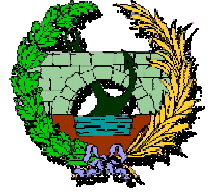




UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos
Canales y Puertos**



TESIS DOCTORAL



**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PAVIMENTOS
INDUSTRIALES DESDE EL PUNTO DE VISTA
DEL ACABADO SUPERFICIAL**



Autor

ÁLVARO GARCÍA HERNÁNDEZ

Directores

DANIEL CASTRO FRESNO

JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Santander, Noviembre 2007

7. MODELO DE EVOLUCIÓN DEL DESGASTE POR ABRASIÓN EN UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN

La abrasión en un pavimento de hormigón es causada por el movimiento continuado de las ruedas de los vehículos sobre la superficie de la losa. Tomando como base el modelo propuesto por Horszczaruk [83], en este Capítulo se desarrolla un modelo teórico que expresa la pérdida de volumen de material como una función del trabajo realizado por la rueda y del tiempo transcurrido, así como de la composición del material abrasado. Para la comprobación experimental del modelo se utilizaron muestras de un pavimento experimental acabado con partículas de corindón. Finalmente, aplicando este modelo se podrá predecir la vida útil de un pavimento con tan sólo conocer la composición del hormigón y la intensidad y características del tráfico sobre el mismo.

Entre el pavimento y los vehículos en movimiento ocurren fenómenos de abrasión por impacto o por el deslizamiento debido a las fuerzas de fricción generadas entre las ruedas y la superficie. El resultado de esto es una merma en las características estéticas del pavimento, así como una reducción en el espesor de la losa, lo que puede a su vez derivar en un incremento de las tensiones que reducirá la vida de servicio del pavimento. Por otra parte, el fenómeno de desgaste del pavimento puede aumentar también su resistencia al deslizamiento [84].

Se ha demostrado que la resistencia a la abrasión del hormigón depende principalmente de variables como su resistencia a compresión, las características de los áridos o el tipo de acabado y de endurecedores superficiales empleados. Diferentes autores afirman que la resistencia a la abrasión se ve incrementada con un aumento de la resistencia a compresión [76, 107] y que esta característica es el factor más importante para la resistencia a la abrasión del hormigón [107]. Naik et al. [132] indican que la relación entre la resistencia a compresión del hormigón y la resistencia a la abrasión es lineal. Sin embargo, Atis [19], sugiere que esta relación era hiperbólica.

Por otra parte, Kettle y Sadegzadeh [99], aseveran que en el caso de un pavimento de hormigón, la resistencia a compresión o el tipo de curado no son muy relevantes a la hora de estudiar la resistencia a la abrasión, siempre y cuando exista algún tipo de acabado superficial como por ejemplo el espolvoreado de algún tipo de endurecedor cementoso sobre el hormigón fresco antes del proceso de pulido posterior, ya que estos tienen una gran influencia en la resistencia a la abrasión [133, 199] mejorándola considerablemente cuando están correctamente aplicados. Estos autores llegaron a obtener resultados [99] en los que apenas hay diferencia en cuanto a la abrasión se refiere entre losas ensayadas a los 28 días y losas ensayadas a los 6 meses después de haber sido terminadas.

De este modo, para controlar la resistencia a la abrasión, no será suficiente con especificar una resistencia adecuada del hormigón. Sadegzadeh et al. [150] estudian la relación entre la microestructura superficial y la resistencia a la abrasión del hormigón. Los resultados indican que diferentes técnicas de acabado superficial producen distintas estructuras de poro y durezas en una zona de unos pocos milímetros y que la resistencia a la abrasión se ve afectada en gran medida por la estructura de poro en la zona superficial. De este modo, la pasta de cemento en la zona superficial (aproximadamente 1 – 2 mm) del pavimento puede hacerse más fuerte y densa tras el fratasado, ya que mediante este proceso se consigue que las partículas se encuentren más próximas unas de otras, logrando que las partículas de cemento hidratado se “conecten” muy densamente con cada partícula de árido. Por otra parte, Omeregie et al. [58] encontraron que en el caso de abrasión del hormigón por efecto de la acción del agua, el pavimento pulido a máquina era el que mejor resistencia presentaba.

Donde se requiere una alta resistencia a la abrasión, se suelen aplicar tratamientos superficiales, como la incorporación de áridos minerales o metálicos, tanto a la superficie durante las operaciones de acabado o como una segunda capa encima del pavimento. El uso de estos materiales da lugar a suelos altamente resistentes a la abrasión y al impacto, que son las características típicamente exigidas en los almacenes y plantas de manufacturación.

El grado en que un suelo de hormigón, donde se usa un endurecedor, puede resistir la abrasión variará de una manera considerable en función de qué tipo de endurecedor se emplee. Los más comúnmente utilizados son cuarzo, hierro y corindón y deben colocarse como define la ACI 302. 1R-04 sección 8.6. [10]. El problema de los endurecedores de hormigón es que, una vez que se han desgastado, la resistencia a abrasión vuelve a ser la misma que en un hormigón sin tratar.

La mayor parte de ensayos de resistencia a la abrasión de hormigón consisten en medir los efectos de la destrucción por chorro de arena seca o el crecimiento del desgaste por medio de la fricción [186, 188]. Existen también, otros tipos de ensayos que tratan de simular las condiciones reales a los que estará sometido el material de estudio [16]. Por ejemplo, mezclando agua con arena. En el análisis llevado a cabo se ha utilizado el método que se ha considerado que mejor se aproxima al efecto que tendrá una rueda sobre el pavimento,

consistente en un cilindro de acero que gira a una velocidad determinada sobre una muestra de hormigón entre los cuales cae un chorro de abrasivo.

De este modo, el objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo que sirva como primera aproximación para futuras investigaciones acerca de la vida útil de un pavimento, proporcionando al interesado una base teórica de la que partir para conocer la evolución de las características superficiales del pavimento en función de las cargas de tráfico actuantes.

7.1. METODOLOGÍA Y MATERIALES USADOS

7.1.1. Ensayo de abrasión

Los ensayos de resistencia a la abrasión se han practicado de acuerdo a la norma UNE-EN 1338 [186], con el aparato mostrado en la Figura 5.12 (a). Consiste en una rueda de acero de 200 mm de diámetro y 70 mm de anchura, que gira a 75 r.p.m. y que se encuentra en contacto con la muestra estudiada. La fuerza entre la rueda y la muestra viene dada por el peso de una plomada que cuelga libremente. Durante el proceso del ensayo, el abrasivo se dejaba caer entre la rueda y la muestra. La velocidad de descarga de abrasivo es de 2.5 l/min y la duración total del ensayo era de 2 minutos. Se colocan dos trasductores en el carrito (Figura 5.12 (b)), de tal manera que se puede medir sus movimientos en el tiempo, que se correspondían con la profundidad de penetración en el pavimento. La señal analógica proveniente de los comparadores se convierte a señal numérica usando una tarjeta rápida de adquisición de datos, cuya frecuencia es de 1 kHz.

$$Y = k \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (7.1)$$

Donde k es un coeficiente determinado experimentalmente, que relaciona voltaje con deformación y U es el voltaje obtenido a partir de la deformación en el tiempo t_2-t_1 .

