,05
4.43	0,42	0,54	0,12	0,55	0,13	0,55	0,13
4.44	0,43	0,54	0,11	0,54	0,11	0,51	0,08
4.45	0,51	0,65	0,14	0,64	0,13	0,50	-0,01
4.46	0,45	0,51	0,06	0,50	0,05	0,47	0,02
4.47.DP0	0,56	0,60	0,04	0,61	0,05	0,62	0,06
4.48	0,62	0,51	-0,11	0,50	-0,12	0,52	-0,10
4.49.DP0	0,62	0,64	0,02	0,64	0,02	0,54	-0,08
5.50	0,60	0,52	-0,08	0,52	-0,08	0,50	-0,10
5.51	0,37	0,49	0,12	0,50	0,13	0,37	0,00
5.52	0,63	0,50	-0,13	0,50	-0,13	0,57	-0,06
5.53	0,29	0,33	0,04	0,32	0,03	0,25	-0,04
5.54	0,69	0,54	-0,15	0,54	-0,15	0,64	-0,05

**Tabla 7.7 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.11), (4.12) y (4.13)). 22 muestras originales pertenecientes a los grupos 1 y 2.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rz		Rt		Rpm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,37	0,02	0,37	0,02	-	-
1.2	0,28	0,36	0,08	0,37	0,09	-	-
1.3	0,20	0,24	0,04	0,23	0,03	-	-
1.4	0,25	0,25	0,00	0,25	0,00	-	-
1.5.DP0	0,17	0,16	-0,01	0,16	-0,01	0,21	0,04
2.6	0,51	0,56	0,05	0,56	0,05	0,58	0,07
2.7	0,62	0,52	-0,10	0,51	-0,11	0,51	-0,11
2.8.DP0	0,45	0,41	-0,04	0,40	-0,05	0,32	-0,13
2.9	0,67	0,71	0,04	0,71	0,04	0,65	-0,02
2.10.DP0	0,39	0,42	0,03	0,42	0,03	0,49	0,10
2.11	0,23	0,37	0,14	0,37	0,14	0,35	0,12
2.12	0,62	0,58	-0,04	0,58	-0,04	0,59	-0,03
2.13	0,57	0,61	0,04	0,61	0,04	-	-
2.14	0,58	0,46	-0,12	0,45	-0,13	0,48	-0,10
2.15.DP0	0,58	0,62	0,04	0,62	0,04	0,64	0,06
2.16	0,33	0,28	-0,05	0,27	-0,06	0,28	-0,05
2.17	0,26	0,16	-0,10	0,17	-0,09	0,18	-0,08
2.18	0,49	0,39	-0,10	0,39	-0,10	-	-
2.19	0,51	0,41	-0,10	0,42	-0,09	0,44	-0,07
2.20.DP0	0,26	0,29	0,03	0,29	0,03	0,33	0,07
2.21.DP0	0,16	0,25	0,09	0,25	0,09	-	-
2.22.DP0	0,15	0,22	0,07	0,22	0,07	0,18	0,03

**Tabla 7.8 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.11), (4.12) y (4.13)). 8 muestras duplicadas pertenecientes al grupo 2.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rz		Rt		Rpm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
2.14.DL0	0,59	0,45	-0,14	0,45	-0,14	0,50	-0,09
2.14.DP0	0,55	0,48	-0,07	0,47	-0,08	0,50	-0,05
2.16.DL0-1	0,32	0,28	-0,04	0,27	-0,05	0,25	-0,07
2.16.DL0-2	0,32	0,22	-0,10	0,21	-0,11	0,29	-0,03
2.16.DP0	0,32	0,25	-0,07	0,24	-0,08	0,24	-0,08
2.17.DL0	0,24	0,25	0,01	0,25	0,01	0,21	-0,03
2.19.DL0	0,49	0,45	-0,04	0,45	-0,04	0,46	-0,03
2.19.DP0	0,47	0,42	-0,05	0,42	-0,05	0,49	0,02

**Tabla 7.9 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.14), (4.15) y (4.16)). 30 muestras originales pertenecientes a los grupos 3 a 5.**

Ref.	[PTV/100] experimental	$\Delta a$		$\Delta q$		Rz	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
3.23	0,47	0,35	-0,12	0,38	-0,09	0,42	-0,05
3.25	0,21	0,26	0,05	0,25	0,04	0,25	0,04
3.26	0,25	0,15	-0,10	0,11	-0,14	0,11	-0,14
3.27	0,18	0,14	-0,04	0,15	-0,03	0,23	0,05
3.28	0,17	0,24	0,07	0,21	0,04	0,25	0,08
3.29	0,19	0,24	0,05	0,21	0,02	0,13	-0,06
3.30	0,20	0,14	-0,06	0,15	-0,05	0,27	0,07
3.31.DP0	0,51	0,50	-0,01	0,50	-0,01	0,49	-0,02
3.32	0,26	0,32	0,06	0,33	0,07	0,30	0,04
3.33	0,15	0,23	0,08	0,23	0,08	0,11	-0,04
3.34	0,12	0,18	0,06	0,25	0,13	0,15	0,03
4.35	0,45	0,48	0,03	0,48	0,03	0,44	-0,01
4.36	0,50	0,45	-0,05	0,45	-0,05	0,42	-0,08
4.38.DP0	0,49	0,58	0,09	0,58	0,09	0,53	0,04
4.39.DP0	0,34	0,35	0,01	0,35	0,01	0,38	0,04
4.40	0,21	0,27	0,06	0,25	0,04	0,32	0,11
4.41	0,45	0,38	-0,07	0,37	-0,08	0,41	-0,04
4.42	0,30	0,35	0,05	0,35	0,05	0,40	0,10
4.43	0,42	0,56	0,14	0,55	0,13	0,51	0,09
4.44	0,43	0,51	0,08	0,51	0,08	0,51	0,08
4.45	0,51	0,50	-0,01	0,50	-0,01	0,60	0,09
4.46	0,45	0,44	-0,01	0,47	0,02	0,48	0,03
4.47.DP0	0,56	0,61	0,05	0,61	0,05	0,57	0,01
4.48	0,62	0,51	-0,11	0,52	-0,10	0,48	-0,14
4.49.DP0	0,62	0,55	-0,07	0,54	-0,08	0,60	-0,02
5.50	0,60	0,49	-0,11	0,50	-0,10	0,49	-0,11
5.51	0,37	0,37	0,00	0,38	0,01	0,46	0,09
5.52	0,63	0,58	-0,05	0,56	-0,07	0,48	-0,15
5.53	0,29	0,26	-0,03	0,26	-0,03	0,33	0,04
5.54	0,69	0,64	-0,05	0,64	-0,05	0,51	-0,18

**Tabla 7.10 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.14), (4.15) y (4.16)). 5 muestras duplicadas pertenecientes a los grupos 3 a 5.**

Ref.	[PTV/100] experimental	$\Delta a$		$\Delta q$		Rz	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
3.30.DL0	0,20	0,16	-0,04	0,17	-0,03	0,25	0,05
3.32.DL0	0,18	0,31	0,13	0,31	0,13	0,28	0,10
4.35.DL0	0,40	0,47	0,07	0,46	0,06	0,40	0,00
5.50.DL0	0,59	0,43	-0,16	0,49	-0,10	0,49	-0,10
5.51.DL0	0,41	0,34	-0,07	0,37	-0,04	0,46	0,05

**Tabla 7.11 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.17), (4.18) y (4.19)). 5 muestras originales grupo 1.**

Ref.	[PTV/100] experimental	$\Delta a$		$\Delta q$		$l_0$	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,33	-0,02	0,32	-0,03	0,33	-0,02
1.2	0,28	0,30	0,02	0,30	0,02	0,31	0,03
1.3	0,20	0,21	0,01	0,22	0,02	0,22	0,02
1.4	0,25	0,25	0,00	0,25	0,00	0,24	-0,01
1.5.DP0	0,17	0,16	-0,01	0,16	-0,01	0,16	-0,01

**Tabla 7.12 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.20), (4.21) y (4.22)). 17 muestras originales grupo 2.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rz		Rt		Rpm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
2.6	0,51	0,56	0,05	0,57	0,06	0,58	0,07
2.7	0,62	0,52	-0,10	0,52	-0,10	0,51	-0,11
2.8.DP0	0,45	0,41	-0,04	0,41	-0,04	0,32	-0,13
2.9	0,67	0,71	0,04	0,71	0,04	0,65	-0,02
2.10.DP0	0,39	0,42	0,03	0,43	0,04	0,49	0,10
2.11	0,23	0,38	0,15	0,38	0,15	0,36	0,13
2.12	0,62	0,59	-0,03	0,59	-0,03	0,59	-0,03
2.13	0,57	0,61	0,04	0,61	0,04	-	-
2.14	0,58	0,46	-0,12	0,46	-0,12	0,48	-0,10
2.15.DP0	0,58	0,62	0,04	0,63	0,05	0,64	0,06
2.16	0,33	0,29	-0,04	0,28	-0,05	0,29	-0,04
2.17	0,26	0,17	-0,09	0,19	-0,07	0,19	-0,07
2.18	0,49	0,40	-0,09	0,40	-0,09	-	-
2.19	0,51	0,42	-0,09	0,43	-0,08	0,44	-0,07
2.20.DP0	0,26	0,30	0,04	0,30	0,04	0,34	0,08
2.21.DP0	0,16	0,26	0,10	0,26	0,10	-	-
2.22.DP0	0,15	0,23	0,08	0,23	0,08	0,19	0,04

**Tabla 7.13 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.23), (4.24) y (4.25)). 11 muestras originales grupo 3.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rq		Ra		Rt	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
3.23	0,47	0,39	-0,08	0,37	-0,10	0,40	-0,07
3.25	0,21	0,24	0,03	0,24	0,03	0,23	0,02
3.26	0,25	0,18	-0,07	0,18	-0,07	0,16	-0,09
3.27	0,18	0,22	0,04	0,22	0,04	0,21	0,03
3.28	0,17	0,18	0,01	0,18	0,01	0,22	0,05
3.29	0,19	0,16	-0,03	0,17	-0,02	0,16	-0,03
3.30	0,20	0,25	0,05	0,24	0,04	0,23	0,03
3.31.DP0	0,51	0,54	0,03	0,55	0,04	0,53	0,02
3.32	0,26	0,26	0,00	0,25	-0,01	0,26	0,00
3.33	0,15	0,15	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00
3.34	0,12	0,15	0,03	0,15	0,03	0,17	0,05

