

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Elèctrica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Tesi Doctoral

Electricitat i foc: aportacions experimentals d'aplicació docent

Tesi presentada per obtenir el
títol de Doctor per la Universitat
Politécnica de Catalunya (UPC)
Dins el programa de doctorat en
Enginyeria Elèctrica

Autor: Marc Martí Tous

Director: Dr. Ricard Bosch Tous

Barcelona, juliol de 2015

Resum

Les fonts d'ignició d'origen elèctric tenen una incidència estadística notable en relació amb la generació d'incendis i explosions. Els equips i instal·lacions elèctriques també són víctimes del foc. És a causa de la destrucció dels aïllaments i la disminució de la rigidesa dielèctrica de l'aire, entre d'altres factors. Aquest conjunt dóna lloc a un espai de recerca experimental i docència ampli, que encara es troba poc desenvolupat. S'introdueix l'estat de l'art il·lustrant-lo amb experiments de laboratori electrotècnic i l'exposició de casos reals.

El curtcircuit amb arc elèctric que produeix l'ejecció de partícules calentes, és una de les fonts d'ignició elèctrica poc investigades. Es desenvolupen experiments que poden ajudar a estudiar i il·lustrar aquest fenomen. S'utilitza un cas aportat pels Bombers de la Generalitat de Catalunya com a fil conductor. Suggestia una relació entre les canalitzacions de ventilació i climatització fabricades amb alumini i la ignició elèctrica.

Els fenòmens de descàrrega elèctrica en gasos tenen unes característiques particulars en presència de foc. Té implicacions en el subministrament d'energia elèctrica, la seguretat dels equips d'extinció d'incendis, la investigació de sinistres i la propagació del foc. Es porten a terme experiments que contribueixen a il·lustrar-ho. Es relacionen amb el comportament de les línies aèries d'alta tensió en presència de foc en el nostre entorn.

Paraules Clau

Incendi d'origen elèctric, arc elèctric, alumini, conductes de ventilació i aire condicionat, espurnes i partícules calentes, foc, propagació elèctrica del foc, línies aèries d'alta tensió, tensió disruptiva, seguretat elèctrica.

Abstract

According to reliable statistics, electrical fire ignition sources have a notable impact regarding the generation of fires and explosions. Electrical equipment and installations can also be the victims of fire. This is due to the wearing of insulation, the reduction of dielectric strength of the air and other factors. This combination opens up a space for a wide range of experimental and educational research which until now has seen little development. The state of the art of electrical fire is introduced illustrating it with electro technical laboratory experiments as well as with real story cases.

The electric arc which produces the ejection of hot particles is one of the electrical fire ignition sources, has seen little investigation. The development of experiments can help in finding out more about this phenomenon. A case study by the fire department of Catalonia can be used as an explanation, which suggests that there is a direct relationship between ventilation and air conditioning ducts made of aluminum and electrical ignition.

The phenomenon electrical breakdown in gases has a special characteristic in the presence of fire. It has an effect on electricity supply, fire extinguisher security, fire investigations and the fire spread. This has brought about experiments to illustrate the point. The experiments are related with the behavior of high voltage power lines in presence of fire in our environment.

Keywords

Electrical fire, electric arc, aluminum, ventilation and air conditioning ducts, sparks and hot particles, fire, electrical fire spread, high voltage power line, breakdown voltage, electrical safety

Prefaci

Agraïments

El Dr. Ricard Bosch em va engrescar a continuar la tasca iniciada en el meu projecte fi de carrera, al Laboratori de Màquines Elèctriques i Alta Tensió de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). Gràcies a això he pogut iniciar-me en el món de la recerca. Vull agrair-li el temps que ha dedicat a ajudar-me a desenvolupar aquesta tesi, les idees que ha aportat i el seu suport i gran implicació en els treballs experimentals.

El Sr. Miquel Rejat em va ajudar a orientar-me quan valoràvem la possibilitat de centrar la recerca en l'àmbit del foc i l'electricitat. Li agraeixo el seu suport, ànims i col·laboració des del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya.

També volia agrair les aportacions de totes les persones que han col·laborat, d'una forma o altra, en l'elaboració d'aquesta tesi i en particular al Sr. Robert Capella, a la Dra. Montserrat Marsal, al Dr. Jesús Álvarez, a la Dra. Elsa Pastor, al Dr. Víctor Fuses, al Dr. Oriol Gallemí, al Sr. Javier Cuesta, al Sr. Jordi Bosch, al Sr. Antoni Hidalgo, al Sr. Joan Martí, a la Dra. Maria Àngels Olivella, al Dr. Juli Colom, al Sr. Frederic Martí, al Sr. Josep Ramis i als mestres de taller del Laboratori de Màquines Elèctriques del Departament d'Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB. Així com, als membres del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya i d'empreses del sector elèctric que han fet aportacions.

Quan vius i treballes lluny del laboratori i tens dos fills petits, compaginar el dia a dia amb el desenvolupament d'una tesi de caire experimental esdevé un graó afegit de dificultat. Aquest graó hauria estat insuperable sense el suport de familiars, amics i companys de feina, entre els que vull agrair especialment el seu ajut a la Núria, als meus pares i a en Rafel i la Lluïsa.

Publicacions i difusió

SANS, J.; BOIXADÉ, J.; BOSCH, R; et al. *La investigació d'incendis i explosions*. Col·lecció segments de seguretat 1. Institut de Seguretat Pública de Catalunya. Mollet del Vallès, Octubre de 2010, p. 105-108 i 135-148. Disponible a: <http://www.recercat.cat/>. Col·laboració amb el Dr. Ricard Bosch en el seu treball en el Grup de Recerca sobre Investigació d'Incendis i Explosions, recollida en la redacció de part de la publicació citada. Així com, en l'elaboració de la presentació pública dels aspectes elèctrics de la publicació, que va tenir lloc a l'auditori de l'Institut de Seguretat Pública de Catalunya, a Mollet del Vallès, el 10 de novembre de 2010.

MARTÍ, M. *Electrical ignition experiment on aluminum pipe*. Experiment presentat al 11th IAFFS Symposium on Fire Safety Science, en l'apartat de Fire Science Image Award, que es va celebrar entre el 10 i 14 de febrer de 2014 a la Universitat de Canterbury (Nova Zelanda).

MARTÍ, M.; BOSCH, R.; REJAT, M. *Ignition experiments on the effects of aluminum in building electrical fires*. Article de recerca seleccionat pel congrés “*International Meeting of Electrical Engineering Research ENIVVIE [April 9-11-2014]*” de la Universitat Autònoma de Zacatecas (Mèxic).

MARTÍ, M; BOSCH, R. *Experiments on the striking of the electric arc with the presence of fire*. Pòster de recerca seleccionat i presentat a la “*Student Poster Research Session, NFPA (National Fire Protection Association) Conference & Expo 2014*”. Sessió celebrada el 8 de Juny de 2014 a Las Vegas (EUA).

Motivació

La relació entre l'electricitat i el foc ha tingut influència sobre les persones des que els incendis produïts pels llamps ja afectaven als primers pobladors. Actualment, l'incendi d'origen elèctric té una incidència estadística notable. Segons la National Fire Protection Association (NFPA), el 13% dels incendis registrats en edificis, durant el període 2007-2011 als Estats Units d'Amèrica, van tenir un origen elèctric. Només l'any 2011 aquests incendis van ser responsables de 431 morts civils i pèrdues per quasi dos bilions de dòlars, en danys directes a la propietat [1].

Existeixen diversos tipus de fonts d'ignició elèctrica. Tenen associades casuístiques molt diverses. El seu estudi és d'interès per determinar les causes d'incendis i explosions, contribuir a orientar les actuacions dels professionals que intervenen en l'extinció i establir futures mesures preventives. Tot i així, moltes d'elles encara són desconegudes o no han estat suficientment explorades.

D'altra banda, molts cops les instal·lacions elèctriques no són les inductores del foc, sinó que en són víctimes. És a causa de l'aparició de defectes elèctrics, com curtcircuits i arcs. Són ocasionats per la destrucció dels aïllaments i la disminució de la rigidesa dielèctrica de l'aire que produeix el foc i el fum, entre d'altres factors.

Aquesta circumstància dóna lloc a un escenari on és més complex determinar si una font d'ignició elèctrica ha estat responsable de l'inici d'un incendi. Els arcs produïts abans i després de l'incendi no són trivialment distingibles. Aquesta singularitat és la responsable que se'ls puguin atribuir molts dels orígens dubtosos registrats. El foc també acostuma a produir talls de subministrament elèctric i augmenta els riscos associats a les tasques d'extinció. Per exemple, els Bombers de la Generalitat de Catalunya han observat descàrregues elèctriques violentes, quan el fum i les flames s'acosten a una línia aèria d'alta tensió durant els incendis forestals.

Les instal·lacions elèctriques poden tenir un efecte propagador de l'incendi. Per exemple, quan les flames les afecten abans que les proteccions elèctriques actuïn. No obstant, en altres casos, poden ser poc rellevants per la progressió del foc. Per exemple, si aquest ja es vigorós i ocupa un volum ampli quan afecta la instal·lació.

Aquesta relació entre incendi i electricitat, dóna lloc a un espai de recerca experimental i docència ampli i multidisciplinari. L'estat de l'art posa de manifest que encara es troba poc desenvolupat a nivell internacional en molts aspectes, i en particular a Catalunya també.

A l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (ETSEIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), fa una bona colla d'anys que s'han anat posant a punt tot un seguit d'estacions d'assaig en l'àmbit de l'alta tensió i els corrents forts. És factible utilitzar-les per realitzar aportacions experimentals inèdites, en l'àmbit de l'incendi en presència d'instal·lacions elèctriques. També per desenvolupar experiments de laboratori electrotècnic, que contribueixin a il·lustrar aquesta temàtica, amb una finalitat docent.

Alguns professors i col·laboradors d'aquesta universitat, fa anys que acumulen experiència professional en el peritatge de sinistres, la investigació d'incendis d'origen elèctric i la docència relacionada amb aquest àmbit. En són una mostra les diverses edicions del Curs d'Investigació de Causes d'Incendis d'Origen Elèctric de la UPC. Així com, la participació en el Grup de Recerca sobre Investigació d'Incendis i Explosions (GRIIE) i el Grup de Recerca sobre els Riscos en Incendis de Vehicles de Nova Generació, ambdós promoguts per l'Institut de Seguretat Pública de Catalunya (ISPC). Poc a poc s'ha anat generant un entorn de col·laboració amb empreses i professionals del sector i un suport institucional des del ISPC. En aquest sentit, un membre dels Bombers de la Generalitat de Catalunya que formava part del GRIIE, va formular la necessitat de "suggerir a les autoritats de la Generalitat de Catalunya, la generació de convenis de col·laboració amb departaments especialitzats d'universitats i laboratoris d'assaig, a fi d'intercanviar coneixements i facilitar la verificació d'hipòtesis en sinistres complexes".

Tanmateix, en el marc del programa de Doctorat d'Enginyeria Elèctrica de la UPC, no existia recerca experimental que s'aproximés a l'incendi d'origen elèctric. Aquesta és una situació comuna a molts països. Els EUA és un dels referents en la recerca en l'àmbit dels incendis a occident. Tot i així, poc abans de l'aprovació del projecte d'aquesta tesi, l'investigador Dr. Vytenis Babrauskas, descrivia d'aquesta forma la situació a l'article "Research on electrical fires: The state of the art"[2]:

"No hi ha cap institució en el món de parla anglesa amb un compromís de recerca continuada en aquesta àrea. Al món, la situació és molt millor, a causa de l'extensa recerca realitzada al Japó. Però la major part de la mateixa ha estat publicada només en japonès, fóra de l'abast de la majoria de científics i enginyers [...]. La revisió de l'estat de l'art mostra que hi ha encara nombrosos buits en els que no hi ha recerca de primer nivell. És urgent que s'estableixi un esforç sistemàtic en la recerca d'incendis d'origen elèctric als EUA i que es defineixin certes temàtiques prioritàries".

Efectivament, cal sumar la dificultat afegida d'una bibliografia especialitzada força limitada. La majoria de referències cal buscar-les en articles de recerca dispersos i presentacions en congressos internacionals. Sovint abasten temàtiques més àmplies. Les normatives i guies nord-americanes publicades per la NFPA, són una de les principals referències en aquest àmbit al nostre país. D'altra banda, hi ha pèrits i investigadors amb molta experiència, però sovint la informació de que disposen està sotmesa a compromisos de confidencialitat.

Un altre aspecte a considerar és que pot succeir que la recerca que es pugui dur a terme, no es difongui més enllà de publicacions universitàries o dirigides a especialistes en la matèria. Sovint és viable simplificar els experiments o il·lustrar-los suficientment, com per poder transferir-los a altres col·lectius (bombers, enginyers, tècnics d'instal·lacions elèctriques, etc). En particular, els tècnics que munten i mantenen les instal·lacions elèctriques, juguen un paper determinant en el seu dia a dia, a l'hora de limitar la incidència dels incendis d'origen elèctric. En aquest sentit, els centres de formació professional, especialment ara que s'ha fixat com a prioritat educativa de país augmentar el seu prestigi i qualitat, poden jugar un paper transmetent competències i actituds que els permeti tenir-ho present des del principi.

La tesi que es proposa, pretén aportar el seu petit gra de sorra perquè s'avanci en la direcció de portar a terme recerca experimental, amb aplicació docent, en aquest àmbit i en el nostre entorn.

Objectius

L'objectiu d'aquesta tesi és desenvolupar, registrar i analitzar experiments de laboratori electrotècnic, que contribueixin a realitzar noves aportacions a l'estudi de l'incendi en presència d'instal·lacions elèctriques i la seva docència.

Aquest objectiu general es concreta en els següents objectius parcials, en funció de l'àmbit al que s'associen:

a) Àmbit de l'electricitat com a font d'ignició i propagació de l'incendi:

- Analitzar la bibliografia disponible per establir l'estat de l'art actual de l'incendi d'origen elèctric. Il·lustrar-ho amb experiments de laboratori electrotècnic i l'exposició de casos reals.
- Dissenyar, implementar, registrar i analitzar experiments de corrents forts amb arc elèctric i ejecció d'espurnes i partícules calentes. S'utilitza com a fil conductor l'estudi del comportament dels conductes de ventilació i climatització, fabricats o revestits d'alumini, quan entren en contacte accidental amb conductors actius.
- Millorar i preparar la plataforma d'assaig de curtcircuit ubicada a la Sala d'Alta Tensió de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (ETSEIB), per poder portar a terme els experiments i registrar-los.

b) Àmbit de l'incendi com a font de generació de defectes elèctrics:

- Dissenyar, implementar, registrar i analitzar experiments que il·lustrin el comportament de fenòmens de descàrrega elèctrica en un gas en corrent altern i en presència de foc. Es relaciona principalment amb els seus efectes sobre les línies aèries d'alta tensió durant els incendis.
- Preparar l'equip d'assaigs d'alta tensió de 300kV, a freqüència industrial 50Hz, ubicat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB, per poder portar a terme els experiments i registrar-los.

Sumari

Resum	i
Paraules clau	i
Abstract.....	ii
Keywords.....	ii
Prefaci.....	iii
Agraïments.....	iii
Publicacions i difusió.....	iv
Motivació.....	v
Objectius	vii
Sumari.....	viii
Llista de figures	xiv
Llista de taules	xviii
Llista d'abreviacions i símbols.....	xix
Introducció.....	1
Capítol 1. Introducció als incendis d'origen elèctric.....	3
1.1 Fonaments d'incendis i explosions.....	3
1.1.1 Incendis	3
1.1.2 Explosions	4
1.2 Ignició elèctrica.....	5
1.3 Fonts d'ignició d'origen elèctric.....	7
1.3.1 Generació de calor per efecte Joule	7
1.3.1.1 Sobreescalfament en condicions de ventilació insuficient.....	7
1.3.1.1.1 Descripció de la font d'ignició	7
1.3.1.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	8
1.3.1.2 Sobreintensitats: sobrecàrrega i curtcircuit	8
1.3.1.2.1 Descripció de la font d'ignició	8
1.3.1.2.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	9
1.3.1.3 Contactes de resistència elevada	12
1.3.1.3.1 Descripció de la font d'ignició	12
1.3.1.3.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	13
1.3.1.4 Efectes sobre els conductors i aïllaments i la seva aplicació forense	15
1.3.1.4.1 Efectes de les sobreintensitats	15
1.3.1.4.2 Diferències entre els efectes produïts per les sobreintensitats i pel foc	17

1.3.1.4.3 Efectes dels contactes de resistència elevada	19
1.3.1.4.4 Grau d'oxidació deguda al foc i als contactes de resistència elevada.....	20
1.3.2 Descàrregues elèctriques.....	21
1.3.2.1 Arcs entre elèctrodes estacionaris separats per l'ambient.....	21
1.3.2.1.1 Descripció de la font d'ignició	21
1.3.2.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	23
1.3.2.2 Arc de separació i arc sèrie.....	23
1.3.2.2.1 Descripció de la font d'ignició	23
1.3.2.2.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	24
1.3.2.2.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició	25
1.3.2.3 Llamp.....	26
1.3.2.4 Altres descàrregues capacitives d'origen electrostàtic.....	27
1.3.2.4.1 Corona.....	28
1.3.2.4.2 Descàrregues capacitives ramificades	28
1.3.2.4.3 Guspires	30
1.3.2.4.4 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	31
1.3.2.5 Descàrregues per pistes conductores.....	32
1.3.2.5.1 Descripció de la font d'ignició	32
1.3.2.5.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	34
1.3.2.5.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició	34
1.3.2.6 Efectes sobre els conductors i aïllaments i la seva aplicació forense	36
1.3.2.6.1 Efectes ocasionats pels arcs.....	36
1.3.2.6.2 Efectes ocasionats pels arcs de separació.....	39
1.3.2.6.3 Diferències entre efectes produïts per l'arc i pel foc	42
1.3.2.6.4 Diferències entre els indicis dels arcs produïts abans i després del foc	42
1.3.2.6.5 Efectes ocasionats pels llamps.....	43
1.3.2.6.6 Efectes ocasionats per les descàrregues per pistes conductores.....	46
1.3.3 Espurnes i partícules calentes d'origen elèctric	47
1.3.3.1 Ejecció d'espurnes i partícules calentes causada per l'arc.....	47
1.3.3.1.1 Descripció de la font d'ignició	47
1.3.3.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició.....	50
1.3.3.1.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició	51
1.3.3.2 Efectes sobre els conductors i la seva aplicació forense.....	52
1.3.4 Altres fonts d'ignició.....	55
1.3.4.1 Generació de calor per inducció electromagnètica	55
1.3.4.2 Bateries	56
1.3.4.2.1 Sobreescalfament per formació de dendrites.....	56

1.3.4.2 Explosions d'hidrogen.....	56
1.4 Estadístiques d'incendis d'origen elèctric i la seva relació amb la recerca.....	56
1.4.1 Estadístiques nacionals en relació amb l'incendi d'origen elèctric	56
1.4.2 Estadístiques internacionals en relació amb l'incendi d'origen elèctric.....	58
Capítol 2. Experiments d'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric.....	62
2.1 Introducció	62
2.1.1 Antecedents.....	62
2.1.2 Presència d'alumini en els sistemes elèctrics.....	63
2.1.3 Aproximació a un incendi amb probable ejecció elèctrica d'espurnes d'alumini.....	64
2.1.3.1 Descripció del sinistre	64
2.1.3.2 Apunt estadístic sobre incendis en sistemes de ventilació i aire condicionat.....	64
2.1.3.3 Hipòtesis sobre la possibilitat d'ignició i propagació elèctrica a l'incendi.....	65
2.1.3.4 Proximitat entre conductors elèctrics i conductes de ventilació i climatització	66
2.2 Experiments d'ejecció d'espurnes d'origen elèctric en conductes d'alumini.....	67
2.2.1 Introducció als experiments	67
2.2.2 Equipament general d'assaig	67
2.2.3 Experiments amb conductes de ventilació d'alumini tubulars	68
2.2.3.1 Materials i muntatge.....	68
2.2.3.1.1 Muntatge A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes	68
2.2.3.1.2 Muntatge B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode.....	70
2.2.3.1.3 Muntatge C: conducte tubular connectat a un ventilador.....	70
2.2.3.2 Metodologia	71
2.2.3.2.1 Configuració A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes	71
2.2.3.2.2 Configuració B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode	72
2.2.3.2.3 Configuració C: conducte tubular connectat a un ventilador.....	72
2.2.3.3 Descripció, resultats i discussió	72
2.2.3.3.1. Configuració A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes	72
2.2.3.3.1.1 Descripció del procés d'ejecció d'espurnes i del seu vol	72
2.2.3.3.1.2 Variabilitat d'espurnes ejectives a una mateixa tensió eficaç.....	78
2.2.3.3.1.3 Estimació de la quantitat de material ejectat en forma d'espurnes.....	80
2.2.3.3.1.4 Efecte de l'augment de la tensió eficaç	81
2.2.3.3.1.5 Efecte de l'augment del temps d'actuació de la protecció elèctrica.....	82
2.2.3.3.1.6 Efecte de la limitació del corrent mitjançant reactàncies	84
2.2.3.3.1.7 Efecte de l'increment de pressió en el punt de contacte.....	85
2.2.3.3.1.8 Efecte de la humitat.....	85
2.2.3.3.1.9 Efecte de l'apropament de flames.....	85

2.2.3.3.2 Configuració B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode	86
2.2.3.3.3 Configuració C: conducte tubular connectat a un ventilador	87
2.2.3.3.4 Descripció de l'estat del tub i dels elèctrodes després dels assajos.....	89
2.2.4 Experiments amb panells revestits d'alumini per conductes d'aire condicionat	92
2.2.4.1 Materials i muntatge.....	92
2.2.4.1.1 Configuració D: panell en contacte amb conductors rígids de Cu.....	93
2.2.4.1.2 Configuració E: panell en contacte amb conductors flexibles de Cu.....	93
2.2.4.2 Metodologia	94
2.2.4.3 Descripció, resultats i discussió	94
2.2.4.3.1 Configuració D: panell en contacte amb conductors rígids de Cu.....	94
2.2.4.3.1.1 Descripció del procés d'ejecció d'espurnes i del seu vol	94
2.2.4.3.1.2 Estimació de la quantitat de material ejectat en forma d'espurnes.....	95
2.2.4.3.1.3 Efecte del confinament en l'ejecció d'espurnes	96
2.2.4.3.2 Configuració E: panell en contacte amb conductors flexibles de Cu.....	96
2.2.4.3.2.1 Descripció dels efectes observats durant l'experiment.....	96
2.2.4.3.2.2 Estimació de la quantitat de material ejectat	99
2.2.4.3.3 Descripció de l'estat del panell i dels elèctrodes després dels assajos.....	100
2.2.5 Síntesi dels efectes observats i propostes per prevenir-los.....	101
Capítol 3. Experiments de descàrrega elèctrica en un gas en corrent altern en presència de foc	103
3.1 Introducció.....	103
3.1.1 Antecedents.....	103
3.1.2 Variació de la tensió de ruptura dielèctrica en presència de foc.....	105
3.1.3 Descàrregues elèctriques en línies aèries d'alta tensió degudes als incendis	106
3.1.3.1 Descripció de les descàrregues i àmbits on es manifesten.....	106
3.1.3.2 Conseqüències de les descàrregues.....	108
3.1.3.2.1 Efectes en la investigació de les causes dels incendis.....	108
3.1.3.2.2 Pertorbacions i talls de subministrament d'energia elèctrica	108
3.1.3.2.3 Riscos pels equips d'extinció d'incendis.....	108
3.1.3.2.4 Efecte propagador de l'incendi.....	109
3.2 Experiments de generació d'arc elèctric en corrent altern en presència de foc	109
3.2.1 Equipament general d'assaig	109
3.2.2 Experiments amb explosor de banyes en presència de flama.....	109
3.2.2.1 Introducció als experiments	109
3.2.2.2 Materials i muntatge.....	110
3.2.2.3 Metodologia	111
3.2.2.3.1 Influència del procés de descàrrega en la forma de les flames	111

3.2.2.3.2 Anàlisi de la tensió disruptiva i dels oscil·logrames de l'arc amb foc	112
3.2.2.4 Descripció, resultats i discussió	112
3.2.2.4.1 Influència del procés de descàrrega en la forma de les flames	112
3.2.2.4.1.1 Flama procedent d'una espelma de parafina	112
3.2.2.4.1.2 Flama procedent d'una torxa de gas butà	115
3.2.2.4.2 Variació de la tensió disruptiva en presència de flames.....	116
3.2.2.4.3 Anàlisi de les descàrregues a partir d'oscil·logrames de tensió i corrent	118
3.2.3 Experiments amb explosor amb forma de Thiele refrigerat en presència de flames	121
3.2.3.1 Introducció als experiments	121
3.2.3.2 Materials i muntatge.....	121
3.2.3.3 Metodologia	122
3.2.3.3.1 Variació de la forma de les flames	122
3.2.3.3.2 Influència de la direcció i sentit de les flames.....	122
3.2.3.3.3 Influència de la temperatura dels elèctrodes	123
3.2.3.4 Descripció, resultats i discussió	123
3.2.3.4.1 Variació de la forma de les flames	123
3.2.3.4.2 Influència de la temperatura dels elèctrodes	123
3.2.3.4.3 Influència de la temperatura, direcció i sentit de les flames	127
3.2.4 Experiments de descàrrega entre una filassa d'alumini i una platina d'acer amb foc.....	127
3.2.4.1 Introducció als experiments	127
3.2.4.2 Materials i muntatge.....	128
3.2.4.3 Metodologia	130
3.2.4.4 Descripció, resultats i discussió	130
3.2.4.4.1 Anàlisi de la formació de les descàrregues.....	130
3.2.4.4.2 Anàlisi de la tensió disruptiva en relació amb una línia de MT.....	133
3.2.4.4.3 Rastres de l'arc sobre conductors i ferramentes.....	135
Capítol 4. Conclusions i futures línies d'investigació.....	136
4.1 Conclusió global	136
4.2 Conclusions parcials i aportacions per capítols.....	138
4.2.1 Conclusions i aportacions del capítol 1	138
4.2.2 Conclusions i aportacions del capítol 2	141
4.2.3 Conclusions i aportacions del capítol 3	142
4.3 Futures línies d'investigació.....	146
4.3.1 Estat de l'art de l'incendi d'origen elèctric.....	146
4.3.2 Ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric	148
4.3.3 Descàrregues elèctriques en presència de foc.....	149

Bibliografia.....	151
Annex A. Taules i figures complementàries.....	160
A.1 Taules complementàries.....	160
A.1.1 Taules relatives al capítol 1.....	160
A.1.2 Taules relatives al capítol 2.....	161
A.1.3 Taules relatives al capítol 3.....	162
A.2 Figures complementàries.....	164
A.2.1 Sinistre en la instal·lació d'enllaç d'un edifici.....	164
A.2.2 Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB.....	165
Annex B. Experiments i simulacions complementàries.....	166
B.1 Experiments de curtcircuit a tensió reduïda.....	166
B.1.1 Experiment amb conductors de coure.....	166
B.1.2 Experiment d'ejecció d'espurnes des d'un conducte tubular d'alumini.....	168
B.2 Observació dels efectes de polaritat d'una flama amb generador de Van der Graaf.....	169
B.3 Registre d'espurnes mitjançant anàlisi d'imatges amb Matlab.....	171
Annex C. Treballs constructius.....	173
C.1 Aportacions a la plataforma d'assaig de curtcircuit de l'ETSEIB.....	173
C.2 Adaptació del tub de Thiele com a explosor elèctric d'alta tensió refrigerat.....	175
Annex D. Altres hipòtesis i indicis observats.....	176
D.1 Anàlisi d'un sinistre amb hipòtesi d'ignició per descàrrega per pistes carbonitzades.....	176
D.2 Indicis de conducció resistiva a través d'animals electrocutats.....	178
D.3 Rastres minerals en un conductor d'una línia aèria de AT afectat per un arc.....	178

Llista de figures

Fig.1.1	Tetraedre del foc.....	3
Fig.1.2	Escena d'un incendi provocat per un calefactor elèctric.....	5
Fig.1.3	Trencament experimental d'un conductor de Cu per sobreintensitat	9
Fig.1.4 (a)	Caixa general de protecció d'un edifici afectada per un curtcircuit	11
Fig.1.4 (b)	Tanca metàl·lica de jardí afectada per una sobrecàrrega	11
Fig.1.5 (a)	Formació d'òxid de coure (I) incandescent en un conductor.....	13
Fig.1.5 (b)	Descàrrega elèctrica de separació reproduïda experimentalment.....	13
Fig.1.5 (c)	Anàlisi termogràfic d'un contacte d'elevada resistència	13
Fig.1.6 (a)	Anàlisi termogràfic d'un mal contacte en un autotransformador	14
Fig.1.6 (b)	Pont de terra mòbil revisat amb contactes oxidats.....	14
Fig.1.7	Efectes d'una sobrecàrrega sobre un conductor de coure flexible aïllat.....	16
Fig.1.8 (a)	Conductor de coure amb senyals de fusió per curtcircuit.....	16
Fig.1.8 (b)	Detall de l'oxidació superficial	16
Fig.1.8 (c)	Anàlisi EDX de la mostra	17
Fig.1.9	Conductor de coure aïllat afectat pel foc.....	18
Fig.1.10 (a)	Conductor de coure amb oxidació superficial afectat per flames externes	19
Fig.1.10 (b)	Formació globular produïda pel foc en el punt de trencament	19
Fig.1.10 (c)	Cable de fils de coure afectat per flama externa i corrent de curtcircuit	19
Fig.1.11	Connexió de neutre fortament oxidada	20
Fig.1.12 (a)	Formació d'un arc elèctric, aplicant $U_p=20\text{kV}$ i $P \cdot D > 5\text{atm} \cdot \text{mm}$	22
Fig.1.12 (b)	Corba de Paschen	22
Fig.1.13 (a)	Arc de separació format durant la fusió d'un conductor per curtcircuit.....	25
Fig.1.13 (b)	Generació experimental d'arcs de separació i arcs sèrie a 230V.....	25
Fig.1.14 (a)	Fotografia termogràfica de l'experiment de generació d'arcs de separació i sèrie ...	26
Fig.1.14 (b)	Detall d'una descàrrega de separació experimental.....	26
Fig.1.15	Descàrregues capacitives emeses des de filasses d'alumini	28
Fig.1.16	Generació de descàrregues capacitives en una ampolla de cava	29
Fig.1.17	Corona i guspira en presència d'un gas inflamable	31
Fig.1.18	Rastres de descàrregues sobre la vegetació de l'entorn d'una línia aèria.....	32
Fig.1.19	Descàrregues sobre camins conductors carbonitzats en un tronc humit.....	35
Fig.1.20	Descàrregues superficials i punts incandescents sobre aïllament de PVC humit.....	35
Fig.1.21	Terminal de MT afectat per un arc elèctric.....	36
Fig.1.22 (a)	Formació d'arc entre filasses d'alumini.....	38
Fig.1.22 (b)	Marques sobre una filassa d'alumini afectada per un arc.....	38
Fig.1.22 (c)	Embarrats afectats per l'acció de l'arc procedents d'una estació transformadora.....	38