7.1.2. Materiales

Para el desarrollo del modelo se han utilizado las muestras de pavimento acabado con corindón descritas en el Capítulo 5. La dosificación de áridos para el hormigón de la losa se ajustó por: (i) el método de los porcentajes retenidos, de tal forma que todos las partículas se encontraran retenidas dentro del huso granulométrico indicado y por (ii) el

método de la distribución de partículas, con el propósito de obtener una mezcla apropiada para la colocación manual del pavimento [79]. La distribución combinada de los agregados usados en la losa, se muestra en la Tabla 3.3.

El hormigón fue suministrado por una planta de hormigonado conteniendo 340 kg/m^3 de cemento CEM IV/A 32.5 SR y una relación agua/cemento de 0,48. El tamaño máximo de árido era de 20 mm y se empleó un aditivo fluidificante polifuncional, de manera que su consistencia era fluida. Para la dosificación de los acabados superficiales se utilizaron 50 kg de arena de cuarzo y sílice, 25 kg de corindón y 35 kg de cemento Pórtland y la forma de colocación fue la descrita en el Capítulo 5.

El cemento puzolánico CEM IV/A (V) 32.5 N/SR usado presentaba una composición en peso de un 84 % de clínker, 14 % de ceniza volante, 1 % de yeso y un 1 % de filler. La superficie específica Blaine era de $368.5 \text{ m}^2/\text{kg}$. El tiempo de fraguado de la pasta de cemento tal y como se describe en la norma EN 196-3, con relación agua/cemento de 0.29 para obtener “consistencia normal” y densidad de la pasta 2845 kg/m^3 es de 191 minutos [189] (Capítulo 2). La resistencia a compresión del mortero hecho con este cemento a 28 días de curado es de 46.5 MPa.

7.1.3. Procedimiento experimental

La trabajabilidad del hormigón medida con el método del cono de Abrams era plástica. Después de ser colocada, la mezcla fue primero vibrada, después flotada, y por último, pulida. Cuando el pavimento se encontraba completamente acabado, se cubría con una membrana plástica para evitar la pérdida de humedad. Transcurridas 24 horas, se cortaron las muestras del pavimento y se introdujeron en la cámara de curado a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 98 % de humedad durante 28 días. Cumplida esta edad, las probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 6.3 cm de altura se secaron hasta peso constante y sujetas a abrasión durante dos minutos. La sustancia abrasiva elegida sobre alúmina blanca fundida. Se probaron seis plumadas diferentes, con pesos de 2, 6.4, 10, 14 y 18.4 kg. Para cada peso se practicaron cinco ensayos.

7.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 7.1 se muestran los cambios en el volumen abrasado (v_a) como función de la fuerza ejercida por la plomada ($v_a=f(F)$) a lo largo del tiempo. En esta Figura, donde puede observarse claramente cómo cambia la velocidad de abrasión en función del peso de la plomada, los decrementos de volumen son la media de los resultados de cinco especímenes obtenidos de la misma losa y curados de la misma manera. Por otra parte, los datos de profundidad de penetración obtenidos estaban sometidos a un ruido motivado por las vibraciones del motor del aparato de ensayo. En la Figura 7.1 puede verse cómo este ruido es inversamente proporcional al peso de la plomada

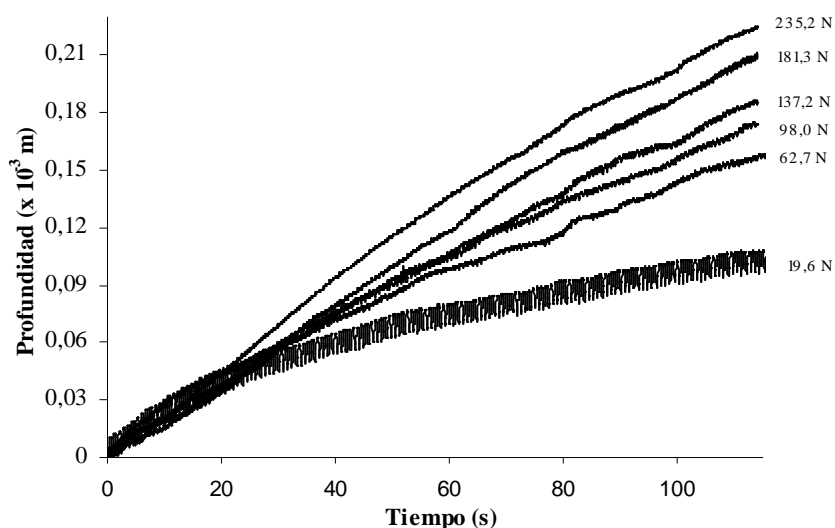


Figura 7.1: Cambios de profundidad en el tiempo con diferentes pesos.

Por otra parte, en la Figura 7.2 se muestra un ejemplo particular de variación de la profundidad de penetración con el tiempo. En esta figura puede apreciarse a primera vista la existencia de dos etapas diferenciadas en la variación de la abrasión del hormigón. La primera de las cuales (hasta aproximadamente 25 segundos de tiempo y $0,05 \times 10^{-3}$ m de penetración) tiene una velocidad mucho mayor que la segunda.

El ensayo utilizado permitía establecer las condiciones de abrasión. A partir de la profundidad de penetración de la huella en el hormigón medida con los transductores, se averiguó el volumen de hormigón abrasado. Por otra parte, a partir del peso, teniendo en cuenta que la velocidad de rotación de la rueda es constante en el tiempo, podría medirse a partir de la curva de regresión la variación de volumen-tiempo, el coeficiente de

rozamiento del hormigón con el acero de la rueda. Los resultados obtenidos en estos ensayos demostraron que la velocidad de abrasión de un pavimento de hormigón es proporcional a la fuerza entre la rueda y el material abrasado y a la velocidad de giro de la rueda.