**Tabla 7.14 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.26), (4.27) y (4.28)). 14 muestras originales grupo 4.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rp		Δq		Rz <sub>ISO</sub>	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
4.35	0,45	0,43	-0,02	0,46	0,01	0,45	0,00
4.36	0,50	0,40	-0,10	0,44	-0,06	0,44	-0,06
4.38.DP0	0,49	0,46	-0,03	0,55	0,06	0,52	0,03
4.39.DP0	0,34	0,39	0,05	0,35	0,01	0,39	0,05
4.40	0,21	0,20	-0,01	0,26	0,05	0,22	0,01
4.41	0,45	0,45	0,00	0,37	-0,08	0,35	-0,10
4.42	0,30	0,42	0,12	0,35	0,05	0,38	0,08
4.43	0,42	0,49	0,07	0,53	0,11	0,52	0,10
4.44	0,43	0,48	0,05	0,49	0,06	0,50	0,07
4.45	0,51	0,56	0,05	0,48	-0,03	0,52	0,01
4.46	0,45	0,49	0,04	0,46	0,01	0,47	0,02
4.47.DP0	0,56	0,54	-0,02	0,59	0,03	0,55	-0,01
4.48	0,62	0,49	-0,13	0,50	-0,12	0,48	-0,14
4.49.DP0	0,62	0,58	-0,04	0,52	-0,10	0,55	-0,07
2.20.DP0	0,26	0,30	0,04	0,30	0,04	0,34	0,08
2.21.DP0	0,16	0,26	0,10	0,26	0,10	-	-
2.22.DP0	0,15	0,23	0,08	0,23	0,08	0,19	0,04

**Tabla 7.15 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.29), (4.30) y (4.31)). 5 muestras originales grupo 5.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Δq		Δa		I <sub>0</sub>	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
5.50	0,60	0,52	-0,08	0,50	-0,10	0,49	-0,11
5.51	0,37	0,40	0,03	0,39	0,02	0,40	0,03
5.52	0,63	0,61	-0,02	0,63	0,00	0,59	-0,04
5.53	0,29	0,31	0,02	0,33	0,04	0,34	0,05
5.54	0,69	0,74	0,05	0,73	0,04	0,75	0,06

**Tabla 7.16 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34)). 52 muestras originales.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Rq, I <sub>0</sub> , Δa, Rz <sub>ISO</sub> , Rp, Rz, RPc	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,34	-0,01
1.2	0,28	0,33	0,05
1.3	0,20	0,20	0,00
1.4	0,25	0,27	0,02
1.5.DP0	0,17	0,20	0,03
2.6	0,51	0,47	-0,04
2.7	0,62	0,49	-0,13
2.8.DP0	0,45	0,46	0,01
2.9	0,67	0,65	-0,02
2.10.DP0	0,39	0,41	0,02
2.11	0,23	0,29	0,06
2.12	0,62	0,54	-0,08
2.13	0,57	0,59	0,02
2.14	0,58	0,49	-0,09
2.15.DP0	0,58	0,58	0,00
2.16	0,33	0,27	-0,06
2.17	0,26	0,21	-0,05
2.18	0,49	0,43	-0,06
2.19	0,51	0,41	-0,10
2.20.DP0	0,26	0,27	0,01
2.21.DP0	0,16	0,23	0,07
2.22.DP0	0,15	0,18	0,03
3.23	0,47	0,47	0,00
3.25	0,21	0,22	0,01
3.26	0,25	0,17	-0,08
3.27	0,18	0,20	0,02
3.28	0,17	0,19	0,02
3.29	0,19	0,16	-0,03
3.30	0,20	0,23	0,03
3.31.DP0	0,51	0,51	0,00
3.32	0,26	0,25	-0,01
3.33	0,15	0,16	0,01
3.34	0,12	0,17	0,05
4.35	0,45	0,47	0,02
4.36	0,50	0,43	-0,07
4.38.DP0	0,49	0,50	0,01
4.39.DP0	0,34	0,40	0,06
4.40	0,21	0,26	0,05
4.41	0,45	0,50	0,05
4.42	0,30	0,43	0,13
4.43	0,42	0,51	0,09
4.44	0,43	0,47	0,04
4.45	0,51	0,56	0,05
4.46	0,45	0,51	0,06
4.47.DP0	0,56	0,61	0,05
4.48	0,62	0,55	-0,07
4.49.DP0	0,62	0,57	-0,05
5.50	0,60	0,52	-0,08
5.51	0,37	0,46	0,09
5.52	0,63	0,56	-0,07
5.53	0,29	0,27	-0,02
5.54	0,69	0,74	0,05



**Tabla 7.17 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuación (4.35)). 22 muestras originales pertenecientes a los grupos 1 y 2.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Ra, Δq, Rp, RSm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
1.1	0,35	0,34	-0,01
1.2	0,28	0,33	0,05
1.3	0,20	0,20	0,00
1.4	0,25	0,27	0,02
1.5.DP0	0,17	0,20	0,03
2.6	0,51	0,47	-0,04
2.7	0,62	0,49	-0,13
2.8.DP0	0,45	0,46	0,01
2.9	0,67	0,65	-0,02
2.10.DP0	0,39	0,41	0,02
2.11	0,23	0,29	0,06
2.12	0,62	0,54	-0,08
2.13	0,57	0,59	0,02
2.14	0,58	0,49	-0,09
2.15.DP0	0,58	0,58	0,00
2.16	0,33	0,27	-0,06
2.17	0,26	0,21	-0,05
2.18	0,49	0,43	-0,06
2.19	0,51	0,41	-0,10
2.20.DP0	0,26	0,27	0,01
2.21.DP0	0,16	0,23	0,07
2.22.DP0	0,15	0,18	0,03

**Tabla 7.18 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuación (4.36)). 30 muestras originales pertenecientes a los grupos 3 a 5.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Ra, Δa, Rz <sub>ISO</sub> , Rp	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
3.23	0,47	0,41	-0,06
3.25	0,21	0,24	0,03
3.26	0,25	0,18	-0,07
3.27	0,18	0,18	0,00
3.28	0,17	0,20	0,03
3.29	0,19	0,19	0,00
3.30	0,20	0,23	0,03
3.31.DP0	0,51	0,50	-0,01
3.32	0,26	0,24	-0,02
3.33	0,15	0,18	0,03
3.34	0,12	0,17	0,05
4.35	0,45	0,46	0,01
4.36	0,50	0,39	-0,11
4.38.DP0	0,49	0,49	0,00
4.39.DP0	0,34	0,33	-0,01
4.40	0,21	0,23	0,02
4.41	0,45	0,48	0,03
4.42	0,30	0,37	0,07
4.43	0,42	0,52	0,10
4.44	0,43	0,45	0,02
4.45	0,51	0,52	0,01
4.46	0,45	0,48	0,03
4.47.DP0	0,56	0,64	0,08
4.48	0,62	0,55	-0,07
4.49.DP0	0,62	0,56	-0,06
5.50	0,60	0,50	-0,10
5.51	0,37	0,40	0,03
5.52	0,63	0,54	-0,09
5.53	0,29	0,25	-0,04
5.54	0,69	0,75	0,06

**Tabla 7.19 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.32), (4.33) y (4.34)). 13 muestras duplicadas.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Rq, I <sub>0</sub> , Δa, Rz <sub>iso</sub> , Rp, Rz, RPc	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
2.14.DL0	0,59	0,50	-0,09
2.14.DP0	0,55	0,52	-0,03
2.16.DL0-1	0,32	0,27	-0,05
2.16.DL0-2	0,32	0,23	-0,09
2.16.DP0	0,32	0,23	-0,09
2.17.DL0	0,24	0,23	-0,01
2.19.DL0	0,49	0,47	-0,02
2.19.DP0	0,47	0,45	-0,02
3.30.DL0	0,20	0,22	0,02
3.32.DL0	0,18	0,25	0,07
4.35.DL0	0,40	0,42	0,02
5.50.DL0	0,59	0,58	-0,01
5.51.DL0	0,41	0,46	0,05

**Tabla 7.20 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuación (4.35)). 8 muestras duplicadas pertenecientes al grupo 2.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Ra, Δq, Rp, RSm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
2.14.DL0	0,59	0,63	0,04
2.14.DP0	0,55	0,54	-0,01
2.16.DL0-1	0,32	0,29	-0,03
2.16.DL0-2	0,32	0,24	-0,08
2.16.DP0	0,32	0,27	-0,05
2.17.DL0	0,24	0,20	-0,04
2.19.DL0	0,49	0,48	-0,01
2.19.DP0	0,47	0,51	0,04

**Tabla 7.21 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuación (4.36)). 5 muestras adicionales pertenecientes a los grupos 3 a 5.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Ra, Δa, Rz <sub>iso</sub> , Rp	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
3.30.DL0	0,20	0,22	0,02
3.32.DL0	0,18	0,24	0,06
4.35.DL0	0,40	0,40	0,00
5.50.DL0	0,59	0,59	0,00
5.51.DL0	0,41	0,38	-0,03



**7.2.4 Valores parámetros rugosidad de las muestras desgastadas**



**Tabla 7.22 Parámetros superficiales de rugosidad.**

Referencia	Nº personas	PTV/100	Ra µm	Rz µm	Rt µm	Rq µm	Rk	Rz <sub>ISO</sub> µm	Rpm µm	Rp µm	Δa rad	Δq rad	I <sub>0</sub>	RPc picos/cm	RSm mm/pico
1.5.DP0	0	0,17	0,70	4,5	4,9	0,89	2,4	3,2	1,6	2,5	0,077	0,10	1,006	185	0,059
1.5.DP4	50000	0,11	0,63	4,1	4,4	0,80	2,1	3,0	1,3	2,1	0,083	0,11	1,007	215	0,048
2.8.DP0	0	0,45	1,3	8,9	9,4	1,7	3,8	6,4	2,2	3,8	0,21	0,28	1,036	274	0,039
2.8.DP1	10000	0,31	0,91	5,5	6,0	1,1	2,9	4,2	1,9	2,7	0,10	0,14	1,010	201	0,052
2.8.DP2	20000	0,22	0,89	5,4	5,8	1,1	2,8	4,1	1,9	2,7	0,099	0,13	1,010	194	0,055
2.8.DP3	30000	0,13	0,86	4,9	5,2	1,1	2,8	3,8	1,8	2,6	0,094	0,12	1,009	192	0,055
2.10.DP0	0	0,39	1,6	9,2	10	2,0	5,5	6,7	3,7	5,8	0,13	0,18	1,018	135	0,078
2.10.DP1	10000	0,31	1,6	8,9	9,4	2,0	5,4	6,4	3,6	5,4	0,12	0,16	1,015	129	0,083
2.10.DP4	50000	0,22	1,4	7,7	8,2	1,7	4,9	5,6	3,1	4,4	0,11	0,15	1,012	140	0,075
2.14.DP0	0	0,55	1,3	11	12	1,9	3,4	6,3	3,9	7,8	0,14	0,21	1,023	207	0,054
2.14.DP1	20000	0,39	0,91	7,5	7,9	1,3	2,8	4,3	2,7	5,4	0,098	0,16	1,013	194	0,056
2.14.DL0	0	0,59	1,3	10	11	1,8	3,8	6,0	3,8	7,4	0,13	0,22	1,021	153	0,072
2.14.DL1	10000	0,35	1,3	9,6	10	1,9	4,1	5,1	3,2	6,5	0,11	0,16	1,013	144	0,078
2.15.DP0	0	0,58	2,6	17	18	3,3	8,1	12	5,9	9,3	0,23	0,33	1,053	151	0,070
2.15.DP2	20000	0,49	1,6	10	11	2,1	4,8	6,9	4,0	6,7	0,14	0,20	1,022	147	0,073
2.15.DP3	30000	0,39	1,6	10	11	2,0	4,6	6,5	3,5	6,1	0,13	0,19	1,019	159	0,067
2.15.DP4	50000	0,35	1,7	10	11	2,2	5,1	7,1	3,9	6,0	0,16	0,22	1,026	167	0,065
2.16.DP0	0	0,32	0,47	5,7	5,9	0,79	1,2	3,0	1,8	4,0	0,068	0,12	1,007	253	0,042
2.16.DP1	20000	0,20	0,47	5,0	5,2	0,75	1,2	2,6	1,6	3,3	0,060	0,100	1,005	247	0,044
2.16.DL0-1	0	0,32	0,59	6,3	6,5	0,92	1,5	3,3	2,0	4,3	0,079	0,13	1,009	254	0,042
2.16.DL3-1	30000	0,16	0,47	4,1	4,3	0,69	1,3	2,4	1,2	2,5	0,061	0,091	1,005	245	0,043
2.16.DL14-1	140000	0,10	0,39	3,3	3,4	0,55	1,2	1,8	0,96	1,9	0,052	0,072	1,003	248	0,043
2.16.DL0-2	0	0,32	0,54	5,3	5,5	0,80	1,5	2,9	1,7	3,6	0,069	0,11	1,007	231	0,047
2.16.DL3-2	30000	0,16	0,45	4,1	4,4	0,66	1,3	2,2	1,1	2,3	0,052	0,078	1,004	217	0,050