Fig.1.23	Partícules adherides a una empiuladura de Al sotmesa a l'acció de l'arc	38
Fig.1.24 (a)	Extrem d'un conductor de Cu sotmès a curtcircuit i arc de separació.....	39
Fig.1.24 (b)	Extrem d'un conductor de Cu sotmès a arcs usant un soldador a l'arc	39
Fig.1.24 (c)	Detall de l'extrem d'un conductor de Cu sotmès a arcs usant un soldador a l'arc....	39
Fig.1.25	Cable multipolar de BT afectat per curtcircuit i arc elèctric.....	40
Fig.1.26 (a)	Conductor de Al afectat per un curtcircuit amb arc de separació.....	41
Fig.1.26 (b)	Filassa de Al afectada per arcs usant soldador a l'arc.....	41
Fig.1.27	Contactes d'un ICP destruït per un curtcircuit i arc de separació.....	42
Fig.1.28 (a)	Rastres de fusió del coure de conductors produïts per incendis	42
Fig.1.28 (b)	Rastres de fusió en un conductor d'alumini produït per una torxa de butà	42
Fig.1.29 (a)	Fulgurita trobada a prop d'un conductor caigut d'una línia aèria de AT	44
Fig.1.29 (b)	Branca cremada trobada a prop de la fulgurita de (a).....	44
Fig.1.29 (c)	Fulgurites amb esquitxos metàl·lics trobades a prop de la de (a).....	44
Fig.1.29 (d)	Fulgurita formada en un desert	44
Fig.1.29 (e)	Roques hipotèticament foradades per un llamp.....	44
Fig.1.30 (a)	Perforació d'un aïllament Presspan per un impuls tipus llamp	45
Fig.1.30 (b)	Detall de la perforació mostrada a (a).....	45
Fig.1.30 (c)	Perforació d'un aïllament Presspan a $f=50\text{Hz}$	45
Fig.1.31	Cràters ocasionats per impulsos de corrent sobre superfícies de Al i Ti	46
Fig.1.32 (a)	Cable sotmès a un assaig de resistència a l'arc per pistes carbonitzades.....	47
Fig.1.32 (b)	Pista carbonitzada entre els forats d'un adaptador d'endoll Schuko a americà.....	47
Fig.1.33 (a)	Ejecció d'espurnes durant la fusió d'un conductor de Cu	49
Fig.1.33 (b)	Ejecció d'espurnes de Al durant un arc de separació	49
Fig.1.34	Ejecció d'espurnes des d'una línia aèria ocasionada per l'acció de l'arc	50
Fig.1.35	Ejecció d'espurnes mitjançant arc de separació.....	51
Fig.1.36 (a)	Ejecció d'espurnes experimental amb soldador per arc.....	52
Fig.1.36 (b)	Ejecció d'espurnes d'origen elèctric de Al i Fe	52
Fig.1.37 (a)	Pantalla de vidre amb impactes de partícules de Al en combustió.....	54
Fig.1.37 (b)	Detall dels impactes de les partícules de Al mostrats a (a).....	54
Fig.1.37 (c)	Espurna d'alumini solidificada ràpidament	54
Fig.1.37 (d)	Espurna de Cu solidificada.....	54
Fig.1.37 (e)	Espurna de Cu solidificada amb recobriment superficial	54
Fig.1.38	Factors d'ignició elèctrica accidental als habitatges de EUA (2007-2011).....	59
Fig.1.39	Incendis produïts per llamps als EUA (2007-2011)	60
Fig.2.1 (a)	Escena d'un sinistre amb partícules d'alumini adherides al sostre.....	65
Fig.2.1 (b)	Conductes de climatització i cables elèctrics involucrats en el sinistre.....	65
Fig.2.2	Representació esquemàtica del desplaçament de l'arc entre dos conductors.....	66

Fig.2.3	Croquis de les configuracions experimentals amb conductes tubulars d'alumini.....	69
Fig.2.4	Selecció de fotogrames relatives a la filmació de la configuració experimental A...	73
Fig.2.5	Oscil·logrames de tensió i corrent associats a l'assaig representat a la Fig.2.4.....	75
Fig.2.6	Trajectòries de partícules de Al relatives a la configuració experimental A.....	76
Fig.2.7	Efectes singulars produïts durant el vol de les partícules de Al ejectades.....	77
Fig.2.8	Trajectòries de les partícules d'alumini ejectades des del tub	78
Fig.2.9	Il·lustració de la variabilitat d'ejecció d'espurnes durant els experiments.....	79
Fig.2.10	Variació de la intensitat a les repeticions de l'experiment amb $U_{ef}=230V$	80
Fig.2.11	Oscil·logrames de tensió i corrent a l'experiment amb $U_{ef}=400V$	82
Fig.2.12	Oscil·logrames de tensió i corrent a l'experiment amb la protecció IA2	83
Fig.2.13	Incrementos de massa i superfície perduda amb diferents interruptors automàtics	83
Fig.2.14 (a)	Fotograma relatiu a l'experiment amb l'interruptor automàtic IA1	84
Fig.2.14 (b)	Seqüència de fotogrames relativa a l'experiment amb l'interruptor automàtic IA2 .	84
Fig.2.15	Seqüència de fotogrames relativa a la configuració experimental B.....	86
Fig.2.16	Seqüència de fotogrames relatives a la configuració experimental C	88
Fig.2.17	Mostres dels elèctrodes i del conducte tubular després dels experiments	90
Fig.2.18 (a)	Superfície del tub original vista amb microscopi electrònic.....	91
Fig.2.18 (b)	Perifèria d'un forat produït durant l'experiment.....	91
Fig.2.19	Comparació de la composició de diverses zones de la superfície del tub	92
Fig.2.20	Tipus de contacte (D i E) entre elèctrodes de Cu i un panell recobert de Al.....	92
Fig.2.21	Fotogrames relatius a la configuració experimental D	95
Fig.2.22	Fotogrames relatius a la configuració experimental D amb confinament.....	96
Fig.2.23	Fotogrames relatius a la configuració experimental E.....	97
Fig.2.24	Seqüència de fotogrames relativa a la formació d'espurnes d'alumini	98
Fig.2.25	Oscil·logrames de tensió i corrent relatius a la configuració experimental E	99
Fig.2.26	Mostres dels elèctrodes i de la superfície del panell després dels experiments.....	100
Fig.3.1 (a)	Experiment de l'explosor de banyes	104
Fig.3.1 (b)	Experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma	104
Fig.3.2	Descàrrega elèctrica en una línia aèria d'alta tensió involucrada en un incendi	107
Fig.3.3 (a)	Croquis de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama.....	110
Fig.3.3 (b)	Il·lustració de l'experiment i de les zones de la flama d'una espelma	110
Fig.3.4 (a)	Flama estable abans d'aplicar AT a l'explosor de banyes.....	113
Fig.3.4 (b)	Deformació màxima de la flama a l'aplicar AT a l'explosor de banyes	113
Fig.3.5	Oscil·lació d'una flama durant descàrregues en AT amb l'explosor de banyes	113
Fig.3.6	Oscil·lació d'una flama durant descàrregues en AT amb l'explosor de banyes	114
Fig.3.7 (a)	Flama de butà estable a l'aplicar AT amb l'explosor de banyes	115
Fig.3.7 (b)	Evolució de la flama de (a) al produir-se descàrregues disruptives.....	115

Fig.3.8	Descarregues a l'explosor de banyes amb flama de butà propera als elèctrodes.	116
Fig.3.9	Evolució de U_d a l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma.....	116
Fig.3.10 (a)	Relacions de reducció de U_d a l'explosor de banyes amb flama en funció de (a)...	118
Fig.3.10 (b)	Relacions de reducció de U_d a l'explosor de banyes amb flama en funció de (h)...	118
Fig.3.11	Oscil·logrames de l'experiment de l'explosor de banyes sense flama.....	119
Fig.3.12	Oscil·logrames de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma	119
Fig.3.13	Oscil·logrames de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma	120
Fig.3.14	Oscil·lació d'una flama de butà entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele	123
Fig.3.15 (a)	Descàrrega en l'explosor de Thiele sense flama.....	124
Fig.3.15 (b)	Descarregues en una flama de butà entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele....	124
Fig.3.16 (a)	Descarregues entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele amb flama de butà.	125
Fig.3.16 (b)	Marques de l'arc i sutge adherit a un elèctrode de l'explosor de Thiele	125
Fig.3.17	Descarregues entre els elèctrodes amb flames de butà sobre diferents eixos.....	125
Fig.3.18	Evolució de les tensions disruptives en l'experiment de l'explosor de Thiele.....	126
Fig.3.19	Croquis de l'experiment de descàrrega entre una filassa de Al i una platina	129
Fig.3.20	Descàrrega entre una filassa de Al i una platina amb flama de butà (50%)	131
Fig.3.21	Descàrrega entre una filassa de Al i una platina amb flama de butà	131
Fig.3.22	Descarregues entre una filassa de Al i una platina d'acer en una flama de butà.....	132
Fig.3.23	Oscil·logrames de l'experiment entre una filassa de Al i una platina	133
Fig.3.24 (a)	Rastres de l'arc i el foc en la filassa de Al després de l'experiment.....	135
Fig.3.24 (b)	Rastres de l'arc en la platina d'acer després de l'experiment	135
Fig.A.1	Escena d'un sinistre probablement produït per un portafusibles mal roscat	164
Fig.A.2	Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB	165
Fig.B.1	Experiment de curtcircuit de 6,7kA sobre un conductor de Cu nu.....	167
Fig.B.2	Experiment d'ejecció d'espurnes des d'un conducte tubular d'alumini.....	168
Fig.B.3 (a)	Deformació de flames per camp elèctric.....	169
Fig.B.3 (b)	Efectes de la polaritat sobre flames sotmeses a un camp elèctric.....	169
Fig.B.3 (c)	Extinció d'una flama per camp elèctric	169
Fig.B.3 (d)	Moviment d'un conductor amb càrrega elèctrica en presència d'una flama.....	169
Fig.B.4	Detecció i anàlisi d'espurnes mitjançant Matlab	171
Fig.B.5	Detecció i anàlisi d'una espurna mitjançant Matlab	172
Fig.C.1	Oscil·logrames relatius al funcionament d'un regulador d'inducció	174
Fig.C.2	Explosor basat en el tub de Thiele	175
Fig.D.1	Esquerdes en l'aïllament dels conductors de fase i neutre d'un sinistre.....	177
Fig.D.2	Partícules adherides a una empiuladura de Al sotmesa a l'acció de l'arc	179

Llista de taules

Taula 1.1	Manifestacions típiques de l'energia d'activació del foc	4
Taula 2.1	Anàlisi EDX de la superfície d'un tub d'alumini usat en sistemes de ventilació	69
Taula 2.2	Pèrdua de massa i superfície del tub en diferents assajos	81
Taula 2.3	Anàlisi EDX de la composició d'un panell recobert d'alumini	93
Taula 2.4	Estimació de la quantitat d'alumini ejectat amb la configuració E.....	100
Taula 3.1	Tensions disruptives (cresta) entre la filassa i la platina en presència de flames.....	133
Taula A.1	Propietats dels combustibles en funció de l'origen i propagació del foc	160
Taula A.2	Valors mínims de corrent per estabilitzar un arc sèrie	161
Taula A.3	Anàlisi EDX de la superfície d'un conducte tubular de Al posterior als assajos.....	161
Taula A.4	Tensions disruptives associades a l'experiment de l'explosor de banyes.....	162
Taula A.5	Relacions de reducció de U_d a l'experiment de l'explosor de banyes.....	162
Taula A.6	Tensions disruptives associades a l'experiment de l'explosor de Thiele.....	163

Llista d'abreviacions i símbols

d	Densitat (kg/m^3)
D	Diàmetre (m)
D	Distància (m)
D_D	Distància disruptiva (m)
D_{el}	Distància que evita descàrregues disruptives entre les parts en tensió i objectes a potencial terra en condicions d'exploració normal de les xarxes (m).
E_i	Energia d'ignició (J)
f	Freqüència (Hz)
fps	Fotogrames per segon (fps)
h	Alçada o cota (m)
I	Intensitat elèctrica (A)
I_0	Intensitat de buit (A)
$I_{cc,max}$	Intensitat de curtcircuit màxima registrada durant un experiment (A)
I_k	Intensitat de curtcircuit permanent en valor eficaç (A)
$I_{k'}$	Intensitat de curtcircuit simètrica inicial en valor eficaç (A)
I_N	Intensitat nominal
I_m	Intensitat de dispar magnètica d'un interruptor automàtic (A)
l	Longitud (m)
m	Massa (g)
P	Potència elèctrica activa (W)
Q	Potència elèctrica reactiva (var)
R	Resistència elèctrica (Ω)
s	Superfície (m^2)
S	Àrea de la secció transversal d'un conductor (m^2)
S	Potència elèctrica aparent (VA)
t	Temps (s)
T	Temperatura (K, °C)
T_A	Temperatura ambient (K, °C)
T_E	Temperatura d'ebullició (K, °C)
T_F	Temperatura de fusió (K, °C)
u_{cc}	Tensió de curtcircuit (%)
U	Tensió (V)
U_d	Tensió disruptiva (cresta) (V)
U_{ef}	Tensió eficaç (V)
U_N	Tensió nominal (V)
U_p	Tensió de pic (V)

U_{pap}	Tensió de pic a pic (V)
U_s	Tensió més elevada de la xarxa (V)
V	Potencial elèctric (V)
v	Velocitat (m/s)

Al	Alumini
C	Carboni
Ca	Calci
Cl	Clor
Cu	Coure
Fe	Ferro
H	Hidrogen
Mg	Magnesi
Mn	Manganès
Si	Silici
O	Oxigen
Ti	Titani

AMFE	Asociación de fabricantes de material eléctrico
AT	Alta tensió
BT	Baixa tensió
CA	Corrent altern
CC	Corrent continu
ETSEIB	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
EUA	Estats Units d'Amèrica
GRIIE	Grup de Recerca sobre Investigació d'Incendis i Explosions
IAFFS	International Association for Fire Safety Science
ICP	Interruptor de control de potència
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGA	Interruptor general d'alimentació
ISPC	Institut de Seguretat Pública de Catalunya
LAMT	Línia aèria de mitja tensió
MT	Mitja tensió
NFPA	National Fire Protection Association
NTP	Norma Tècnica Particular
PBD	Propagating Brush Discharge

PVC	Policlorur de vinil
RLAT	Reglament Electrotècnic de Línies d'Alta Tensió
REBT	Reglament Electrotècnic de Baixa Tensió
SAT	Sala d'Alta Tensió
SEM	Scanning Electron Microscope
TI	Transformador d'intensitat
TT	Transformador de tensió
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya

A.	Autor
A.f.	Autor de la fotografia
A.f.d.	Autor de la fotografia desconegut
cap.	capítol
dta.	Dreta
Eq.	Equació
esq.	Esquerra
et al.	I altres
Fig.	Figura
Ibid.	En el mateix lloc
Op. cit.	Obra citada
p.	pàgina
p.e.	per exemple
v.	veure

Introducció

Els incendis d'origen elèctric tenen una incidència estadística significativa. Són responsables anualment d'un gran nombre de sinistres al món, que comporten uns danys materials, personals i ambientals rellevants. No obstant, no existeix una bibliografia extensa que abordi la qüestió de forma específica. Tampoc estan definides unes línies de recerca clares sobre la temàtica al món, ni està gaire estesa la docència específica en aquest àmbit. En particular a Catalunya, no té presència en la majoria de plans d'estudis universitaris d'enginyeria o en els estudis reglats de formació professional, relacionats amb les instal·lacions elèctriques.

En el primer capítol es presenta una introducció a l'incendi d'origen elèctric. Es realitza una aproximació a l'estat de l'art, a partir de la descripció de les principals fonts d'ignició elèctrica conegudes. Es basa en la bibliografia, les guies i normatives de la NFPA, articles de recerca publicats en revistes i congressos internacionals i l'experiència acumulada durant els sinistres peritats, des del Laboratori de Màquines Elèctriques del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la ETSEIB (UPC). S'il·lustra amb exemples i alguns experiments de laboratori electrotècnic. Les fonts d'ignició es relacionen amb els seus efectes i alguns dels rastres característics que poden tenir un valor forense. També amb els efectes del foc sobre les instal·lacions elèctriques, com els arcs elèctrics ocasionats per una destrucció dels aïllaments. Aquests arcs, que es poden anomenar secundaris, acostumen a deixar pistes similars als arcs primaris que originen els incendis. Addicionalment poden tenir un efecte propagador. Finalment es realitza una petita valoració sobre l'estat de l'art de l'estudi estadístic de l'incendi d'origen elèctric i les fonts d'ignició elèctriques.

En el segon capítol es presenten experiments relacionats amb l'ejecció de partícules en combustió, incandescentes o calentes, produïda durant la circulació de corrents forts en baixa tensió. Es tracta d'una de les fonts d'ignició elèctrica poc investigades. S'utilitza un cas aportat pels Bombers de la Generalitat de Catalunya com a fil conductor. Suggestia que les canalitzacions de ventilació i climatització amb una superfície d'alumini, poguessin conduir a la ignició elèctrica o actuar com a propagadores o accelerants d'un incendi, quan entren accidentalment en contacte amb conductors actius. Les espurnes d'alumini tenen una habilitat superior a la d'altres metalls per produir la ignició de materials fàcilment inflamables. S'ha observat que aquesta casuística pot donar lloc a l'ejecció d'un gran nombre de partícules d'alumini que volen a temperatures molt elevades. Es proposen algunes mesures per reduir aquest risc. D'altra banda, els experiments poden tenir una aplicació docent per il·lustrar aquesta font d'ignició de forma econòmica i relativament senzilla.

En el tercer capítol es tracten experimentalment les descàrregues elèctriques en alta tensió, produïdes per la disminució de la rigidesa dielèctrica de l'aire en presència de foc. Poden afectar a les línies aèries i les instal·lacions d'alta tensió en cas d'incendi. Per exemple, a Catalunya han estat observades pels bombers durant les tasques d'extinció dels incendis forestals. Tenen implicacions en el subministrament d'energia elèctrica, la seguretat dels equips d'extinció d'incendis, la investigació de sinistres i la propagació del foc. Es parteix d'alguns estudis de recerca experimental publicats i un experiment realitzat a la UPC per il·lustrar aquesta temàtica, durant el peritatge d'un sinistre. Es presenta l'anàlisi d'aquest experiment i es realitzen derivades del mateix. S'observa que la disminució de la tensió disruptiva no està relacionada

únicament amb l'increment de la temperatura, sinó que depèn d'altres factors com l'efecte de la polaritat de les flames o les partícules conductores presents. Els experiments es relacionen amb el comportament de les línies aèries de MT durant els incendis en el nostre entorn i els resultats d'altres estudis. Poden tenir una aplicació docent en relació amb aquesta problemàtica.

En el quart capítol es presenten les conclusions globals de la tesi i les conclusions específiques de cada capítol. Finalment se suggereixen treballs i línies d'investigació futures.

Capítol 1. Introducció als incendis d'origen elèctric

1.1 Fonaments d'incendis i explosions

1.1.1 Incendis

Un incendi és un foc d'evolució descontrolada. És habitual realitzar l'aproximació a l'anàlisi dels elements d'un incendi a partir de la representació geomètrica anomenada tetraedre del foc (v. Fig.1.1). Cadascun dels costats del tetraedre conté un element necessari pel manteniment del foc: comburent, energia d'activació i reacció en cadena. Les quatre cares adjacents de la figura del tetraedre representen que aquests quatre elements contribueixen de forma conjunta al foc, de forma que si un d'ells desapareix, es produeix la seva extinció.

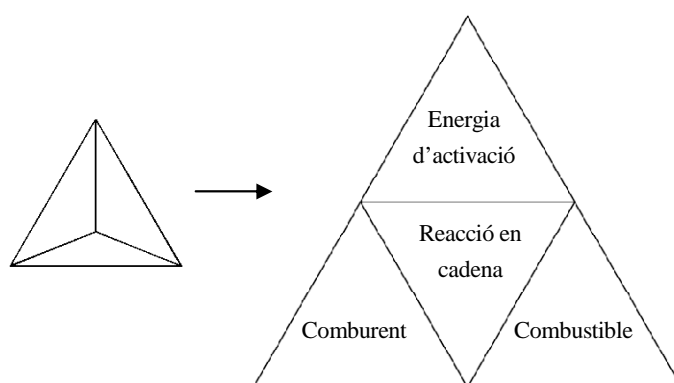


Fig.1.1 Tetraedre del foc.

El combustible pot ser qualsevol substància que es pugui cremar. Aquest procés s'anomena combustió. Hi té lloc una reacció d'oxidació exotèrmica que implica l'alliberament ràpid d'energia i la transformació química del combustible¹.

El comburent és l'agent oxidant que propicia la combustió. L'oxigen és el denominador comú en tots els comburents coneguts. El més habitual és l'oxigen atmosfèric, amb una concentració normal del 21% en volum d'oxigen.

També poden actuar com a comburent les mescles gasoses o vaporoses amb presència d'oxigen (com a mínim entre 5% i 15%), les mescles líquides amb contingut d'oxigen, les sals sòlides d'oxoàcids (utilitzades en artilleria), etc.

En conseqüència, normalment perquè hi hagi combustió, cal una certa quantitat d'oxigen a l'ambient. Tot i així, també pot produir-se en entorns pobres en oxigen en determinades condicions, si hi ha substàncies que puguin desprendre oxigen contingut a la seva pròpia estructura molecular [3].

¹ A la taula A.1 de l'annex A, es detallen les principals propietats dels combustibles relacionades amb l'origen i la propagació del foc.

L'energia d'activació és la mínima energia requerida perquè es produeixi la combustió. Es manifesta habitualment amb les formes i característiques que es mostren a la taula 1.1. Com major sigui la presència d'oxigen major serà la inflamabilitat, de forma que es requerirà una menor energia d'activació i el foc s'iniciarà amb major facilitat.

Energia	Temperatura	Duració	Extensió
Flames i arcs	Elevada	Elevada	Elevada
Espurnes i guspires	Elevada	Reduïda	Reduïda
Superfícies calentes	Reduïda	Elevada o reduïda	Elevada o reduïda

Taula.1.1 Manifestacions típiques de l'energia d'activació del foc.

Les fonts d'ignició són les responsables d'aportar l'energia d'activació per tal que el combustible, en presència del comburent, pugui entrar en combustió.

La reacció en cadena és la transmissió d'energia des d'unes partícules de la combustió a d'altres. Propicia que es mantingui la reacció i es puguin generar nous focus d'ignició, de forma que el foc no s'extingeixi.

Un cas particular de combustió, de gran poder destructiu, implicada en els incendis i que accelera la seva progressió, és la combustió sobtada generalitzada o "flashover". Es produeix quan durant un incendi en un espai confinat, totes les superfícies combustibles involucrades s'inflamen d'una forma sobtada, més o menys simultània, a causa de la radiació tèrmica. Això provoca que tot l'espai és vegi involucrat ràpidament en l'incendi, atès que tot el volum es veu immers en flames [4].

1.1.2 Explosions

Una explosió és una conversió instantània d'energia potencial en cinètica, amb producció i alliberament d'un gas que estava a pressió. Durant aquest procés aquests gasos realitzen un treball, com pot ser moure o transformar els materials que tenen al voltant [5].

Les explosions poden ser de tipus mecànic, nuclear, químic o elèctric. Les explosions químiques i elèctriques no controlades, són les que normalment són susceptibles de causar sinistres amb un origen relacionat amb l'electricitat.

Les explosions químiques més habituals poden ser deflagracions o detonacions. Els dos fenòmens requereixen per poder tenir lloc l'existència dels següents elements:

- Un combustible que normalment tindrà la forma de gas, vapor, pols o fum².

² Les explosions de fum o "Backdraft" es poden produir, per exemple, quan en un recinte tancat la combustió s'ha aturat per falta de comburent, però continua existint fum combustible a elevada temperatura. Una entrada sobtada d'aire, per exemple deguda al trencament d'una finestra, pot desencadenar una explosió.

- Un comburent, normalment aire atmosfèric, que al barrejar-se amb el combustible anterior produeix una mescla inflamable.
- L'energia d'activació necessària perquè es produeixi la inflamació de la mescla.

Una deflagració produeix un front de flama amb una velocitat subsònica. En canvi, una detonació genera una ona de xoc supersònica que comporta sobrepressions molt superiors. En ambdós casos existeix la possibilitat que es produeixen reaccions en cadena. Els efectes destructius d'aquests fenòmens augmenta significativament en cas de confinament. Per exemple, si es produeixen a l'interior d'un edifici amb tancaments de gran resistència o a l'interior d'un buc.

Les explosions elèctriques són degudes als arcs elèctrics d'alta tensió i elevada energia. L'escalfament ràpid dels gasos que envolten l'arc, a causa de la seva elevada temperatura, produeixen explosions mecàniques en forma d'ones de xoc. Un exemple natural d'explosió elèctrica és el tro. Aquestes explosions poden ser innòcues o poden causar o contribuir a propagar un incendi [6].

1.2 Ignició elèctrica

Les fonts d'ignició d'origen elèctric aporten l'energia d'activació necessària per donar lloc a un incendi o una explosió, a partir d'una transformació de l'energia elèctrica en calorífica. Normalment són fonts d'ignició accidentals que s'associen a defectes o un mal ús d'equips i instal·lacions elèctriques. No obstant, també poden ser degudes a processos naturals, com per exemple, en el cas d'incendis originats per llamps i altres descàrregues elèctriques relacionades amb l'electricitat estàtica. Són les fonts d'ignició que ocasionen un incendi o explosió d'origen elèctric.

Que una font elèctrica pugui transmetre l'energia suficient perquè es produeixi la ignició d'un combustible, és una condició necessària però no suficient, perquè s'origini un incendi o una explosió. En primer lloc, aquesta font elèctrica ha d'estar activa. En segon lloc, l'energia calorífica generada per la font elèctrica ha de ser transferida als combustibles de l'entorn, en presència de comburent, amb una magnitud prou elevada i una duració suficient, com perquè es produeixi la combustió.

Un radiador elèctric, en règim nominal de funcionament, pot emetre suficient energia calorífica com per produir la ignició d'una cortina tèxtil i originar un incendi. Ara bé, això no vol dir que en una habitació amb un radiador i una cortina s'hagi de produir un incendi per aquest motiu. Cal que el radiador estigui en funcionament i que l'apropem suficientment a la cortina durant un temps prou prolongat. De forma que l'energia calorífica, que normalment s'evacua innòcuament a través de l'ambient, pugui augmentar la temperatura de la cortina a uns valors suficientment elevats com per provocar la seva ignició.

En l'escena del sinistre il·lustrat a la Fig.1.2, s'observa un calefactor elèctric endollat, amb l'interruptor en posició d'encès i proper a l'espai que ocupava una cortina. No obstant, el calefactor i la cortina podrien haver estat destruïts per un foc ocasionat en un altre punt. En aquest cas, la

superfície de paret sense sutge adherit i en forma de V invertida és un indicati³, que situa l'origen de l'incendi en aquesta zona i recolza la hipòtesi que apunta a una ignició causada pel calefactor.



Fig.1.2 Escena d'un incendi provocat per un calefactor elèctric. (A.f.d. Font: v. [7]).

Encara que la transferència de calor del radiador a la cortina sembli la hipòtesi més obvia, no és la única. Per exemple, un mal contacte en el mecanisme de l'interruptor del calefactor podria ocasionar un contacte de resistència elevada i un sobreescalfament⁴. Al transmetre calor per convecció i radiació als cables d'alimentació, podria deteriorar els seus aïllaments. Amb el temps, podria produir-se un curtcircuit amb arc elèctric, que provoqués la ignició dels cables d'alimentació que passaven a prop de la cortina.

Inclús si l'interruptor hagués estat en posició d'apagada, el calefactor endollat podria ser-ne el responsable. Per exemple, els cables d'alimentació del radiador podrien tenir un aïllament que estigués patint un procés de deteriorament dielèctric d'origen elèctric. Tot i passar externament inadvertit, es podria perforar en algun punt crític i podria conduir a un curtcircuit amb arc.

D'altra banda, alguns investigadors no considerarien el cas de simple radiació de calor, des del radiador a la cortina, com un incendi d'origen elèctric. És perquè en aquest cas el foc és una conseqüència indirecta de la circulació del corrent elèctric. Tot i així, una instal·lació inadequada d'un equip elèctric, en condicions de mala ventilació, és la que produeix l'incendi i l'energia procedeix de la generació de calor per efecte Joule.

Es posa de manifest que les possibles casuístiques són molt diverses. Una anàlisi experta de l'escena del sinistre és determinant a l'hora d'establir-ne les causes. Tot i així, és factible que el

³ En la zona on s'origina el foc, sovint la combustió en forma de flames és molt bona. S'observa que en la paret adjacent no hi ha rastres de fum, atès que el sutge només s'adhereix sobre superfícies fredes.

⁴ Aquest tipus d'ignició elèctrica es detalla a l'apartat 1.3.1.3.

propi foc destrueixi part de les proves o passin inadvertides. En alguns casos, encara que es pugui senyalar l'origen, és possible que la causa elèctrica del sinistre no sigui determinable amb certesa.

A l'hora d'establir relacions de causa i efecte que portin a senyalar una font d'ignició elèctrica com a origen d'un incendi, cal considerar que el foc deteriora o destrueix la majoria d'aïllaments elèctrics. Si les temperatures són prou elevades també fon els conductors. Les fonts d'ignició elèctrica poden ocasionar un incendi. Però també acostumen a aparèixer com a conseqüència de l'acció del foc (especialment els arcs anomenats secundaris). En funció de l'escenari, poden ajudar a propagar l'incendi, generant nous focus. O bé, no tenir gaire rellevància en relació amb la progressió i propagació del foc. Aquesta singularitat pot generar falses pistes que dificultin establir un origen elèctric.

Tornant al sinistre il·lustrat a la Fig.1.2, un cop iniciat l'incendi pel sobreescalfament de la cortina, el foc degrada i carbonitza els aïllaments dels conductors que alimenten el calefactor. Això pot donar lloc a un curtcircuit amb arc elèctric entre ells i deixar-ne indicis. Trobar-los en l'escena del sinistre, permetria realitzar la hipòtesi que un deteriorament previ dels aïllaments hagués donat lloc a l'incendi. Existeixen alguns rastres i estratègies que poden ajudar a reconstruir l'ordre dels fets⁵. No obstant, hi ha similituds entre els rastres ocasionats per l'acció directa de les flames i els associats a defectes elèctrics. D'altra banda, distingir els arcs anteriors i posteriors al foc (primaris i secundaris) no és trivial. Tot això dificulta la tasca de l'investigador i pot induir-lo a cometre errors.

En els casos d'ambients explosius, com barreges d'aire amb gasos, vapors, boires i pols, l'energia mínima d'ignició necessària per produir una explosió és molt reduïda⁶. La majoria de descàrregues poden transferir energia suficient per provocar la ignició en ambients explosius (v.1.3.2).

1.3 Fonts d'ignició d'origen elèctric

1.3.1 Generació de calor

1.3.1.1 Escalfament per efecte Joule en condicions de ventilació insuficient

1.3.1.1.1 Descripció de la font d'ignició

Qualsevol conductor elèctric amb component resistiva, pel que hi circuli un corrent, genera calor per efecte Joule. Pot produir un sobreescalfament que condueixi a la ignició.

Pot ser provocat per un mal ús o per un defecte de funcionament o instal·lació d'un equip elèctric que genera calor. O bé per un aïllament tèrmic excessiu, que dificulti l'evacuació normal de calor d'un dispositiu o conductor elèctric.

Es pot produir sense superar el corrent nominal de l'aparell o instal·lació. En aquest cas les proteccions elèctriques no actuen.

⁵ v. 1.3.1.4, 1.3.2.6 i 1.3.3.2.

⁶ Per la majoria de mesclades de gasos i vapors l'energia mínima d'ignició és de l'ordre de 0,25mJ [8]. Per pols de $1\text{mJ} < E_i < 1\text{J}$ [9].

1.3.1.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

Per exemple, una assecadora de roba amb el termòstat avariats, integrada en un espai confinat massa reduït, per criteris estètics. Comporta una mala instal·lació que dificulta la ventilació i un defecte de funcionament. O bé, sense defecte de funcionament, una làmpada halògena encastada en un moble de fusta (el transformador s'acostuma a integrar dins de l'armari, dificultant la refrigeració).

Un cable instal·lat en una canalització amb excessiu aïllament tèrmic, pot produir un sobreescalfament dels seus aïllaments. Les ampliacions que saturen els tubs de les instal·lacions domèstiques són típiques.

Alguns investigadors no classifiquen els incendis produïts simplement per la calor transferida per dispositius elèctrics generadors de calor com incendis d'origen elèctric (com el cas del calefactor ubicat massa a prop de la cortina; o el d'un mal funcionament del termòstat d'una placa de cocció, que provoca un increment de la temperatura de l'oli fins a la seva ignició).

1.3.1.2. Sobreintensitats: sobrecàrrega i curtcircuit

1.3.1.2.1 Descripció de la font d'ignició

Una sobreintensitat pot produir un sobreescalfament dels cables per efecte Joule. Aquest origina un augment de la temperatura dels seus aïllaments, que pot superar aquella per la qual han estat dimensionats. Això pot deteriorar-los de forma més ràpida a l'habitual, encara que la sobreintensitat sigui petita. Amb temps suficient, es pot produir la ignició dels aïllaments o de combustibles propers. Especialment en situacions d'aïllament tèrmic excessiu.