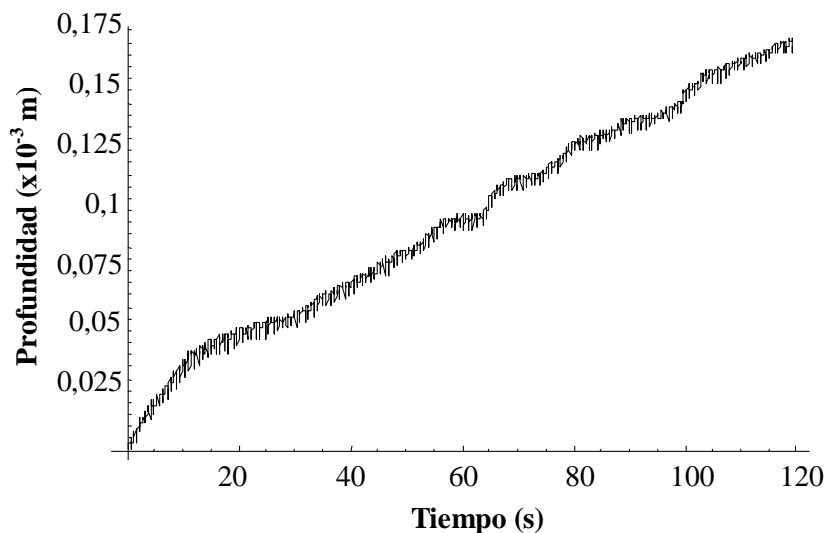


Figura 7.2: Ejemplo de cambios de penetración variando en el tiempo (14 kg).

7.3. MODELO TEÓRICO

El modelo teórico para caracterizar la abrasión del hormigón se ha planteado a partir del desarrollado por Horszczaruk [83], para desgaste por abrasión del hormigón en estructuras hidráulicas, modificándolo de tal manera que se puede adaptar al ensayo de resistencia a la abrasión utilizado. En primer lugar, el hormigón se considera como una sustancia uniforme construida de moléculas particulares, que se mantienen unidas gracias a que la energía aplicada sobre ellas es menor que la energía de activación (E_a) necesaria para romper sus interacciones. Cuando el material se ensaya a abrasión, se aplica energía hasta que un cierto nivel (E_a) es alcanzado, con lo que las fuerzas de interacción entre partículas desaparecen y surge una zona abrasada. La ecuación de Maxwell-Boltzmann describe la probabilidad ($f(E)$) de que una partícula tenga una energía E en un instante dado en un sistema cuya energía media es E_m , proporcionada por los componentes del hormigón y su grado de hidratación:

$$f(E) = C_1 \exp\left(-\frac{E}{E_m}\right) \quad (7.2)$$

Parte de la energía aplicada por la rueda sobre el hormigón se disipa en el sistema (E_d) y parte se usa para incrementar la energía interna de las partículas de hormigón (E_i). Horszczaruk indica que esta parte se verá parcialmente disipada. Para dejar patente este efecto, este autor introduce un coeficiente de disipación (a), que describe la resistencia a la abrasión del hormigón, y cuando la suma de estos dos procesos sobrepasa la energía de activación del hormigón, éste será abrasado:

$$E_d + aE_i \geq E_a \quad (7.3)$$

Si el sistema se considera compuesto de $(N+1)$ partículas y se pregunta por la probabilidad de que la molécula extra tenga una energía entre E_i y E_i+dE_i cuando se sabe que la energía total del sistema es E_m , la probabilidad será proporcional al número de estados para los que E_i se encuentra entre E_i y E_i+dE_i y por lo tanto, la energía en el resto del hormigón se encontrará entre E_i y $E_m-E_i-dE_i$. De este modo, escribiendo $f(E_i)dE_i$ para la probabilidad de que la energía del volumen abrasado extra se encuentre en este rango, se obtendrá la siguiente fórmula:

$$\frac{dv}{v} = C_1 \exp(-aE_i)dE_i \quad (7.4)$$

En el ensayo utilizado, la potencia del motor será proporcional a la fuerza hecha por la plomada entre la muestra y la rueda y a la velocidad tangencial (Figura 7.3). Por otra parte, como la velocidad angular de la rueda será constante, la fuerza entre la rueda y la muestra será igual a la resistencia al deslizamiento del hormigón:

$$P = F_f \cdot V = \mu F \cdot \omega R \quad (7.5)$$

Y como la energía E_i , aplicada al sistema por la rueda será aproximadamente constante en el tiempo y proporcional a la potencia de la máquina de ensayo (P) la variación de la energía en el tiempo será:

$$E_i \approx (\mu F \cdot wR) \cdot t \rightarrow dE_i = (\mu F \cdot wR) dt = C_2 dt \quad (7.6)$$

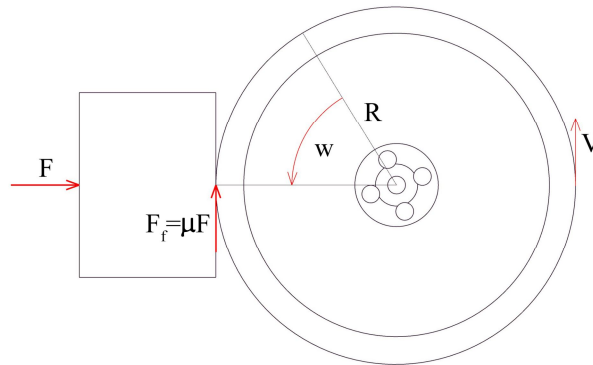


Figura 7.3: Esquema de distribución de fuerzas.

Llamando v_a al volumen de hormigón abrasado y v_0 al volumen inicial de la muestra estudiada, (7.4) quedará como sigue:

$$\frac{dv_a}{v_0} = C_3 \exp(-aPt) dt \quad (7.7)$$

Por otra parte, la abrasión del pavimento de hormigón dependerá de la resistencia a abrasión de los diferentes endurecedores superficiales añadidos a la capa superior y de la calidad del mortero. Por lo tanto, podrá considerarse que existen diferentes valores de a en el pavimento, dependiendo cada uno de ellos de las propiedades locales del hormigón:

$$\begin{aligned} \frac{dv_a}{v_0 C_3 dt} &= a_1 p_1 \exp(-a_1 Pt) + a_2 p_2 \exp(-a_2 Pt) \\ &+ \dots + a_n p_n \exp(-a_n Pt) = \sum_{i=1}^n a_i p_i \exp(-a_i Pt) \end{aligned} \quad (7.8)$$

La variación de la resistencia a abrasión del hormigón con el tiempo viene dada por:

$$\frac{dv_a}{v_0 dt} = C_3 \int_0^{\infty} f(a) a \exp(-aPt) da \quad (7.9)$$

Y como la abrasión en el hormigón dependerá de todos sus componentes, en este modelo propone el uso de la distribución Gamma para determinar la variable $f(a)$, de manera

similar a la solución propuesta por Horszczaruk [83], aunque transformada para el caso del aparato de ensayo utilizado:

$$\frac{dv_a}{v_0 dt} = \frac{C_3 \lambda^\alpha}{(\alpha - 1)!} \int_0^\infty a^\alpha \exp[-a(Pt + \lambda)] da = \frac{\alpha C_3}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{Pt + \lambda} \right)^{\alpha+1} \quad (7.10)$$