Tabla 7.22 Cont. Parámetros superficiales de rugosidad.

Referencia	Nº personas	PTV/100	Ra µm	Rz µm	Rt µm	Rq µm	Rk	RZ <sub>ISO</sub> µm	Rpm µm	Rp µm	Δa rad	Δq rad	I <sub>0</sub>	RPC picos/cm	RSm mm/pico
2.17.DL0	0	0,24	0,73	5,7	6,2	1,0	2,3	3,1	1,6	3,5	0,075	0,11	1,006	202	0,054
2.17.DL3	30000	0,19	0,63	3,6	4,3	0,81	2,1	2,3	1,1	2,0	0,060	0,081	1,004	192	0,055
2.17.DL15	150000	0,16	0,40	2,7	3,0	0,51	1,3	1,8	0,82	1,3	0,049	0,067	1,003	196	0,054
2.19.DP0	0	0,47	1,2	9,2	9,9	1,7	4,0	5,3	3,4	6,4	0,10	0,16	1,016	128	0,085
2.19.DP1	20000	0,34	1,3	7,9	8,8	1,7	4,4	4,7	2,9	5,5	0,091	0,13	1,010	120	0,096
2.19.DL0	0	0,49	1,5	10	11	2,0	4,6	5,4	3,7	7,1	0,11	0,17	1,015	134	0,085
2.19.DL1	10000	0,29	1,3	8,0	8,5	1,7	4,1	4,8	2,9	4,8	0,092	0,14	1,010	122	0,091
2.20.DP0	0	0,26	0,93	6,4	6,9	1,2	3,0	3,8	2,3	4,3	0,076	0,11	1,007	133	0,084
2.20.DP2	20000	0,20	0,93	5,4	5,9	1,2	3,2	3,7	2,0	3,4	0,071	0,097	1,006	132	0,080
2.21.DP0	0	0,16	0,78	5,7	6,1	1,1	2,4	3,5	1,8	3,6	0,082	0,11	1,007	184	0,059
2.22.DP0	0	0,15	0,75	5,2	5,7	1,0	2,2	3,1	1,4	2,3	0,063	0,095	1,005	157	0,072
2.22.DP4	50000	0,09	0,69	4,7	5,0	0,94	2,0	2,7	1,2	2,0	0,057	0,078	1,004	181	0,069
3.30.DL0	0	0,20	0,75	5,2	5,7	1,0	2,4	3,1	1,9	3,8	0,058	0,087	1,004	130	0,083
3.30.DL9	90000	0,13	0,63	3,6	4,1	0,82	2,0	2,2	1,4	2,3	0,043	0,058	1,003	121	0,091
3.31.DP0	0	0,51	2,5	16	17	3,2	8,1	10	5,7	9,3	0,18	0,25	1,033	115	0,094
3.31.DP2	20000	0,42	2,4	13	14	3,0	7,6	9,1	5,2	8,1	0,15	0,20	1,023	103	0,10
3.31.DP3	30000	0,34	2,0	11	11	2,4	6,7	7,2	4,0	5,9	0,13	0,17	1,017	111	0,094
3.31.DP4	50000	0,30	1,9	11	11	2,4	6,2	7,6	4,1	6,4	0,13	0,18	1,018	109	0,097
3.32.DL0	0	0,18	0,89	6,0	6,5	1,2	3,0	4,0	1,7	3,0	0,096	0,14	1,009	185	0,060
3.32.DL9	90000	0,13	0,96	5,5	6,2	1,2	3,2	4,0	1,6	2,5	0,087	0,12	1,008	155	0,068
4.35.DL0	0	0,40	1,8	10	11	2,2	6,0	7,2	3,5	5,4	0,17	0,22	1,025	164	0,064
4.35.DL9	90000	0,34	1,5	8,7	9,5	1,9	5,1	6,3	3,0	4,5	0,14	0,19	1,020	166	0,063
4.35.DL18	180000	0,30	1,7	10	11	2,2	5,8	7,5	3,3	4,7	0,16	0,22	1,024	157	0,066



**Tabla 7.22 Cont. Parámetros superficiales de rugosidad.**

Referencia	Nº personas	PTV/100	Ra µm	Rz µm	Rt µm	Rq µm	Rk	RZ <sub>ISO</sub> µm	Rpm µm	Rp µm	Δa rad	Δq rad	I <sub>0</sub>	RPc picos/cm	RSm mm/pico
4.38.DP0	0	0,49	3,0	19	20	3,9	9,0	12	5,6	8,0	0,24	0,32	1,050	132	0,081
4.38.DP2	20000	0,41	2,6	14	15	3,2	8,9	9,0	4,7	7,0	0,17	0,23	1,028	115	0,095
4.38.DP4	50000	0,34	2,4	13	14	3,0	8,4	8,9	4,4	6,8	0,18	0,24	1,031	131	0,081
4.39.DP0	0	0,34	1,6	9,3	10	2,1	5,6	5,9	3,3	5,8	0,11	0,15	1,014	125	0,089
4.39.DP4	50000	0,27	2,1	12	13	2,7	7,3	7,8	4,5	7,3	0,14	0,19	1,018	111	0,096
4.47.DP0	0	0,56	3,9	22	24	4,9	13	15	7,6	12	0,26	0,36	1,061	115	0,094
4.47.DP3	30000	0,45	3,0	15	16	3,6	10	10	5,7	8,2	0,18	0,24	1,032	101	0,11
4.49.DP0	0	0,62	5,3	26	27	6,5	19	15	8,9	14	0,21	0,28	1,045	69	0,16
4.49.DP2	20000	0,53	4,7	24	25	5,8	15	12	7,7	13	0,20	0,27	1,039	72	0,17
4.49.DP4	50000	0,46	5,2	24	26	6,3	19	14	9,0	14	0,21	0,28	1,044	65	0,17
5.50.DL0	0	0,59	2,3	13	15	2,9	7,4	8,0	4,6	7,7	0,14	0,20	1,023	113	0,095
5.50.DL2	20000	0,38	1,8	9,7	10	2,3	6,7	6,6	3,5	5,0	0,12	0,16	1,014	102	0,11
5.50.DL42	420000	0,19	0,80	5,9	6,1	1,1	1,8	3,4	1,3	2,0	0,083	0,12	1,008	180	0,062
5.51.DL0	0	0,41	2,2	15	16	3,2	5,3	6,0	5,4	11	0,11	0,16	1,015	85	0,13
5.51.DL2	20000	0,34	1,6	8,6	9,9	2,1	4,5	3,9	3,5	6,4	0,077	0,11	1,007	85	0,14



**7.2.5 Comparación entre los valores experimentales de PTV/100 y los calculados a partir de los parámetros de rugosidad de las muestras desgastadas**



**Tabla 7.23 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.42), (4.43) y (4.44)). 37 muestras desgastadas.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rp		Rpm		Rt	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
1.5.DP4	0,11	0,15	0,04	0,17	0,06	0,16	0,05
2.8.DP1	0,31	0,20	-0,11	0,23	-0,08	0,22	-0,09
2.8.DP2	0,22	0,20	-0,02	0,23	0,01	0,21	-0,01
2.8.DP3	0,13	0,19	0,06	0,22	0,09	0,19	0,06
2.10.DP1	0,31	0,33	0,02	0,34	0,03	0,31	0,00
2.10.DP4	0,22	0,29	0,07	0,31	0,09	0,29	0,07
2.14.DP1	0,39	0,33	-0,06	0,29	-0,10	0,28	-0,11
2.14.DL1	0,35	0,36	0,01	0,32	-0,03	0,33	-0,02
2.15.DP2	0,49	0,37	-0,12	0,36	-0,13	0,34	-0,15
2.15.DP3	0,39	0,35	-0,04	0,34	-0,05	0,34	-0,05
2.15.DP4	0,35	0,35	0,00	0,36	0,01	0,34	-0,01
2.16.DP1	0,20	0,24	0,04	0,19	-0,01	0,19	-0,01
2.16.DL14-1	0,10	0,14	0,04	0,11	0,01	0,11	0,01
2.16.DL3-1	0,16	0,18	0,02	0,15	-0,01	0,16	0,00
2.16.DL3-2	0,16	0,17	0,01	0,14	-0,02	0,16	0,00
2.17.DL15	0,16	0,06	-0,10	0,08	-0,08	0,08	-0,08
2.17.DL3	0,19	0,15	-0,04	0,13	-0,06	0,15	-0,04
2.19.DP1	0,34	0,33	-0,01	0,30	-0,04	0,30	-0,04
2.19.DL1	0,29	0,31	0,02	0,30	0,01	0,29	0,00
2.20.DP2	0,20	0,24	0,04	0,24	0,04	0,22	0,02
2.22.DP4	0,09	0,14	0,05	0,15	0,06	0,19	0,10
3.30.DL9	0,13	0,17	0,04	0,18	0,05	0,14	0,01
3.31.DP2	0,42	0,40	-0,02	0,40	-0,02	0,39	-0,03
3.31.DP3	0,34	0,34	0,00	0,36	0,02	0,34	0,00
3.31.DP4	0,30	0,36	0,06	0,36	0,06	0,35	0,05
3.32.DL9	0,13	0,18	0,05	0,20	0,07	0,23	0,10
4.35.DL18	0,30	0,30	0,00	0,33	0,03	0,35	0,05
4.35.DL9	0,34	0,30	-0,04	0,31	-0,03	0,31	-0,03
4.38.DP2	0,41	0,38	-0,03	0,39	-0,02	0,41	0,00
4.38.DP4	0,34	0,37	0,03	0,37	0,03	0,39	0,05
4.39.DP4	0,27	0,39	0,12	0,38	0,11	0,38	0,11
4.47.DP3	0,45	0,41	-0,04	0,42	-0,03	0,42	-0,03
4.49.DP2	0,53	0,50	-0,03	0,50	-0,03	0,51	-0,02
4.49.DP4	0,46	0,50	0,04	0,50	0,04	0,51	0,05
5.50.DL2	0,38	0,32	-0,06	0,34	-0,04	0,33	-0,05
5.50.DL42	0,19	0,14	-0,05	0,17	-0,02	0,23	0,04
5.51.DL2	0,34	0,36	0,02	0,33	-0,01	0,32	-0,02