Aquesta casuística és típica d'una sobreintensitat per sobrecàrrega prolongada o sobre tensió permanent. La sobrecàrrega molts cops no deteriora el conductor. No obstant, la degradació dels aïllaments, pot donar lloc a l'aparició de curtcircuits i arcs elèctrics, els quals sí acostumen a deteriorar els conductors.

En casos severs de corrents forts, com curtcircuits i conduccions a massa de corrents elevats, tenen lloc grans increments de temperatura dels conductors. També efectes electrodinàmics violents, a causa de les forces electromagnètiques entre ells. La temperatura pot arribar a ser prou elevada com per iniciar un procés de fusió. Apareix un efecte de forja de filasses, a causa de l'esforç electrodinàmic d'atracció simultani per l'escalfor interna en absència d'oxigen. Es pot produir fluència, degoteig de material i finalment el trencament del conductor.

A la Fig.1.3, es mostra un experiment⁷ que il·lustra aquesta seqüència en un conductor de coure nu. L'experiment es detalla a l'annex B.1.1.

En el punt de trencament és habitual que es generi un arc elèctric de separació⁸. Allibera una gran quantitat d'energia localitzada en aquest punt. Dóna lloc a episodis violents amb abundant fusió de

⁷ Experiment realitzat al Laboratori de Màquines Elèctriques de l'ETSEIB.

material i ejecció d'espurnes i partícules calentes. Finalment, s'interromp el corrent i l'aportació de calor des de la font elèctrica, a causa del trencament del conductor.

Aquest fenomen, de gran potencial incendiari i explosiu, és característic de les sobreintensitats per curtcircuit. On la disminució sobtada de la impedància a valors ínfims, produeix un augment sobtat de la intensitat fins a centenars o milers d'ampers. Produeix un efecte tèrmic d'escalfament dels conductors de tipus adiabàtic, en el sentit que molts cops no hi ha temps per dissipar la calor a través dels aïllaments [10].

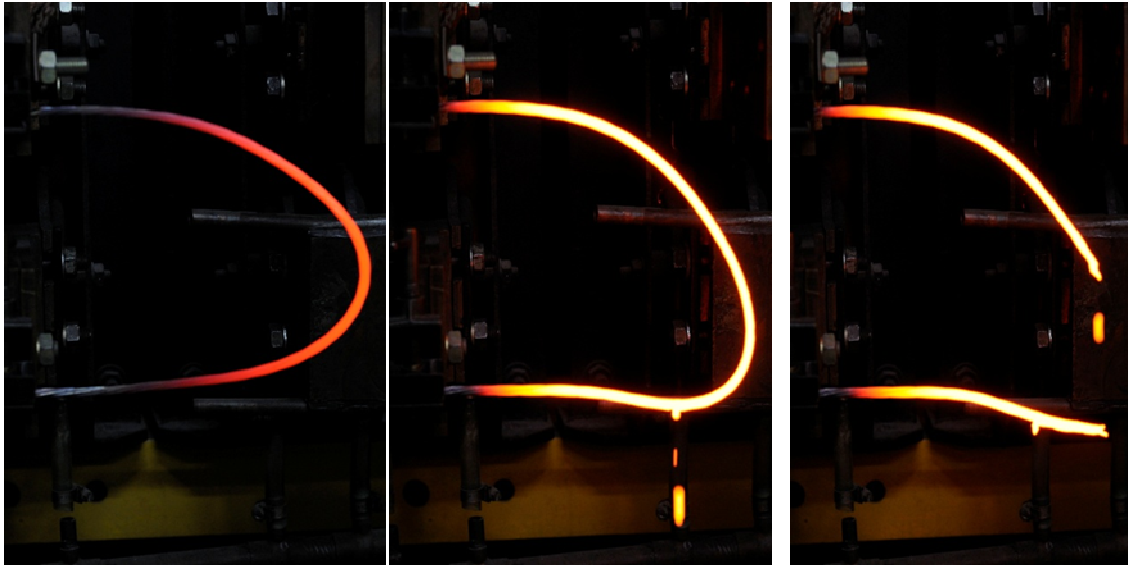


Fig.1.3 Trencament experimental d'un conductor de Cu per sobreintensitat. (A.f. Martí, M.).

1.3.1.2.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

La sobrecàrrega normalment és interrompuda per l'actuació de les proteccions elèctriques. S'ha de produir un mal dimensionament dels conductors i/o de les proteccions, o bé un mal funcionament de les proteccions, perquè sigui prou prolongada per representar una font d'ignició potencial.

Per exemple, la popularitat de les extensions multibase als habitatges (sovint de baix cost), és un dels principals problemes de seguretat elèctrica domèstica. A Espanya, el REBT de 2002 ha ampliat el nombre de bases mínimes per estança i la seva guia tècnica recomana la instal·lació d'un nombre de bases superior al mínim⁹ [12]. L'objectiu és reduir la tendència dels usuaris a utilitzar extensions amb endolls múltiples. Els seus conductors freqüentment no estan dimensionats de forma coherent amb les proteccions del circuit de l'habitatge, el que dificulta l'actuació de les proteccions. La presència de combustibles i mala ventilació en el seu entorn és habitual (p.e. quan s'amaguen al mobiliari o s'instal·len sobre catifes). Als EUA, se senyala també aquesta

⁸ Aquest tipus d'arc es descriu a l'apartat 1.3.2.2.

⁹ Segons un estudi de la AMFE, aproximadament el 70% de les instal·lacions elèctriques en habitatges realitzades a Espanya en base al REBT de 1973, es troben en situació de perill en aquest sentit [11].

problemàtica com a una de les causes comunes d'incendi d'origen elèctric per sobrecàrrega a l'habitatge [13].

D'altra banda, les proteccions elèctriques no poden actuar si no n'hi ha o no funcionen. Una secció insuficient dels conductors també és un factor de risc. Segons un estudi estadístic, aquesta és una situació freqüent a Espanya (v. 1.4).

En relació amb el dimensionament dels conductors de les línies elèctriques, la majoria de conductors actius acostumen a estar força sobredimensionats. Combinat amb un ús i funcionament correcte de les proteccions, disminueix el risc davant d'excessos moderats de demanda de potència o davant d'un augment imprevist del seu aïllament tèrmic.

No obstant, la circulació de corrents elevats pel neutre de les línies trifàsiques de BT, representa un perill singular. Les fases sovint són protegides contra sobreintensitats amb fusibles, enlloc d'usar interruptors automàtics de tall omnipolar (p.e. en les línies generals d'alimentació dels edificis). El neutre no es protegeix amb fusible¹⁰. Normalment pel neutre hi circula corrent, atès que els consums elèctrics acostumen a ser desequilibrats. Actualment existeix un gran nombre de càrregues no lineals connectades a instal·lacions domèstiques i industrials (equips informàtics, làmpades de descàrrega, convertidors estàtics, etc), que introdueixen distorsions harmòniques. En particular, una circulació rellevant del tercer harmònic, pot produir increments significatius en els corrents que circulen pel neutre. Aquesta problemàtica, de vegades no suficientment prevista amb un sobredimensionament adequat dels conductors de neutre en els projectes, pot comportar sobreescalfaments per sobrecàrrega continuada. De vegades, el manteniment de les línies i connexions del neutre rep menys atenció que el de les fases. Sovint és per la impressió que no hi circulen corrents importants.

Les sobretensions permanents també poden conduir a situacions de sobrecàrrega dels conductors, sense necessitat que existeixi una demanda de potència excessiva. La principal causa acostuma a ser la interrupció del conductor neutre d'una línia trifàsica. Aquesta casuística és potencialment perillosa, perquè la implantació de les proteccions contra sobretensions permanents encara no està generalitzada¹¹.

Les caigudes de tensió excessives i forats de tensió, poden ser igualment perillosos, especialment quan el sistema alimenta certs tipus de motors. Per exemple, les neveres i els congeladors de compressor tenen un motor d'inducció, en molts casos monofàsic, que arrenca freqüentment amb corrents superiors a set vegades el nominal [16]. Un altre exemple és el de motors de formigonera alimentats a l'obra per extensions excessivament llargues. Per mantenir la potència, la intensitat consumida pel motor augmenta. Aquestes sobrecàrregues continuades poden accelerar el deteriorament dels aïllaments i acabar provocant la seva ignició.

¹⁰ Una interrupció del neutre, mentre les fases continuen actives, pot donar lloc a sobretensions en els subministraments monofàsics.

¹¹ L'obligatorietat d'aquestes proteccions a Catalunya és recent (en compliment de l'article 16.3 del nou REBT de 2002 [14] i de la norma tècnica particular per instal·lacions d'enllaç en baixa tensió de FECSA-ENDESA; reconeguda pel DOGC n°4827, de 22 de febrer de 2007 [15]).

El curtcircuit normalment també és interromput per l'actuació de les proteccions elèctriques. No obstant, pot produir esdeveniments violents en pocs milisegons (especialment quan implica fusió dels conductors amb arc i ejecció d'espurnes). La causa més habitual és el deteriorament dels aïllaments. Principalment és originat per l'envelliment, el sobreescalfament produït per altres defectes elèctrics o fonts de calor i les sobrecàrregues mecàniques (radis de curvatura excessius, tracció excessiva durant el moviment d'equips industrials automatitzats, com braços robòtics, etc). També pot ser ocasionat per falles mecàniques dels connectors. Encara que actuïn les proteccions, el curtcircuit pot actuar com a font d'ignició de combustibles o explosius.

Un dimensionament adequat del poder de tall de les proteccions, en relació amb la potència de curtcircuit de la xarxa, és rellevant a l'hora d'aconseguir que aquestes actuïn correctament. No és insòlit trobar interruptors automàtics destruïts o fusibles soldats a les bases després d'un curtcircuit. A la Fig.1.4 (a), s'observa un cas extrem. Després d'un sinistre en el nínxol de la caixa general de protecció d'un edifici provocat per un curtcircuit amb arc elèctric, només resten els conductors de coure d'entrada. Els conductors d'alumini procedents de la línia de distribució s'han volatilitzat¹².

Un cop iniciat l'incendi, el foc també pot produir curtcircuits. Pot ser a causa de la destrucció dels aïllaments o per la generació de camins conductors carbonitzats sobre la seva superfície.



Fig.1.4 (a) Caixa general de protecció d'un edifici afectada per un curtcircuit. (A.f. Bombers de la Generalitat de Catalunya.). (b) Tanca metàl·lica de jardí afectada per una sobrecàrrega. (A.f. Graps, A.; font: v. [17]).

Una altra casuística particular és la del curtcircuit llunyà, en borns d'una càrrega petita, en relació amb la potència del circuit. El corrent de curtcircuit pot no augmentar de valor suficientment com per produir el dispar de les proteccions, a causa de l'elevada resistència del cable que l'alimenta.

¹² La baixa temperatura de fusió de l'alumini, en relació amb la del coure, i la seva tendència a projectar una gran quantitat d'espurnes quan es sotmès al curtcircuit amb arc, propicien aquest efecte (v. 1.3.3)

D'altra banda, un motor d'inducció al girar disposa d'una certa massa rodant que posa en joc una energia cinètica. Quan en borns d'un motor d'inducció es produeix un curtcircuit, perd el sincronisme i inicia el seu procés de desacceleració. Part de l'energia cinètica acumulada genera un corrent addicional de curtcircuit que s'aporta a la xarxa. El motor esdevé transitòriament un generador. En les instal·lacions amb motors que giren connectats en paral·lel amb el punt de curtcircuit, aquests aporten un corrent addicional que pot magnificar els seus efectes.

Les sobrecàrregues i curtcircuits també poden produir-se per la circulació de corrent a través de conductors imprevistos. La connexió a terra d'aquestes masses pot ser inexistent, el que impedeix l'actuació de les proteccions diferencials. Per exemple, en el sinistre mostrat a la Fig.1.4 (b), un habitatge és afectat per un incendi originat per la circulació de corrent a través d'una tanca metàl·lica mallada de jardí amb recobriment plàstic. Un altre exemple, és la circulació de corrent a través d'alguns animals electrocutats en els embarrats dels quadres elèctrics (v. annex D.2).

1.3.1.3 Contactes de resistència elevada

1.3.1.3.1 Descripció de la font d'ignició

Els contactes de resistència elevada produeixen un sobreescalfament per efecte Joule de la zona de contacte, que promou la formació d'òxid superficial. Atès que la resistència dels òxids és significativament superior a la dels metalls conductors originals, s'incrementa encara més la resistència i la calor generada per aquest efecte [18]. En conseqüència, encara es genera més òxid. Normalment no implica sobreintensitats ni caigudes de tensió significatives, pel que les proteccions elèctriques difícilment actuen. Aquest fet propicia una llarga duració i una detecció difícil.

Com és un procés localitzat en una àrea reduïda, petites intensitats són suficients per grans increments de temperatura. Si hi ha materials combustibles a prop, la ignició és factible. En alguns casos, pot produir-se la incandescència dels metalls i/o òxids involucrats, perquè es poden assolir temperatures superiors als 1200°C [19]. A la Fig.1.5 (a), es mostra un cas singular. El sobreescalfament d'un conductor de coure, promou la formació d'òxid de coure (I). L'òxid assoleix la incandescència, mentre la resta del conductor roman a una temperatura relativament baixa [20].

La calor generada és transferida des del punt de contacte als conductors i d'aquí als aïllaments en totes direccions. Pot degradar els aïllaments i provocar l'aparició d'altres fonts d'ignició, com arcs. També dilatar els conductors involucrats en les connexions, el que propicia que s'afluixin i acabin fallant. A la Fig.1.5 (c) es mostren les dues connexions d'una reactància ubicada en un quadre elèctric (vistes mitjançant càmera termogràfica, durant una inspecció). Pels conductors hi circula el mateix corrent nominal. S'observa un augment anòmal de la temperatura d'un dels terminals i com s'està transmetent aquesta calor al conductor i als seus aïllaments, produint un sobreescalfament. Al verificar l'estat del terminal, es va comprovar que no estava correctament grimpat (es podia extreure el conductor estirant-lo lleugerament amb els dits).

Els mals contactes també es poden relacionar amb l'aparició de descàrregues elèctriques de separació que aportin més calor. Poden estabilitzar-se o actuar intermitentment. Actuen com un

element més del circuit connectat en sèrie, sense disparar les proteccions elèctriques. A la Fig.1.5.(b) es mostra un experiment que ho il·lustra (es detalla a l'apartat 1.3.2.2.3).

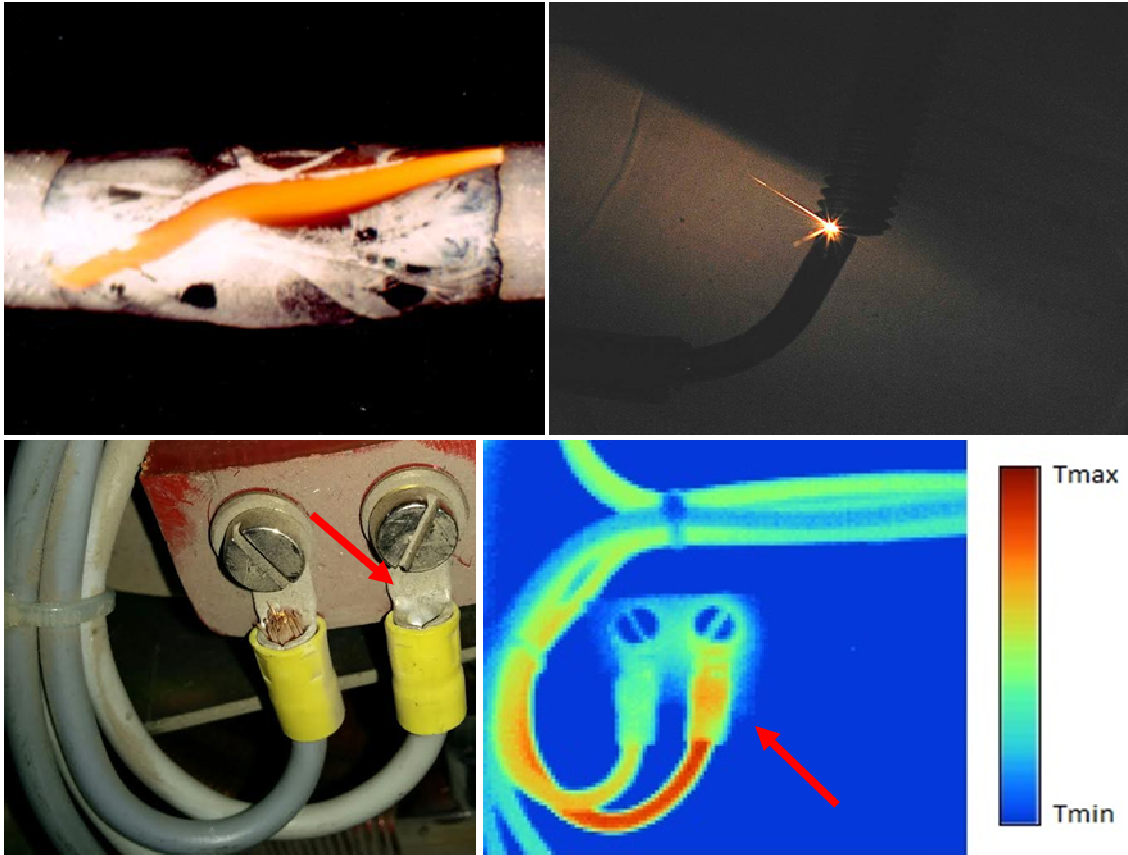


Fig.1.5 (a) Formació d'òxid de coure (I) incandescent en un conductor. (A.f: Hagimoto, Y. Font: v. [20]). (b) Descàrrega elèctrica de separació reproduïda experimentalment. (c) Anàlisi termogràfic d'un contacte d'elevada resistència. (A.f. Martí, M.).

1.3.1.3.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

Les causes que poden conduir a un contacte d'elevada resistència són diverses i freqüents.

En l'àmbit de les instal·lacions industrials, la manca d'una pressió adequada i l'ús de pastes conductores en les connexions, propicia l'aparició d'aquesta casuística. Les operacions de manteniment preventiu relatives a repassar periòdicament l'estat de les connexions, que tendeixen a afluixar-se amb el temps, no sempre són prioritàries. La correcta execució del procés d'inserció del cable en el terminal i crimpatge també és determinant, especialment quan es tracta de conductors d'alumini (v. 2.1.2).

Els contactes mòbils, com rodets o escombretes, tendeixen a afluixar-se amb el temps. Si el manteniment no és adequat el sobreescalfament produeix oxidació en la connexió. A la Fig.1.6.(a) es mostra el sobreescalfament d'un dels contactes mòbils d'un autotransformador trifàsic

regulable¹³. S'observa com la calor es propaga al seu cablejat. També poden ser originats per la interposició de pols o brutícia poc conductora en el contacte, entre d'altres causes.

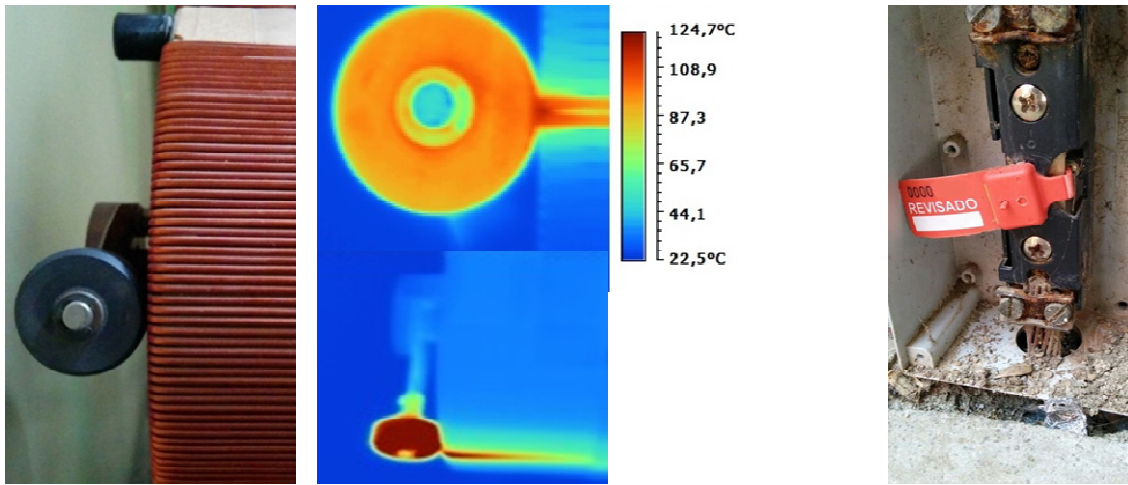


Fig.1.6 (a) Anàlisi termogràfic d'un mal contacte en un autotransformador. (b) Pont de terra mòbil revisat amb contactes oxidats. (A.f. Martí, M.).

En l'àmbit dels edificis, les connexions en regletes també tenen tendència a aflluixar-se amb el temps (especialment quan estan mal executades). Un factor de risc són les freqüents modificacions i ampliacions d'instal·lacions elèctriques d'habitatges no realitzades per professionals. Un altre factor de risc comú és la falta de concordança entre la secció del connector i la dels conductors. Així com, una longitud insuficient del tram de cable pelat, que propicia la introducció d'un tram aïllat a la regleta. La superfície i pressió de contacte disminueix inicialment. El contacte plàstic també propicia que s'aflluixin amb el temps, el que accentua el problema.

Les centralitzacions de comptadors és un dels punts dels edificis on es produeixen incendis severos. Una potència elevada magnifica els efectes dels defectes elèctrics. Actualment és habitual que s'adquireixin precablejades. Això disminueix el risc, perquè l'instal·lador realitza menys connexions. Els punts crítics són la connexió de la LGA, de les derivacions individuals i el muntatge dels fusibles. Els fusibles que protegeixen les derivacions individuals s'instal·len en portafusibles roscats. Poden quedar mal ajustats propiciant un mal contacte. A la Fig.A.1, de l'annex A.2.1, es mostra un sinistre que podria haver estat ocasionat per aquesta casuística. Els embarrats de neutre poden conduir corrents grans, a causa dels desequilibris de corrents, que facilitin l'oxidació en cas de mal contacte.

L'oxidació d'origen atmosfèric de les connexions també poden generar contactes de resistència elevada si les caixes elèctriques, ubicades a l'exterior, deixen de ser estanques. D'altra banda, si les connexions de la posada a terra d'un parallamps s'afllueixen, els contactes pateixen sobreescalfaments durant les descàrregues. Quan la connexió és defectuosa, s'oxiden fortament, pels impulsos de gran intensitat del llamp. La seva revisió periòdica no és obligatòria per tots els

¹³ Detectat a partir de l'olor característica d'aïllament cremat que provenia del quadre on es trobava instal·lat.

edificis. Encara que ho sigui l'oxidació pot produir-se. És el cas que es mostra a la Fig.1.6 (b), corresponent a un edifici de pública concurrència de Catalunya.

1.3.1.4 Efectes sobre els conductors i aïllaments i la seva aplicació forense

1.3.1.4.1 Efectes ocasionats per les sobreintensitats

La calor interna generada en els conductors per efecte Joule, té efectes observables que poden ajudar a identificar una font d'ignició elèctrica. L'excés de calor generada durant una sobrecàrrega es transmet des del conductor en totes direccions i malmet els aïllaments. Produeix un efecte d'estovament i dilatació que tendeix a separar-los del conductor.

La transmissió de calor es produeix des de l'interior cap a l'exterior. És observable pel canvi de color (normalment decoloració i ennegriment) i la degradació de l'aïllament des de l'interior. L'exterior pot presentar signes de fusió i solidificació, ocasionats per la interacció amb un ambient a una temperatura inferior, com rius de material fos i forats. Si la temperatura i temps són suficients, hi haurà trams d'aïllament que es despendran deixant el conductor nu.

A la Fig.1.7 es mostren els efectes d'una sobreintensitat sobre els aïllaments d'un conductor implicat en un sinistre. Es trobava en la instal·lació interior d'un edifici mal dimensionada, en la que al produir-se un curtcircuit no van actuar les proteccions correctament. S'observen trams d'aïllament que s'han separat parcial o completament del conductor. L'interior dels aïllaments es troba totalment ennegrit i degradat. Tot i que l'exterior manté identificable el seu color, és visible l'efecte de fusió i solidificació i la formació de forats.

Amb corrents forts permanents, característics dels curtcircuits que no són interromputs ràpidament, les temperatures elevades degraden també els conductors. En els conductors de coure apareix oxidació superficial. Habitualment té una coloració vermella (òxid de coure (I)) o bé marró o negra (òxid de coure (II)) [21]. Aquests òxids poden reaccionar donant carbonat de coure (amb coloració verda) i altres sals. La degradació dels aïllaments de PVC genera àcids que ataquen el coure i també presenten una coloració verda o blava [22].

Si se supera la temperatura de fusió del coure, els fils que conformen el conductor poden soldar-se entre ells. Les forces d'atracció electromagnètica entre els fils, degudes als corrents paral·lels que hi circulen, en absència d'oxigen, afavoreixen aquest efecte de forja de filasses. També pot produir-se degoteig de material fos. No obstant, una actuació ràpida de les proteccions elèctriques acostuma a impedir la soldadura generalitzada. És perquè el corrent s'interromp abans que tot el conductor assoleixi una temperatura suficient.

Un trencament del conductor en el punt de curtcircuit, impedeix que continui circulant corrent. No obstant, normalment comporta un arc de separació associat. Genera fusió local i ejecció d'espurnes (v.1.3.2.6 i 1.3.3.2).

Tornant a la Fig.1.7, s'observa que els fils dels conductors de coure han quedat parcial o completament soldats entre ells. A l'intentar deformar el conductor es fa palesa una manca de flexibilitat i que ha esdevingut fràgil (es trenca fàcilment al doblar-lo amb els dits).

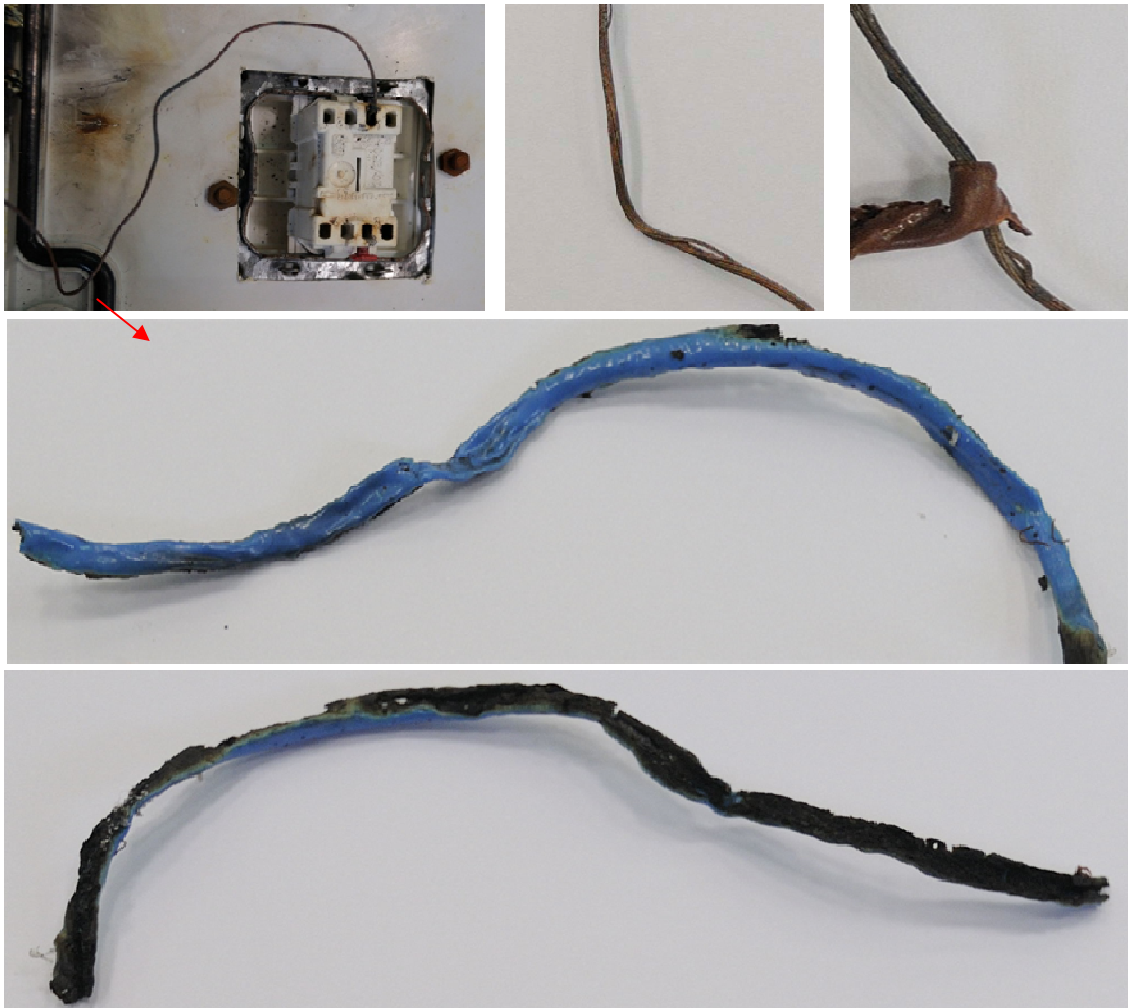


Fig.1.7 Efectes d'una sobrecàrrega sobre un conductor de coure flexible aïllat. (A.f. Martí, M.).

A la Fig.1.8 (a), es mostra un conductor de coure nu sotmès a curtcircuit durant l'experiment de laboratori presentat a la Fig.1.3 (es detalla a l'annex B.1.1).

S'observa com els fils han quedat soldats entre ells. És a causa de l'efecte de forja dels fils. És produït per l'esforç electrodinàmic d'atracció simultani, per l'escalfament intern en absència d'oxigen. També s'observa la formació d'una gota de coure i una osca adjacent, característica del procés de fusió per curtcircuit.

A la Fig.1.8 (b), s'observa la formació dels dos tipus d'òxid de coure superficial, amb coloració vermella, o bé, marró i negre. Així com, la formació de compostos amb carboni de coloració verda. A la Fig.1.8 (c), es mostra l'anàlisi mitjançant EDX del conductor¹⁴. Apareix el coure, l'oxigen i el carboni que conformen els compostos esmentats.

¹⁴ Anàlisi EDX realitzat al Laboratori de Microscòpia Electrònica de la UPC.

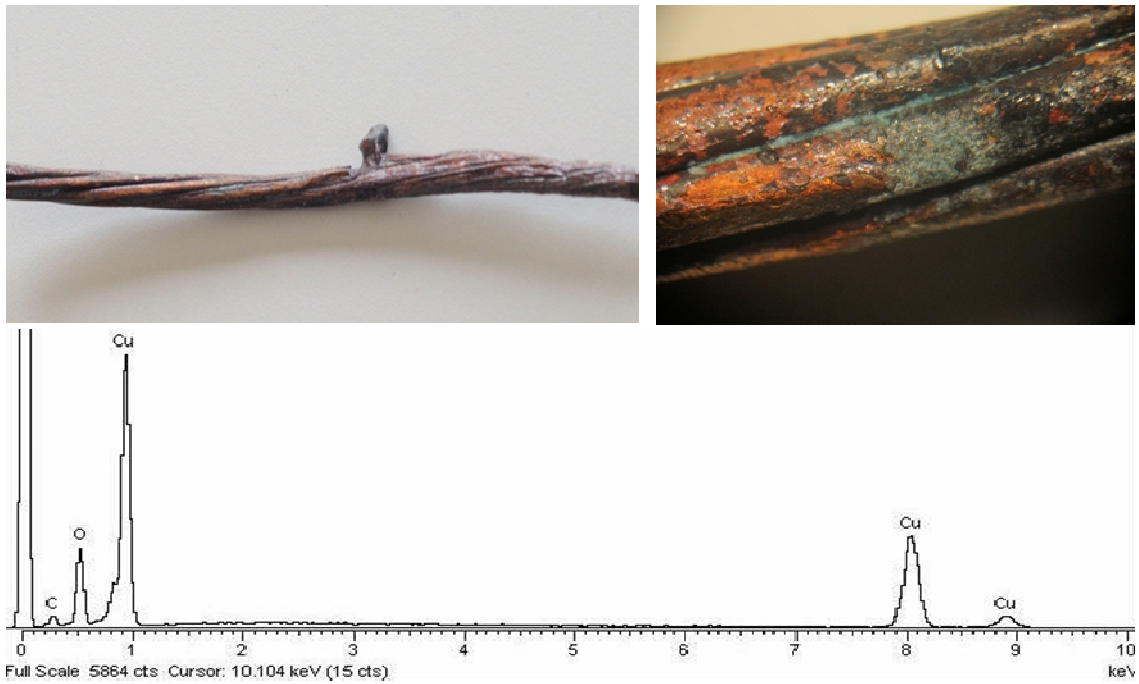


Fig.1.8 (a) Conductor de coure amb senyals de fusió per curtcircuit. (b) Detall de l'oxidació superficial. (A.f. Martí, M.). (c) Anàlisi EDX de la mostra.