Como se muestra en la Figura 7.2, el volumen total de hormigón abrasado será la suma de dos partes claramente diferenciadas, con lo que haciendo la hipótesis de que existe continuidad entre las dos curvas se tendrá que:

$$\frac{v_a}{v_0} = \frac{\Delta v_{a1}}{v_0} + \frac{\Delta v_{a2}}{v_0} \quad (7.11)$$

Llamando t_1 al instante de tiempo en el que la curva pierde continuidad e integrando (7.11) desde 0 hasta t_1 , es decir se obtendrá la fórmula que describe el incremento de hormigón abrasado en el tiempo durante la primera etapa:

$$\frac{v_{a1}}{v_0} = \frac{\alpha_1 C_3}{\lambda_1} \int_0^{t_1} \left(\frac{\lambda_1}{Pt + \lambda_1} \right)^{\alpha_1+1} dt = 1 - \left(\frac{\lambda_1}{Pt_1 + \lambda_1} \right)^{\alpha_1} \quad (7.12)$$

Por otra parte, integrando (7.12) desde t_1 hasta t , se obtendrá una fórmula que describe el incremento volumétrico de pavimento abrasado a lo largo del tiempo durante la segunda etapa:

$$\frac{v_{a2}}{v_0} = \frac{\alpha_2 C_3}{\lambda_1} \int_{t_1}^t \left(\frac{\lambda_2}{Pt + \lambda_2} \right)^{\alpha_2+1} dt = \left(\frac{\lambda_2}{Pt_1 + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} - \left(\frac{\lambda_2}{Pt + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} \quad (7.13)$$

Combinando (7.12) y (7.13) con (7.11), se encontrará la solución para el volumen total de hormigón desgastado durante la segunda etapa:

$$\frac{v_a}{v_0} = 1 - \left(\frac{\lambda_1}{Pt_1 + \lambda_1} \right)^{\alpha_1} + \left(\frac{\lambda_2}{Pt_1 + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} - \left(\frac{\lambda_2}{Pt + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} = B - \left(\frac{\lambda_2}{Pt + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} \quad (7.14)$$

Cuando $t \rightarrow \infty$, se habrá transmitido suficiente energía a la muestra, incrementándose el volumen abrasado de la muestra hasta una asíntota en la que $v_a = v_0$, con lo que B debería ser aproximadamente 1:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_a}{v_0} = B - \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\lambda_2}{Pt + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} = B \rightarrow \frac{v_a}{v_0} = B \approx 1 \quad (\text{para } \alpha_2 > 0) \quad (7.15)$$

Combinando (7.5) y (7.14) se obtendrá la siguiente ecuación, que muestra la dependencia entre el peso de la plomada y el volumen abrasado de hormigón, que es la fórmula de la superficie de abrasión del hormigón representada en la Figura 7.13:

$$\frac{v_a}{v_0} = 1 - \left(\frac{\lambda}{(\mu F \cdot wR)t + \lambda} \right)^{\alpha} \quad (7.16)$$

Por otra parte, como muestra Horszczaruk, el valor el parámetro a vendrá dado por la fórmula:

$$a = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{1}{P} \quad (7.17)$$

Que sustituyendo en (7.16):

$$\frac{v_a}{v_0} = 1 - \left(\frac{\lambda}{Pt + \lambda} \right)^{a\lambda P} \quad (7.18)$$

Con lo que a y λ son los parámetros de forma de esta ecuación, indicadores de la resistencia a abrasión del material. De este modo, para $\lambda \rightarrow \infty$:

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{v_a}{v_0} = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\lambda}{Pt + \lambda} \right)^{a\lambda P} = 1 - \exp(-aP^2 t) \quad (7.19)$$

Y para $\lambda \rightarrow 0$

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{v_a}{v_0} = 1 - \lim_{t \rightarrow 0} \left(\frac{\lambda}{Pt + \lambda} \right)^{a\lambda P} = 0 \quad (7.20)$$

De la misma forma, en el caso en que $a \rightarrow \infty$, $v_a \rightarrow \infty$ y en el caso en que $a \rightarrow 0$, $v_a \rightarrow 0$; es decir, cuanto mayores sean estos parámetros, menor será la resistencia del material. Así, cuando $\lambda_1, a_1 \geq \lambda_2, a_2 \cup F, t \geq 0$, se cumplirá que:

$$\frac{v_a}{v_0}(\lambda_1, a_1 \cup F, t) \geq \frac{v_a}{v_0}(\lambda_2, a_2 \cup F, t) \quad (7.21)$$

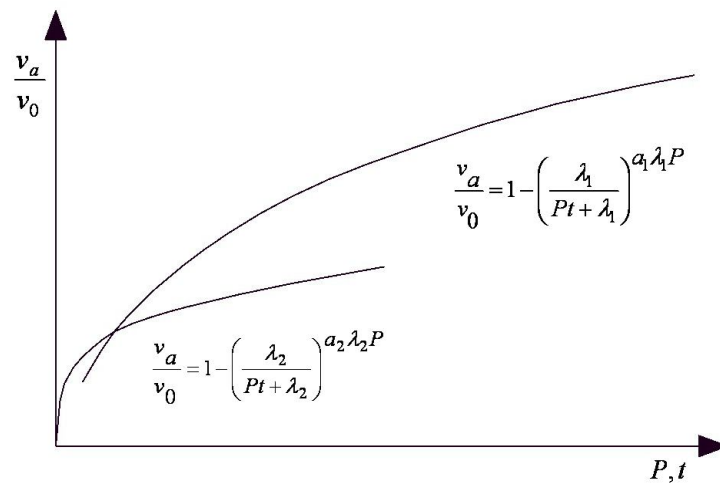


Figura 7.4: Cambios de volumen en el tiempo con diferentes pesos.

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos mostrados en la Figura 7.1, se han transformado las profundidades de penetración obtenidas de los transductores a volumen abrasado de la siguiente manera:

$$v_a = A \left[(R - y) \sqrt{(2R - y)y} + R^2 \text{ArcTan} \left(\frac{\sqrt{(2R - y)y}}{R - y} \right) \right] \quad (7.22)$$

Donde A es la anchura de la rueda de acero, R es el radio de la misma e y cuantifica su penetración en el hormigón.