**Tabla 7.24 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.45), (4.46) y (4.47)). 21 muestras desgastadas grupos 1 y 2.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rp		Rt		Rz	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
1.5.DP4	0,11	0,15	0,04	0,16	0,05	0,16	0,05
2.8.DP1	0,31	0,20	-0,11	0,23	-0,08	0,23	-0,08
2.8.DP2	0,22	0,20	-0,02	0,22	0,00	0,23	0,01
2.8.DP3	0,13	0,19	0,06	0,20	0,07	0,21	0,08
2.10.DP1	0,31	0,34	0,03	0,34	0,03	0,34	0,03
2.10.DP4	0,22	0,30	0,08	0,31	0,09	0,31	0,09
2.14.DP1	0,39	0,34	-0,05	0,30	-0,09	0,30	-0,09
2.14.DL1	0,35	0,37	0,02	0,36	0,01	0,36	0,01
2.15.DP2	0,49	0,38	-0,11	0,37	-0,12	0,37	-0,12
2.15.DP3	0,39	0,36	-0,03	0,37	-0,02	0,37	-0,02
2.15.DP4	0,35	0,36	0,01	0,38	0,03	0,37	0,02
2.16.DP1	0,20	0,24	0,04	0,20	0,00	0,21	0,01
2.16.DL14-1	0,10	0,13	0,03	0,10	0,00	0,11	0,01
2.16.DL3-1	0,16	0,18	0,02	0,16	0,00	0,16	0,00
2.16.DL3-2	0,16	0,17	0,01	0,16	0,00	0,16	0,00
2.17.DL15	0,16	0,06	-0,10	0,07	-0,09	0,06	-0,10
2.17.DL3	0,19	0,15	-0,04	0,15	-0,04	0,13	-0,06
2.19.DP1	0,34	0,34	0,00	0,33	-0,01	0,32	-0,02
2.19.DL1	0,29	0,31	0,02	0,32	0,03	0,32	0,03
2.20.DP2	0,20	0,24	0,04	0,23	0,03	0,23	0,03
2.22.DP4	0,09	0,14	0,05	0,19	0,10	0,19	0,10

**Tabla 7.25 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.48), (4.49) y (4.50)). 16 muestras desgastadas grupos 3 a 5.**

Ref.	[PTV/100] experimental	Rq		Rpm		Ra	
		[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia	[PTV/100] calculado	Diferencia
3.30.DL9	0,13	0,13	0,00	0,15	0,02	0,13	0,00
3.31.DP2	0,42	0,38	-0,04	0,40	-0,02	0,37	-0,05
3.31.DP3	0,34	0,33	-0,01	0,34	0,00	0,34	0,00
3.31.DP4	0,30	0,33	0,03	0,35	0,05	0,34	0,04
3.32.DL9	0,13	0,20	0,07	0,18	0,05	0,21	0,08
4.35.DL18	0,30	0,32	0,02	0,31	0,01	0,32	0,02
4.35.DL9	0,34	0,29	-0,05	0,30	-0,04	0,29	-0,05
4.38.DP2	0,41	0,39	-0,02	0,38	-0,03	0,39	-0,02
4.38.DP4	0,34	0,37	0,03	0,36	0,02	0,37	0,03
4.39.DP4	0,27	0,35	0,08	0,37	0,10	0,35	0,08
4.47.DP3	0,45	0,41	-0,04	0,41	-0,04	0,42	-0,03
4.49.DP2	0,53	0,50	-0,03	0,50	-0,03	0,50	-0,03
4.49.DP4	0,46	0,52	0,06	0,50	0,04	0,52	0,06
5.50.DL2	0,38	0,32	-0,06	0,32	-0,06	0,33	-0,05
5.50.DL42	0,19	0,18	-0,01	0,14	-0,05	0,17	-0,02
5.51.DL2	0,34	0,31	-0,03	0,32	-0,02	0,30	-0,04

**Tabla 7.26 Valores [PTV/100] experimentales y calculados a partir de los parámetros de rugosidad (ecuaciones (4.51), (4.52) y (4.53)). 37 muestras desgastadas.**

Referencia	[PTV/100] experimental	Rp, Rk, I <sub>0</sub> , RSm	
		[PTV/100] calculado	Diferencia
1.5.DP4	0,11	0,16	0,05
2.10.DP4	0,22	0,23	0,01
2.10.DP1	0,31	0,32	0,01
2.14.DP1	0,39	0,34	-0,05
2.14.DL1	0,35	0,36	0,01
2.15.DP4	0,35	0,38	0,03
2.15.DP3	0,39	0,36	-0,03
2.15.DP2	0,49	0,39	-0,10
2.16.DL14-1	0,10	0,16	0,06
2.16.DL3-2	0,16	0,16	0,00
2.16.DL3-1	0,16	0,15	-0,01
2.16.DP1	0,20	0,20	0,00
2.17.DL15	0,16	0,15	-0,01
2.17.DL3	0,19	0,13	-0,06
2.19.DL1	0,29	0,31	0,02
2.19.DP1	0,34	0,32	-0,02
2.20.DP2	0,20	0,19	-0,01
2.22.DP4	0,09	0,15	0,06
2.8.DP3	0,13	0,18	0,05
2.8.DP2	0,22	0,21	-0,01
2.8.DP1	0,31	0,21	-0,10
3.30.DL9	0,13	0,16	0,03
3.31.DP3	0,34	0,32	-0,02
3.31.DP4	0,30	0,35	0,05
3.31.DP2	0,42	0,40	-0,02
3.32.DL9	0,13	0,17	0,04
4.35.DL9	0,34	0,33	-0,01
4.35.DL18	0,30	0,31	0,01
4.38.DP4	0,34	0,38	0,04
4.38.DP2	0,41	0,37	-0,04
4.39.DP4	0,27	0,36	0,09
4.47.DP3	0,45	0,40	-0,05
4.49.DP2	0,53	0,53	0,00
4.49.DP4	0,46	0,50	0,04
5.50.DL42	0,19	0,18	-0,01
5.50.DL2	0,38	0,30	-0,08
5.51.DL2	0,34	0,35	0,01





### **7.3 Software estimación CoF a partir de un conjunto de parámetros de rugosidad**



### 7.3.1 Introducción

Con la finalidad de estimar el coeficiente de fricción (CoF) a partir del conjunto de parámetros superficiales disponibles que se habían medido en los pavimentos seleccionados, se desarrolló un software basado en las técnicas de minería de datos.

Dichas mediciones topográficas tendrán variables de diversa tipología, por lo que a través del software se hallarán las relaciones entre variables o atributos, cuáles son más relevantes para la variable estimada y finalmente una predicción numérica del coeficiente.

La herramienta software se basa en la API del software de minería de datos y aprendizaje automático Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis). El paquete Weka se compone de un conjunto de herramientas que permiten las siguientes operaciones:

- Preprocesamiento de atributos.
- Clasificación de instancias.
- Regresión.
- Predicción numérica.
- Selección de atributos.
- Asociación de instancias.
- Visualización y comparativa de atributos e instancias.

En el software se han utilizado algoritmos de preprocesamiento de atributos, clasificadores con predicción numérica (regresión lineal y M5P) y selección de atributos óptimos (evaluaciones CFSSubset, WrapperSubset y ClassifierSubset). Este software se ha desarrollado como front-end de la API de Weka, adaptando los casos a las necesidades de modelado para estimación del CoF. Dicho software permite abrir un fichero Excel con las mediciones del coeficiente de fricción (PTV/100) y los parámetros superficiales de los pavimentos. Tras configurar qué algoritmos estimadores lanzar, efectuará llamadas simultáneas a la API de Weka, obteniendo el polinomio estimador y la estimación del CoF de los nuevos casos introducidos si los hubiere.

A continuación, se detallan los métodos de predicción y selección de atributos.

### 7.3.2 Algoritmos de clasificación con predicción numérica

#### 7.3.2.1 Regresión lineal múltiple

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables (Figura 7.11). En el caso de la regresión múltiple, el análisis de regresión lineal puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente o criterio (Y) y una o más variables llamadas independientes o predictoras ( $X_1, X_2, \dots, X_k$ ), así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos.

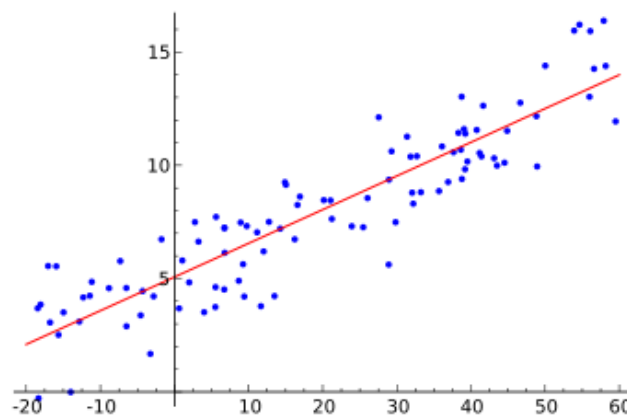


Figura 7.11 Ejemplo análisis regresión lineal.

#### 7.3.2.2 M5P

M5P aplica una regresión por tramos, creando un árbol de decisión en Y aproximando cada rama a una función de regresión independiente (Figura 7.12). Busca nubes de puntos cercanos y busca la aproximación numérica de cada nube. Presenta un proceso automático de suavizado que puede ser deshabilitado y también se puede controlar la profundidad del podado, así como la cantidad de información a la salida.