1.3.1.4.2 Diferències entre els efectes produïts per les sobreintensitats i pel foc

Els efectes que generen els incendis sobre els conductors i els aïllaments poden confondre's amb els produïts per les fonts d'ignició elèctrica. Diferenciar aquests efectes, sempre i quan sigui possible, és útil per contribuir a descartar una font d'ignició elèctrica com a causa de l'incendi i evitar realitzar una hipòtesi errònia. El foc també pot destruir o modificar els rastres deixats per la font d'ignició. Aquest factor contribueix a dificultar la investigació i pot propiciar que la causa del sinistre pugui ser indeterminable.

El foc afecta els aïllaments des de l'exterior. L'aïllament comença a degradar-se des de fora, a diferència de quan la calor té un origen intern.

En alguns incendis, les flames l'afecten només superficialment. L'interior, tot i que fos, no es troba tan degradat (p.e. pot conservar la seva coloració), perquè s'ha mantingut a una temperatura més baixa [23]. L'orientació i el sentit dels rius i regalims d'aïllament fos, venen determinats per la gravetat. Pot ser útil per conèixer la posició del conductor en el moment del sinistre.

En altres ocasions, el foc els degrada completament. L'aïllament tendeix a adherir-se al conductor i no a separar-se, com en el cas de la calor interna (v. Fig.1.9).

El grau de degradació de l'aïllament produït pel foc i la zona de cable afectada, molts cops és heterogènia. És perquè el foc sovint no l'afecta uniformement. En canvi, quan la calor la produeix una sobreintensitat, la degradació del conductor és més homogènia al llarg de tota la seva longitud. Al circular-hi la mateixa intensitat, la calor generada és més uniforme.



Fig.1.9 Conductor de coure aïllat afectat pel foc. (A.f. Martí, M.)

El foc també afecta als conductors. El coure pateix un procés d'oxidació superficial que pot ser similar al produït per una sobreintensitat en quan a la formació de compostos (v. Fig.1.10 (a)). Pels mateixos motius que en el cas de l'aïllament, la degradació tendeix a ser més irregular i heterogènia.

El coure té un punt de fusió elevat ($T_F=1084^\circ\text{C}$), en relació amb altres materials conductors com l'alumini ($T_F=660^\circ\text{C}$) [24]. Sovint els conductors de coure afectats pel foc no presenten símptomes de fusió. En la majoria d'incendis en edificis normalment no s'assoleix la seva temperatura de fusió [25].

No obstant, en alguns incendis si es pot superar aquesta temperatura. En aquest cas, els conductors poden fondre's i soldar-se per acció del foc, sense necessitat d'una sobreintensitat. Quan això succeeix s'acostumen a presentar formacions globulars (v. Fig.1.10.(b)). Tenen unes dimensions i una distribució heterogènia, sobre la seva superfície i en els punts de trencament¹⁵ [22].

En canvi, la temperatura de fusió dels conductors d'alumini aliat sí que s'acostuma a superar a la majoria d'incendis. Acostumen a aparèixer molt degradats, presentant formes irregulars, o destruïts pel foc. Per aquesta causa, l'anàlisi de els restes acostuma a ser més difícil d'interpretar. Tenen un valor forense més reduït a l'hora d'identificar una sobreintensitat.

A la Fig.1.10 (c), a l'esquerra, es mostra¹⁶ un cable de fils de coure afectat per una flama procedent d'un cremador de butà. S'observa l'oxidació superficial de cada fil per separat. A la Fig.1.10 (d), a la dreta, el mateix tipus de cable afectat per un corrent de curtcircuit fins la seva fusió. En aquest cas, s'observa la soldadura dels fils i la formació de glòbuls de coure fos i posteriorment solidificat. També és visible oxidació superficial sobre el conjunt resultant.

¹⁵ No és trivial diferenciar-les de les que es formen per un arc de separació després d'un curtcircuit (v. 1.3.2.6)

¹⁶ Mitjançant microscopi electrònic del Laboratori de Microscòpia Electrònica de la UPC.

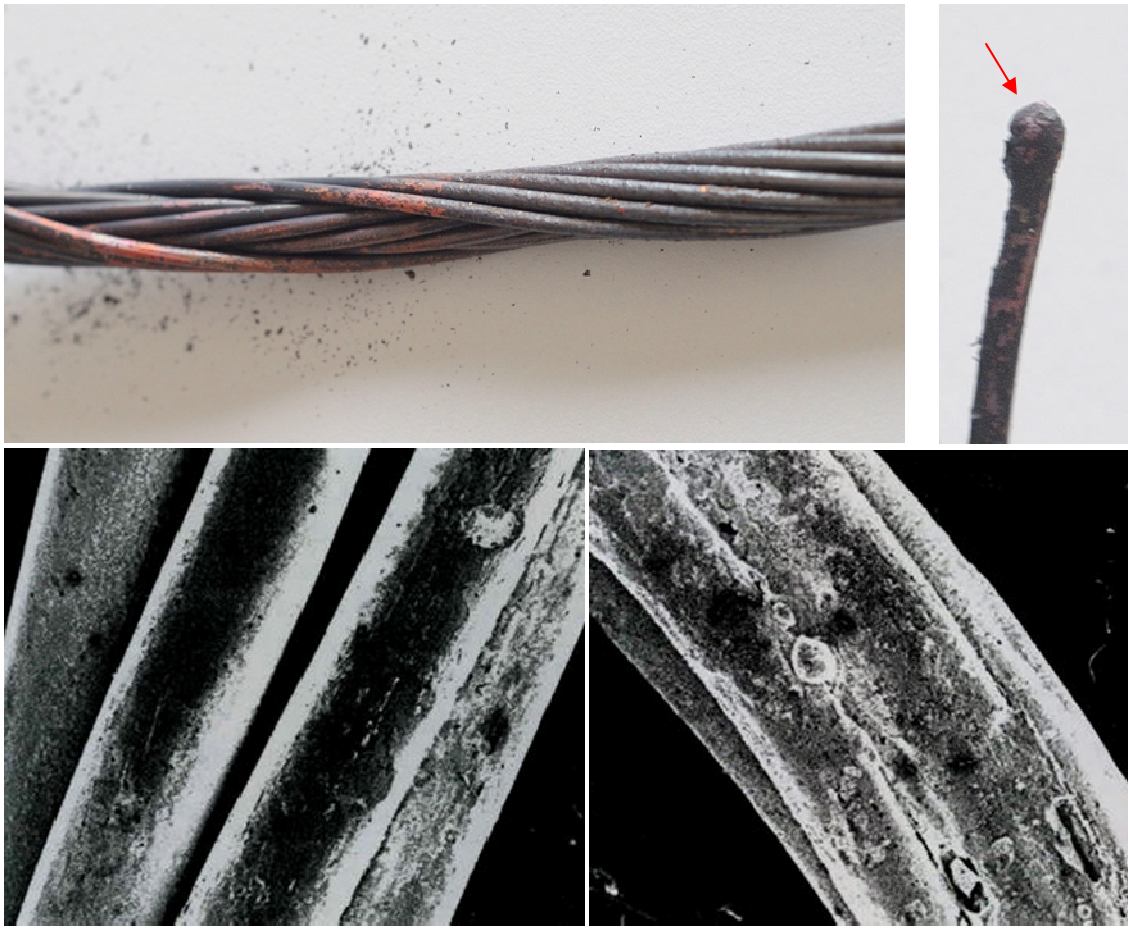


Fig.1.10 (a) Conductor de coure amb oxidació superficial afectat per flames externes. (b) Formació globular produïda pel foc en el punt de trencament. (c) Cable de fils de coure afectat per flama externa (esq.) i corrent de curtcircuit (dta.). (A.f. (a i b): Martí, M.; (c): Bosch, R. i Marsal, M.).

1.3.1.4.3 Efectes ocasionats pels contactes de resistència elevada

Els efectes dels contactes de resistència elevada també es manifesten en els conductors elèctrics, les connexions i els aïllaments. L'indicador més característic és una forta oxidació d'una determinada connexió. Normalment acostuma a ser significativament superior a l'oxidació que pugui existir en les connexions adjacents. És perquè és improbable que totes hagin estat mal executades o s'hagin afluijat al mateix temps. El sobreescalfament produït a la connexió, es transmet al conductor i els aïllaments. Pot presentar efectes similars als de la sobreintensitat, però localitzats a la zona de contacte.

A la Fig.1.11, es mostra un contacte de resistència elevada produït en la connexió del neutre de la caixa de seccionament de companyia d'un institut públic de Catalunya. Un matí els alumnes que feien classe a les aules d'informàtica, de sobte, van veure com sortia fum de les fonts d'alimentació dels seus ordinadors portàtils i fallava l'enllumenat de l'aula. En general una gran quantitat d'equipaments electrònics i sistemes d'enllumenat de tot l'edifici van patir les mateixes conseqüències.

Aquests efectes són característics d'una sobretensió permanent produïda en les línies monofàsiques per una interrupció del neutre de l'alimentació trifàsica. En aquest cas la protecció contra sobretensions existia, però havia estat ajustada a un valor massa elevat.

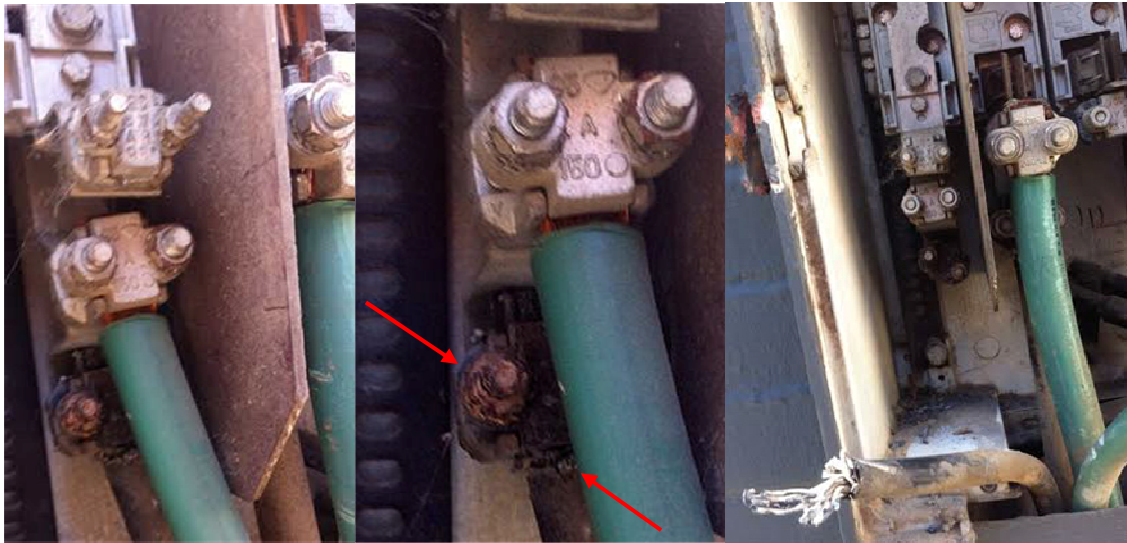


Fig.1.11 Connexió de neutre fortament oxidada per sobreescalfament. (A.f. Hidalgo, A.).

A l'obrir la caixa de seccionament es va observar que el contacte del neutre estava fortament oxidat. L'elevada resistència dels òxids va interrompre la continuïtat del neutre.

La gran quantitat d'equips informàtics i enllumenat de descàrrega amb balast de reactància inductiva, connectats en aquest tipus d'edificis, generen harmònics que desequilibren el sistema trifàsic i donen lloc a circulació de corrents elevats pel neutre.

Un mal contacte accidental en la connexió, combinat amb la circulació de corrents elevats i un manteniment inadequat, va donar lloc a un procés continu de sobreescalfament per efecte Joule i a una formació d'òxid creixent.

Si es compara l'oxidació de la connexió del neutre i els seus cargols amb les adjacents, s'observa que és molt superior. La superfície té un aspecte picat, característic dels contactes d'elevada resistència. L'aïllament del cable de neutre està deteriorat localment a prop del contacte.

1.3.1.4.4 Grau d'oxidació deguda al foc i als contactes de resistència elevada

L'oxidació produïda pel sobreescalfament, deguda a la circulació de corrent en els contactes d'elevada resistència, acostuma a ser superior a la produïda pel foc [26]. Per això, normalment el seu rastre sobreviu a l'acció de les flames. Això permet identificar-la després del sinistre, perquè existirà una connexió significativament més oxidada que les altres. Per aquest motiu, presentarà una resistència de contacte superior (fàcilment mesurable amb un multímetre).

El contacte d'elevada resistència mostrat a la Fig.1.11, no va provocar un incendi. No obstant, si no s'hagués detectat, amb el temps, el progressiu deteriorament de l'aïllament hauria pogut donar lloc

a un defecte que produís la seva ignició (p.e. una descàrrega elèctrica amb suficient energia d'activació). Si s'hagués produït la ignició, l'oxidació superior de la connexió del neutre, en relació amb les altres, molt probablement s'hagués mantingut després de l'oxidació produïda per les flames (atès que la deguda a les flames, és d'un ordre de magnitud significativament inferior). Aquest indici hauria pogut senyalar la causa del foc.

1.3.2 Descàrregues elèctriques

1.3.2.1 Arcs entre elèctrodes estacionaris separats per l'ambient

1.3.2.1.1 Descripció de la font d'ignició

L'arc elèctric és un tipus de descàrrega disruptiva que es produeix habitualment en el buit o en un medi gasós. Es manifesta en forma de plasma format per electrons i ions lliures que s'estableix entre un càtode i un ànode. Si es produeix en corrent altern, passa per zero cada centèsima de segon (quan $f=50\text{Hz}$). En aquest cas l'ànode i el càtode variarien la seva posició cada semiperíode i no és fàcilment distingible la diferència entre elèctrodes.

És un fenomen generalment continu. Tot i així, en CA quan el corrent passa per zero l'arc s'extingeix. No obstant, el camí de l'arc queda ionitzat. S'inicia un procés de regeneració dielèctrica de l'ambient. Si la tensió transitòria de restabliment és superior a la necessària per produir la ruptura en el camí ionitzat, en un determinat instant de temps, l'arc es torna a encendre [27]. Per aquest motiu, l'arc es manté i es produeixen reenceses i canvis de polaritat periòdics.

Si una descàrrega disruptiva té lloc a un espai d'amplitud D amb una atmosfera a pressió P , quan $P \cdot D > 5 \text{atm} \cdot \text{mm}$, es poden produir arcs que segueixen el mecanisme de formació per descàrrega filamentosa [28]. A pressió atmosfèrica, s'ha validat per distàncies majors a 10mm [28].

En aquestes condicions, l'arc s'inicia amb una descàrrega d'estructura filamentosa, ben definida, que tendeix a crear formes tortuoses, pot recórrer grans distàncies i emet llum ultraviolada [29] (v. Fig.1.12 (a)). Si el corrent augmenta, es produeix emissió termoiònica des del càtode, la llum emesa es torna blanca i es forma l'arc. La temperatura de l'arc assoleix valors de 5000 a 20000°C [29]. Aquest rang de temperatures és molt superior a les temperatures d'ignició i fusió dels materials utilitzats en les construccions i les seves instal·lacions¹⁷ [31].

A baixes pressions, o bé a pressió atmosfèrica i $D < 5\text{mm}$, es produeixen altres tipus de descàrregues, com les descàrregues de Townsend o les descàrregues luminiscentes (en les que es basa el funcionament de les làmpades de descàrrega a baixa pressió). Es caracteritzen per l'emissió de llum difusa i baixes temperatures [29]. Per tant, és més difícil que actuïn com a fonts d'ignició.

Les elevades temperatures de l'arc i la seva tendència a desplaçar-se allunyant-se de la font que el genera, fan que sigui un fenomen amb un gran potencial destructiu. Especialment en els sistemes de

¹⁷ Com a punt de referència, el tungstè és el metall amb la màxima temperatura de fusió ($T_f=3500^\circ\text{C}$) i l'element amb la màxima temperatura d'ebullició $T_e=5555^\circ\text{C}$ [30].

potència de AT, on les elevades potències de curtcircuit i alts nivells de tensió, li permeten posar en joc molta energia i assolir grans longituds. Tot i així, aquesta energia s'ha de transmetre al combustible, en presència de comburent, perquè pugui produir-se la combustió.

Normalment perquè l'arc actui com a font d'ignició els combustibles han de ser fàcilment inflamables. Quan la relació entre l'àrea de la superfície i la massa del combustible és elevada, el combustible absorbeix la calor més fàcilment i pot assolir la seva temperatura d'ignició més ràpidament [32]. Per exemple, un arc de potencia limitada pot ser capaç de produir la ignició d'estelles de fusta, però no la d'un tronc (v. 1.3.2.5.3, Fig.1.19). D'altra banda, quan el camí de l'arc travessa ambients altament inflamables o explosius la ignició és probable.

En sistemes de BT, només es poden iniciar descàrregues disruptives espontànies entre superfícies separades per distàncies molt petites¹⁸. Per tant, tenen efectes més localitzats. Segons la corba de Paschen (Fig. 1.12 (b)), existeix una tensió disruptiva mínima. Aquest valor a l'aire, en condicions de $P=1\text{atm}$ i $T_a=20^\circ\text{C}$, és de $U_p=350\text{V}$ (amb una separació dels elèctrodes de $D=7\mu\text{m}$) [34]. En un sistema equilibrat i simètric, aquesta tensió de pic es donaria amb una tensió eficaç de 247V ¹⁹. Se situa lleugerament per sobre de la tensió eficaç dels sistemes monofàsics a Europa i en particular a Espanya ($U_{ef}=230\text{V}$), encara que s'admeti una sobretensió del 7%²⁰. Per aquest motiu, generalment és difícil que es produeixin descàrregues disruptives espontànies, entre dues superfícies estacionaries, en instal·lacions que operin a una tensió de 230V o inferior.

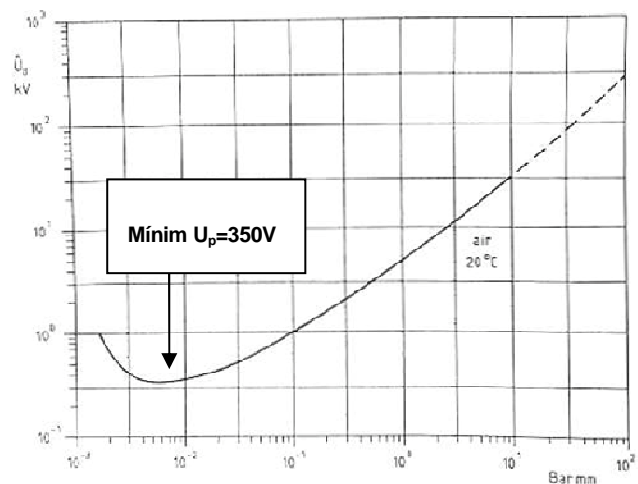
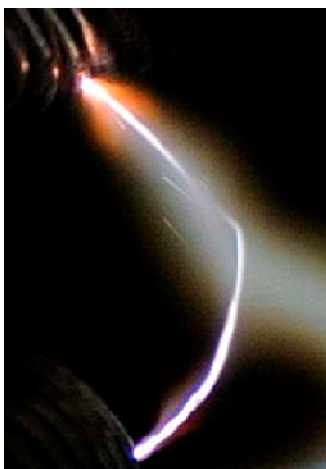


Fig.1.12 (a) Formació d'un arc elèctric, aplicant $U_p=20\text{kV}$ i amb $P\cdot D>5\text{atm}\cdot\text{mm}$ ²¹. (A.f. Martí, M.). (b) Corba de Paschen. (Font: v.[34]).

Cal matisar que aquesta corba no és vàlida en el cas que $P\cdot D>5\text{atm}\cdot\text{mm}$. També es modifica o deixa de ser vàlida amb temperatures elevades. Amb l'augment de la temperatura, pot disminuir la

¹⁸ La rigidesa dielèctrica de l'aire és de l'ordre de 3MV/m, en condicions normals de T i P atmosfèrica [33].

¹⁹ Utilitzant la relació $U_{ef} = U_p / \sqrt{2}$, vàlida en el cas particular d'una tensió sinusoidal.

²⁰ Màxima sobretensió permesa a Espanya pel RD 1995/2000 [35].

²¹ Arc generat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB amb un sistema: $S_N=75\text{kVA}$, $U_N=0-300\text{kV}$, $f=50\text{Hz}$, $u_{cc}=4,8\%$ i $R_{limitadora}=300\text{k}\Omega$.

tensió disruptiva mínima [36]. D'altra banda, la tensió del sistema pot augmentar per sobre dels límits, durant les hores de baixa demanda d'energia. En sistemes amb distorsió harmònica també s'ha de tenir en compte el factor de cresta. En conseqüència, la tensió de pic pot ser superior a l'habitual. Per tot això, no es pot descartar completament l'aparició de descàrregues disruptives en l'ambient en sistemes amb una tensió eficaç nominal de 230V.

1.3.2.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

En sistemes de AT la formació d'arcs elèctrics a l'aire és més probable. Poden ser causats per una disminució dielèctrica de l'aire (a causa de pols, fums, ionització ambiental, etc). Un mal dimensionament o manteniment de les distàncies dielèctriques, també condueix a l'aparició d'arcs espontanis. La ruptura d'aïlladors o la degradació d'aïllaments és un altre exemple típic (per dipòsits de contaminants o pols conductores en aïlladors; envelliment, degradació tèrmica, o atacs d'animals rosegadors als aïllaments, etc).

En sistemes de BT un factor de risc són les sobretensions transitòries generades per llamps o maniobres a la xarxa i les sobretensions permanents provocades pel trencament del neutre. També poden aparèixer descàrregues disruptives en l'àmbit de mals contactes.

Els arcs també poden ser una conseqüència dels incendis. El foc incrementa la temperatura, ionitza l'ambient i genera partícules conductores. Aquests factors disminueixen la rigidesa dielèctrica de l'aire (v. cap.3). En aquest cas l'arc té associada una tensió disruptiva inferior. Apareix i es desplaça més fàcilment. Tot i que el foc sigui originat per causes no relacionades amb l'electricitat, els efectes de l'arc poden actuar com a elements propagadors de l'incendi, generant nous focus.

1.3.2.2 Arc de separació i arc sèrie

1.3.2.2.1 Descripció de la font d'ignició

L'arc de separació, és el que es forma quan se separa per un punt un conductor o contacte pel que circula corrent. Per exemple, durant l'obertura d'un interruptor automàtic en càrrega. S'inicia en l'espai alliberat en el punt de separació. Els nous extrems generats actuen com a elèctrodes. Quan es troben en moviment relatiu entre ells, l'augment progressiu de la separació dels elèctrodes allarga l'arc i afavoreix la seva extinció. Per aquest motiu, en BT acostuma a ser una descàrrega de duració breu. Malgrat això, algunes circumstàncies poden dificultar l'extinció, com per exemple, un baix factor de potència inductiu [37]. En corrent continu l'arc també és més estable i difícil d'extingir, perquè el corrent no passa mai per zero. Si la separació entre elèctrodes s'atura a una distància convenientment petita, l'arc es pot mantenir (com en els processos de soldadura per arc).

Aquest tipus d'arc també es pot produir durant la fusió d'un conductor pel que circula una sobreintensitat, per exemple en cas de curtcircuit. Les elevades temperatures que s'assoleixen durant un curtcircuit permanent fonen el conductor. Arriba un moment en que es produeix un trencament. Localment es crea un forat fortament ionitzat en el que s'estableix l'arc. Un efecte típic de l'arc de separació en aquests casos, és l'ejecció d'espurnes i partícules calentes.

La llei de Ayrton estableix que l'arc es caracteritza per una tensió de l'arc (U) que decreix amb l'increment de corrent (i), de forma no proporcional, segons l'expressió [38]:

$$U = a + b \cdot l + (c + d \cdot l)/i \quad (\text{Eq. 1.1})$$

On a, b, c, d són constants empíriques que depenen del material dels elèctrodes i les característiques del medi i l és la longitud de l'arc.

Aquesta llei és popular perquè ha estat assumida en els desenvolupaments d'autors, amb influència a la bibliografia, com O. Mayr [39]. No obstant, no es pot extrapolar fóra del rang de valors experimentals en el que es va definir. En particular, no és vàlida per qualsevol valor de corrent. Per exemple, s'ha observat que la tensió de l'arc disminueix amb la intensitat fins a l'entorn dels 50A, on es produeix una inflexió, de forma que al continuar augmentant la intensitat la tensió de l'arc també augmenta fins als 80A [40]. De la llei de Ayrton es podria deduir, que per corrents de curtcircuit el tercer terme tendeix a zero. Es podria definir una tensió mínima d'arc, la qual tendiria al valor de a , quan la longitud és mínima. No obstant, també es tractaria d'una extrapolació fóra dels rangs de l'experiment de Ayrton. En general, no permet establir la tensió mínima que dona lloc a l'aparició d'un arc de separació, durant la fusió d'un conductor per curtcircuit.

Si l'arc de separació es manté estable, el circuit queda tancat. Es pot considerar que l'arc actua com un element més del circuit elèctric connectat en sèrie. Quan es produeix entre dues superfícies separades una petita distància, és una descàrrega visualment difícil de detectar. Al no implicar sobreintensitats ni grans caigudes de tensió, generalment no es interrompuda per les proteccions elèctriques convencionals. Introdueix una distorsió harmònica del corrent, però és difícil de diferenciar de les distorsions harmòniques presents habitualment als edificis. Per tot això, pot passar desapercebuda. Aquesta tipologia de descàrrega es pot anomenar arc sèrie.

Quan l'arc de separació s'extingeix ràpidament, la seva capacitat per actuar com a font d'ignició és més reduïda i requereix combustibles fàcilment inflamables. En canvi, l'arc sèrie produeix un major escalfament localitzat, que en presència de combustibles pot produir la ignició amb major facilitat. La calor generada es pot transmetre pels conductors i malmetre els aïllaments, donant lloc a altres defectes que també poden actuar com a fonts d'ignició (p.e. curtcircuits i arcs).

1.3.2.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

Els arcs de separació són típics de les maniobres d'obertura de circuits en càrrega en sistemes de potència de AT. Normalment els interruptors automàtics i seccionadors en càrrega produeixen la ruptura. Si no es realitza correctament o l'aparellatge no està preparat per produir la ruptura, els arcs es poden mantenir encebats i assolir grans longituds. Durant les operacions de manteniment en tensió també poden produir-se per causes accidentals. Aquests arcs tenen un gran poder destructiu i poden afectar zones àmplies.

En sistemes de BT, habitualment apareixen en els contactes mòbils dels motors (com escombretes) i dels mecanismes (com interruptors, polsadors, etc). També quan fallen les connexions produint-se separacions (p.e. per l'afluixament d'una regleta o d'un born).

La fusió d'un conductor per corrents forts permanents també acostuma a generar un arc de separació. En el cas que el circuit tingui càrregues inductives, per exemple perquè alimenti màquines rotatives girant en buit, l'extinció de l'arc és més difícil. També ho és en circuits de corrent continu, com és el cas de les instal·lacions solars fotovoltaïques. Atès que aquestes instal·lacions operen a tensions reduïdes, els corrents acostumen a ser elevats magnificant la perillositat.

Una altra casuística a considerar, és la possibilitat del contacte d'un conductor a massa que impliqui corrents forts. Per exemple, quan es produeix un contacte accidental entre un conductor actiu i una safata, conducte o carcassa metàl·lica.

1.3.2.2.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició

A la Fig.1.13, es mostren alguns experiments, que permeten il·lustrar i reproduir com es manifesta l'arc de separació i alguns dels seus efectes.

A la Fig.1.13 (a), es mostra un arc de separació, creat durant la fusió d'un conductor de coure nu, sotmès a corrents forts de curtcircuit²² (l'experiment es detalla a l'annex B.1.1). S'observa l'aparició de l'arc, durant el trencament del conductor per un punt. Provoca l'ejecció instantània de partícules incandescentes de coure que volen a una gran velocitat. Atès que la tensió és reduïda (9V), l'arc s'extingeix molt ràpidament. Deixa de circular corrent i l'aportació d'energia des de la font elèctrica s'atura.

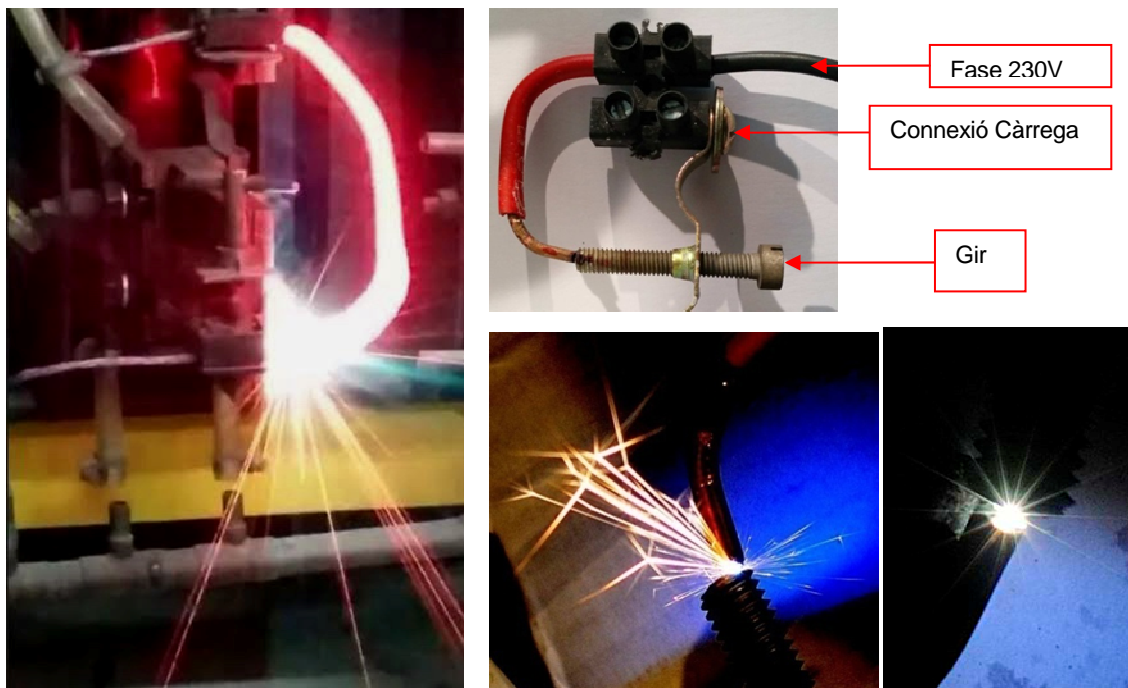


Fig.1.13 (a) Arc de separació format durant la fusió d'un conductor per curtcircuit. (b) Generació experimental d'arcs de separació i arcs sèrie a 230V. (A.f. Martí, M.).

²² Experiment realitzat al Laboratori de Màquines Elèctriques de l'ETSEIB..

A la Fig.1.13 (b), es mostra un petit muntatge que permet generar arcs de separació i arcs sèrie, girant el cargol en sentit antihorari. En l'exemple de la figura, s'alimenta un radiador resistiu amb un consum de 10A a 230V. Al separar el cargol del conductor de coure, s'observa una descàrrega i l'ejecció d'espurnes. Per establir l'arc, cal un corrent mínim, que varia en funció del material dels elèctrodes (v. taula A.2, annex A). Fins l'extinció de l'arc, el receptor es manté en funcionament. Es produeix una petita caiguda de tensió de 1,3V. L'arc dona lloc a una distorsió harmònica del corrent, observable amb oscil·loscopi. No és trivial detectar-la ni diferenciar-la d'altres fonts generadores d'harmònics. Les proteccions convencionals no detecten el defecte.