En la Figura 7.5 se muestra la variación del volumen abrasado con el tiempo, obtenida de la media de cinco ensayos, para una fuerza F constante de 235 N. En esta figura se observa

cómo existen dos comportamientos en la variación de la profundidad abrasada de hormigón con el tiempo. La misma crece rápidamente en los primeros instantes hasta una profundidad de penetración de aproximadamente $3.5 \cdot 10^{-5}$ m. Esto es debido a la existencia de una zona superficial de mortero muy densa por el efecto del pulido. En la Figura 7.6 se muestra una imagen al microscopio de la superficie del pavimento estudiado. En ella puede observarse la existencia de una capa semitransparente (rallada por efecto del pulido) debajo de la cual se aprecian las partículas de cuarzo y corindón usadas como endurecedores superficiales. Esta capa es la que provoca el brillo del pavimento.

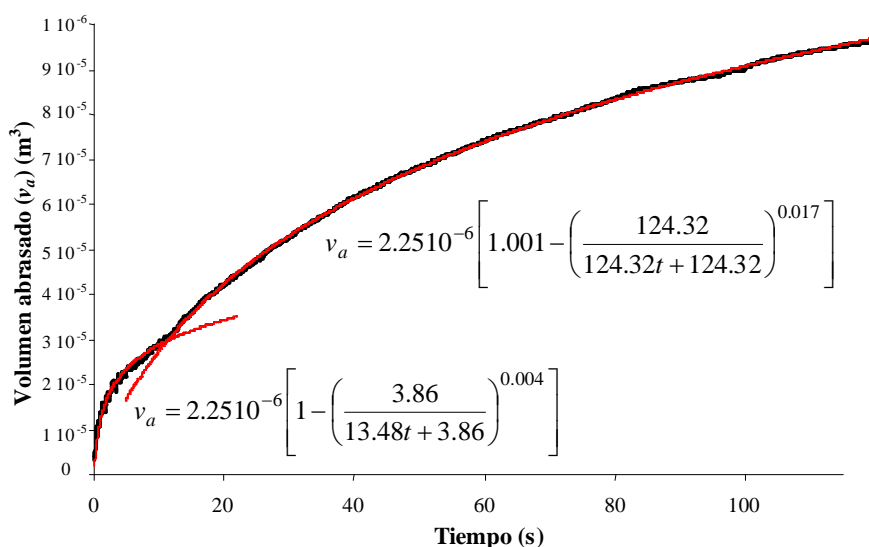


Figura 7.5: Cambio de volumen abrasado en el tiempo para una fuerza F de 235,2 N.

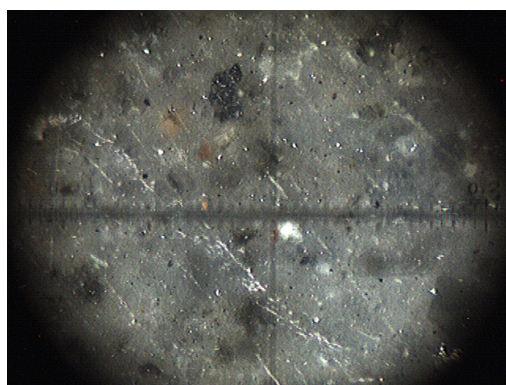


Figura 7.6: Vista al microscopio (200 aumentos) de la superficie del pavimento estudiado.

En la Figura 7.7 se presenta el papel de probabilidad normal de las profundidades de penetración en la intersección de las dos curvas (Figura 7.5) para todos los ejemplos estudiados (ANEXO VIII). En esta figura, después de aplicar el criterio de Chauvenet a los datos, se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson en la línea recta de 0.976 y un valor de p mayor de 0.25, con lo que cabe suponer que el valor obtenido en la intersección

de las dos curvas es independiente de la fuerza aplicada entre la probeta y la rueda y por lo tanto es un parámetro intrínseco del material estudiado. Los coeficientes de confianza del 5% y del 95% son de $9.9 \cdot 10^{-6}$ y de $5.8 \cdot 10^{-5}$ m respectivamente y el valor medio de penetración es de $3.5 \cdot 10^{-5}$ m.

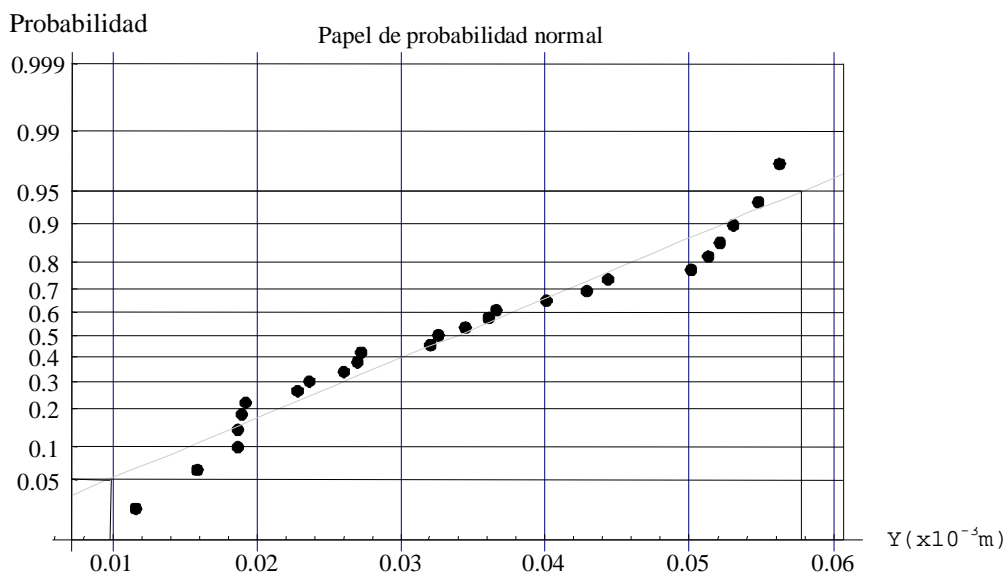


Figura 7.7: Papel de probabilidad normal de las profundidades de abrasión a las que las curvas se intersecan.