Este algoritmo hace uso de un modelo de regresión lineal conocido como árbol de modelos. Se trata de un árbol de decisión usado en predicción numérica que estima el valor de la clase de la instancia cuando se alcanza una de sus hojas. En un principio se construye usando un algoritmo inductivo de árbol de decisión.

Posteriormente cuando el árbol de modelos es usado para predecir el valor de una instancia el árbol es recorrido hacia abajo hasta llegar a una hoja, para ello se usan los valores de los atributos de la instancia que permiten tomar las decisiones de enrutado en cada nodo. La hoja contendrá un modelo lineal basado en alguno/s de los valores de los atributos de la instancia a partir de los cuales se puede obtener el valor predicho de la misma.

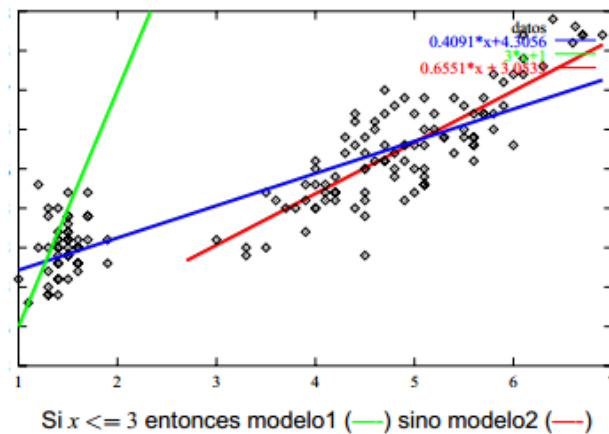


Figura 7.12 Ejemplo análisis regresión M5P.

El criterio de selección de una variable en la construcción del árbol está basado en una reducción del error esperado: reducción de la desviación/varianza en la variable objetivo:

$$\text{SDR} = \text{sd}(T) - \sum_i \frac{|T_i|}{|T|} \text{sd}(T_i) \quad (7.1)$$

SDR = Standard Deviation Reduction

### 7.3.2.3 Preselección de atributos

Los algoritmos de predicción numérica, dada la variabilidad del cálculo, pueden comportarse mejor si se efectúa un filtrado previo de los atributos seleccionados. Los atributos no relevantes para el algoritmo pueden introducir pequeñas variaciones que resultan en un mayor error de cálculo y mayor tiempo de ejecución del algoritmo. Dada esta premisa, resulta de interés efectuar una preselección de atributos.

Los algoritmos de selección de atributos se basan en la siguiente estrategia:

- 1- Crear las posibles combinaciones entre atributos.
- 2- Iterar sobre las combinaciones.
- 3- Para cada combinación seleccionada, aplicar un algoritmo que puntúe la bondad de la solución que se obtendría partiendo de ese conjunto de atributos. Este algoritmo puede ser uno de los clasificadores de predicción numérica (regresión lineal, M5P).
- 4- Devolver el conjunto de atributos que maximizan la bondad de la solución candidata.

Selección de atributos mediante CFS Subset Evaluation.

Evalúa un subconjunto de atributos considerando la habilidad predictiva individual de cada variable, así como el grado de redundancia entre ellas. Se prefieren los subconjuntos de atributos que estén altamente correlacionados con la clase y tengan baja intercorrelación.

Selección de atributos mediante Classifier Subset Evaluation.

Evalúa los subconjuntos de atributos en los datos de entrenamiento o en un conjunto de prueba independiente, utilizando un clasificador. En nuestro caso se utilizan los algoritmos Linear Regression y M5P de Weka.

Selección de atributos mediante Wrapper Subset Evaluation.

Evalúa los subconjuntos de atributos utilizando un clasificador, en nuestro caso Linear Regression o M5P. Emplea validación cruzada para estimar la exactitud del esquema de aprendizaje en cada conjunto.

Los métodos de búsqueda se aplican en la herramienta para efectuar un filtrado previo de atributos, de forma que se seleccione el más relevante. Como se ha comentado en el apartado anterior, los algoritmos de selección de atributos efectúan una búsqueda sobre el conjunto de soluciones posibles, según cierta heurística de búsqueda que incluiremos en la llamada. Se han utilizado las siguientes:

- BestFirst: algoritmo de búsqueda que, dado un grafo de soluciones, expande el nodo más prometedor, buscando la mejor solución dada una regla especificada previamente. En nuestro caso, la regla será minimizar el error de aproximación.

- Greedy-stepwise: algoritmo hill-climbing voraz. Es una técnica de búsqueda que, comenzando con una solución arbitraria (obtenida mediante algoritmo voraz), intenta encontrar una solución mejor cambiando de forma incremental un único elemento de la solución de la iteración en curso. Si el cambio produce una mejor solución, se toma esta solución como partida y se vuelve a iterar, repitiendo hasta que no se pueden encontrar soluciones mejores.
- GeneticSearch: algoritmo genético, lanza cruzamientos y mutaciones entre poblaciones de soluciones potenciales durante un número determinado de generaciones. En cada generación se valora la bondad de cada solución, en nuestro caso el menor error o mayor correlación.

Tras aplicar las diferentes técnicas de análisis al conjunto de muestras seleccionadas se comprobó que los algoritmos con los que se obtenía un mejor coeficiente de correlación eran:

- Algoritmo de predicción numérica: Árbol de regresión M5P con selección Classifier Subset.
- Algoritmo de búsqueda para filtrado: GeneticSearch.

### **7.3.3 Resultados**

Con estos algoritmos se obtuvieron los resultados que se muestran en las Figuras 7.13 a 7.16.

<p><b>Options:</b>          -E "weka.attributeSelection.ClassifierSubsetEval -B weka.classifiers.trees.M5P -T -H "          " -- -M 5" -S "weka.attributeSelection.GeneticSearch -Z 30 -G 30 -C 0.6 -M 0.033 -R 20 -S 1"          W weka.classifiers.trees.M5P -- -M 5</p>																																
<p><b>Search Method:</b>          Genetic search          Start set: no attributes          Population size: 30          Number of generations: 30          Probability of crossover: 0.6          Probability of mutation: 0.033          Report frequency: 20          Random number seed: 1</p>																																
<p><b>Attribute Subset Evaluator (supervised, Class (numeric): 1 PTV/100):</b>          Classifier Subset Evaluator          Learning scheme: weka.classifiers.trees.M5P          Scheme options: -M 5.0          Hold out/test set: Training data          Accuracy estimation: MAE</p>																																
<p><b>Selected attributes:</b> 2,3,4,5,6,7,8: 7          Rq, I<sub>0</sub>, Δa, Rz<sub>ISO</sub>, Rp, Rz, R<sub>Pc</sub></p>																																
<p><b>Classifier Model</b>          M5 pruned model tree:          (using smoothed linear models)  <b>Rz &lt;= 8.373 :</b>            Rz &lt;= 5.716 : LM1 (13)            Rz &gt; 5.716 : LM2 (9)  <b>Rz &gt; 8.373 : LM3 (30)</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>LM num: 1</th> <th>LM num: 2</th> <th>LM num: 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PTV/100=</td> <td>PTV/100=</td> <td>PTV/100=</td> </tr> <tr> <td>-0.0557 * Rq</td> <td>-0.0557 * Rq</td> <td>-0.0458 * Rq</td> </tr> <tr> <td>+ 1.1619 * I<sub>0</sub></td> <td>+ 1.4968 * I<sub>0</sub></td> <td>+ 2.9761 * I<sub>0</sub></td> </tr> <tr> <td>+ 1.0759 * Δa</td> <td>+ 1.0759 * Δa</td> <td>+ 0.8847 * Δa</td> </tr> <tr> <td>- 0.0125 * Rz<sub>ISO</sub></td> <td>- 0.0125 * Rz<sub>ISO</sub></td> <td>- 0.0275 * Rz<sub>ISO</sub></td> </tr> <tr> <td>+ 0.0259 * Rp</td> <td>+ 0.0259 * Rp</td> <td>+ 0.0378 * Rp</td> </tr> <tr> <td>+ 0.0076 * Rz</td> <td>+ 0.0076 * Rz</td> <td>+ 0.0063 * Rz</td> </tr> <tr> <td>- 0.0002 * R<sub>Pc</sub></td> <td>- 0.0002 * R<sub>Pc</sub></td> <td>- 0.0001 * R<sub>Pc</sub></td> </tr> <tr> <td>-10.244</td> <td>-1.338</td> <td>-27.246</td> </tr> </tbody> </table>			LM num: 1	LM num: 2	LM num: 3	PTV/100=	PTV/100=	PTV/100=	-0.0557 * Rq	-0.0557 * Rq	-0.0458 * Rq	+ 1.1619 * I <sub>0</sub>	+ 1.4968 * I <sub>0</sub>	+ 2.9761 * I <sub>0</sub>	+ 1.0759 * Δa	+ 1.0759 * Δa	+ 0.8847 * Δa	- 0.0125 * Rz <sub>ISO</sub>	- 0.0125 * Rz <sub>ISO</sub>	- 0.0275 * Rz <sub>ISO</sub>	+ 0.0259 * Rp	+ 0.0259 * Rp	+ 0.0378 * Rp	+ 0.0076 * Rz	+ 0.0076 * Rz	+ 0.0063 * Rz	- 0.0002 * R <sub>Pc</sub>	- 0.0002 * R <sub>Pc</sub>	- 0.0001 * R <sub>Pc</sub>	-10.244	-1.338	-27.246
LM num: 1	LM num: 2	LM num: 3																														
PTV/100=	PTV/100=	PTV/100=																														
-0.0557 * Rq	-0.0557 * Rq	-0.0458 * Rq																														
+ 1.1619 * I <sub>0</sub>	+ 1.4968 * I <sub>0</sub>	+ 2.9761 * I <sub>0</sub>																														
+ 1.0759 * Δa	+ 1.0759 * Δa	+ 0.8847 * Δa																														
- 0.0125 * Rz <sub>ISO</sub>	- 0.0125 * Rz <sub>ISO</sub>	- 0.0275 * Rz <sub>ISO</sub>																														
+ 0.0259 * Rp	+ 0.0259 * Rp	+ 0.0378 * Rp																														
+ 0.0076 * Rz	+ 0.0076 * Rz	+ 0.0063 * Rz																														
- 0.0002 * R <sub>Pc</sub>	- 0.0002 * R <sub>Pc</sub>	- 0.0001 * R <sub>Pc</sub>																														
-10.244	-1.338	-27.246																														
<p><b>Error on training data:</b></p> <table> <tr> <td>Correlation coefficient</td> <td>0.9434</td> </tr> <tr> <td>Mean absolute error</td> <td>0.045</td> </tr> <tr> <td>Root mean squared error</td> <td>0.0555</td> </tr> <tr> <td>Relative absolute error</td> <td>30.1781 %</td> </tr> <tr> <td>Root relative squared error</td> <td>33.258 %</td> </tr> <tr> <td>Total Number of Instances</td> <td>52</td> </tr> </table>			Correlation coefficient	0.9434	Mean absolute error	0.045	Root mean squared error	0.0555	Relative absolute error	30.1781 %	Root relative squared error	33.258 %	Total Number of Instances	52																		
Correlation coefficient	0.9434																															
Mean absolute error	0.045																															
Root mean squared error	0.0555																															
Relative absolute error	30.1781 %																															
Root relative squared error	33.258 %																															
Total Number of Instances	52																															

Figura 7.13 Resultados conjunto 52 muestras originales.