A la Fig.1.14 (a), es mostra una fotografia termogràfica realitzada durant l'experiment presentat a la Fig.1.13 (b). En pocs minuts s'observa un rellevant increment de la temperatura, a causa de la calor generada per la descàrrega. Es transmet al cargol i al cable. És suficientment elevada com per produir la degradació tèrmica d'un aïllament de PVC convencional. A la Fig.1.14 (b), es mostra una ampliació de la descàrrega, realitzada amb lupa electrònica. S'observa com també pot degradar directament l'aïllament localment en la zona que es produeix l'arc.

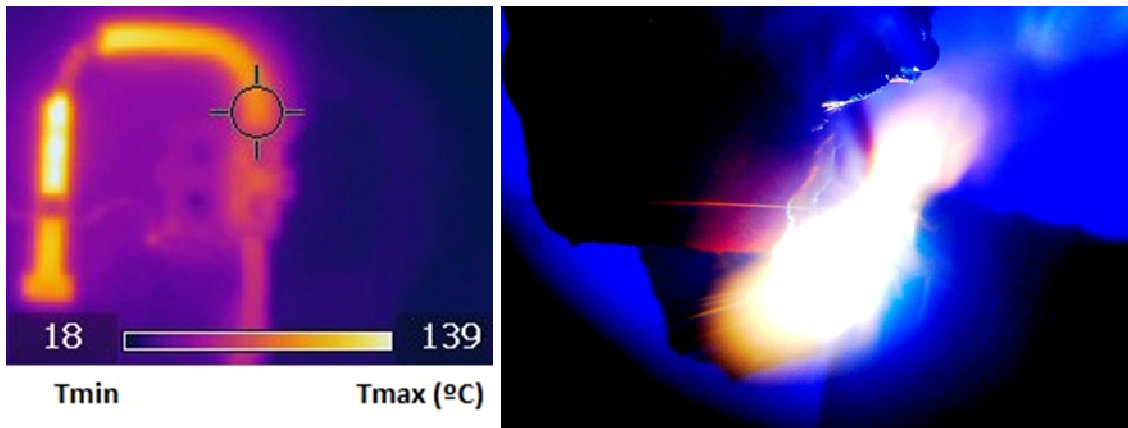


Fig.1.14 (a) Fotografia termogràfica de l'experiment de generació d'arcs de separació i sèrie. (b) Detall d'una descàrrega de separació experimental. (A.f. Martí, M.).

1.3.2.3 Llamp

El llamp és una descàrrega disruptiva d'origen electrostàtic. Dona lloc a tensions de l'ordre de 1MV, corrents de fins a 100kA i temperatures de més de 20000°C [41]. El llamp genera ones de xoc supersòniques. Són degudes a l'expansió de l'aire, ocasionada per l'increment instantani de temperatura i a la seva posterior contracció quan es refreda. Es perceben acústicament i corresponen al tro. L'efecte és semblant al d'una explosió mecànica, a la que de vegades s'anomena explosió elèctrica. El llamp pot produir piròlisi. Per exemple de materials combustibles sòlids com la fusta, formant gasos combustibles susceptibles de generar explosions químiques.

Per reproduir els seus efectes quan afecta a instal·lacions elèctriques, la sobretensió transitòria que genera en un sistema elèctric s'ha estandarditzat com un impuls de $1,2/50\mu s^{23}$. I la sobreintensitat

²³ Segons la norma IEC-60060-1, temps de pujada/temps de baixada fins el semivalor (50%) de l'amplitud de cua [42].

transitòria, en el seu camí de descàrrega directa a terra, com un impuls de $8/20\mu\text{s}$. Els corrents dels llamps donen lloc a efectes electrodinàmics forts. Els conductors del sistema elèctric, han de superar l'assaig normalitzat tipus llamp de $8/20\mu\text{s}$, per garantir que suportaran els esforços electrodinàmics i tèrmics durant la sobreintensitat transitòria.

Quan afecta a les instal·lacions elèctriques en AT i BT pot ser molt destructiu. L'impuls de corrent pot deformar i volatilitzar metalls al seu pas. Si afecta a una instal·lació de BT, pot travessar interruptors oberts i saltar entre circuits, normalment aïllats per la rigidesa dielèctrica de l'aire. També pot perforar els aïllaments. Acostuma a disparar discretament les proteccions diferencials. Al tornar a donar tensió de servei, la degradació dels aïllaments pot conduir a la ignició elèctrica.

Quan afecta a una xarxa de distribució, l'impuls de tensió produeix sobretensions transitòries que es transmeten a les instal·lacions que alimenta. Aquest fet afavoreix la degradació dels aïllaments i l'aparició d'altres fonts d'ignició elèctrica com sobreintensitats, arcs elèctrics, etc. Les proteccions contra sobretensions transitòries encara no són presents a moltes instal·lacions de BT. A Espanya, la seva instal·lació és obligatòria des de l'entrada en vigor del REBT de 2002 [14].

Quan la descàrrega es deriva a terra pot elevar el seu potencial i el de les preses de terra. Un bon estat de manteniment dels parallamps i els sistemes de posada a terra ajuden a prevenir els efectes del llamp. L'oxidació de les seves connexions produeix contactes de resistència elevada. Un altre factor de risc, és que després d'una mesura de la resistència de posada a terra, no es tanqui el pont de la caixa de seccionament.

Els llamps sovint impacten contra els arbres. L'efecte de punta i la seva tendència a buscar la línia recta menys inductiva ho faciliten. Acostumen a produir una destrucció explosiva d'una zona de l'escorça, que sol afectar una branca i una arrel. La circulació del corrent es produeix per la perifèria del tronc, a causa de l'efecte pel·licular [43]. Molts cops l'arbre continua viu i no es produeix un incendi. No obstant, en determinades condicions de risc, pot actuar com a font d'ignició d'incendis forestals (p.e. si impacta contra la zona morta produïda per un llamp anterior).

1.3.2.4 Altres descàrregues capacitives d'origen electrostàtic

L'acumulació de càrregues que genera l'electricitat estàtica normalment és deguda a la fricció triboelèctrica, la inducció elèctrica, l'escalfament d'una superfície o l'efecte piezoelèctric. Quan a través d'aquests mecanismes es carrega elèctricament un conductor o un aïllament, es pot produir una descàrrega capacitiva. Les descàrregues poden donar-se entre conductors (p.e. quan hom obre la porta d'un vehicle) o bé entre un cos aïllant i un conductor (p.e. quan un operari descarrega films de plàstic).

Tot i que l'energia que poden transmetre és reduïda, combinada amb una capacitat paràsita, poden produir la ignició de combustibles amb energies mínimes d'activació reduïdes. També poden produir un deteriorament dels aïllaments, que condueixi a l'aparició d'altres fonts d'ignició.

1.3.2.4.1 Corona

La corona és una descàrrega parcial que es produeix en un gas aïllant. Apareix en les regions d'elevat camp elèctric al voltant de contorns, extrems punxeguts o arestes angulosos. Normalment han de tenir radis de curvatura inferiors a 5mm [44]. És un fenomen de tipus capacitiu i polsant. Produeix ionització, a causa del camp elèctric, però no implica emissió termoiónica com l'arc. Emet llum, soroll, ones electromagnètiques i genera ozó i compostos nitrogenats.

L'ordre de magnitud de la màxima energia que pot transmetre és de 0,1mJ [45], quan té polarització positiva. Es tracta d'una energia inferior a l'energia mínima d'ignició de la majoria de substàncies fàcilment inflamables o explosives²⁴. Per aquest motiu generalment no és una font d'ignició directa. No obstant, existeixen experiments de laboratori que senyalen que la corona pot produir ignició en atmosferes singulars altament explosives, com en ambients amb presència d'hidrogen i sulfur de carboni [46].

1.3.2.4.2 Descàrregues capacitives ramificades

Quan la casuística de la corona es dona amb radis de curvatura superiors a 5mm, entre d'altres variables, tendeixen a formar-se descàrregues ramificades. Tenen una naturalesa i efectes similars als de la corona. La seva forma pot recordar a una brotxa o un pinzell, pel que a la literatura escrita en anglès se les anomena habitualment "brush discharges" [47]. A la Fig.1.15 es mostren aquest tipus de descàrregues, emeses des de filasses d'alumini usades en línies aèries d'alta tensió. Han estat generades²⁵ aplicant una tensió de $U_{ef}=70\text{kV}$, a freqüència industrial.

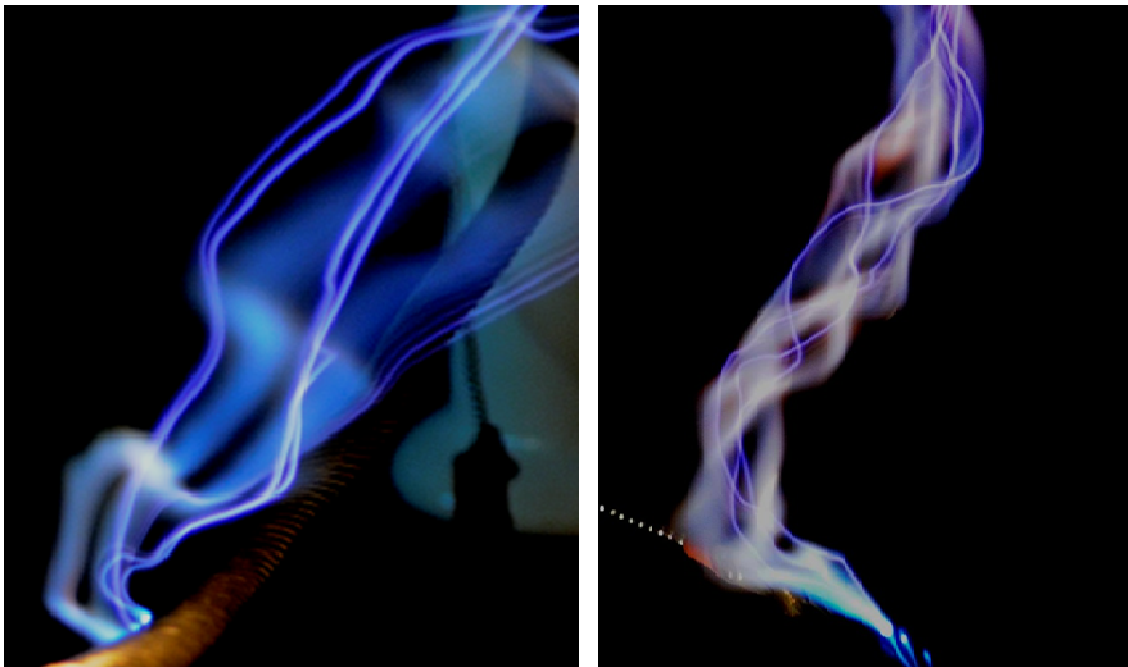


Fig.1.15 Descàrregues capacitives emeses des de filasses d'alumini. (A.f. Martí, M.).

²⁴ Les més comunes requereixen energies mínimes d'ignició superiors a 0,25mJ (v. nota a peu de pàgina 6, p.5).

²⁵ Realitzat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB amb un sistema: $S_N=75\text{kVA}$, $U_N=0-300\text{kV}$, $f=50\text{Hz}$, $u_{cc}=4,8\%$ i $R_{limitadora}=300\text{k}\Omega$.

Tenen una major capacitat que la corona per actuar com a font d'ignició elèctrica. Per exemple, en presència de vapors amb energies mínimes d'ignició reduïdes. Normalment, es manifesten en entorns similars als que s'han descrit per la corona. Un tipus particular d'aquestes descàrregues, són les descàrregues amb forma de raspall cònica. Normalment es produeixen en acumulacions de gra o pols aïllant. L'ordre de magnitud de l'energia que poden transmetre és de 10mJ a 20mJ [48].

En el cas que un aïllament amb una de les seves superfícies ionitzades, entri en contacte amb un conductor connectat a terra, l'altra superfície queda polaritzada amb signe contrari. S'ha format un condensador. Si l'aïllament es perfora o es canvia la polaritat de les superfícies, el condensador queda curtcircuitat. Es formen descàrregues arborescents que es propaguen sobre la superfície de l'aïllament. A la literatura escrita en anglès se les anomena habitualment "propagating brush discharges" o PBD. Poden transmetre energies superiors a les anteriors, de l'ordre de fins a 1J [45]. Tenen la capacitat de produir la ignició de diversos tipus de mescles de gasos inflamables o núvols de pols.

A la Fig.1.16 es mostra una seqüència de fotogrames d'un experiment²⁶ inspirat en l'ampolla de Leyden. Permet il·lustrar la propagació de descàrregues arborescents. S'observa un condensador elèctric construït amb una ampolla de cava, mig plena d'aigua i col·locada sobre una superfície conductora plana connectada a terra. S'aplica progressivament alta tensió, a freqüència industrial, a un filferro introduït pel coll de l'ampolla i en contacte amb l'aigua.

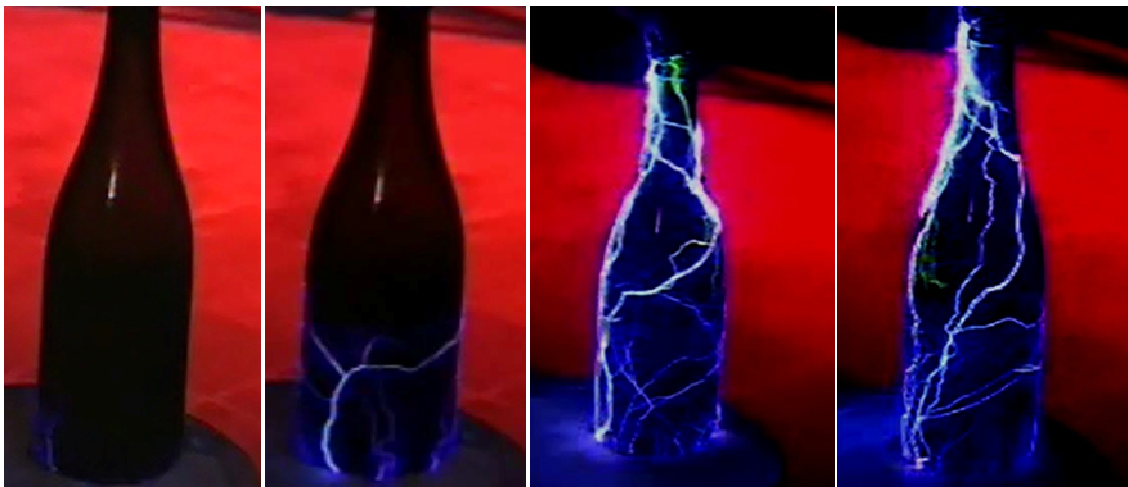


Fig.1.16 Generació de descàrregues capacitives en una ampolla de cava. (A.f. Bosch, R.).

Al primer fotograma es posa de manifest la formació de les primeres descàrregues capacitives, que es propaguen des de la superfície exterior de la base de l'ampolla. És audible un soroll d'eixam d'abelles característic. La tensió és d'un ordre de magnitud de $U_p=55\text{kV}$.

Al segon fotograma, s'ha augmentat la tensió fins a $U_p=60\text{kV}$. S'observen centelles amb forma arborescent que no passen del nivell de l'aigua. El soroll es va magnificant, recordant al d'una traca. Es percep l'olor característica de l'ozó que es va formant. Pel canvi de polaritat a cada

²⁶ Realitzat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB amb un sistema: $S_N=75\text{kVA}$, $U_N=0-300\text{kV}$, $f=50\text{Hz}$, $u_{cc}=4,8\%$ i $R_{limitadora}=300\text{k}\Omega$.

semiperíode, els condensadors es van carregant i curtcircuitant. En conseqüència, les centelles neixen i moren contínuament, recorrent camins diferents. Al tercer i quart fotograma, la tensió és de $U_p=90\text{kV}$ i les descàrregues arriben a l'elèctrode connectat a la font de AT. Contornegen l'ampolla i embolcallen tot el seu perímetre.

Tot i que l'experiment tingui una duració de minuts, al tocar l'ampolla amb la mà es percep que la seva superfície no està calenta. Això posa de manifest la reduïda quantitat d'energia calorífica alliberada per aquest tipus de descàrregues.

1.3.2.4.3 Guspines

Quan el camp elèctric entre dos conductors o un conductor i un aïllament és suficientment elevat, es pot generar un canal ionitzat conductor en el medi dielèctric que els separa i produir-se una descàrrega disruptiva que es pot anomenar guspina. Normalment té un caràcter efímer, o bé intermitent. Acostuma a ser audible.

La guspina es pot relacionar amb l'estadi previ a la formació de l'arc elèctric, el qual s'interromp abans que s'assoleixi el corrent necessari perquè es produeixi emissió termoiònica i un arc estable.

L'energia emmagatzemada en una guspina emesa entre dos conductors, en funció de la capacitat (C) i el potencial del sistema (V), es pot determinar amb l'Eq.1.2 [45].

$$E = 1/2 \cdot C \cdot V^2 \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Malgrat això, només una petita part d'aquesta energia es transmet als combustibles. Aquest valor pot oscil·lar en funció de múltiples variables, però normalment supera els 0,25mJ necessaris per produir la ignició d'un gran nombre de combustibles. Pot arribar a ordres de magnitud de 10J [45]. No obstant, la seva energia es transmet de forma molt localitzada i habitualment durant un temps breu, el que dificulta la ignició.

La guspina és la descàrrega d'origen electrostàtic, prescindint del llamp, que pot transmetre més energia. A la Fig.1.17, es mostra un petit experiment qualitatiu per il·lustrar la diferència d'energia que poden transmetre la corona i la guspina.

Es connecta a terra la boca metàl·lica d'una torxa de gas butà amb encesa piezoelèctrica d'ús general. S'allibera el gas i s'acosta manualment a la boca un elèctrode de 1mm de diàmetre i d'extrem punxegut, connectat a un generador de descàrregues electrostàtiques ($U_p=20\text{kV}$ i $S_N=20\text{VA}$).

Al segon fotograma s'observa la formació de corona a l'extrem de l'elèctrode, el qual es troba proper a la boca. El gas flueix a través de la corona sense inflamar-se. Als següents fotogrames, s'observa la formació d'una guspina (ocasionada per la ionització i la disminució de la distància entre elèctrode i boca) que provoca la ignició del gas.

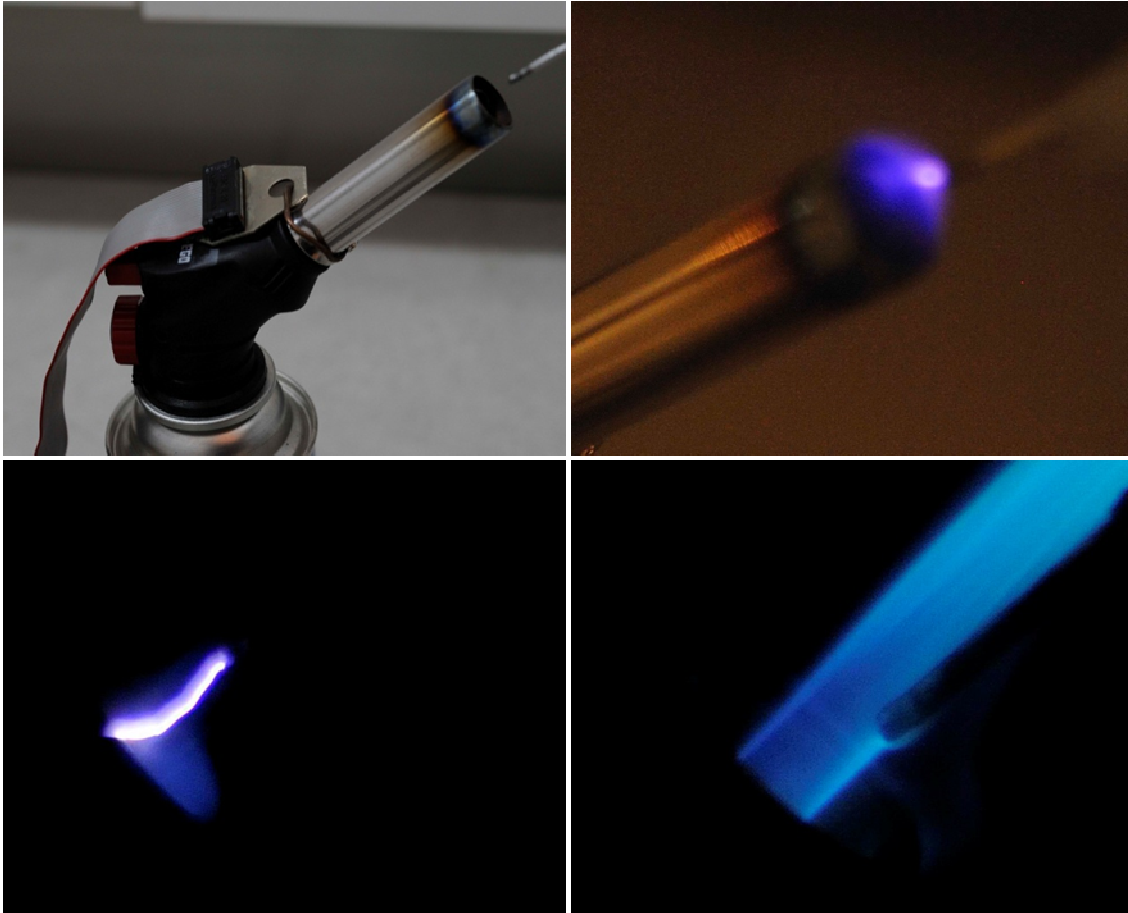


Fig.1.17 Corona i guspira en presència d'un gas inflamable. (A.f. Martí, M.).

1.3.2.4.4 Exemples de factors causals de la font d'ignició

La corona es manifesta habitualment al voltant de conductors de AT, conductors connectats a terra que penetren en un camp elèctric intens o superfícies aïllants carregades electrostàticament. Per exemple, sovint apareix a l'aire que envolta els conductors de les línies aèries d'alta tensió, especialment a prop dels aïlladors. Els anells anticorona redueixen els seus efectes. La dissipació d'energia s'incrementa en cas d'humitat, formació de gel i en presència de partícules conductores, com sals o residus de la combustió d'hidrocarburs [49].

La corona també deteriora els aïllaments, el que pot donar lloc a l'aparició d'altres fonts d'ignició. Per exemple, s'han registrat casos d'ignició de pantalles de tub de raigs catòdics causada per arcs elèctrics, originats per la degradació d'aïllaments produïda per la corona [50].

El cos humà és un conductor que tendeix a carregar-se durant la seva activitat diària i es responsable de molts accidents relacionats amb l'electricitat estàtica. El dits actuen com elèctrodes amb forma arrodonida que afavoreixen les descàrregues ramificades i les guspises, quan s'apropen a un altre objecte carregat. L'energia d'una guspira procedent del cos humà pot assolir valors de 22.5mJ [51]. Per exemple, s'han registrat casos en els que descàrregues electrostàtiques procedents de persones que duïen calçat sintètic, han provocat explosions per la ignició del carburant que proveïen en una estació de servei [52].

Els processos de transvasament de fluids, les acumulacions de gra i pols aïllants en sitges i contenidors; i les cintes transportadores propulsades per rodets de les cadenes dels processos industrials, també són escenaris típics per l'aparició de descàrregues ramificades i guspires. Una adequada detecció de les fonts, la instal·lació d'equips antielectricitat estàtica i una instal·lació de posada a terra adient, ajuden a disminuir el risc d'explosió o incendi.

D'altra banda, a la Fig.1.18, es mostra vegetació afectada per descàrregues elèctriques capacitives, procedents d'una línia aèria. En l'entorn de la línia no s'han realitzat els treballs de poda pertinents. S'observen els rastres de descàrregues que han perforat i degradat algunes fulles dels arbres. Aquesta casuística podria provocar un incendi forestal.



Fig.1.18 Rastres de descàrregues sobre la vegetació de l'entorn d'una línia aèria. (A.f. Bosch, C.).

1.3.2.5 Descàrregues per pistes conductores

1.3.2.5.1 Descripció de la font d'ignició

Els aïllaments dels conductors estan fabricats amb materials plàstics. Generalment, quan els plàstics es degraden per acció d'una calor excessiva es genera carboni. Si la superfície externa d'un aïllament, o la d'un camí interior, comença a carbonitzar-se, s'estableix un camí conductor. A causa de la formació d'aquest camí, poden produir-se petites descàrregues elèctriques parcials o disruptives cap a un altre conductor o massa. Normalment els corrents són petits, pel que no són

detectats per les proteccions. Malgrat això, per petites que siguin les descàrregues, generen calor. Aquesta calor magnifica i accelera el procés de carbonització, donant lloc a més descàrregues. Un cop iniciada aquesta seqüència, es va desenvolupant autònomament construint pistes conductores sobre les superfícies afectades. Si l'aïllament es troba en contacte amb altres cables, el defecte es pot estendre a altres aïllaments.

Amb el temps, pot arribar un moment en que el nivell de degradació dels aïllaments comporti l'aparició d'un curtcircuit i/o descàrrega, amb suficient energia com per produir la ignició elèctrica de l'aïllament o combustibles propers. Si l'aïllament desprèn gasos inflamables durant la seva degradació tèrmica, també poden inflamar-se i conduir a la ignició elèctrica.

La calor que inicia aquest procés pot tenir el seu origen en un escalfament extern de l'aïllament. També pot estar causada pel propi sistema elèctric²⁷. Per exemple, pot ser ocasionada per un contacte d'elevada resistència que sobreescalfi l'aïllament. O bé, per una contaminació externa de l'aïllament amb substàncies conductores (pols, sals, dissolucions conductores, etc), que donin lloc a descàrregues parcials a través seu.

La humitat afavoreix el desenvolupament dels camins conductors i les descàrregues. És un factor clau en el desenvolupament d'aquest fenomen. És per la conductivitat de les dissolucions que la humitat forma amb contaminants conductors que es troben a l'aïllament, ja siguin d'origen extern o produïts per la degradació del propi aïllament. En el cas de cables multipolars, és més difícil que es produeixi aquest efecte i en conseqüència el fenomen, perquè la penetració de la humitat requereix certa degradació prèvia del recobriment extern que exposi al medi humit els conductors actius.

Estudis recents demostren que els aïllaments de PVC són susceptibles a una forma singular d'aquest fenomen: la humitat autoinduida [53]. Quan l'aïllament se sotmet a una temperatura superior a 110-120°C, es pot comprovar experimentalment que el carbonat càlcic (CaCO_3) reacciona amb el PVC formant clorur de calci (CaCl_2) [54]. El carbonat càlcic és habitualment usat en la fabricació d'aïllaments de PVC, com a farciment per millorar les seves propietats mecàniques, abaratir costos, reduir l'aparició de vapors inflamables en cas d'incendi, etc. Com el clorur de calci és un compost altament higroscòpic pot crear una capa d'humitat sobre les superfícies aïllants.

Si una font de calor dona lloc a aquesta reacció i la humitat es combina amb els contaminants, produïts per una certa degradació tèrmica de l'aïllament, s'afavoreix l'aparició de pistes conductores que faciliten l'aparició del procés de descàrregues descrit.

La formació de clorur d'hidrogen (HCl), durant la degradació tèrmica del PVC, pot produir compostos com l'hidroxiclорur de coure (II), ($\text{Cu}(\text{OH})\text{Cl}$), que afavoreixen la proliferació d'aquest fenomen [54].

A l'annex D.1, s'exposa una hipòtesi que relaciona un sinistre singular amb aquesta forma singular de descàrrega elèctrica.

²⁷ Quan es dona aquesta casuística, la literatura i normativa escrita en anglès en fa referència amb el nom de "arc tracking" [53].

1.3.2.5.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

Les descàrregues per pistes carbonitzades tan es poden produir en AT com en BT i en CC o CA. Les tensions elevades afavoreixen la seva aparició, malgrat que pot produir-se en sistemes de molt baixa tensió. En CC el problema és més crític, perquè el corrent no passa per zero i les descàrregues elèctriques assoleixen una major estabilitat.

Per exemple, és un problema rellevant en la indústria del l'automòbil, en circuits que operen en CC i tensions de 12V [55]. També és crític en la indústria aeroespacial, on les condicions de baixa pressió atmosfèrica influeixen en el disseny i assaigs específics dels aïllaments dels seus cables [56].

Tot i que pot passar desapercebut, pot ser l'origen d'incendis en instal·lacions de BT en edificis i indústries. En indústries la contaminació externa dels aïllaments pot accentuar el problema. Malgrat que en habitatges, locals i oficines no és habitual la presència de contaminants externs, sí que ho són altres factors com els mals contactes que generen punts calents, aïllaments de PVC i ambients humits.

1.3.2.5.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició

A la Fig.1.19 es mostra un experiment²⁸ qualitatiu que permet il·lustrar aquest fenomen. Es fixen dos cargols d'acer, separats una distància de l'ordre de 200mm, a un tronc de llenya. Es connecten els cargols a una font d'alta tensió, a freqüència industrial, amb $U_p=20kV$ i capacitat per mantenir arcs estables. Es ruixa la fusta amb una dissolució conductora de clorur de sodi (NaCl). A l'aplicar tensió als elèctrodes es produeix el fenomen de descàrrega sobre pistes conductores.

S'observa que va apareixent progressivament un camí conductor carbonitzat sobre la superfície de la fusta. En aquest cas tendeix a seguir les vetes naturals on s'ha acumulat humitat. Es manifesta en forma de traçat incandescent. Presenta la peculiaritat que conté una successió de punts singulars que brillen amb major intensitat. Són punts en els que es concentra una major energia. Resplendeixen durant minuts (inclús després de deixar d'aplicar tensió), de forma que recorden a les brases d'una llar de foc. Una explicació pot ser que en aquests punts s'hagi concentrat una major quantitat de carboni durant el procés.

Al segon fotograma s'observa com en un d'aquests punts s'ha iniciat la combustió d'una estella de fusta i l'emissió de fum. La relació entre l'àrea de la superfície i la seva massa és reduïda, pel que s'inflama fàcilment. S'extingeix espontàniament.

Aquest traçat incandescent és un tret característic d'aquesta casuística, el qual permet identificar-la en la foscor. El camí evoluciona fins que uneix els dos elèctrodes. Si es continua aplicant tensió, el corrent continua circulant i es va fent més profund. També es va estenent amb noves descàrregues que generen noves ramificacions.

²⁸ Realitzat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB amb un sistema: $S_N=75kVA$, $U_N=0-300kV$, $f=50Hz$, $u_{cc}=4,8\%$ i $R_{limitadora}=300k\Omega$.

En l'últim fotograma s'observa el seu rastre arborescent i les diferents profunditats que assoleix el solc que ha creat. Varia en funció del temps d'incandescència de cada tram.



Fig.1.19 Descàrregues sobre camins conductors carbonitzats en un tronc humit. (A.f. Martí, M.).

A la Fig.1.20, es mostra un petit experiment realitzat amb un cable unipolar de coure d'ús general en BT. Té aïllament de PVC i és del tipus H07V-K. El conductor s'ha connectat a terra i s'ha humidificat la seva superfície ruixant-lo amb aigua no destil·lada.

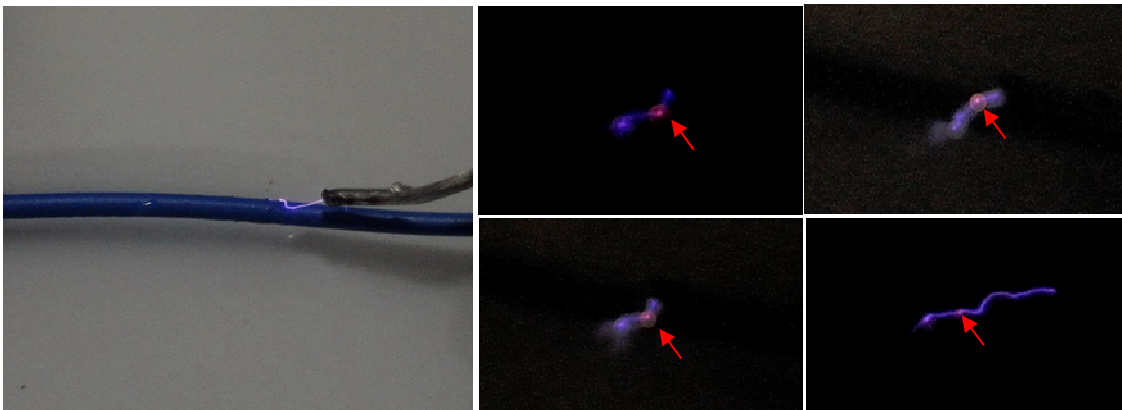


Fig.1.20 Descàrregues superficials i punts incandescents sobre aïllament de PVC humit. (A.f. Martí, M.).