En la Figura 7.8, se muestra la variación de volumen abrasado en el tiempo con diferentes pesos de la plomada. En esta figura, puede observarse cómo se produce una disminución de la pendiente de las curvas; es decir, de la velocidad de abrasión en los casos en que la fuerza ejercida por la plomada es menor. En la Tabla 7.1 se detallan los parámetros de regresión de las curvas representadas en esta figura. A partir de estos datos puede deducirse cómo los parámetros α y λ determinarán la velocidad de abrasión del hormigón, que dependerá de factores como las características del ensayo o la resistencia del material. Como comprobación de la validez de la regresión obtenida, se ha representado en un gráfico de probabilidad normal el parámetro v_0 con el fin de comprobar la existencia de una asíntota única entre todos los valores obtenidos. De este modo, en la Figura 7.9 (a) se muestra la linealidad de los valores representados en el papel de probabilidad normal, con valor p mayor que 0,25 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.953; los coeficientes de confianza del 5 y del 95% obtenidos son de $6.78 \cdot 10^{-4}$ y $2.31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ y el valor medio es de $1.49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, con lo que se confirma la validez del modelo al encontrarse un punto común entre todos los ensayos realizados, independiente del peso de la plomada empleado. Por último, en la Figura 7.9 (b) se han representado los valores de λ en un papel de probabilidad normal, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson de 0.994 y

un valor p mayor de 0.25, con lo que, con la precaución de los pocos datos tomados, puede afirmarse que el valor de λ obtenido es de 227.01 N.m y que la dispersión se corresponde con el error provocado por la heterogeneidad del material y por las imperfecciones en las medidas inherentes al método.

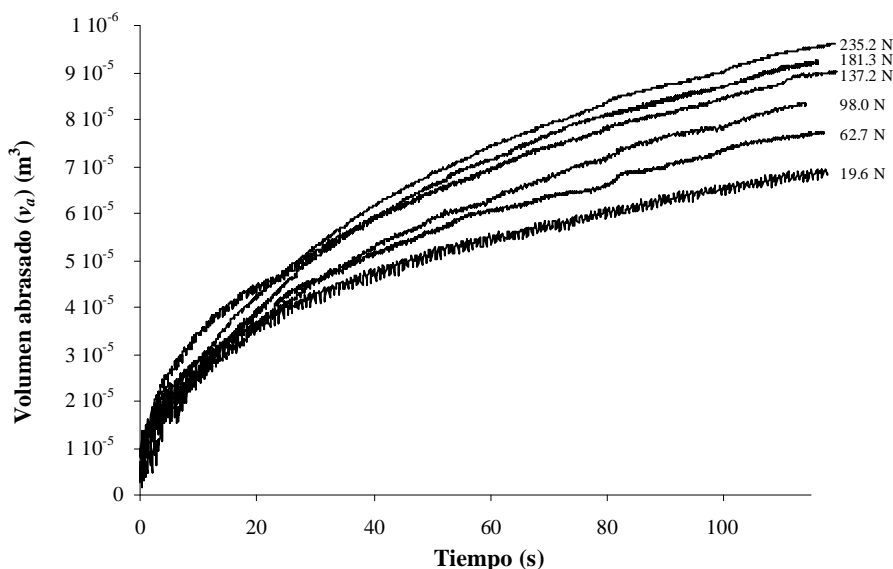


Figura 7.8: Cambios de volumen en el tiempo con diferentes pesos.

Fuerza entre el hormigón y la rueda		B	α	λ	P	v_o	Intersección entre las dos curvas		
							t (s)	v_a	Penetración (mm)
19.6 N	C. I	1	0.010	1.46	2.25	1.04E+06	17.09	3,43E+04	0,030
	C. S	1.02	0.026	49.12	2.61				
62.72 N	C. I	1	0.012	19.41	7.66	1.72E+06	23.25	4,05E+04	0,042
	C. S	1.010	0.019	195.54	7.62				
98.0 N	C. I	1	0.006	2.93	11.59	1.13E+06	12.15	2,78E+04	0,020
	C. S	1.006	0.033	249.98	11.55				
137.2 N	C. I	1	0.010	17.46	16.46	1.41E+06	22.21	4,54E+04	0,053
	C. S	1.012	0.028	405.23	18.61				
182.3 N	C. I	1	0.006	10.35	20.27	1.36E+06	10.09	2,39E+04	0,015
	C. S	0.996	0.028	163.81	21.07				
235.2 N	C. I	1	0.004	9.25	32.35	2.25E+06	11.35	2,98E+04	0,023
	C. S	1.001	0.017	298.37	32.16				
C.I. :	Curva inferior								
C.S. :	Curva superior								

Tabla 7.1: Parámetros de regresión de las curvas de la Figura 7.8.