<b>Options:</b> -E "weka.attributeSelection.ClassifierSubsetEval -B weka.classifiers.trees.M5P -T -H " " -- -M 5" -S "weka.attributeSelection.GeneticSearch -Z 30 -G 30 -C 0.6 -M 0.033 -R 20 -S 1" W weka.classifiers.trees.M5P -- -M 5	
<b>Search Method:</b> Genetic search Start set: no attributes Population size: 30 Number of generations: 30 Probability of crossover: 0.6 Probability of mutation: 0.033 Report frequency: 20 Random number seed: 1	
<b>Attribute Subset Evaluator (supervised, Class (numeric): 1 PTV/100):</b> Classifier Subset Evaluator Learning scheme: weka.classifiers.trees.M5P Scheme options: -M 5.0 Hold out/test set: Training data Accuracy estimation: MAE	
<b>Selected attributes:</b> 2,3,4,5: 4 Ra, Δq, Rp, RSm	
<b>Classifier Model</b> M5 pruned model tree: (using smoothed linear models)  <b>LM num: 1</b> <b>PTV/100=</b> <b>-0.2936 * Ra</b> <b>+ 2.9161 * Δq</b> <b>+ 0.0508 * Rp</b> <b>+ 4.9311 * RSm</b> <b>- 0.3443</b>	
<b>Error on training data:</b>	
Correlation coefficient	0.9415
Mean absolute error	0.0439
Root mean squared error	0.0567
Relative absolute error	28.7318 %
Root relative squared error	33.6882 %
Total Number of Instances	22

**Figura 7.14** Resultados conjunto 22 muestras originales grupos 1 y 2.

<p><b>Options:</b>          -E "weka.attributeSelection.ClassifierSubsetEval -B weka.classifiers.trees.M5P -T -H "          " -- -M 5" -S "weka.attributeSelection.GeneticSearch -Z 30 -G 30 -C 0.6 -M 0.033 -R 20 -S 1"          W weka.classifiers.trees.M5P -- -M 5</p>													
<p><b>Search Method:</b>          Genetic search          Start set: no attributes          Population size: 30          Number of generations: 30          Probability of crossover: 0.6          Probability of mutation: 0.033          Report frequency: 20          Random number seed: 1</p>													
<p><b>Attribute Subset Evaluator (supervised, Class (numeric): 1 PTV/100):</b>          Classifier Subset Evaluator          Learning scheme: weka.classifiers.trees.M5P          Scheme options: -M 5.0          Hold out/test set: Training data          Accuracy estimation: MAE</p>													
<p><b>Selected attributes:</b> 2,3,4,5: 4          Ra, Δa, Rz<sub>ISO</sub>, Rp</p>													
<p><b>Classifier Model</b>          M5 pruned model tree:          (using smoothed linear models)</p> <p><b>LM num: 1</b>  <b>PTV/100=</b>    -0.055 * Ra                            + 2.4826 * Δa                            - 0.0302 * Rz<sub>ISO</sub>                            + 0.0528 * Rp                            + 0.0151</p>													
<p><b>Error on training data:</b></p> <table> <tr> <td>Correlation coefficient</td> <td>0.9473</td> </tr> <tr> <td>Mean absolute error</td> <td>0.0432</td> </tr> <tr> <td>Root mean squared error</td> <td>0.0531</td> </tr> <tr> <td>Relative absolute error</td> <td>29.4491 %</td> </tr> <tr> <td>Root relative squared error</td> <td>32.0275 %</td> </tr> <tr> <td>Total Number of Instances</td> <td>30</td> </tr> </table>		Correlation coefficient	0.9473	Mean absolute error	0.0432	Root mean squared error	0.0531	Relative absolute error	29.4491 %	Root relative squared error	32.0275 %	Total Number of Instances	30
Correlation coefficient	0.9473												
Mean absolute error	0.0432												
Root mean squared error	0.0531												
Relative absolute error	29.4491 %												
Root relative squared error	32.0275 %												
Total Number of Instances	30												

**Figura 7.15 Resultados conjunto 30 muestras originales grupos 3 a 5.**

<b>Options:</b> -E "weka.attributeSelection.ClassifierSubsetEval -B weka.classifiers.trees.M5P -T -H " " -- -M 5" -S "weka.attributeSelection.GeneticSearch -Z 30 -G 30 -C 0.6 -M 0.033 -R 20 -S 1 " W weka.classifiers.trees.M5P -- -M 5		
<b>Search Method:</b> Genetic search Start set: no attributes Population size: 30 Number of generations: 30 Probability of crossover: 0.6 Probability of mutation: 0.033 Report frequency: 20 Random number seed: 1		
<b>Attribute Subset Evaluator (supervised, Class (numeric): 1 PTV/100):</b> Classifier Subset Evaluator Learning scheme: weka.classifiers.trees.M5P Scheme options: -M 5.0 Hold out/test set: Training data Accuracy estimation: MAE		
<b>Selected attributes:</b> 2,3,4,5: 4 $I_0, R_p, R_{Sm}, R_k$		
<b>Classifier Model</b> M5 pruned model tree: (using smoothed linear models) <b>Rp &lt;= 4.452 :</b>   <b>Rp &lt;= 2.608 : LM1 (11)</b>   <b>Rp &gt; 2.608 : LM2 (5)</b> <b>Rp &gt; 4.452 : LM3 (21)</b>		
<b>LM num: 1</b> PTV/100=	<b>LM num: 2</b> PTV/100=	<b>LM num: 3</b> PTV/100=
8.6568 * $I_0$ + 0.0169 * $R_p$ + 0.6096 * $R_{Sm}$ - 0.0188 * $R_k$ -85.777	9.638 * $I_0$ + 0.0169 * $R_p$ + 0.6096 * $R_{Sm}$ - 0.0188 * $R_k$ -95.511	4.6383 * $I_0$ + 0.026 * $R_p$ + 0.525 * $R_{Sm}$ - 0.0162 * $R_k$ -44.846
<b>Error on training data:</b> Correlation coefficient 0.9301 Mean absolute error 0.0345 Root mean squared error 0.0435 Relative absolute error 34.004 % Root relative squared error 36.8588 % Total Number of Instances 37		

**Figura 7.16 Resultados conjunto 37 muestras desgastadas.**



## **8.Nomenclatura**



- **API:** "Application Programming Interface" Interfaz de programación de aplicaciones.
- **A<sub>1</sub>:** Parámetro estadístico de la curva de Abbot-Firestone relacionado con los picos del perfil. (Ver Apartado 3.2.2).
- **A<sub>2</sub>:** Parámetro estadístico de la curva de Abbot-Firestone relacionado con los picos del perfil. (Ver Apartado 3.2.2).
- **α:** Ángulo crítico de deslizamiento (°).
- **CoF:** Coeficiente de fricción.
- **D:** Número de picos que componen un perfil, no normalizado (picos) (Ver Apartado 3.2.2).
- **DCOF:** Coeficiente de fricción dinámico.
- **[DCOF]<sub>(57)(A)</sub>:** Coeficiente de fricción dinámico tribómetro lineal dinámico UNE-EN ISO 13287 con caucho IRHD 57 y agua.
- **[DCOF]<sub>(57)(A+SLS)</sub>:** Coeficiente de fricción dinámico tribómetro lineal dinámico UNE-EN ISO 13287 con caucho IRHD 57 y agua+SLS.
- **[DCOF]<sub>(57)(aceite)</sub>:** Coeficiente de fricción dinámico tribómetro lineal dinámico UNE-EN ISO 13287 con caucho IRHD 57 y aceite.
- **[DCOF-BOT]<sub>(95)(A+SLS)</sub>:** Coeficiente de fricción dinámico tribómetro BOT-3000 con caucho SBR Shore A 95 y agua+SLS.
- **Δa:** Pendiente media del perfil filtrado respecto de la línea media (rad) (Ver Apartado 3.2.2).
- **Δq:** Media cuadrática de la pendiente del perfil filtrado respecto de la línea media (rad) (Ver Apartado 3.2.2).
- **F<sub>N</sub>:** Fuerza normal (N).
- **F<sub>Nm</sub>:** Fuerza normal máxima (N).
- **F<sub>R</sub>:** Fuerza de rozamiento (N).
- **ID:** Intensidad de desgaste.
- **I<sub>m</sub>:** Longitud de evaluación. También se denomina L<sub>m</sub>. (μm) (Ver Apartado 3.2.2).
- **I<sub>m0</sub>:** Longitud real del perfil medida sobre el perfil de rugosidad nivelado respecto de una línea recta media (μm) (Ver Apartado 3.2.2).
- **I<sub>0</sub>:** Cociente entre la longitud obtenida siguiendo el trazo dibujado por la línea del perfil (I<sub>m0</sub>) y la longitud de evaluación (I<sub>m</sub>). (Ver Apartado 3.2.2).

- **$\lambda_a$** : Ondulación media del perfil, que tiene en cuenta la ondulación y la distancia pico-valle ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$\lambda_c$** : “Cut-off” Filtro de corte rugosímetro (mm) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$\lambda_q$** : Media cuadrática de la ondulación media del perfil ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$M_{r1}$** : Ratio de picos respecto de la zona central del perfil  $R_k$ . (%) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$M_{r2}$** : Ratio de valles respecto de la zona central del perfil  $R_k$ . (%) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$\mu$** : Coeficiente de fricción.
- **$\mu_d$** : Coeficiente de fricción dinámico.
- **$\mu_e$** : Coeficiente de fricción estático.
- **$N$** : N° de personas tránsito peatonal real.
- **$NE$** : N° de etapas de desgaste equipo laboratorio.
- **$P_p$** : parámetro primario correspondiente a la altura máxima del perfil sobre la línea media ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 1.3.4).
- **$P_t'$** : Distancia pico-valle máxima del perfil calculada a partir del perfil sin filtrar ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$P_k$** : Valor no filtrado de la rugosidad central o del ‘núcleo’ correspondiente a la profundidad del perfil de la zona portante de la carga de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 1.3.4).
- **$PTV$** : “Pendulum Test Value”. Valor ensayo péndulo.
- **$[PTV/100]_{(57)(A)}$** : Valor ensayo péndulo con caucho IRHD 57 y agua.
- **$[PTV/100]_{(57)(A+SLS)}$** : Valor ensayo péndulo con caucho IRHD 57 y agua+SLS.
- **$[PTV/100]_{(57)(aceite)}$** : Valor ensayo péndulo con caucho IRHD 57 y aceite.
- **$[PTV/100]_{(96)(A)}$** : Valor ensayo péndulo con caucho IRHD 96 y agua.
- **$R_a$** : Media aritmética de los valores absolutos de la distancia de los puntos que componen el perfil a una línea media ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_c$** : Media aritmética de la distancia vertical pico-valle de cada una de las cinco fracciones en las que se ha dividido el perfil ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_d$** : Resistencia al deslizamiento.