S'acosta a la superfície de l'aïllament un elèctrode connectat a un generador de descàrregues d'alta tensió ($U_p=15kV$) i reduïda potència. Pot reproduir la situació d'una connexió plàstica en presència d'altres conductors actius en una regleta. S'aplica AT per reproduir i visualitzar el procés més fàcilment.

S'observen descàrregues parcials que tendeixen a seguir la superfície humida de l'aïllament. Si es mantenen, comencen a aparèixer punts incandescents en el traçat. S'hi desprèn localment una mica de fum. Es comença a carbonitzar l'aïllament i s'inicia la formació d'una pista conductora sobre la seva superfície. Deixa un rastre en forma d'un petit traçat negre.

1.3.2.6 Efectes sobre els conductors i aïllaments i la seva aplicació forense

1.3.2.6.1. Efectes ocasionats per arcs

L'arc elèctric acostuma a degradar o destruir aïllaments i conductors. Els seus efectes són més severos en sistemes de potència, especialment en AT.

A la Fig.1.21, es mostra un terminal d'alumini estanyat amb aïllament exterior de goma de silicona i presa de terra de coure. Procedeix d'un centre de transformació ubicat a Catalunya que operava a 25kV. Durant uns treballs de manteniment en tensió, es va produir un arc elèctric.



Fig.1.21 Terminal de MT afectat per un arc elèctric. (A.f. Martí, M.).

L'arc es va iniciar a la zona del terminal. Va evolucionar allunyant-se de la font de tensió cap a la presa de terra. A la zona annexa al connector tot el material aïllant s'ha volatilitzat. Més avall, els cons també han patit una gran degradació, deformació i fragilització, amb parts que han desaparegut. En algunes zones és visible l'aïllament interior. Sembla com si els aïllaments del terminal haguessin estat mossegats en diversos punts, el que és un tret característic de l'acció de

l'arc. També del llamp. Bona part de la superfície dels cons es troba carbonitzada. També s'observen dipòsits de pols blanca²⁹, que són rastres de la formació de diòxid de silici (SiO_2) durant el procés de combustió de la silicosa. Els regalims de la coberta externa evidencien que el terminal es trobava en posició vertical quan es va produir la seva fusió.

La superfície del conductor d'alumini i el connector presenta oxidació superficial, excepte en les àrees que no van estar exposades a l'ambient (preservades pels caps dels cargols i la zona de contacte). Malgrat que l'arc assoleix temperatures de més de 5000°C , el conductor no va assolir la temperatura necessària perquè es produís la fusió de l'alumini. Per l'actuació de les proteccions i el sistema de posada a terra, la capacitat de transmetre energia de la descàrrega va quedar restringida. La duració de la descàrrega i la magnitud dels corrents, són factors que determinen el dany sobre els conductors, que en aquest cas és reduït. Contrasta amb el cas presentat a la Fig.1.4, (v. p.9), on els conductors d'alumini procedents d'una línia de distribució de BT, s'havien volatilitzat a l'interior de la caixa general de protecció d'un edifici.

La trena de coure de la connexió de terra, presenta oxidació superficial. A primera vista, sembla que també evidencien restes de fusió del coure. No obstant, un anàlisi més detallat (pot ser tan simple com tallar-les amb una navalla, tot i que distorsiona la mostra, o comprovar si és conductora amb un òhmmetre), demostra que són en realitat residus plàstics de la fusió dels aïllaments.

D'altra banda, quan un arc estable es produeix afectant conductors nus, per exemple una filassa d'alumini d'una línia aèria o un embarrat de coure en un quadre, tendeix a desplaçar-se sobre ells allunyant-se de la font que l'ha generat. Les elevades temperatures que s'assoleixen en els elèctrodes, a causa de l'emissió termoiònica, produeixen la vaporització localitzada del metall que els conforma. Apareixen unes mossegades característiques que senyalen el recorregut de l'arc. Amb corrents reduïts pot ser necessària una lupa per observar-les. Una altra manera de detectar-les és palpant la superfície afectada.

A la Fig1.22 (a) es mostra la formació d'un arc estable generat experimentalment³⁰ entre dues filasses d'alumini, aplicant una tensió a freqüència industrial de $U_p=20\text{kV}$ i amb el corrent limitat a un ordre de magnitud de 50mA . L'arc es desplaça sobre els fils d'alumini. A la Fig.1.26 (b) es mostren les marques que han produït diversos arcs. Senyalen els punts d'emissió i el seu recorregut.

A la Fig.1.22 (c) es mostren els efectes de l'arc, sobre uns embarrats de coure d'una estació transformadora sinistrada. Quan augmenta la potència, els efectes de l'arc sobre els conductors també augmenten. Es manifesten en forma de mossegades que evidencien la volatilització de part del metall que formava part de l'embarrat.

²⁹ En altres casos, una pigmentació blanca dels plàstics pot posar de manifest que han estat sotmesos a elevades temperatures o radiació continuada (p.e. és típica una coloració blanca dels aïllaments de cables de BT instal·lats en la coberta d'un edifici, quan han perdut el tub de protecció).

³⁰ Realitzat a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB amb un sistema: $S_N=75\text{kVA}$, $U_N=0-300\text{kV}$, $f=50\text{Hz}$, $u_{cc}=4,8\%$ i $R_{limitadora}=300\text{k}\Omega$.



Fig.1.22 (a) Formació d'arc entre filasses d'alumini (b) Marques sobre una filassa d'alumini afectada per un arc. (A.f. Martí, M.). (c) Embarrats afectats per l'acció de l'arc procedents d'una estació transformadora. (A.f. Bosch, R.).

L'acció de l'arc pot deixar altres rastres sobre els conductors nus, com partícules adherides als mateixos. Per exemple, el vent pot transportar partícules que es dipositin als conductors de línies aèries d'alta tensió (v. Fig.1.23). Aquests conductors actuen com a precipitadors electrostàtics, el que afavoreix aquesta casuística. Si accidentalment es produeix un arc, pot tenir lloc un gran augment de la temperatura de les partícules, a causa de les elevades temperatures implicades en la descàrrega. Pot ocasionar la fusió local del material del conductor que es troba en contacte amb les partícules. Al solidificar-se, poden quedar adherides al conductor. A l'annex D.3 es detallen els indicis observats en aquest cas particular.



Fig.1.23. Partícules adherides a una empiuladura de Al sotmesa a l'acció de l'arc. (A.f. Martí, M.).

1.3.2.6.2. *Efectes ocasionats pels arcs de separació*

L'arc de separació, es caracteritza per uns efectes més localitzats. La degradació dels aïllaments i dels conductors produïda per l'arc, es limita a les àrees annexes al punt on s'ha separat un conductor o contacte, pel que circulava corrent. A la Fig.1.24 (a), es mostra l'extrem d'un conductor de coure que ha estat sotmès experimentalment a un arc de separació, ocasionat per la fusió per curtcircuit del conductor (amb un corrent eficaç de l'ordre de 6kA). A la Fig.1.24 (b) i (c) es mostra l'extrem d'un conductor de coure sotmès experimentalment a arcs de separació creats amb un soldador a l'arc de baixa potència³¹ (amb un corrent eficaç de l'ordre de 250A).

S'observa que un tret característic d'aquest tipus d'arc és la formació de terminacions arrodonides amb forma de gota. Són degudes a la fusió local i posterior solidificació del coure, produïda per les elevades temperatures de l'arc. S'aprecien les diferents reenceses de l'arc. Quan el conductor està format per diversos fils, aquests acostumen a quedar soldats entre ells. La resta dels fils del conductor poden quedar també soldats o mostrar signes de fusió, com osques i gotes, si un corrent fort hi circula permanentment. No obstant, molts cops això no succeeix. És a causa de l'actuació ràpida de les proteccions elèctriques o a un trencament ràpid del conductor pel punt de curtcircuit. Impedeix que continuï circulant corrent i que la totalitat del conductor augmenti la seva temperatura per sobre del punt de fusió de forma uniforme.



Fig.1.24 (a) Extrem d'un conductor de Cu sotmès a curtcircuit i arc de separació. (b) Extrem d'un conductor de Cu sotmès a arcs usant un soldador a l'arc. (A.f. Martí, M). (c) Detall de l'extrem d'un conductor de Cu sotmès a arcs usant un soldador a l'arc. (Bosch, R., Marsal, M.).

A la Fig.1.25, es mostren les restes d'un cable multipolar de 4x16mm², amb aïllament de PVC i conductors de coure, que ha patit un curtcircuit. S'havia usat per realitzar una instal·lació provisional, que per error es va sobrecarregar permanentment. La protecció tèrmica de l'interruptor automàtic no s'havia ajustat en relació amb la secció del cable. Quan es va produir el sinistre circulava un corrent altern eficaç de l'ordre de 150A (més del doble del màxim corrent admissible del cable). La tensió entre els conductors de fase era de 400V.

El cable s'havia subjectat provisionalment amb una brida a una safata metàl·lica. En aquest punt crític, menys ventilat i de contacte, passats pocs minuts des de l'inici de la sobrecàrrega, un operari

³¹ Es pot reproduir al laboratori utilitzant un aparell de soldadura a l'arc. L'elèctrode convencional se substitueix per un conductor de coure. S'acosta a massa i se separa, establint-se l'arc.

va veure un arc elèctric de duració breu. També va sentir una detonació. Immediatament es va produir la interrupció de circulació de corrent per dispar d'un interruptor automàtic en la zona magnètica (havien circulat corrents de curtcircuit). L'operari va extingir les flames ràpidament.



Fig.1.25 Cable multipolar de BT afectat per curtcircuit i arc elèctric. (A.f. Martí, M.).

S'observa que la coberta externa del cable ha reventat localment. Va ser causat per les ones de pressió produïdes per l'arc. A l'interior, es troben restes d'aïllament solidificat després de la seva fusió. Algunes amb la superfície totalment carbonitzada. Moltes d'elles tenen forma de gota. Si se seccionen, s'observa que al seu interior hi ha atrapada una mescla porosa d'aïllaments de diferents colors (no s'han carbonitzat). El plasma i el foc, ocasionats pel curtcircuit amb arc de separació, van carbonitzar la superfície a causa d'un gran increment instantani de la temperatura. Malgrat això, com el succés va tenir una duració breu, per l'actuació ràpida de les proteccions i de l'operari extingint les flames, l'interior de l'aïllament es va mantenir més fred. Les ones de pressió produïdes per l'arc poden ajudar a mantenir restes d'aïllament a una temperatura inferior. Tot i així, la mescla de colors i la porositat demostren que es va fondre.

Aquestes gotes d'aïllament fos poden conservar en el seu interior rastres i petits components elèctrics no carbonitzats per les flames, com l'ambre preserva els insectes atrapats per la resina. En alguns casos, pot facilitar informació sobre la història del sinistre que ajudi a reconstruir els fets.

Explorant l'interior es va trobar el punt de curtcircuit, senyalat per l'existència de fils de dos conductors diferents soldats localment. Realitzant una prova amb un òhmmetre, es va comprovar que hi havia continuïtat entre ells. Posa de manifest que el curtcircuit es va produir perquè els conductors van entrar en contacte, a causa de la fusió dels aïllaments produïda per la sobrecàrrega. La seva superfície exterior està parcialment oxidada (la pigmentació negra correspon a la formació d'òxid de coure (II)). També hi ha restes superficials de material de color verd. Pot correspondre a la formació de carbonat de coure a partir dels òxids, o bé a altres compostos produïts per l'atac d'àcids formats durant la degradació del PVC.

En el material fos s'observa certa porositat i formació de forats. Evidencien que s'ha produït un ràpid i sobtat increment de la temperatura, seguit d'una posterior solidificació. La presència d'aquests forats és un tret característic d'una fusió del coure ocasionada per l'arc (la temperatura ha superat els 1084°C en aquesta zona). La resta de fils dels conductors no estan soldats. El corrent de curtcircuit va circular durant un temps molt breu, el que no va permetre un augment uniforme de la temperatura que donés lloc a la fusió dels fils al llarg de tot el recorregut dels conductors implicats. Va ser un procés de tipus adiabàtic.

D'altra banda, quan els conductors són d'alumini els arcs de separació produeixen també gotes i oxidació superficial. Un altre tret característic és la formació de forats, deguts a la propensió de l'alumini a ejectar una gran quantitat de partícules incandescentes o en combustió (v. cap.2). En alguns casos el conductor es pot volatilitzar (com és el cas del sinistre mostrat anteriorment a la Fig.1.4 (a), p.11)

A la Fig.1.26 (a), es mostra la degradació superficial i la formació de forats produïda per un curtcircuit amb arc de separació, entre dos conductors d'alumini sotmesos a un corrent de curtcircuit de l'ordre de 500A. És interromput per la protecció elèctrica en 45ms.

A la Fig.1.26 (b), es mostren els efectes d'arcs creats amb el mateix soldador a l'arc que s'ha usat en l'exemple mostrat a la Fig.1.24 (b). El corrent eficaç és de l'ordre de 250A. Si es comparen els efectes sobre l'alumini i el coure, s'observa que l'alumini es fon amb major facilitat i pateix un grau de degradació superior.

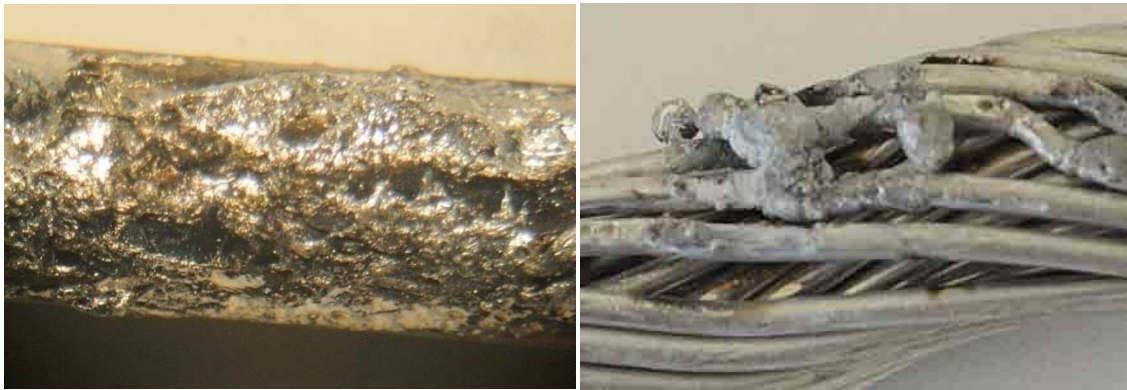


Fig.1.26 (a) Conductor de Al afectat per un curtcircuit amb arc de separació. (b) Filassa de Al afectada per arcs usant soldador a l'arc. (A.f. Martí, M.).

Els arcs de separació, quan es produeixen entre contactes mòbils de mecanismes i proteccions, també deixen rastres i poden tenir efectes destructius si se superen les limitacions del dispositiu. A la Fig.1.27, es mostra un interruptor de control de potència (ICP). Havia format part d'una instal·lació antiga, sense interruptor general d'alimentació (IGA)³², ubicada en un local. Durant un curtcircuit produït a la seva instal·lació interior, va ser sotmès a un corrent significativament

³² A Espanya, la funció de protecció contra sobreintensitats i control de potència màxima, en instal·lacions interiors en edificis, és obligatori realitzar-la de forma separada en tots els casos des que s'aplica el RBT 2002 (instal·lant un IGA amb poder de tall suficient per la intensitat de curtcircuit que pugui produir-se en el punt d'instal·lació i un mínim de 4,5kA, aigües avall del ICP) [57].

superior al seu poder de tall ($I_k > 4,5\text{kA}$). El contacte mòbil va quedar inoperatiu (senyalat per la fletxa vermella). Part de la carcassa va ser destruïda. Sobre els contactes s'observen petits cràters, fusió local i esquitxos metàl·lics. També oxidació superficial. La càmera apagaguspaires presenta una forta oxidació superficial i esquitxos metàl·lics.



Fig.1.27. Contactes d'un ICP destruït per un curtcircuit i arc de separació. (A.f. Martí, M.).

1.3.2.6.3. Diferències entre els efectes produïts per l'arc i pel foc

Tot i que no és el més habitual, en alguns incendis es poden assolir temperatures suficientment elevades com perquè es produeixi la fusió del coure. En aquests casos, també es poden trencar els conductors per fusió i donar lloc a terminacions en forma de gota als seus extrems. Poden tenir un aspecte similar al de les produïdes per l'arc. Tot i així, acostumen a tenir formes més irregulars i dimensions diverses, com s'observa a la Fig.1.28 (a) [22]. La seva formació i distribució és més àmplia i heterogènia. No existeix una delimitació clara entre les zones que s'han fos i les que no, com si que s'observa normalment en les que tenen el seu origen en l'arc (v. Fig.1.24).

D'altra banda, el foc produeix la fusió dels conductors d'alumini més fàcilment a causa de la seva reduïda temperatura de fusió. Per aquest motiu, en general, els conductors d'alumini tenen un valor forense més reduït. La seva fusió forma solcs amb forma d'anella brillant a la seva superfície, com es mostra en el conductor afectat per les flames d'una torxa de gas butà a la Fig.1.28 (b).



Fig.1.28 (a) Rastres de fusió del coure de conductors produïts per incendis. (A.f. NFPA 921. Font: v. [22]). (b) Rastres de fusió en un conductor d'alumini produït per una torxa de butà. (A.f. Martí, M.).

1.3.2.6.4. Diferències entre els indicis dels arcs produïts abans i després del foc

En el cas del curtcircuit amb arc de separació en un conductor multipolar que s'ha il·lustrat a la Fig.1.23, si l'operari no hagués estat present, les flames s'haurien pogut estendre afectant instal·lacions connectades aigües avall d'altres proteccions elèctriques. El foc hauria pogut destruir

els aïllaments dels seus cables i construir-hi pistes carbonitzades conductores. Haurien facilitat que els seus conductors entressin en contacte entre ells, donant lloc a altres curtcircuits i arcs secundaris. Durant la investigació posterior al sinistre, és probable que s'haguessin trobat restes de fusió de coure en els conductors. Serien indicis que s'haurien produït diversos curtcircuits i arcs elèctrics. No obstant, caldria algun criteri per discernir quins d'aquests arcs foren previs a l'incendi i quins posteriors. En cas contrari, la troballa només té cert valor si altres proves situen l'origen de l'incendi en aquella zona. Tot i així, encara podria induir a realitzar una hipòtesi falsa.

Aquesta problemàtica ha estat abordada per diversos investigadors. A través de tècniques d'anàlisi microscòpic, EDX, etc; han intentat establir metodologies per discernir possibles diferències entre les gotes i rastres de fusió del coure previs i posteriors a l'incendi. Tot i així, existeix un anàlisi d'aquestes estudis que assegura que els resultats obtinguts no són estadísticament fiables [58]. Actualment continua sense haver un mètode científic reconegut per les normatives de referència.

En aquests casos, una tècnica que pot ajudar a situar l'origen de l'incendi és la cartografia d'arcs en l'escena del sinistre [59]. Segons aquesta metodologia, quan apareixen diversos arcs en el cablejat aigües avall d'una determinada protecció elèctrica (és més probable que succeeixi en línies trifàsiques), normalment s'assumeix que els arcs que es produeixen en primer lloc, són els més allunyats de la protecció [60]. Per tant, es podria configurar un mapa que representi l'evolució temporal del foc en funció de la posició dels arcs.

No obstant, aquesta tècnica no sempre pot ser aplicada de forma fiable. S'assumeix una evolució espacial i temporal del foc relativament uniforme a partir de l'origen, el que no sempre es correspon amb la realitat. Per exemple, si en un punt es produeix una explosió de materials combustibles, el foc pot evolucionar més ràpidament en aquesta zona. En conseqüència, pot deteriorar amb major grau els seus cables primer, de forma que es poden produir arcs més allunyats de l'origen abans que en el cablejat més proper. La combustió dels cables, pot produir-se a velocitats diferents en funció de les modalitats d'instal·lació (superficial, aèria, etc). Les proteccions de tall no omnipolar, com els fusibles, també poden alterar el principi que el curtcircuit més allunyat és el primer, atès que poden no interrompre el subministrament de totes les fases simultàniament.

L'existència de rastres d'arc sobre un conductor nu, tampoc implica necessàriament que sigui un arc primari que hagi originat un incendi. La ionització de l'aire produïda pel foc i les partícules conductores que poden contenir les flames i el fum, disminueixen la seva rigidesa dielèctrica i la tensió disruptiva. Pot ocasionar arcs secundaris entre conductors separats per distàncies que en condicions normals eren dielèctricament segures (v. cap.3).

1.3.2.6.5. Efectes ocasionats pels llamps

El llamp és una descàrrega d'elevada energia. Normalment dissipa més de 1GJ i genera ones de pressió de fins a 10GPa [61]. No obstant, només transmet una fracció de la seva energia, de l'ordre de fins a 1MJ, quan impacta al terra [61]. Si ho fa sobre sorra o roca, es produeix un gran escalfament localitzat que en algunes ocasions pot produir la fusió de minerals.

La fulgurita és un mineral que es forma a causa d'un procés de fusió i posterior solidificació molt ràpid, com el que produeix l'impacte d'un llamp. Sobretot en terrenys o roques amb presència de silici. És típica dels deserts, on es generen fulgurites que normalment tenen l'aspecte de cilindres de grans de sorra silícia fusionats (Fig.1.29 (d)). Acostumen a ser fràgils. Sovint estan formats per un cor vitrificat, de vegades foradat, envoltat per una capa rugosa de cristalls fosos i altres d'inalterats, atès que les ones de xoc preserven alguns grans del xoc tèrmic [62].

Un altre tipus de fulgurites formen Lechatelierita, que és una forma amorfa de l'òxid de Silici amb aspecte de vidre [62]. A la Fig.1.29 (a) es mostra una fulgurita d'aquest tipus en una roca³³. Es va trobar en una zona no desèrtica de Catalunya, al costat d'un punt en el que havien caigut els conductors d'una línia aèria de AT a terra. A la Fig.1.29 (b) i (c) es mostra una branca amb carbonització localitzada i fulgurites, d'amplitud inferior a 100mm, que també es van trobar en aquest punt. Algunes presenten esquitxades de metall fos, probablement procedent de la línia.

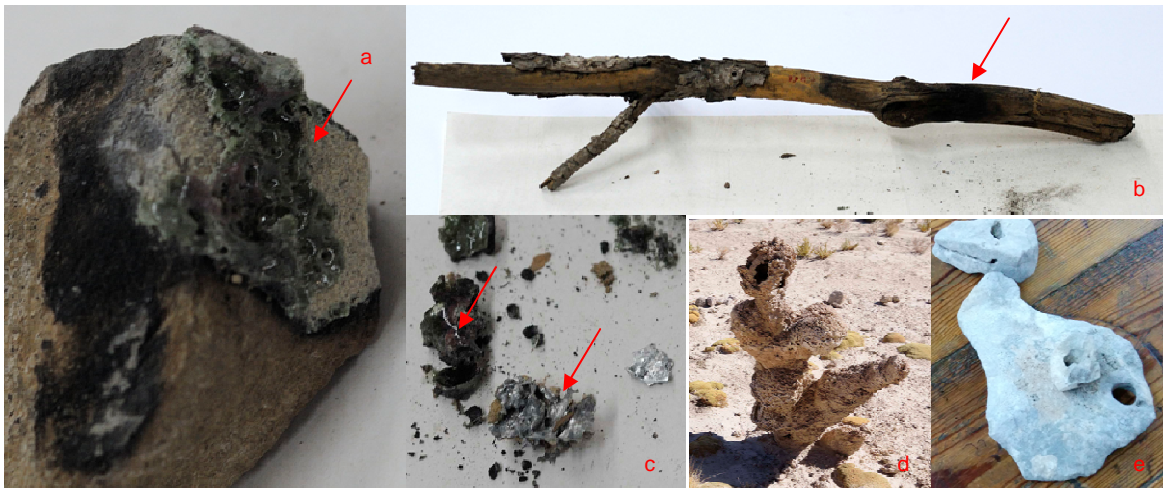


Fig.1.29 (a) Fulgurita trobada a prop d'un conductor caigut d'una línia aèria de AT. (b) Branca cremada trobada a prop de la fulgurita de (a). (c) Fulgurites amb esquitxos metàl·lics trobades a prop de la de (a). (d) Fulgurita formada en un desert (Bolívia). (e) Roques hipotèticament foradades per un llamp. (A.f. Martí, M.).

La formació de fulgurites artificials, ocasionades per descàrregues produïdes des de línies aèries de AT, ha estat documentada per alguns autors [63]. Per exemple, durant la caiguda a terra d'una línia de 11kV a Otago (Nova Zelanda) [64]. Va produir descàrregues durant 40 minuts, en un terra amb substrat vegetal, formant fulgurites amb formes irregulars, algunes tubulars, d'entre 70 i 95mm d'amplitud. Una altra possibilitat és que un llamp impacti sobre la línia caiguda i sigui guiat cap a terra produint fulgurites. També ha estat documentada la formació d'aquest tipus de fulgurites enterrades al costat dels pilots d'acer dels suports de línies de AT, a causa de la derivació a terra de llamps [63].

D'altra banda, a la Fig.1.29 (e) es mostren unes roques amb forats peculiars de geometria tubular, trobades normalment a pocs centenars de metres dels cims de les muntanyes de la Serra del Port del

³³ Conservada pel Dr. Ricard Bosch i disponible al Departament d'Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB.

Compte³⁴ (Catalunya). Una hipòtesi per explicar els forats és que hagin estat produïts per l'impacte d'un llamp, a causa de l'augment de pressió instantània produït per l'evaporació d'humitat emmagatzemada a la pedra. Aquest rastre del llamp és típic trobar-lo en murs de morter de calç.

La majoria dels rastres de descàrrega sobre el terra exposats, sobreviuen a l'acció de les flames en cas d'incendi. Malgrat que són proves que senyalen l'existència d'un llamp o una descàrrega a terra procedent d'una línia de AT, per si soles no permeten garantir que el succés va tenir lloc abans de l'incendi.

Quan el llamp impacta sobre un aïllament es produeix una ràpida perforació del mateix. La perforació és localitzada i té formes irregulars, que semblen mossegades o esqueixaments. A la Fig. 1.30 (a) i (b), es mostra la perforació dielèctrica experimental³⁵ d'un aïllament de cartró dielèctric presspan, sotmès a un impuls de corrent tipus llamp de 8/20µs. S'observa un esqueixament irregular de les fibres. Posa de manifest un fenomen violent i ràpid. Un increment del corrent de l'impuls, comporta que la perforació afecti una superfície major.

En canvi, a la Fig.1.30 (c) és mostra la perforació dielèctrica del mateix tipus d'aïllament, produïda per una perforació lenta a la freqüència de la xarxa (50Hz). En aquest cas s'observa una geometria més regular i ben delimitada. Posa de manifest un creixement progressiu de la perforació.

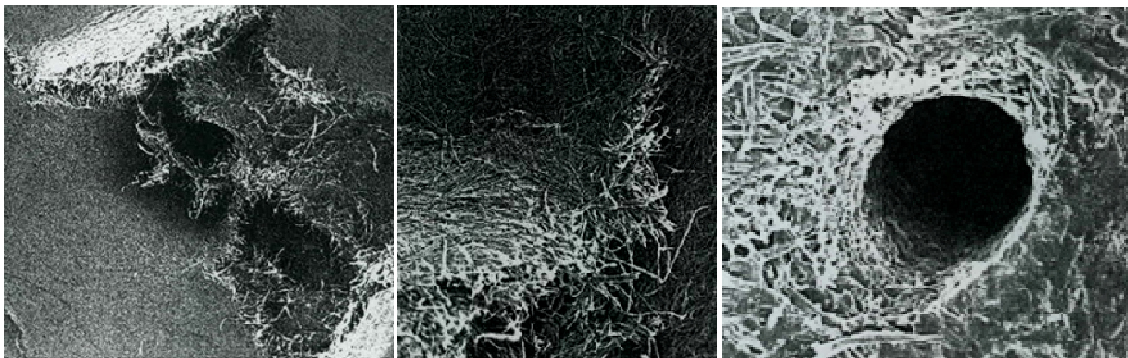


Fig.1.30 (a) Perforació d'un aïllament Presspan per un impuls tipus llamp. (b) Detall de la perforació mostrada a (a). (c) Perforació d'un aïllament Presspan a f=50Hz. (A.f. Bosch, R., Marsal, M.).

La perforació dels aïllaments provocada per l'impacte d'un llamp, o per les sobretensions transitòries que es transmeten després quan afecta a la xarxa, poden provocar altres defectes com curtcircuits i arcs elèctrics. Els seus efectes, poden destruir els aïllaments i eliminar els rastres característics del llamp. Malgrat això, un cas en el que s'han trobat rastres, és en la corba d'entrada a l'edifici de cables de rètols lluminosos instal·lats en façanes afectats per llamps.

Quan l'arc impacta sobre un conductor produeix un cràter localitzat. A la Fig.1.31 es mostren exemples d'erosió, reproduïda experimentalment, per l'impacte d'impulsos de corrent capacitius de 10kA i 20kA, amb una duració de 100µs, sobre una superfície d'alumini i una altra de titani [65].

³⁴ Troballa i descripció del succés realitzada per David Xixons Clotet.

³⁵ Realitzat a la plataforma d'assaig de corrent d'impuls tipus llamp (100kA, 80kJ, 8/20µs) de l'ETSEIB.

Aquest experiment pretén simular els efectes dels impactes d'un llamp sobre el fuselatge d'una aeronau. S'observa que el diàmetre i profunditat del cràter depenen del corrent i també del material (el titani mostra un millor comportament).

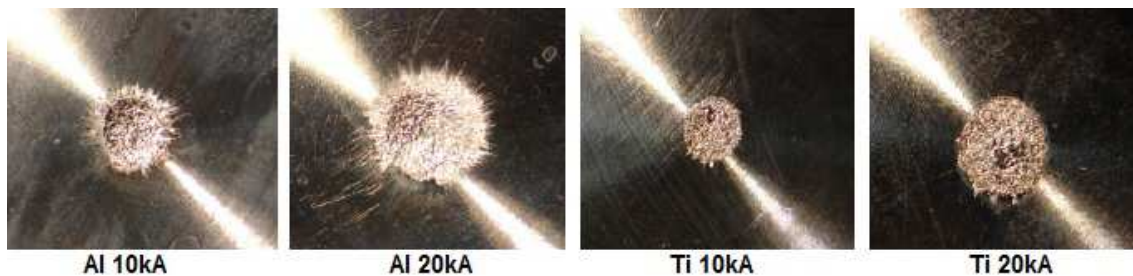


Fig.1.31 Cràters ocasionats per impulsos de corrent sobre superfícies de Al i Ti. (font: v.[65]).

Molts components del sistema elèctric poden haver de suportar impulsos de corrent tipus llamp (conductors, seccionadors, parallamps, etc). Han de superar assajos normalitzats per garantir que resistiran els esforços electrodinàmics i tèrmics que implica la circulació de corrent tipus llamp. Tot i així, en funció de la casuística i component afectat, aquest corrent pot fondre, deformar plàsticament o volatilitzar el metall. Les sobreintensitats produïdes per la xarxa, degudes a la destrucció d'aïllaments produïda pel llamp, també poden afectar als conductors presentant els seus efectes característics.

1.3.2.6.6. Efectes ocasionats per les descàrregues per pistes conductores

Els arcs per camins carbonitzats deixen un rastre visible sobre els materials aïllants, en forma de traçat de color negre, com s'ha mostra anteriorment a la Fig.1.19. El rastre també pot aparèixer en altres aïllaments, que es trobin en contacte amb el que és afectat inicialment per la descàrrega [66]. Pot buscar-se a prop de l'origen del foc. No obstant, és molt probable que el posterior defecte (p.e. curtcircuit i arc elèctric), destrueixi l'aïllament en la zona on s'ha produït aquesta evidència i deixi els seus rastres característics. D'aquesta forma la causa originària del sinistre queda amagada darrera d'una altra font d'ignició elèctrica.