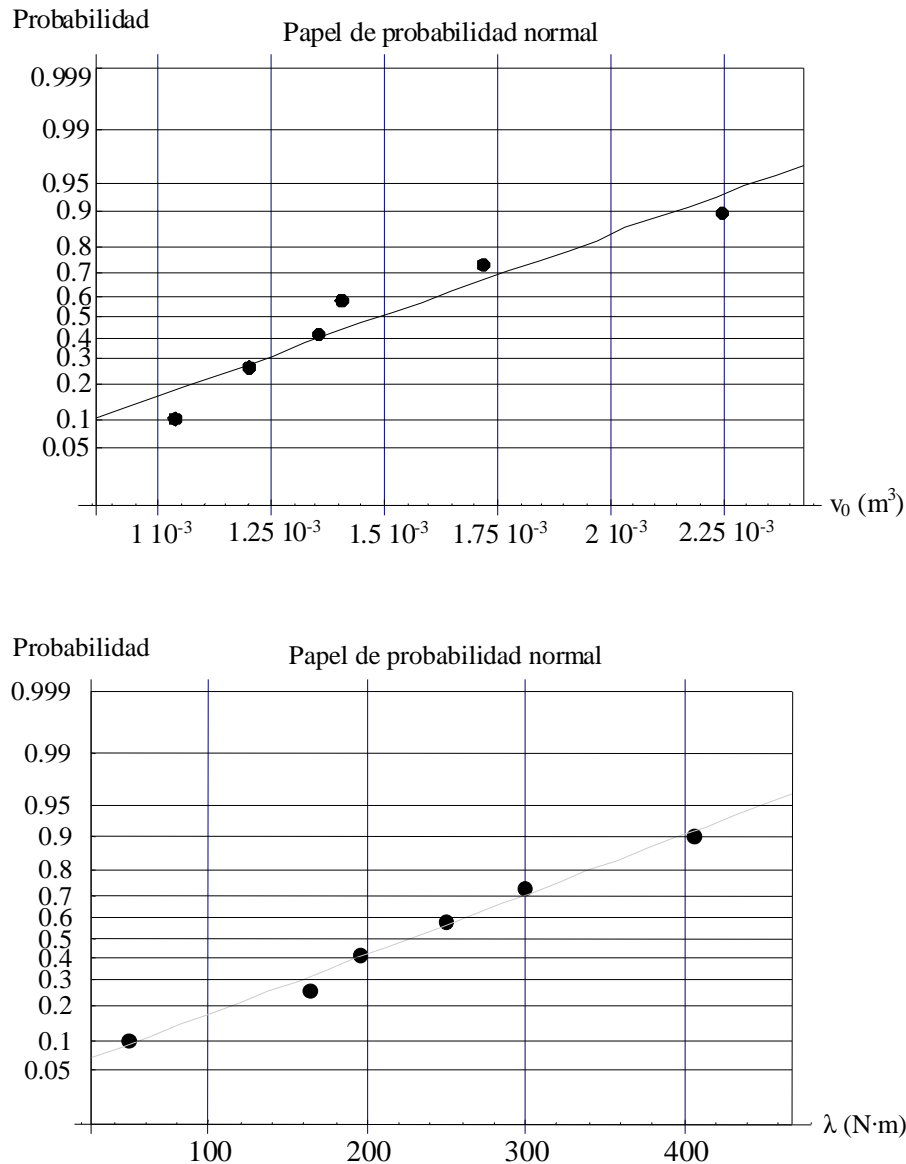


Figura 7.9: Papel de probabilidad normal de los parámetros de la ecuación (7.18). (a) Papel de probabilidad normal del parámetro v_0 . (b) Papel de probabilidad normal del parámetro λ .

La ecuación (7.18) se ha aplicado, también, a los volúmenes abrasados registrados en un determinado instante, variando la fuerza (F) por medio de cambios en el peso de la plomada. Como se muestra en la Figura 7.10, existe una buena correlación entre el modelo teórico y los datos experimentales obtenidos durante el período de estudio. Este ejemplo representa la variación de volumen abrasado durante noventa segundos de abrasión en muestras del pavimento estudiado con diferentes pesos de plomada. Después de aplicar el criterio de Chauvenet a los datos, el coeficiente de correlación de Pearson, en este caso es

de 0.991, y el intervalo de confianza del 95% para el error de profundidad de penetración fue de cerca del 15%. En el caso de los ejemplos estudiados, el coeficiente de correlación fue siempre mejor que 0.97. Además, para todos los tiempos estudiados, hay una probabilidad de que el 95% tengan un intervalo de confianza del error de penetración mejor que el 26%.

Una de las mejores pruebas de la validación de un modelo es la normalidad de sus errores. Así, en la Figura 7.11 se presenta la distribución del porcentaje de error en un gráfico de probabilidad normal. En este caso, el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.99 y el valor p es superior a 0.25. Como era de esperar, el gráfico de probabilidad normal es casi lineal, lo que confirma la hipótesis de normalidad. En todos los ejemplos, la distribución de errores fue normal.

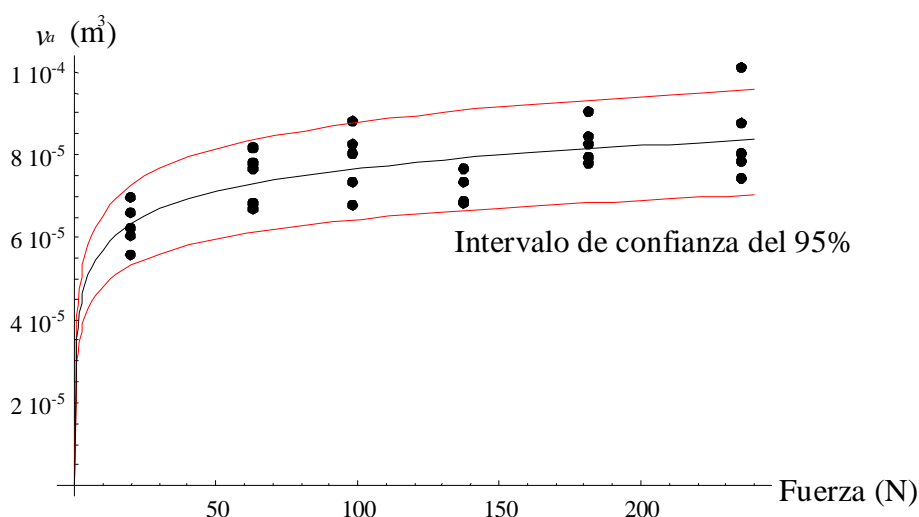


Figura 7.10: Ejemplo de evolución del cambio de volumen con uno de los pesos de la plomada estudiados y sus intervalos de confianza.

En la Figura 7.12, se muestran los cambios en el volumen abrasado (v_a) como una función de la fuerza ejercida por la plomada ($v_a=f(F)$) en diferentes instantes de tiempo. En esta figura, los decrementos de volumen son la media de los resultados obtenidos de cinco testigos extraídos de la misma losa y con el mismo tipo de curado. En este gráfico, después de aplicar el criterio de Chauvenet a los datos, el peor coeficiente de correlación fue de 0.994. En la Tabla 7.2 se muestran los parámetros de las regresiones mostradas en la Figura 7.12.

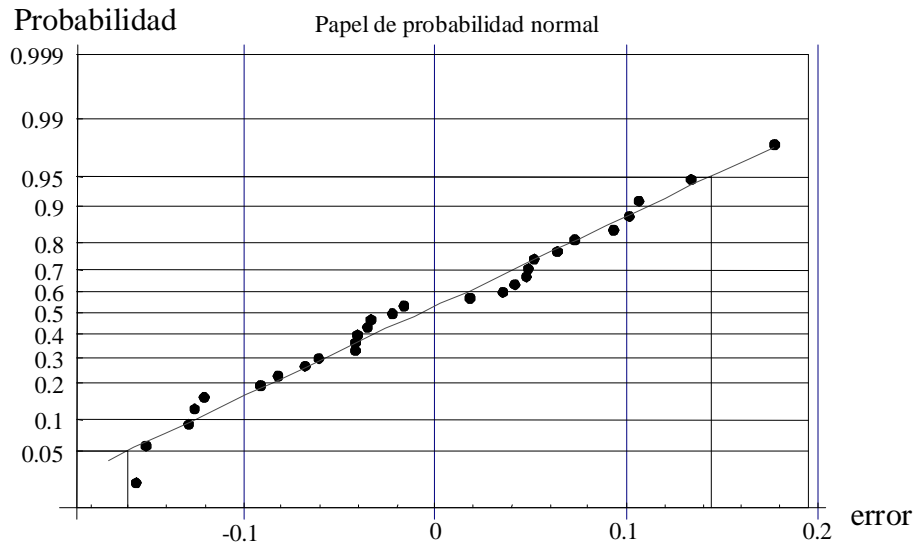


Figura 7.11: Gráfico de probabilidad normal de los errores del modelo propuesto.