- **$R_k$** : Zona central del perfil, eliminando picos y valles. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_p$** : Distancia del pico más elevado del perfil respecto de la línea media ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{pc}$** : Densidad de picos del perfil normalizada respecto de la longitud del perfil evaluada y calculada para 10 mm de longitud (picos/cm) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{pk}$** : Zona de picos del perfil, eliminando los más agudos. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{pk}^*$** : Zona de picos más agudos del perfil. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{pm}$** : Distancia media de los picos que componen el perfil respecto de la línea media, tras la subdivisión del perfil en cinco secciones ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_q$** : Valor obtenido de la desviación media geométrica de los puntos del perfil de rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{sk}$** : Coeficiente de Skewness del perfil. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{sm}$** : Media aritmética de la distancia entre dos puntos consecutivos que cruzan la línea media del perfil (mm/pico) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_t$** : Distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo del perfil de rugosidad filtrado sobre la longitud evaluada ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{vk}$** : Zona de valles del perfil eliminando los más profundos. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{vk}^*$** : Zona de valles más profundos del perfil. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_z$** : Máxima distancia vertical pico-valle de las cinco fracciones en las que se ha dividido el perfil ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$R_{ziso}$** : Media aritmética de la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo de cada una de las cinco fracciones en la que se ha dividido el perfil evaluado ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$S_a$** : Desviación media aritmética de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$S_{al}$** : Longitud de caída de la función de autocorrelación (mm) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$S_{bi}$** : Índice de superficie portante. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$SBR$** : "Styrene-Butadiene Rubber" Caucho estireno-butadieno.
- **$S_{ci}$** : Índice de retención de líquidos. (Ver Apartado 3.2.2).
- **$S_{dr}$** : Relación de área superficial desarrollada (%) (Ver Apartado 3.2.2).
- **$S_{ds}$** : Densidad de máximos de la superficie (picos/ $\text{mm}^2$ ) (Ver Apartado 3.2.2).

- **SΔq:** *Media cuadrática de la pendiente de la superficie ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sfd:** *Dimensión fractal de la superficie. (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sk:** *Parámetro característico de la curva de material obtenido a partir de la recta de mínima pendiente indicativo del centro de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sku:** *Curtosis. (Ver Apartado 3.2.2).*
- **SLS:** *“Sodium Lauryl Sulfate” Lauril sulfato sódico.*
- **Sp:** *Distancia de pico máxima de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **SPc:** *Número de máximos de la superficie (picos/ $\text{mm}^2$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Spk:** *Parámetro característico de la curva de material obtenido a partir de la recta de mínima pendiente indicativo de los picos de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sq:** *Desviación media cuadrática de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sr<sub>1</sub>:** *Relación de material en un extremo del centro de la rugosidad Sk (%) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sr<sub>2</sub>:** *Relación de material en un extremo del centro de la rugosidad Sk (%) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Ssc:** *Media aritmética de la curvatura de los máximos ( $1/\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Ssk:** *Alabeo de la superficie. (Ver Apartado 3.2.2).*
- **St:** *Distancia total pico-valle ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Std:** *Dirección de la textura ( $^\circ$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Str:** *Relación de aspecto de textura de la superficie. (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sv:** *Distancia de valle máxima de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Svi:** *Índice de retención de fluido en los valles. (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Svk:** *Parámetro característico de la curva de material obtenido a partir de la recta de mínima pendiente indicativo de los valles de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **Sz:** *Altura de diez puntos de la superficie ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).*
- **tan  $\alpha$ :** *Tangente ángulo crítico de deslizamiento.*

- **$[\tan \alpha]_{(\text{pie descalzo})(A+SLS)}$** : Tangente ángulo crítico de deslizamiento norma DIN 51097 (pie descalzo y agua+SLS).
- **$[\tan \alpha]_{(57)(A)}$** : Tangente ángulo crítico de deslizamiento con caucho IRHD 57 y agua.
- **$[\tan \alpha]_{(57)(A+SLS)}$** : Tangente ángulo crítico de deslizamiento con caucho IRHD 57 y agua+SLS.
- **$[\tan \alpha]_{(57)(\text{aceite})}$** : Tangente ángulo crítico de deslizamiento con caucho IRHD 57 y aceite.
- **Wt'**: Profundidad de la ondulación, calculada a partir de la altura máxima de ondulación del perfil ( $\mu\text{m}$ ) (Ver Apartado 3.2.2).
- **4S (Four S) rubber**: "Standard Simulated Shoe Sole rubber" Caucho simulación suela de zapato estándar.



## **9. Bibliografía**



- 
- [1] ADA. *Americans with Disabilities Act. United States Department of Justice. Civil Rights.*
- [2] ANSI A137.1:2017 Clause 9.6. *American National Specification for Ceramic Tile. Procedure for Dynamic Coefficient of Friction (DCOF) Testing.*
- [3] ANSI A326.3:2017. *American National Standard Test Method for Measuring Dynamic Coefficient of Friction of Hard Flooring Surface Materials.*
- [4] AS 4586:2013. *Slip Resistance Classification of new pedestrian surface materials.*
- [5] ASTM C 1028: 2007. *Standard test method for determining the static coefficient of friction of ceramic tile and other like surfaces by the horizontal dynamometer pull-meter method.*
- [6] Bowman, R. *Progress on the slip resistance front. Tile Today Aug.-Oct., 40-44, 1997.*
- [7] Bowman, R. *Evaluación de la contribución relativa de las baldosas cerámicas a los accidentes de resbalamiento y caída. Qualicer 1998. V Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, Vol. II, p.161-172, 1998.*
- [8] Bowman, R. *Progreso discreto en el desarrollo de una norma internacional de resistencia al deslizamiento. Qualicer 2004: VIII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón: Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2004. Volumen III, pp. GII155-GII178.*
- [9] Bowman, R. (2010). *Slip resistance testing. Zones of uncertainty. 11th World Congress on Ceramic Tile Quality.*
- [10] Bowman, R., Silva, G., Engels, M., Astrachan, E. (2102) *Slip resistance –Planning for a green future. 12th World Congress on Ceramic Tile Quality.*
- [11] Bowman, R. (2016). *Can we develop slip resistance metrics that ensure appropriate tile selection? 14th World Congress on Ceramic Tile Quality.*
- [12] Bowman, R. (2018). *The competitive advantages arising from accelerated conditioning of ceramic tiles. 15th World Congress on Ceramic Tile Quality.*
- [13] BS 7976-2:2001+A1:2013. *Pendulum testers. Part 2. Method of operation.*
- [14] CEN/TS 16165:2016. *Determination of slip resistance of pedestrian surfaces. Methods of evaluation.*
- [15] Centro Tecnológico del Mármol, 2008, *Campaña de ensayos interlaboratorio de piedra natural. Resistencia al deslizamiento. Rev. 5.*
- [16] Centro Tecnológico del Mármol, 2010, *Campaña de ensayos interlaboratorio de piedra natural. Resistencia al deslizamiento. Rev. 5.*

- [17] Centro Tecnológico del Mármol, 2014, *Campaña de ensayos interlaboratorio de piedra natural. Resistencia al deslizamiento*. Rev. 1.
- [18] Chang, W.R., 1998. *The effect of surface roughness on the dynamic friction between Neolite and quarry tile*. *Safety Science* 29 (1998) 89-105.
- [19] Chang, W.R., 1999. *The effect of surface roughness on the measurement of slip resistance*. *International Journal of Industrial Ergonomics* 24 (1999) 299-313.
- [20] Chang, W.R., Matz, S., 2000. *The effect of filtering processes on surface roughness parameters and their correlation with the measured friction, Part I: quarry tiles*. *Safety Science* 36 (2000) 19-33.
- [21] Chang, W.R., 2000. *The effect of filtering processes on surface roughness parameters and their correlation with the measured friction, Part II: porcelain tiles*. *Safety Science* 36 (2000) 35-47.
- [22] Chang, W.R., 2001. *The effect of surface roughness and contaminant on the dynamic friction of porcelain tile*. *Applied Ergonomics* 32 (2), 173–184.
- [23] Chang, W.R. 2002. *The effects of surface roughness and contaminants on the dynamic friction between porcelain tile and vulcanized rubber*. *Safety Science* 40, 577–591.
- [24] Chang, W.R. 2004. *Preferred surface microscopic geometric features on floors as potential interventions for slip and fall accidents on liquid contaminated surfaces*. *Journal of Safety Research* 35 (2004) 71-79.
- [25] Chang, W.R., Matz, S., Grönqvist, R., Hirvonen, M., 2010. *Linear regression models of floor surface parameters on friction between Neolite and quarry tiles*. *Applied ergonomics* 41 (1), 27-33.
- [26] Chang, W.R, Lesch, M.F., Chang C.C., Matz, S. (2015). "Contribution of gait parameters and available coefficient of friction to perceptions of slipperiness". *Gait & Posture*, 41, 288–290.
- [27] Chen, C.C., Chen, Z.X., Chang, C.L., Lin, F.L. *The slip-resistance effect evaluation of floor roughness under different liquid viscosity*. *Procedia Manufacturing* 3 (2015) 5007-5013.
- [28] CPD 89/106. DIRECTIVA 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción.
- [29] DA DB-SUA/3: Documento de apoyo al Documento Básico SUA. Seguridad de Utilización y Accesibilidad. Resbaladicidad de suelos. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo.
- [30] DB SUA: Documento Básico SUA. Seguridad de Utilización y Accesibilidad. Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación. Secretaría de Estado



- 
- de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo.
- [31] Decreto Ministeriale 14 giugno 1989, nº 236. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 23 giugno 1989.
- [32] Derler, S., Kausch, F., Huber, R., 2005 Systematic patterns and random fluctuations in time series of coefficients of friction measured on floor surfaces. *Safety Science* 43 (2005) 751–770.
- [33] DGVV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. Information 207-006. Bodenbeläge für nassbelastete Barfußbereiche. Juni 2015.
- [34] DIN 51097: 1992. Testing of floor coverings. Determination of the anti-slip properties. Wet loaded workrooms and fields of activities with slip danger. Walking method - Ramp test.
- [35] DIN 51130: 2014. Testing of floor coverings. Determination of the anti-slip property. Workrooms and fields of activities with slip danger. Walking method - Ramp test.
- [36] Engels, M.; Tenaglia, A., Tari, G. El proyecto europeo de investigación colectiva SlipSTD: desarrollo de superficies normalizadas resistentes al resbalamiento. En: *Qualicer 2008: X Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico*. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2008, pp. Pos137-Pos139.
- [37] Engels, M.; Tenaglia, A., Tari, G. Clasificación de recubrimientos de suelos duros en función de su riesgo de resbalamiento: un nuevo enfoque para los recubrimientos cerámicos de suelo. *Qualicer 2010: XI Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico*. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2010.
- [38] Engels, M. (2016). New practice-oriented testing possibilities regarding the durability of slip resistance and cleanability 14th World Congress on Ceramic Tile Quality.
- [39] Estadística de Accidentes de Trabajo. Ministerio de Empleo y Seguridad Social.
- [40] FLOORSHOE PID-560520-2009-6 "Estudio integral de los mecanismos de fricción asociados a diferentes condiciones de tránsito peatonal". Ministerio de Ciencia e Innovación. LIA- Proyectos de I+D+I - Programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada.
- [41] Grönqvist, R., Roine, J., Korhonen, E., Rahikainen, A., 1990. Slip resistance versus surface roughness of deck and other underfoot surfaces in ships. *Journal of Occupational Accidents* 13, 291–302
- [42] GUV-R 181 (bisher GUV 26.18) Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz. GUV-Regel Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr. April 1994 (Aktualisierte Fassung Oktober 2003).