També el foc pot destruir els rastres presents en els aïllaments. En els focs que mantenen la zona on s'han originat menys afectada, podria sobreviure algun rastre. Un camí carbonitzat podria conservar-se dins d'una gota d'aïllament fos, tot i que seria una troballa difícil de realitzar i interpretar.

A la Fig.1.32 (a) es mostra l'aspecte d'un cable multipolar, després d'haver estat sotmès a una prova normalitzada per comprovar la seva resistència a l'arc per camins carbonitzats.

A la Fig.1.32 (b), es mostra una pista carbonitzada entre els forats d'un adaptador d'endoll de tipus Schuko a americà. S'ha mantingut habitualment en tensió, durant més de vint anys, per connectar la làmpada d'una tauleta de nit. S'ha alimentat des d'una instal·lació elèctrica interior de força antiga, sense presa de terra. Amb el temps, el camí conductor carbonitzat pot continuar evolucionant i acabar provocant un curtcircuit.



Fig.1.32 (a) Cable sotmès a un assaig de resistència a l'arc per pistes carbonitzades. (A.f.d. Font: [67]). (b) Pista carbonitzada entre els forats d'un adaptador d'endoll Schuko a americà. (A.f. Bosch, R., Martí, M.)

1.3.3 Espurnes i partícules calentes d'origen elèctric

1.3.3.1 Ejecció d'espurnes i partícules calentes causada per l'arc

1.3.3.1.1 Descripció de la font d'ignició

En general l'espurna és una partícula incandescent que es desprèn d'un cos en combustió³⁶. El fenomen és ocasionat perquè components de la seva superfície, són ejectats per l'augment de pressió de gasos produïts per l'elevada energia implicada a la reacció [69].

L'arc elèctric pot generar l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes, a causa de les grans temperatures i les ones de pressió que implica la seva naturalesa. Per exemple, és fàcilment observable durant el procediment de soldadura a l'arc manual.

Les espurnes poden produir la ignició de materials fàcilment inflamables o combustibles. La seva habilitat per produir la ignició de combustibles, depèn de la seva temperatura i de la seva mida [70].

La grandària d'una espurna és un factor determinant perquè tingui una duració prolongada. Les espurnes grans tenen més massa. Els permet mantenir la combustió i la seva energia calorífica, després d'abandonar la zona d'elevades temperatures on s'han produït [71]. Assolir ambients rics en oxigen quan s'allunyen d'aquesta zona afavoreix el manteniment de la seva combustió.

L'existència de reaccions químiques a l'espurna, que generin calor addicional durant el seu vol, és un altre factor que augmenta l'habilitat d'una espurna per produir la ignició de combustibles. Un exemple és l'oxidació del ferro quan es troba a una temperatura elevada, que produeix òxid de ferro (III) i allibera calor [72].

Els temps de vol grans, a temperatures elevades, afavoreixen que les partícules puguin entrar en contacte amb combustibles de l'entorn i produir la seva ignició. Les partícules més grans, també assolixen velocitats majors i tenen una superfície de bescanvi tèrmic proporcionalment més petita. Això dificulta que es refredin abans d'impactar sobre possibles combustibles.

Quan les espurnes es refreden el seu color acostuma a variar. Arriba un moment que desapareix la incandescència. No obstant, la incandescència no és una condició necessària per produir la ignició

³⁶ Tot i que espurna i guspira sovint s'utilitzen com a sinònims, la guspira té una accepció que la defineix com a descàrrega elèctrica que l'espurna no té. L'Enciclopèdia Catalana recull aquesta diferència de significats [68].

de determinats combustibles [73]. També pot ser ocasionada per partícules calentes que no emeten llum.

L'arc de separació té una gran habilitat per ejectar espurnes. És per la gran quantitat d'energia que es concentra en el petit forat ionitzat en el que s'estableix l'arc. Les ones de pressió associades a l'arc poden contribuir a propulsar les partícules. Els camps magnètics locals també poden transmetre energia cinètica a les partícules. Factors com la circulació de corrents forts a través d'espines tancades o elèctrodes de ferro, reforcen molt el camp localment i poden augmentar la virulència de les projeccions.

Perquè es produeixi una ejecció d'espurnes no és necessària una circulació de corrent molt gran. Pot aparèixer durant arcs de separació produïts en circuits secundaris de baixa potència (v. 1.3.3.1.2, Fig.1.35). No obstant, en defectes ocasionats en sistemes de potència i escomeses, la producció d'espurnes grans és més elevada i potencialment perillosa, que quan es produeixen en circuits secundaris.

En el cas d'un arc produït durant la fusió d'un conductor, ocasionat per un curtcircuit o un defecte a terra amb corrents forts, l'ejecció d'espurnes és notable i violenta. A la Fig.1.33 (a), es mostra una ejecció instantània d'espurnes experimental que es produeix en el moment de trencament d'un conductor de coure nu, a causa de la fusió ocasionada per un corrent de curtcircuit de 6,7kA. L'experiment es realitza a una tensió reduïda de 9V (v. annex B.1.1). Com que la tensió és baixa, l'arc s'extingeix molt ràpidament al produir-se la separació. Per aquest motiu, l'ejecció de partícules és més reduïda, que si el mateix fenomen s'hagués produït a una tensió més elevada.

Una incandescència de color groc-blanc és observable durant la fusió del coure ($T_F= 1084^\circ\text{C}$). Quan les espurnes es refreden la incandescència es percep de color vermell. Evoluciona de brillant a cada cop més tènue, fins que la partícula deixa d'emetre llum. Les partícules de coure es refreden i s'apaguen durant el vol ràpidament.

A la Fig.1.33 (b), es mostra l'ejecció experimental d'espurnes des d'un tub de ventilació d'alumini. Es produeix durant un curtcircuit amb arc de separació, generat per un contacte accidental amb conductors de coure actius³⁷. La tensió eficaç del sistema és de 230V i el corrent de curtcircuit subtransitori de l'ordre de 1,5kA. S'observa l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes de color blanc o blanc-blau. És característic de les espurnes d'alumini. Aquest color posa de manifest que les partícules es troben a una temperatura superior que les de coure mostrades a la Fig.1.33 (a).

L'alumini pur té un punt de fusió més baix que el coure ($T_F= 660^\circ\text{C}$), però té la particularitat que a l'entrar en contacte amb l'atmosfera, crea una capa d'òxid d'alumini (Al_2O_3) o alúmina. És un òxid molt estable que embolcalla l'alumini. L'òxid d'alumini té una temperatura de fusió de 2042°C [74]. La ignició de l'alumini es produeix durant el trencament d'aquesta capa de protecció. Succeeix per sota de la temperatura de fusió de l'òxid d'alumini, en un interval definit experimentalment en $1727\text{-}1927^\circ\text{C}$ [75]. Aquest rang de temperatures, està relacionat amb que les

³⁷ La casuística es tracta de forma més àmplia al capítol 2.

partícules incandescentes d'alumini ejectades, puguin tenir un color groguenc brillant que evoluciona cap a blanc. El cromatisme que porta al groc s'explica perquè l'alumini té un comportament que s'aproxima més al del cos gris i no al del cos negre ideal [76].

Durant la combustió, és conegut que una partícula d'alumini no supera la temperatura d'ebullició de l'òxid d'alumini. Experimentalment s'ha definit la temperatura efectiva de les seves flames en un ordre de magnitud de 3200°C [75]. Explica el cromatisme blanc (molt brillant) de les espurnes d'alumini en combustió [76]. Cal matisar que l'alumini present en els conductors elèctrics acostuma a estar aliat, el que podria introduir lleugeres variacions en els colors. L'elevada temperatura associada a la ignició i combustió de l'òxid d'alumini, es relaciona amb que les espurnes d'alumini assoleixin temperatures i temps de vol superiors que les de coure.

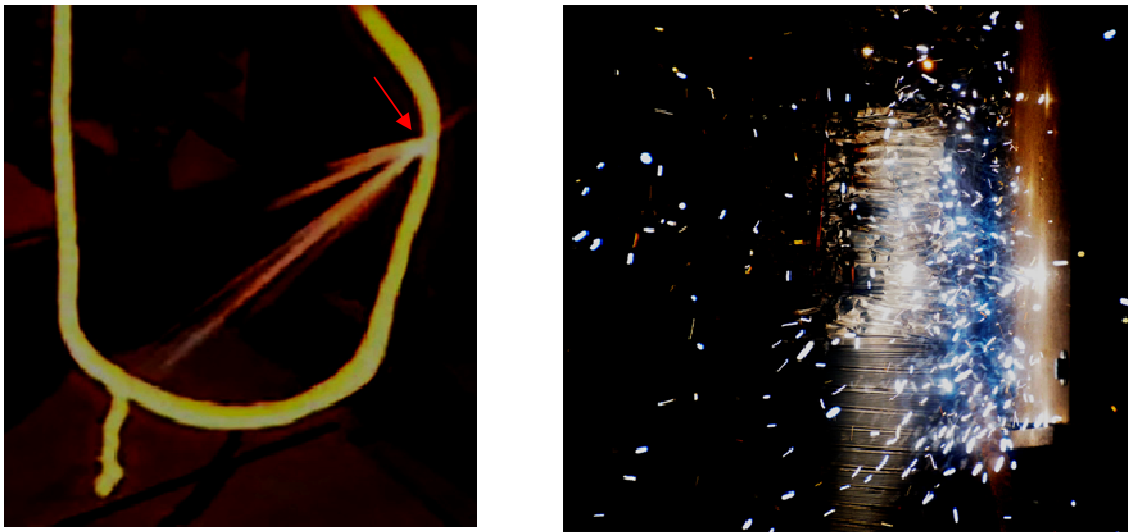


Fig.1.33 (a) Ejección d'espurnes durant la fusió d'un conductor de Cu. (b) Ejección d'espurnes de Al durant un arc de separació. (A.f. Martí, M.).

La guia nord-americana de referència per a la investigació d'incendis i explosions NFPA 921, destaca l'habilitat de les espurnes d'alumini ejectades per l'arc, per produir la ignició de combustibles fàcilment inflamables en relació amb les de coure; atès que entren en combustió i volen extremadament calentes fins que finalitza la combustió o s'apaguen a l'aterrar sobre una superfície [70].

D'altra banda, les reaccions aluminotèrmiques són reaccions d'oxidació de l'alumini que es produeixen a elevades temperatures i són molt exotèrmiques. Un cas particular de reacció aluminotèrmica és la reacció de termita, utilitzada des de 1898 en la soldadura de vies de tren [77]. Es tracta d'una reacció entre òxid de ferro (III) i alumini a elevada temperatura, que produeix òxid d'alumini i allibera una gran quantitat de calor. La reacció es produeix segons l'Eq.1.3 [77].



Aquesta reacció incrementa la temperatura dels productes a valors de l'ordre de 2700°C [77]. Si l'energia per iniciar-la es aportada als reactius de la mescla en un espai confinat de forma abrupta,

p.e. per un arc elèctric, la reacció es desenvolupa de forma automantinguda sense que sigui necessària més aportació d'energia des de l'exterior [77]. Es manifesta en forma de flames i l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes atomitzades. En el cas que l'arc es produeixi en presència d'alumini i òxid de ferro, existeix la possibilitat que es desencadeni aquesta reacció automantinguda. També un incendi pot oxidar el ferro i donar lloc a l'aparició d'arcs secundaris, situació en la que aquest fenomen podria contribuir a propagar el foc.

1.3.3.1.2 Exemples de factors causals de la font d'ignició

L'ejecció elèctrica d'espurnes acostuma a estar causada per l'arc. Les casuístiques i factors que s'han descrit pels arcs que es produeixen entre elèctrodes estacionaris (v. 1.3.2.1.2) i pels arcs de separació (v. 1.3.2.2.2), poden relacionar-se també amb l'ejecció d'espurnes d'origen elèctric.

A la Fig.1.34, es mostra una seqüència de fotogrames relativa a un cas d'ignició, provocat per una ejecció d'espurnes d'origen elèctric. Els residents van notar que el llum de casa seva marxava de forma intermitent. Van sentir uns espetecs a l'exterior i van sortir a l'exterior. Al veure el sinistre que s'estava produint, van trucar als bombers. Aquests van haver d'esperar a que la companyia desconnectés la línia per poder apagar un petit incendi que es va produir en uns matolls [78].



Fig.1.34 Ejecció d'espurnes des d'una línia aèria ocasionada per l'acció de l'arc. (A.f.d. Font: v.[78]).

Es tracta d'una línia aèria en la que es van produint múltiples descàrregues elèctriques de forma intermitent. Es propaguen de forma molt ràpida longitudinalment sobre la línia. El succés té una duració de diversos minuts, durant els quals s'observen pluges d'una gran quantitat d'espurnes que arriben enceses al terra. Les espurnes són ejetades per l'acció de l'arc. Aquest exemple posa de manifest la capacitat de generar un incendi que tenen les espurnes d'origen elèctric.

Els incendis destrueixen els aïllaments i disminueixen la rigidesa dielèctrica de l'aire. Els arcs secundaris produïts pels incendis també poden generar una ejecció d'espurnes. En funció de l'escenari, aquestes poden contribuir a propagar l'incendi. En l'exemple mostrat a la Fig.1.34, si l'incendi en els matolls prosperés, el foc i el fum podrien afectar a la línia. Podria destruir aïllaments i disminuir la rigidesa dielèctrica de l'aire. L'aparició de fenòmens de descàrrega elèctrica es veuria afavorida. També ajudaria a que els arcs poguessin desplaçar-se més fàcilment. L'ejecció d'espurnes associada podria implicar una zona més ampla i contribuir a propagar el foc generant nous focus.

1.3.3.1.3 Experiments il·lustratius de la font d'ignició

A la Fig.1.35, es mostren diferents exemples d'ejecció experimental d'espurnes. Es genera un arc de separació utilitzant el petit muntatge exposat anteriorment a l'apartat 1.3.2.2.3 (v. Fig.1.13(b)). En aquests exemples, abans de girar el cargol per separar-lo del conductor de coure, la tensió eficaç és de 230V el corrent eficaç és de 10A. S'observa la diferència entre la descàrrega elèctrica i les espurnes ejectades, tot i que a simple vista poden semblar un mateix fenomen. Es comprova que una circulació de corrent gran, no és imprescindible perquè es generin espurnes.

La superfície del cargol d'acer té contingut en ferro i carboni. Provoca un efecte d'ejecció d'espurnes amb filaments ramificats. És buscat a la pirotècnia per la seva estètica (similar al de les petites bengales utilitzades a les festes amb pirotècnia). Amb aquesta potència les espurnes s'extingeixen ràpidament i el seu radi d'acció és força localitzat.

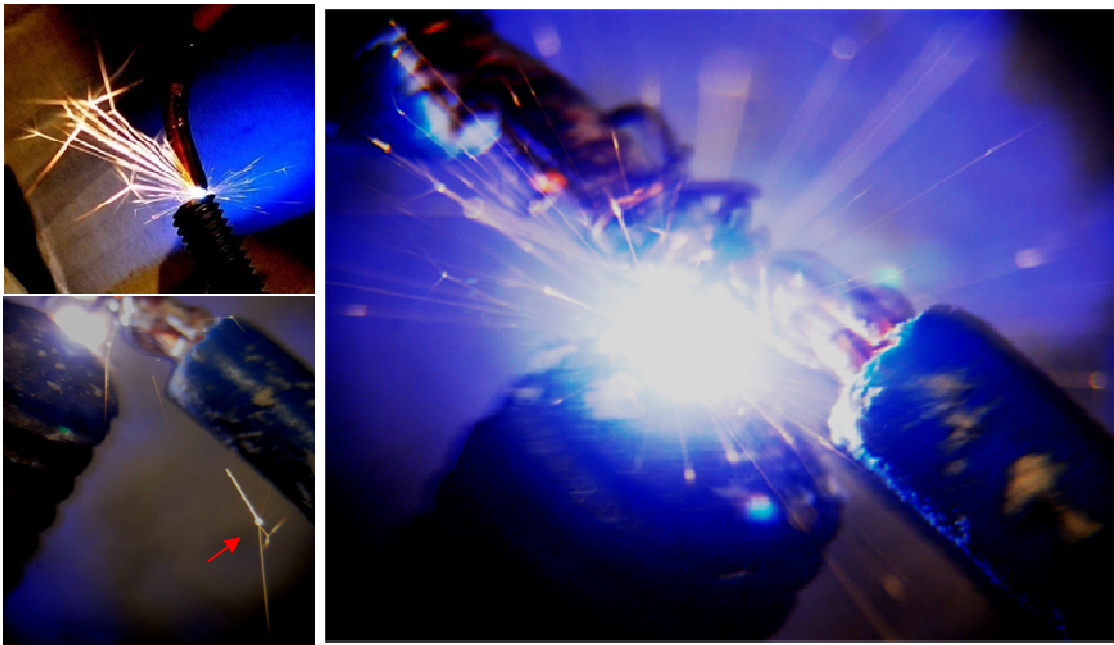


Fig.1.35 Ejecció d'espurnes mitjançant arc de separació. (A.f. Martí, M.).

A la Fig.1.36 (a), es mostra un altre experiment, qualitatiu i d'execució senzilla, per reproduir l'ejecció d'espurnes ocasionada per l'arc de separació. Permet implicar diferents materials i comprovar els efectes exposats. Posa en joc una major potència que l'experiment mostrat a la Fig.1.35, pel que la quantitat de partícules projectades és més abundant i tenen unes dimensions superiors.

Consisteix en substituir l'elèctrode revestit d'un aparell de soldadura manual per arc convencional, per un conductor rígid de coure o alumini. En aquest tipus d'aparells el corrent de curtcircuit normalment s'ajusta a valors de l'ordre de 100 a 400A (tot i que el potenciòmetre no acostuma a indicar el corrent, és fàcilment mesurable amb una pinça amperimètrica). Com major sigui la potència, major serà l'ejecció de partícules. Com a massa és pot utilitzar una superfície de coure o alumini, per simular l'arc que es produeix durant el trencament d'un conductor de Cu o Al o el

contacte d'un conductor de Cu amb una massa de Al. O bé una superfície de ferro, per simular el contacte d'un conductor amb una massa de ferro, amb una circulació de corrents elevats.

Es fa entrar en contacte l'elèctrode amb la massa. Al separar-los s'estableix l'arc i es produeix l'ejecció de partícules, de forma similar al procediment habitual de soldadura per arc manual. Cal protegir la cara i la vista amb una pantalla de protecció inactínica.

Adicionalment es pot acostar una flama al punt de contacte. Ionitza l'aire i pot afavorir la formació de l'arc i l'ejecció d'espurnes. Al mateix temps, permet reproduir el succés en condicions d'incendi. La carbonització produïda per la flama de gas, afavoreix la formació d'espurnes de color taronja.

A la Fig.1.36 (b), es mostra el resultat de realitzar un arc de separació entre elèctrodes d'alumini i ferro. S'observa qualitativament la diferència entre el color i els temps de refredament i de vol, de les espurnes de Al (blanc o blau cap a blanc) i Fe i C (taronja o vermell).

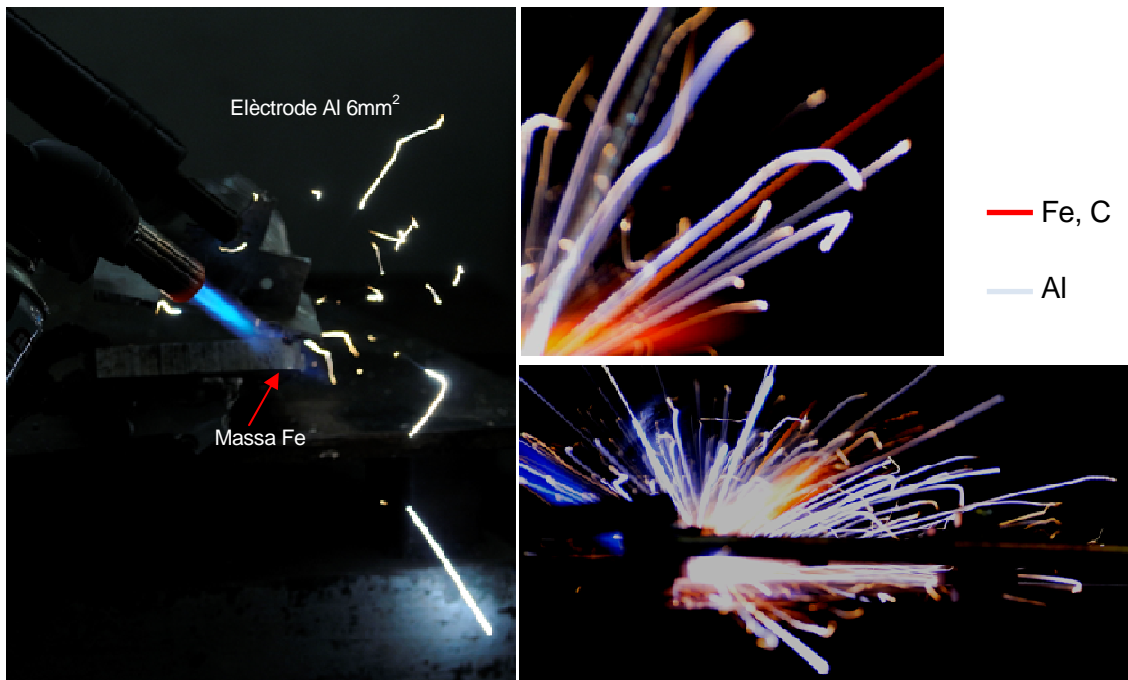


Fig.1.36 (a) Ejecció d'espurnes experimental amb soldador per arc (elèctrode Al i massa Fe). (b) Ejecció d'espurnes d'origen elèctric de Al i Fe. (A.f. Martí, M.).

1.3.3.2 Efectes sobre els conductors i la seva aplicació forense

L'ejecció d'espurnes i partícules calentes des dels conductors, és possible quan aquests estan nus o han perdut el seu aïllament per l'acció d'un defecte elèctric o el foc. La seva ejecció pot deixar senyals en forma d'osca o forats en el conductor.

Les espurnes poden apagar-se durant el vol o sobre la superfície contra la que impactin. En funció de la seva temperatura i de les característiques de la superfície, s'hi poden adherir. Les temperatures

elevades contribueixen a que es produeixi un fenomen de fusió local en el punt d'impacte. Aquesta casuística és típica de l'ejecció elèctrica d'espurnes d'alumini en combustió (poden assolir 3200°C).

A la Fig.1.37 (a) es mostra una pantalla de vidre que protegia un assaig de curtcircuit amb arc de separació, entre elèctrodes de Al i una massa de Al. S'observen diversos impactes de partícules d'alumini, ejectades en combustió durant l'assaig. Al solidificar-se han quedat fortament unides al vidre. Moltes no estan simplement adherides d'una forma superficial, sinó que han format cràters. A la Fig.1.37 (b) es mostren amb més detall aquests impactes, que il·lustren l'elevada temperatura de les partícules i la virulència dels impactes.

Quan la combustió de les partícules d'alumini finalitza durant el vol, es comencen a refredar. Visualment s'observa que deixen d'emetre llum blanca. Es troben cendres d'alumini de petites dimensions. Normalment apareixen amb forma de volva o atomitzades en forma de pols. Es dipositen sobre el terra o altres superfícies.

En canvi, quan les partícules d'alumini no assoleixen una temperatura suficientment elevada perquè es produeixi la combustió, o bé el procés té una duració breu, sovint apareixen rastres en forma de boles o flocs. A la Fig.137 (c) es mostra una espurna d'alumini ejectada durant un arc de separació, realitzat experimentalment entre un conductor rígid de Al i una superfície de Al. Té un diàmetre de 3mm i la seva superfície mostra irregularitats. Es relaciona amb un procés de fusió seguit per una ràpida solidificació.

No obstant, en un incendi les flames també poden fondre l'alumini. Es formen gotes o regalims de material fos. Les partícules amb forma de volva i les fortament adherides en el sostre o parets, trobades a prop de cables elèctrics amb conductors d'alumini o cables ubicats a prop de masses d'alumini, poden posar de manifest un origen relacionat amb una ejecció elèctrica.

L'ejecció elèctrica d'espurnes de coure no és tan habitual com la d'espurnes d'alumini. L'arc genera gotes de coure en els extrems dels conductors fosos, però molts cops no arriben a separar-se. Quan se separen no és tan freqüent que s'adhereixin a superfícies com les d'alumini, perquè es refreden ràpidament i acostumen a volar a temperatures inferiors. Quan se solidifiquen normalment apareixen en forma d'esfera. Molts cops mantenen la coloració típica del coure. No obstant, poden mostrar oxidació superficial i tenir adherides restes de carbonització o d'altres materials. Pot ser a causa de l'acció de l'arc, l'impacte sobre una superfície o l'acció del foc.

A la Fig.1.37 (d), es mostra una espurna de coure solidificada. Procedeix d'un conductor de fils de coure nu de 35mm², afectat per un curtcircuit amb arc de separació. Presenta forma d'esfera i té un diàmetre de 4mm. S'observen signes d'oxidació superficial, alguns cràters fortament oxidats, una textura rugosa i restes de carbonització en la zona d'impacte (senyalada).

A la Fig.1.37 (e), es mostra una altra espurna de coure solidificada. Procedeix d'un sinistre ocasionat en els embarrats del sistema de potència que alimenta una indústria, ubicada a Catalunya. Té forma d'esfera i un diàmetre de 6mm. El diàmetre d'aquesta esfera és superior al de la mostrada a la Fig.137 (d), atès que la potència de curtcircuit en el punt de defecte era major. Presenta una

coloració groguenca. S'observa un recobriment superficial heterogeni de color negre, que l'embolcalla completament.

Un estudi amb EDX podria indicar la composició d'aquest material. Tot i així, senzillament amb un iman ja es va poder comprovar que era ferromagnètica. Aquesta propietat va posar de manifest que el recobriment era d'acer. S'havia fos durant l'impacte amb una massa annexa al defecte. Amb un òhmmetre es comprova que és conductora. Al seccionar-la es posa de manifest que per dins té la coloració típica del coure.

Els components de les connexions i contactes elèctrics poden estar aliats o tenir recobriments superficials. Les espurnes que en procedeixen o impacten contra ells, poden mostrar evidències d'aquest fet. Per exemple, el coure aliat amb el zinc dóna lloc al llautó que es de color daurat o groguenc (s'utilitza per evitar la corrosió en recobriments superficials de cargols, contactes, alguns embarrats de coure³⁸, etc).

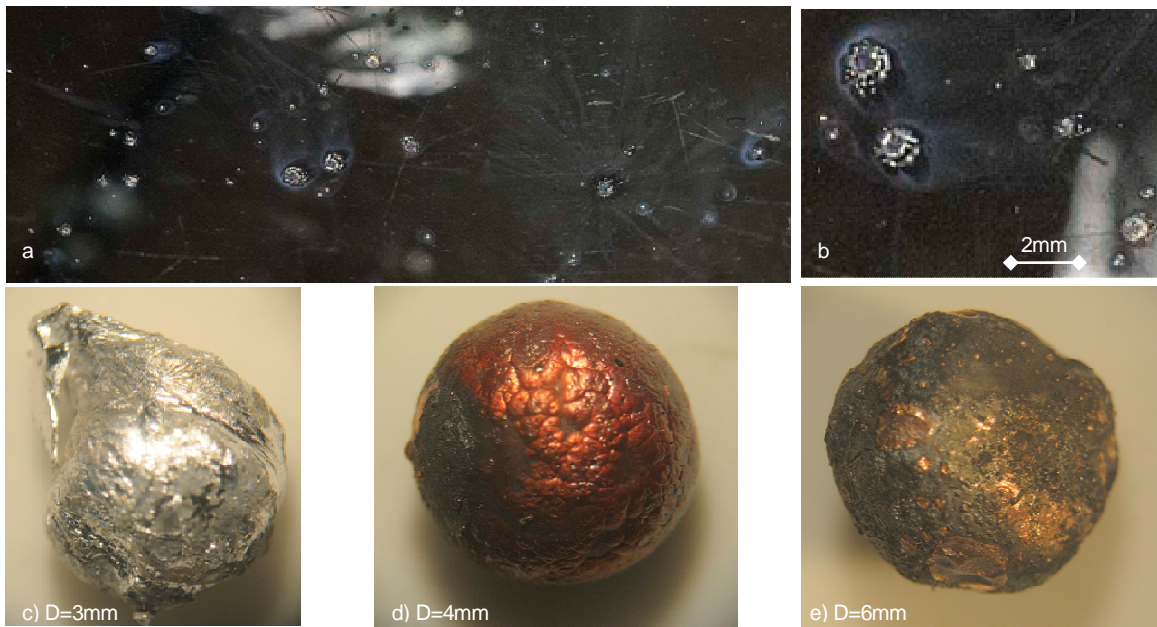


Fig.1.37 (a) Pantalla de vidre amb impactes de partícules de Al en combustió. (b) Detall dels impactes de les partícules de Al mostrats a (a). (c) Espurna d'alumini solidificada ràpidament. (d) Espurna de Cu solidificada. (e) Espurna de Cu solidificada amb recobriment superficial. (A.f. Martí, M.).

La quantitat, dimensions, aspecte, composició, adherència a superfícies, etc, d'aquests rastres, pot ajudar a identificar aquesta font d'ignició elèctrica i a definir les temperatures que es van assolir en els punts de defecte durant el sinistre. La seva localització i els rastres de fusió amb altres materials, poden ser indicadors que ajudin a deduir les seves trajectòries i les característiques del seu vol i dels impactes. Aquesta informació pot ser útil per ajudar a reconstruir els fets d'un sinistre i contribuir a determinar l'origen d'un incendi o els factors que han contribuït a la seva propagació.

³⁸ Alguns fabricants de material elèctric, com Schneider Electric, desaconsellen l'ús de les barres de coure zincades. És perquè introdueixen una major resistència de contacte en els embarrats dels sistemes de potència en BT (fins a 11 vegades superior en relació amb les de coure sense tractament) [79]. Els contactes d'elevada resistència produeixen sobreescalfaments i una forta oxidació.

1.3.4 Altres fonts d'ignició

1.3.4.1 Generació de calor per inducció electromagnètica

Els fenòmens d'inducció electromagnètica que apareixen en els conductors que se situen sota l'acció d'un camp magnètic variable, indueixen corrents (anomenats habitualment de Foucault o paràsits) que produeixen calor. Per exemple, són típiques les pèrdues d'energia degudes a aquest fenomen, en els transformadors de potència. D'altra banda, en els equips amb components ferromagnètics (com els nuclis dels transformadors), també es produeixen pèrdues en forma de calor per histèresis, a causa de la seva permeabilitat variable.

La inducció electromagnètica podria produir sobreescalfaments que conduïssin a un incendi en l'àmbit de les instal·lacions elèctriques. No obstant, no es menciona com a font d'ignició en les guies i normatives de referència a les que s'ha tingut accés. En cas que originés un sinistre, hom pot imaginar que en molts casos seria difícil comprovar una hipòtesi en aquest sentit.

Per exemple, els quadristes elèctrics acostumen a tenir en consideració no fer l'estesa de conductors, d'una mateixa línia trifàsica, per forats diferents d'una superfície d'acer. S'hi podrien induir corrents que escalfessin l'acer. Hipotèticament podrien transmetre aquesta calor als aïllaments dels cables i produir la seva ignició o degradació. El defecte elèctric posterior ocasionaria altres rastres més fàcilment identificables. Probablement serien senyalats com a la causa del sinistre.

D'altra banda, un mal dimensionament d'un equip elèctric que tingui la inducció electromagnètica com a principi de funcionament (transformadors, motors d'inducció, frens elèctrics, etc), també podria conduir a un sobreescalfament dels seus materials dielèctrics que provoqués la seva ignició.

La cuina és un dels punts de l'habitatge on més incendis es generen. Als EUA, a l'últim període estadísticament registrat, es van ocasionar dos de cada cinc incendis domèstics i les plaques de cocció van ser responsables de 3 de cada 5 d'ells [80]. Darrerament han proliferat les plaques de cuina vitroceràmiques d'inducció. Es basen en el principi d'inducció electromagnètica per escalfar directament un recipient amb propietats ferromagnètiques. Les seves vendes es basen en una millor eficiència, facilitat de neteja i seguretat davant de l'incendi. Aquesta major seguretat es relaciona amb que la superfície vitroceràmica es manté freda i disposen d'equips detectors de sobreescalfaments que les desconnecten automàticament.