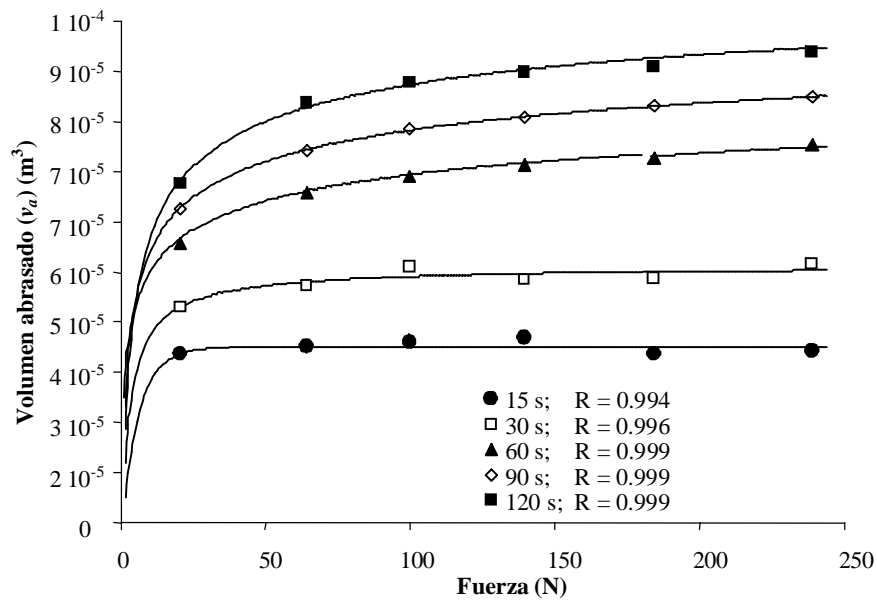


Figura 7.12: Cambios de volumen en el tiempo para diferentes pesos de la plomada.

Tiempo (s)	α	λ	P	v_o
15	12.109	53.110	0.798	$3.586 \cdot 10^{-5}$
30	0.818	9.810	4.108	$5.211 \cdot 10^{-5}$
60	0.149	1.728	6.754	$1.180 \cdot 10^{-4}$
90	0.200	4.680	9.714	$1.201 \cdot 10^{-4}$
120	0.302	4.434	13.604	$1.192 \cdot 10^{-4}$

Tabla 7.2: Parámetros de regresión de las curvas de la Figura 7.12.

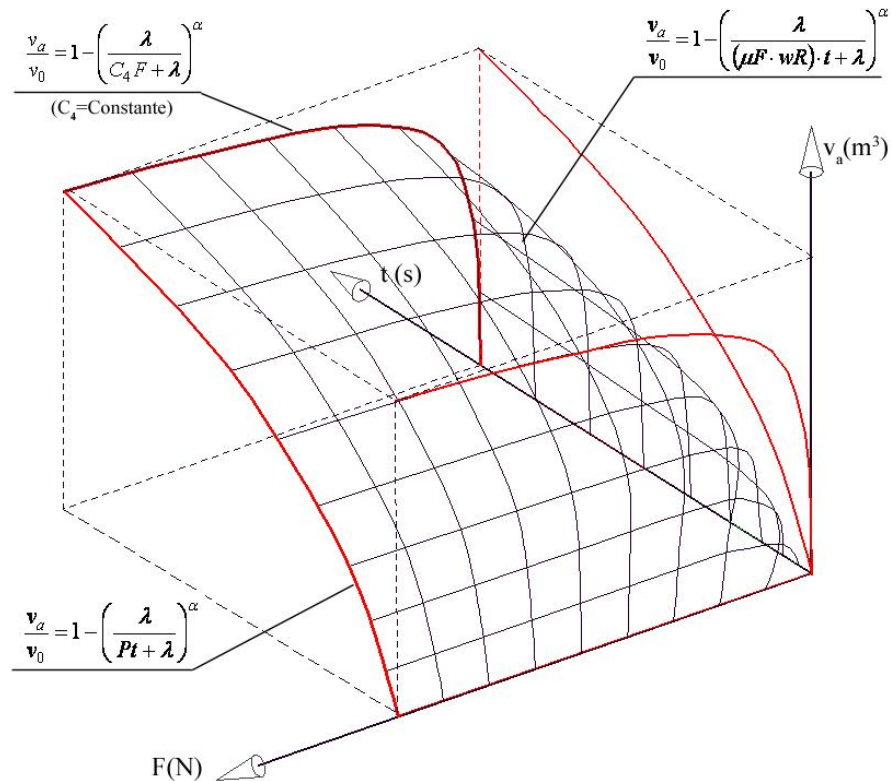


Figura 7.13: Superficie de abrasión del hormigón.

En la Figura 7.13 se muestra una representación tridimensional de la ecuación (7.18), donde se observa que, para velocidad angular (w) constante, un incremento del tiempo dará lugar a un mayor volumen de material abrasado, y del mismo modo, un incremento de la fuerza entre la rueda y el hormigón provoca un incremento en la velocidad de desgaste del mismo. En teoría, esta superficie será única para cada material abrasado. El punto de un material que comenzara a sufrir abrasión se encontraría en el origen de esta superficie, para ir desplazándose sobre ella en función del tiempo de abrasión efectivo que le afectara o de la fuerza entre el material desgastado y el material abrasivo. A tiempo o fuerza infinitos, esta superficie se transformará en un plano en el que $v_a \rightarrow v_0$.

7.5. CONCLUSIONES

En este Capítulo, se ha desarrollado un modelo de resistencia a la abrasión que puede ser fácilmente aplicado al conocimiento de la evolución del desgaste de pavimentos en los que exista un tráfico real, con el consiguiente conocimiento de su vida útil, aunque precisa de un refinamiento basado en el contraste de más experiencias.

Este modelo teórico de desgaste por abrasión ha sido experimentalmente comprobado para el tipo de ensayo utilizado, muy parecido al caso real del efecto de una rueda sobre el pavimento. Horszczaruk demostró, en un modelo similar, creado para estudiar la evolución de la abrasión en obras hidráulicas que, el desgaste del hormigón se puede expresar por un parámetro que depende de su composición. En este caso, se ha demostrado que la evolución de la resistencia a abrasión en un pavimento de hormigón depende directamente de la fuerza entre el suelo y la rueda, del coeficiente de rozamiento entre la rueda y el suelo y de la velocidad de giro de la misma; es decir, del tipo de vehículos que discurran por el pavimento, así como de la composición del hormigón.

Finalmente, el análisis de los resultados muestra la existencia de dos zonas en el desgaste de un pavimento de hormigón pulido. La primera de ellas corresponde al ataque de la capa de mortero superficial, muy denso y transparente por efecto del pulido del hormigón, y la segunda, concierne al propio acabado superficial del pavimento, algo menos resistente que la anterior.