- [43] Hans H.J., 1999. *European round robin study of the slip resistance of surfaces with the pendulum friction tester. Final Report. TCKI Report 09/698Ebk.HvW.*
- [44] Harris, G.W., Shaw, S.R., 1988. *Slip resistance of floors: users' opinions, tortus instrument readings and roughness measurement. Journal of Occupational Accidents 9, 287–298.*
- [45] Hauptmann, J.; Wiedemann, G. *Laser microstructuring of polished floor tiles. En: XIPENG XU (Ed.) Machining of natural stone materials. Uetikon-Zuerich: TTP, 2003, pp, 262-267.*
- [46] HSE (Health Safety Executive), 1999. *Preventing slips in the food and drink industries – a technical update on floor specifications. HSE information sheet. Food Sheet No. 22. HSE Books, Sudbury, Suffolk, UK. <http://www.hse.gov.uk/pubns/Internet/slips01.pdf>*
- [47] HSE Health Safety Executive. *The assessment of pedestrian slip risk 2004.*
- [48] ISO 48: 2010 *Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of hardness (hardness between 10 IRHD and 100 IRHD).*
- [49] ISO/DIS 10545-17: 1998. *Ceramic tiles - part 17: Determination of coefficient of friction.*
- [50] ISO 7619-1:2010: *Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of indentation hardness -- Part 1: Durometer method (Shore hardness).*
- [51] Kim, I.J., Hsiao, H., Simeonov, P. *Functional levels of floor surface roughness for the prevention of slips and falls: Clean-and-dry and soapsuds-covered wet surfaces. Applied Ergonomics 44 (2013) 58-64.*
- [52] Kuisma, R, Kymäläinen, H.-R., Sjöberg, A.-M. *Determination of cleanability and wearing of plastic flooring surfaces in field and laboratory conditions. Construction and Building Materials 23 (2009) 1093–1101.*
- [53] Leclercq, S. *The prevention of slipping accidents: a review and discussion of work related to the methodology of measuring slip resistance. Safety Science 31, 95-125, 1999.*
- [54] Li, K.W., Chang, W.R., Leamon, T.B., Chen, C.J. *Floor slipperiness measurement: friction coefficient, roughness of floors, and subjective perception under spillage conditions. Safety Science 42 (2004) 547-565.*
- [55] Llanes-Parreño, M.D. *Pavimentos porcelánicos para utilización en espacios urbanos. Serie Street. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 48(2), 113-118, 2009.*
- [56] Marchal, P., Jacques, M., Sigari, A. *INRS / CSTB NS 333 Note scientifique et technique. Comparison of measurement methods of the friction coefficient of floor coverings. 2015.*
- [57] M/119 "Floorings" *Mandate to CEN and CENELEC concerning the execution of standardisation work for harmonised standards on Floorings. 1997.*

- 
- [58] NLT-175: 1988. Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo del TRRL.
- [59] Powers, C. M.; Brault, J. R., Stefanou, M. A., Tsai, Y. J., Flynn, J., Siegmund, G. P., Eng, P. Assessment of Walkway Tribometer Readings in Evaluating Slip Resistance: A Gait-Based Approach. *J Forensic Sci*, March 2007, Vol. 52, No. 2 doi:10.1111/j.1556-4029.2007.00386.x.
- [60] prEN 13552. Baldosas cerámicas. Determinación del coeficiente de fricción.
- [61] prEN 15763-1. Determination of slip resistance of pedestrian surfaces-method of evaluation-Part 1: reference method.
- [62] prEN 15763-2. Determination of slip resistance of pedestrian surfaces-method of evaluation-Part 2.
- [63] Ricotti, R., Delucchi, M., Cerisola, G. A comparison of results from portable and laboratory floor slipperiness testers. *International Journal of Industrial Ergonomics* 39 (2009) 353–357.
- [64] Rincón, R.J.; Benet, M.P.; Cabezón, C.; Pedra, J.M.; Carda, J.B.; Martínez, J. Desarrollo de esmaltes vitrocerámicos con propiedades antideslizantes para baldosas de gres porcelánico. En: *Qualicer 2008: X Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico 3*. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2008, pp. P.BC331-P.BC344.
- [65] RPC 305/2011. Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.
- [66] SA HB/198:2014 Handbook Guide to the specification and testing of slip resistance of pedestrian surfaces.
- [67] SAE J 300:1999, Engine Oil Viscosity Classification. SAE International (Society of Automotive Engineers).
- [68] Sebald, J., System oriented concept for testing and assessment of the slip resistance of safety, protective and occupational footwear, 2009, Pro Business, Berlin.
- [69] Silva, G. Muñoz, A. Felíu, C. Rodríguez, C. Pascual, J.A. Soler, C. Análisis comparativo de métodos de evaluación de la resistencia al deslizamiento. VII QUALICER. Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón 3-6 marzo, 2002. ISBN: 84-95931-07-9 .
- [70] Silva, G. Muñoz, A. Felíu, C. Vicent, M. Barberá, J. Soler, C. Nuevo método para la evaluación acelerada de la durabilidad frente a la abrasión de pavimentos cerámicos. VIII QUALICER. Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón 7-10 marzo, 2004. ISBN: 84-95931-08-7.

- [71] Silva, G. Muñoz, A. Monterde, B. Quereda, F. *Análisis comparativo de los requisitos de resistencia al deslizamiento en locales de uso público. IX QUALICER. Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico Castellón 12-15 febrero, 2006. ISBN: 84-95931-17-6 O.C.*
- [72] Silva, G. Muñoz, A. Felú, C. Monzó, M. Barberá, J. Soler, C. *Propuesta de un método normalizado para la determinación de la durabilidad frente al tránsito peatonal de pavimentos. IX QUALICER. Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón 12-15 febrero, 2006. ISBN: 84-95931-17-6 O.C.*
- [73] Silva, G., Beltrán, A., Muñoz, A., Escrig, A., Llobell, C., Sanchís, M., Lillo, G. *Combinaciones optimizadas de pavimento cerámico y calzado para entornos laborales. XV QUALICER Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón 12 y 13 febrero, 2018. ISBN: 978-84-95931-39-9.*
- [74] *Slip Resistance Proficiency Testing. Pendulum Friction Tester. Safe Environments Pty Ltd 2018.*
- [75] *SlipSTD PAS. SlipSTD Publicly Available Specification: Classification of hard floor coverings according to their contribution to reduce the risk of pedestrian slipping, 2009 (www.slipstd.com).*
- [76] Strautins, C.J. *La resistencia al resbalamiento sostenible: una oportunidad para la innovación. En: Qualicer 2008: X Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2008, pp. P.BC 381-P.BC395.*
- [77] Tari, G., Engels, M., 'The SlipSTD European Collective Research Project: Development of slip resistant standard surfaces', *Qualicer 2008, X Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico, Castellón España, Vol. 3, pp. Pos-135 – Pos-137.*
- [78] Tenaglia, A. *Il quadro normativo europeo sulla scivolosità'. En: Seminario Cersaie 2008. Bolonia: Cersaie, 2008.*
- [79] Terjék, A., Dudás, A. *Ceramic Floor Slipperiness Classification. A new approach for assessing slip resistance of ceramic tiles. Construction and Building Materials 164 (2018) 809-819.*
- [80] *UKSRG Guidelines (2011). The Assessment of Floor Slip Resistance. United Kingdom Slip Resistance Group.*
- [81] *ULTRAGRIP FP7-SME-2010-1 262413 "Design Tools for high grip surfaces" Comisión Europea. Capacities - VII Programa Marco.*
- [82] *UNE 41901 EX: 2017. Superficies para tránsito peatonal. Determinación de la resistencia al deslizamiento por el método del péndulo de fricción. Ensayo en húmedo.*
- [83] *UNE 41902 EX: 2017. Superficies para tránsito peatonal. Determinación de la resistencia al deslizamiento por el método del péndulo de fricción. Ensayo en seco.*

- [84] *UNE 138001 IN: 2008. Resistencia al desgaste por tránsito peatonal de pavimentos cerámicos. Recomendaciones para la selección en función del uso previsto.*
- [85] *UNE-EN 1341:2002. Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.*
- [86] *UNE-EN 1342:2003. Adoquines de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.*
- [87] *UNE-EN 13036-4: 2004. Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 4: método para medir la resistencia al deslizamiento/derrape de una superficie. Ensayo del péndulo.*
- [88] *UNE-EN 14231:2004. Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia al deslizamiento mediante el péndulo de fricción.*
- [89] *UNE-EN ISO 13287:2008. Equipos de protección individual. Calzado. Método de ensayo para la determinación de la resistencia al deslizamiento.*
- [90] *UNE-EN ISO 13565-2:1998 Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil; superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad. Parte 2: Caracterización de alturas mediante la curva de porcentaje de material (Curva de Abbott).*
- [91] *UNE-ENV 12633: 2003. Método de la determinación del valor de la resistencia al deslizamiento/resbalamiento de los pavimentos pulidos y sin pulir.*
- [92] *Wetzel, C., Windhövel, U., Mewes, D., Ceylan, O. Slipping on pedestrian surfaces: methods for measuring and evaluating the slip resistance. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2015. Vol. 21, No. 3, 256–267.*
- [93] *XP P 05-010 :2004 Revêtements de sol. Détermination de la résistance à la glissance au moyen du plan incliné.*