Un estudi experimental recent posa de manifest que no són tan segures en relació amb la possibilitat de generar incendis com es diu [81]. L'experiment reproduïx una situació de sobreescalfament d'oli en un recipient escalfat per una cuina d'inducció. Demostra la possibilitat d'ignició de l'oli i la fallada dels mecanismes de seguretat de la placa, quan es produeix un mal contacte entre la placa i el recipient. Li impedeix detectar el sobreescalfament del recipient i activar la desconexió automàtica.

1.3.4.2 Bateries

1.3.4.2.1 Sobreescalfament per creixement de dendrites

La inflamació i explosió de bateries elèctriques és una casuística popularment coneguda, degut en bona mesura a la generalització de l'ús de dispositius electrònics amb bateries d'ions de liti. La seva aplicació està molt estesa en la indústria electrònica, perquè són les bateries comercials que tenen una major densitat d'energia. Per aquest motiu també s'han aplicat en el creixent sector dels vehicles elèctrics.

Un estudi recent del Laboratori Nacional Lawrence Berkeley (Califòrnia), ha posat de manifest que aquestes bateries s'inflamen per una font d'ignició elèctrica singular: el sobreescalfament per un procés de creixement de dendrites de liti [82]. Utilitzant tècniques de microtomografia computeritzada per rajos X, s'ha observat que al llarg dels cicles de càrrega i descàrrega, apareixen dendrites microscòpiques sobre la superfície de l'elèctrode de liti. Creixen i arriben a l'electròlit, de forma que eventualment produeixen curtcircuits. Això genera sobreescalfaments que poden conduir a la inflamació de la bateria. Actualment s'estan desenvolupant estudis per aclarir els factors que propicien el desenvolupament de les dendrites, que permetin reduir la seva incidència [83].

1.3.4.2.2 Explosions d'hidrogen

Les bateries de plom àcid desprenen hidrogen i oxigen, a causa de la hidròlisi que té lloc durant el procés de càrrega. Es produeix especialment al final del procés i si aquest continua quan s'ha assolit la màxima càrrega. També durant les sobrecàrregues. L'hidrogen i l'oxigen formen una mescla que pot inflamar-se amb l'aportació d'una energia d'activació molt petita. La combinació d'aquest factor amb una aportació d'energia d'activació procedent del propi sistema, com una guspira, pot produir explosions amb relativa facilitat.

Les instal·lacions en espais confinats i una mala ventilació incrementen el risc. Aquesta és una problemàtica característica de les instal·lacions de generació solar fotovoltaica, on està estès l'ús d'aquestes bateries. En petites instal·lacions d'autoconsum de vegades les bateries s'instal·len en garatges mal ventilats, per criteris econòmics i estètics, el que incrementa el risc.

1.4 Estadístiques d'incendis d'origen elèctric i la seva relació amb la recerca

Una anàlisi estadística de les casuístiques involucrades en els incendis d'origen elèctric, que les relacioni amb els danys personals, materials i ambientals que produeixen; i amb les fonts d'ignició que es manifesten amb major freqüència, permetria orientar els esforços en la prevenció. També definir unes línies de recerca prioritàries. No obstant, existeixen grans mancances en aquest camp, no només a Catalunya, sinó en general a la resta de països.

1.4.1 Estadístiques nacionals en relació amb l'incendi d'origen elèctric

L'Institut d'Estadística de Catalunya publica cada any nombroses estadístiques, però només existeix una relacionada amb els incendis d'origen elèctric. Es tracta de l'estadística d'incendis

forestals per causes 2010-2014 [84]. L'any 2014 hi va haver aproximadament un 4% d'incendis forestals provocats per línies elèctriques (no s'especifica si de AT o BT), un 4% classificat com a "motors o altres" (poden tenir origen elèctric o no), un 18% per causes naturals (pot incloure el llamp), i un 12% per causes desconegudes, entre d'altres causes no relacionades amb l'electricitat (sobre un total de 461 incendis).

En l'entorn urbà, no es disposa de dades, procedents dels cossos de Bombers, que detallin el nombre d'incendis d'origen elèctric o les seves causes a Catalunya. La informació estadística des d'aquests organismes públics al respecte és molt escassa.

Durant l'exercici 2009 es va implementar a Catalunya, de forma experimental, una recollida de dades sistemàtica utilitzant formularis i índex de classificació de dades adaptats de les normatives nord-americanes NFPA 901 i NFPA 902. Inclouen diversos camps sobre l'origen del sinistre (lloc d'inici, equipament implicat, energia d'activació, causa d'encesa, activitat implicada, entre d'altres). Aquests procediments permetran confeccionar estadístiques en aquest àmbit properament.

Segons informa Miquel Rejat, Inspector del Cos de Bombers de la Generalitat Catalunya i coordinador del Sistema d'Investigació de Sinistres (SIS), durant l'abril de 2015, el sistema informàtic per gestionar-ho encara trigarà en estar disponible. Aquesta tasca s'està realitzant actualment també a nivell espanyol, a través d'un grup de treball de la Asociación Española de Lucha contra el Fuego (ASELF).

Les companyies asseguradores i les associacions relacionades, els pèrits, les companyies de distribució de l'energia elèctrica i algunes indústries, també disposen d'informació al respecte. No obstant, són fonts d'origen privat d'accés més difícils. Poden estar limitades per compromisos de confidencialitat i presentar opacitats. Si personal qualificat dels cossos de bombers o especialistes associats, no realitzen encara una recollida sistemàtica de dades que expliquin les causes i mecanismes d'ignició dels incendis d'origen elèctric, és més difícil que les associacions puguin fer estadístiques representatives.

En l'àmbit de l'habitatge, un document tècnic difós per la plataforma per la revisió de les instal·lacions elèctriques (PRIE) a Espanya, posa de manifest que l'estat de les instal·lacions de molts habitatges espanyols, en relació amb la possibilitat d'ignició elèctrica, és preocupant [85]. Especialment a les instal·lacions antigues.

Segons estudis estadístics basats en inspeccions en habitatges, el 68% dels habitatges espanyols presenta seccions infradimensionades, el 69% presenta preses de corrent insegures i el 12,1% no té petits interruptors automàtics. Dels habitatges inspeccionats que tenien proteccions, el 13,5% patien sobreescalfaments i el 10% no funcionaven correctament. Segons les fonts d'aquest estudi, es produeixen 7300 incendis a l'any a Espanya per causes elèctriques amb tendència creixent i el cost dels incendis d'origen elèctric en habitatges és de l'ordre de 40,5 milions d'euros anuals [86].

1.4.2 Estadístiques internacionals en relació amb l'incendi d'origen elèctric

A nivell d'associacions de bombers internacionals, la International Association of Fire and Rescue Service (CTIF), publica estadístiques anuals sobre incendis [87]. Inclouen informació procedent de nombrosos països del món. No obstant, aquestes estadístiques tampoc ajuden a aportar llum sobre els incendis d'origen elèctric.

D'altra banda, un organisme de referència en l'estudi dels incendis és la NFPA de EUA. Actualment existeix un estudi estadístic específic sobre incendis d'origen elèctric en els edificis, durant el període 2007-2011, amb dades recollides pels cossos de bombers municipals del país [1]. També existeix un estudi específic que explica la incidència estadística del llamp, durant aquest mateix període [88]. No obstant es troba a faltar una categoria d'incendis d'origen elèctric que inclogui tots els àmbits (edificis, generació i distribució de l'energia elèctrica, vehicles, etc).

En relació amb els edificis, segons l'estudi mencionat i com a punt de referència, l'any 2011 el 13% dels incendis registrats que es van produir als edificis dels EUA van tenir un origen elèctric (aproximadament 64100 incendis). Només durant l'any 2011, van ser responsables de 431 morts i 1813 ferits civils. Van ocasionar pèrdues per quasi dos bilions de dòlars en danys directes a les propietats afectades. Aquestes xifres poden ser superiors a causa dels d'incendis d'origen desconegut.

En relació amb els habitatges, els incendis es van produir principalment en equipaments de distribució elèctrica i enllumenat (48%), rentadores i assecadores (6%), calefactors (4%), sistemes d'aire condicionat (4%) i escalfadors elèctrics d'aigua (3%). Indica que les escomeses, els quadres de protecció i el cablejat dels edificis són punts crítics. Segons l'estudi, en el 30% d'aquests incendis el primer element en el que es va produir la ignició van ser conductors o aïllaments de cables. També són crítics els equips generadors de calor i els que funcionen amb motors elèctrics. Aquesta classificació és de difícil interpretació a l'hora d'establir les fonts d'ignició de major rellevància, perquè no especifica les causes o els mecanismes d'ignició.

No obstant, en aquest estudi també es facilita informació sobre les fonts d'ignició. Es distingeix entre incendis produïts en habitatges i incendis produïts en altres edificis. Els resultats són d'un ordre de magnitud similar en ambdós casos.

A la Fig.1.38 es mostren els percentatges associats a diferents factors d'ignició³⁹, relatius als incendis produïts en habitatges (la suma de percentatges supera el 100% a causa d'errors d'arrodoniment, segons s'especifica en l'estudi). La primera observació és que existeix un 50% de casos procedents de defectes elèctrics desconeguts. Sumant-hi el 26% de casos de curtcircuits inexplicats, posa de manifest que existeix un 76% de casos amb una font d'ignició indeterminada. Falten la majoria de peces del trencaclosques per determinar estadísticament les fonts d'ignició preponderants.

³⁹ Les dades s'han extret de la taula 1.3 de la documentació de l'estudi [89]

El primer factor determinat és el curtcircuit amb arc en un conductor amb aïllament degradat o envellit (12% del total). No obstant, no s'especifica perquè s'ha degradat l'aïllament. El curtcircuit amb arc podria ser una conseqüència de descàrregues per camins conductors, sobreescalfament en contactes de resistència elevada o sobreintensitats, etc. Discussions semblants es podrien fer en altres categories.

L'estudi inclou també un indicador que concreta la font de calor. Pot ajudar a aclarir algunes de les indeterminacions que es generen. Aporta que en el 65% dels casos la calor prové directament de l'arc, en el 5% d'espurnes, brases i flames (poden ser ocasionades per ambdues causes i no es concreta la participació de les espurnes) i en el 30% restant, queda indeterminat entre l'arc i el sobreescalfament per efecte Joule o senyala amb diferents graus de probabilitat al sobreescalfament.

Segons aquest estudi, sembla que l'arc és la font d'ignició amb major incidència estadística als habitatges. L'estudi relatiu a altres edificis mostra percentatges molt similars i s'arriba a les mateixes conclusions.

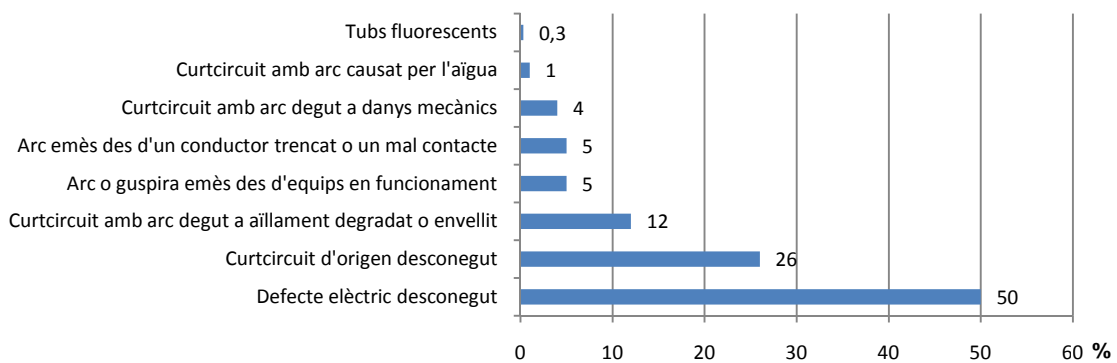


Fig.1.38 Factors d'ignició elèctrica accidental als habitatges de EUA (2007-2011).

Una consideració al respecte és que aquestes dades, corresponents només al 34% de casos no indeterminats, no concreten la tipologia d'arc (tot i que alguna categoria permet suposar-ho, com la d'arc emès des d'un conductor trencat o un mal contacte, que apunta a l'arc de separació). Tampoc es fa cap referència al llamp (es descriu en un altre estudi, tot i que semblaria lògic que aparegués en aquest també) o a les descàrregues capacitives relacionades amb l'electricitat estàtica.

Més concreció en la recollida sistemàtica de dades podria ser útil a l'hora de poder definir quins tipus de descàrregues elèctriques són més rellevants i han de concentrar els esforços de prevenció i recerca. Això també requeriria més recursos, així com un cert nivell de formació elèctrica específica dels equips que realitzen la recollida de dades i/o una associació amb experts en la matèria.

D'altra banda, els rastres de l'arc són més evidents i comuns que els dels sobreescalfaments per contactes d'elevada resistència o sobreintensitats (a excepció de l'arc per pistes conductores del que tampoc se'n tenen dades concretes, més enllà de suposicions i impressions). Els curtcircuits amb

arc també es produeixen habitualment per l'acció de les flames. No obstant, no existeix un criteri científic clar per distingir els arcs primaris dels secundaris o víctimes (com podria ser una diferència en l'aspecte o la metal·lúrgia dels rastres de fusió dels conductors d'ambdós casos, malgrat que els mètodes de localització del punt d'inici de l'incendi i la cartografia d'arcs poden ajudar). Per tot això, no sembla improbable que sense un anàlisi realitzat per un expert i unes proves forenses favorables, l'arc s'apunti com a responsable de l'incendi sense ser-ho directament. En aquest sentit el nivell de formació elèctrica específica dels equips que realitzen la recollida de dades pot ser també un factor determinant.

L'estudi que fa referència al llamp posa de manifest que durant el període 2007-2011, va produir una mitjana de 22600 incendis anuals, amb nou morts, 53 ferits i 451 milions de dòlars en danys directes a la propietat anuals [88].

A la Fig.1.39 es mostren gràficament les dades⁴⁰ corresponents a diferents tipus d'incendis provocats per llamps, en funció dels elements afectats. S'observa que la vegetació exterior és l'entorn on més incendis genera i que els habitatges són els edificis més afectats. El 26% agregat d'incendis produïts en edificis, correspondria a una mitjana de 5876 incendis anuals. Caldria afegir-los als incendis especificats en l'estudi corresponent a edificis citat anteriorment. La relació del llamp amb les sobretensions transitòries, que poden propiciar l'aparició de fonts d'ignició elèctrica en els edificis, no està quantificada.

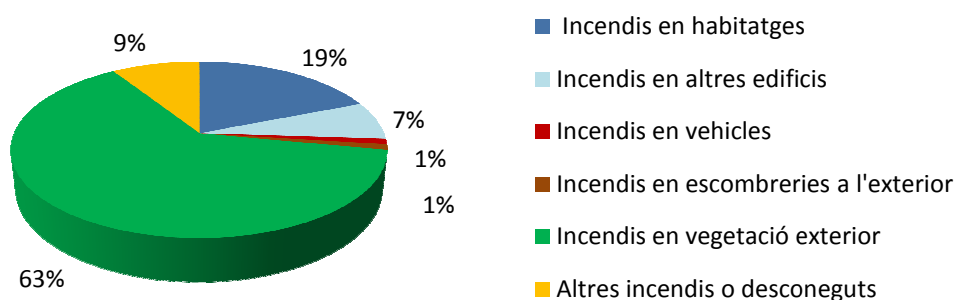


Fig.1.39 Incendis produïts per llamps als EUA (2007-2011).

En un altre estudi es poden trobar dades relatives als incendis en vehicles durant el període 2003-2007 als EUA [91]. Senyala que el 23% dels incendis produïts en vehicles que transiten per carreteres té una causa elèctrica. Implica de l'ordre de 66010 incendis anuals. No obstant, aquesta casuística no va comportar morts civils. Tot i que els seus sistemes elèctrics treballen a tensions reduïdes, la ignició elèctrica també es un factor rellevant en aquest àmbit.

En relació amb les instal·lacions elèctriques de BT o AT, fóra de l'àmbit dels edificis, no existeix un estudi específic. Si es consulten les bases de dades de congressos internacionals especialitzats, com per exemple els que depenen de la IAFSS i articles publicats sobre incendis d'origen elèctric, s'observa que la majoria de treballs són relatius a sistemes de baixa tensió. Una explicació és que la majoria d'incendis, morts i danys materials directes a la propietat es produeixen en sistemes de BT.

⁴⁰ Les dades s'han extret de la documentació de l'estudi [90]

Segons fonts de l'associació CEPREVEN, nou de cada deu dels incendis d'origen elèctric que es produeixen a Espanya són en sistemes de BT. La casuística de BT normalment també és més accessible per l'investigador, a causa que els equipaments d'assaig necessaris per la recerca experimental estan més generalitzats.

Existeix una àmplia experiència sobre defectes elèctrics en AT i articles de recerca sobre la temàtica. No obstant, no s'ha trobat que existeixin gaires treballs de recerca directament relacionats amb la ignició elèctrica o el desenvolupament dels incendis en sistemes de MT i AT. Tot i tenir una incidència estadística sobre el total inferior, les pèrdues econòmiques directes que ocasionen aquests incendis i les que poden comportar els talls de subministrament elèctric que se'n deriven, no són menors.

Els incendis forestals iniciats per línies aèries de MT i AT tampoc són la principal causa d'incendi forestal, segons per exemple, l'estadística de IDESCAT que s'ha citat anteriorment. Malgrat això, quan es produeixen poden ocasionar danys a les persones i les propietats significatius. Sovint comporten un impacte ambiental inestimable. Sembla justificat invertir esforços de recerca també en aquesta direcció.

Capítol 2. Experiments d'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric

2.1 Introducció

2.1.1 Antecedents

L'any 2005 es va realitzar un projecte fi de carrera d'Enginyeria Industrial a la ETSEIB (UPC), amb la finalitat de posar en marxa una plataforma d'assaig de curtcircuit [92]. L'element central de la instal·lació és un regulador d'inducció de 400kVA, 230V/0-460V. Permet treballar amb corrents de curtcircuit de forma transitòria. La tensió és ajustable en un ampli rang de valors i suficientment elevada com per visualitzar descàrregues elèctriques. Eventualment també es pot connectar un sistema d'acumulació d'energia cinètica per incrementar la capacitat de generar corrent de curtcircuit transitori. Dos motors d'inducció de 102kVA poden ser connectats en paral·lel amb la instal·lació actuant com a volants d'inèrcia. Quan es produeix el curtcircuit, el flux no desapareix instantàniament i part de l'energia cinètica emmagatzemada propicia que s'injecti un corrent de curtcircuit addicional.

Un dels primers usos d'aquesta instal·lació va ser realitzar uns assajos de curtcircuit per una companyia elèctrica. L'objecte d'assaig eren unes filasses d'alumini, procedents d'una línia aèria de AT. La seva secció s'havia vist reduïda en alguns punts per uns defectes. Es va observar que quan es produïa la fusió de fils d'alumini durant un curtcircuit, apareixia arc de separació i s'ejectaven espurnes d'alumini. Es va poder comprovar que aquestes espurnes tenien una habilitat apreciablement superior per arribar i mantenir-se enceses al terra, que les espurnes de coure ejectades durant repeticions de l'assaig utilitzant una filasses de fils de coure.

L'any 2009, es va col·laborar en el Grup de Recerca sobre Investigació d'Incendis i Explosions (GRIIE), promogut per l'Institut de Seguretat Pública de Catalunya (ISPC). Un dels seus integrants, Miquel Rejat, inspector del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya, va aportar un cas d'incendi singular en el que se sospitava que uns conductes de ventilació i aire condicionat d'alumini, havien tingut una participació rellevant en la progressió del foc. I va suggerir que es realitzés un estudi experimental sobre la possibilitat d'ignició elèctrica d'aquests conductes i com podia relacionar-se amb la progressió de l'incendi. Un treball experimental preliminar, realitzat durant el projecte d'aquesta tesi i presentat al GRIIE, va permetre constatar que un contacte elèctric entre un conductor actiu i un tub de ventilació d'alumini, donava lloc a l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes que volaven a temperatures molt elevades.

D'altra banda, durant la recerca bibliogràfica realitzada durant el projecte de tesi, no es va trobar cap article o treball de recerca que tractés el tema. Posteriorment, es va localitzar un article presentat al "9th International Symposium on Fire Safety Science", organitzat per la IAFFS, que repassava l'estat de l'art de l'incendi d'origen elèctric. Afirmava que la temàtica de l'ejecció de partícules calentes no ha rebut recerca experimental de laboratori significativa, més enllà d'un únic article de 2007, malgrat que els incendis deguts a aquesta causa són comuns [73].

Per tot això es va decidir començar a investigar en aquesta tesi l'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric, ocasionada per corrents forts amb arc de separació. S'usa com a fil conductor el cas dels conductes de ventilació i climatització d'alumini, aportat pels Bombers de la Generalitat de Catalunya.

2.1.2 Presència d'alumini en els sistemes elèctrics

L'alumini és un material comú en moltes instal·lacions elèctriques. Tot i que la seva conductivitat elèctrica és menor que la del coure, els conductors d'alumini es troben entre els més utilitzats. És per les seves propietats mecàniques, el seu baix cost, en relació amb el coure, i la seva resistència a la degradació per corrosió i oxidació.

Els conductors nus d'alumini amb ànima d'acer i els d'alumini aliat, són els més usats en l'estesa de línies aèries de MT i AT. La lleugeresa de l'alumini, el seu baix preu i la seva facilitat per ser doblat, redueixen els costos de muntatge i transport. L'alumini exposat a condicions ambientals crea una capa d'òxid d'alumini o alúmina, que el protegeix de l'oxidació i la corrosió. També s'utilitza en conductors aïllats i embarrats d'alumini, en les línies aèries i subterrànies de distribució en BT i en instal·lacions i quadres elèctrics de potència.

No obstant, a Espanya no s'utilitza en el cablejat interior d'edificis, com succeeix també a altres països. Tampoc en gran part de les instal·lacions industrials i quadres elèctrics de potència reduïda. Fa cinquanta anys els conductors d'alumini havien estat àmpliament utilitzats en la construcció d'habitatges als EUA [93]. Va coincidir amb una època d'augment de preu del coure. No obstant, van deixar d'instal·lar-se en aquest àmbit, perquè van ser relacionats amb defectes a les connexions que ocasionaven incendis.

És a causa de la dificultat de realitzar connexions fiables i duradores, de forma senzilla i econòmica, amb conductors d'alumini de puresa elevada. Al ser tou, el conductor es deforma quan és sotmès a pressió, el que requereix tècniques de connexió i connectors específics. Tot i que inicialment la connexió sigui bona, el seu coeficient d'expansió elevat ($23,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, quan el del Cu és de $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [94]) i la seva tendència a formar òxid d'alumini superficial (l'alúmina és un material ceràmic prou conegut a la indústria amb excel·lents propietats com aïllant elèctric, les quals augmenten amb la seva puresa), pot donar lloc a mals contactes amb el temps. Aquesta problemàtica és especialment crítica en els contactes bimetal·lics. El mal contacte pot conduir a la ignició elèctrica, per sobreescalfament en un contacte de resistència elevada.

No obstant, actualment la situació ha millorat, gràcies a l'ús de conductors d'alumini aliat. Inclús poden ser connectats amb seguretat sense necessitat de grimpar. Les seves característiques mecàniques s'han anat equiparant a les del coure. Tot i així, la connexió continua sent més delicada. Muntar instal·lacions amb conductors d'alumini amb seguretat, en general requereix un major grau d'especialització dels tècnics i cert manteniment. En el cas de l'habitatge, augmenta el risc, atès que les seves instal·lacions són executades per instal·ladors que sovint tenen un grau de formació bàsic, són sotmeses a modificacions efectuades pels usuaris i tenen un manteniment reduït.

D'altra banda, l'alumini aliat s'utilitza com a element estructural en alguns edificis, tot i que no és tan comú com altres materials com l'acer. Els conductes d'extracció de fums, ventilació i aire condicionat per conductes, són molt freqüents en els edificis. Tenen alts percentatges d'alumini en la seva composició o el seu recobriment superficial. El sistema d'aire condicionat per conductes instal·lats de forma confinada en falsos sostres, és freqüent i ha proliferat darrerament en molts edificis i habitatges.

En l'àmbit del transport l'ús de l'alumini és comú a la indústria aeronàutica, tan a nivell estructural com de conducció elèctrica, on existeix una àmplia experiència en la tecnologia de les connexions i els controls de qualitat necessaris. El desenvolupament creixent de vehicles elèctrics (tan per terra com per mar), també trasllada el seu ús a aquest àmbit.

Recentment s'ha desenvolupat amb èxit una bateria d'alta capacitat i recarregable de forma ultra ràpida, que funciona amb elèctrodes d'alumini i grafit [95]. Segons els seus desenvolupadors, els seus avantatges en relació amb les bateries de ions de liti, són la possibilitat d'aconseguir un cost de fabricació molt més reduït i una baixa inflamabilitat. Esperen que puguin substituir-les en el futur.

2.1.3 Aproximació a un cas d'incendi amb probable ejecció elèctrica d'espurnes d'alumini

2.1.3.1 Descripció del sinistre

Els Bombers de la Generalitat de Catalunya han observat un cas que suggereix la possibilitat que els conductes de ventilació i climatització fabricats a base d'alumini, puguin participar en un procés d'ignició elèctrica que origini o ajudi a propagar un incendi. Miquel Rejat, inspector del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya, ho descriu de la següent forma:

“ Es tracta d'un incendi en un traster d'un hospital. Es van assolir temperatures que saturaven els valors de la càmera tèrmica per sobre del fals sostre del passadís principal. L'anàlisi posterior va evidenciar unes petites taques blanques o grises projectades al sostre i conductors nus de coure que alimentaven el ventilador principal d'aire situat en el fals sostre (v. Fig.2.1(a)). Examinant zones annexes s'observen canalitzacions secundàries de ventilació d'alumini (v. Fig.2.1(b)). Es va apuntar com a molt probable la seva participació en el desenvolupament de l'incendi amb una anormal elevació de la temperatura. En l'escena de l'incendi es va prendre en consideració que un curtcircuit, per pèrdua de les condicions aïllants del recobriment dels conductors de coure i el seu possible contacte directe amb els conductes d'alumini, provoqués la ignició dels conductes o combustibles annexes”.

2.1.3.2 Apunt estadístic sobre incendis en sistemes de ventilació i aire condicionat

Els incendis que impliquen sistemes de ventilació i aire condicionat no són insòlits. Als EUA, la NFPA ha publicat un estudi estadístic sobre els incendis en habitatges produïts per sistemes d'aire condicionat, durant el període 2006-2010 [96]. Segons aquest estudi, l'any 2010 es van produir 7400 incendis registrats en habitatges als EUA, involucrant sistemes d'aire condicionat i de ventilació. Van comportar 29 morts civils, 249 ferits civils i 207 milions de dòlars en danys a la

proprietat directes. Un de cada tres incendis van començar als seus conductors elèctrics o als seus aïllaments.



Fig.2.1 (a) Escena d'un sinistre amb partícules d'alumini adherides al sostre. (b) Conductes de climatització i cables elèctrics involucrats en el sinistre. (A.f. Bombers de la Generalitat de Catalunya).

2.1.3.3 Hipòtesis sobre la possibilitat d'ignició i propagació elèctrica a l'incendi

La localització de contactes entre conductors nus de coure de la instal·lació que alimentava el ventilador principal i conductes fabricats o revestits amb alumini, suggereix la possibilitat d'ignició elèctrica. Per exemple, pot realitzar-se la hipòtesi que els conductors entressin en contacte amb la canalització abans de l'incendi. Hauria provocat una circulació de corrents forts i l'aparició d'arc de separació. Comporta l'ejecció elèctrica d'espurnes i partícules calentes, que explicaria els rastres d'alumini atomitzat adherits al sostre.

D'altra banda, l'incendi podria haver començat per una altra causa. El foc destrueix els aïllaments i pot produir arcs secundaris o "víctimes", posteriors a l'inici de l'incendi. També pot provocar que fallin les subjeccions mecàniques dels conductors de les instal·lacions elèctriques. En aquesta situació, l'ejecció elèctrica d'espurnes i partícules calentes d'alumini, podria tenir un efecte propagador del foc i generar focus secundaris. La seva habilitat per volar en combustió, a temperatures molt elevades, ha estat documentada i s'ha senyalat anteriorment a l'apartat 1.3.3.1.1 (cap.1). També s'ha fet menció en aquest apartat de la possibilitat de reaccions aluminotèrmiques automantingudes, en presència de contaminants com partícules de ferro. Podrien contribuir a elevar significativament la temperatura.

D'altra banda, el desplaçament de l'arc pot ionitzar ràpidament l'aire en espais confinats (característics d'armaris elèctrics o falsos sostres). Aquesta casuística ha estat observada en diversos incendis peritats des del Laboratori de Màquines Elèctriques de l'ETSEIB.

A la Fig.2.2 es mostra una representació esquemàtica del desplaçament de l'arc entre dos conductors, separats una distància (d), i els paràmetres i variables que poden determinar-lo.

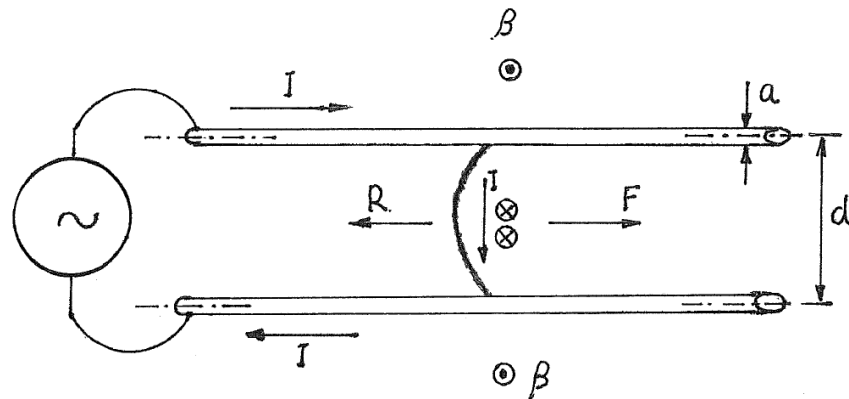


Fig.2.2 Representació esquemàtica del desplaçament de l'arc entre dos conductors.

Quan la força electrodinàmica d'allunyament de la font d'alimentació (F) és igual a la resistència aerodinàmica de l'avanç (R), la velocitat de l'arc (v) és uniforme i es pot aproximar per l'equació Eq.2.1.

$$v = I \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 10^{-7}}{k \cdot d}\right) \cdot \log\left(\frac{2d + a}{a}\right)} \quad Eq. 2.1$$

On, (I) és la intensitat del corrent d'arc, (k) és un coeficient en funció de la geometria de l'arc assimilat a un cos sòlid; i (a) i (d) són distàncies que defineixen la geometria dels elèctrodes, segons la Fig.2.2.

Per exemple, per I=15kA i d=300mm, l'ordre de magnitud de la velocitat de l'arc, aplicant la Eq.2.1, és de v=200m/s. Amb un interruptor automàtic amb tall ràpid de l'ordre de 3ms, l'arc recorreria de l'ordre de 600mm. Suficient per ionitzar bona part d'un armari elèctric mitjà. Si l'interruptor no obre tan ràpid; o bé falla i ha d'obrir un interruptor situat aigües amunt, els danys que pot produir l'arc durant el seu recorregut augmenten. En un espai confinat com un armari o un fals sostre, els danys i el potencial incendiari són més severs.

2.1.3.4 Proximitat entre conductors elèctrics i conductes de ventilació i climatització

Els paral·lelismes i creuaments entre instal·lacions elèctriques i conductes de ventilació o climatització amb una superfície exterior d'alumini, no estan específicament definits pels reglaments habitualment utilitzats en l'àmbit de les instal·lacions en edificis. El Reglament d'Instal·lacions Tèrmiques en Edifici (RITE) [97] i el Codi Tècnic de l'edificació [98] no ho detallen. Alguns instal·ladors i enginyers del sector als que s'ha consultat, han manifestat certa preocupació per la falta de concreció al respecte.

El REBT tampoc ho contempla específicament. La Instrucció Tècnica Complementària 20, defineix una distància mínima entre les superfícies exteriors de les canalitzacions elèctriques i les

no elèctriques genèrica de 30mm [99]. No obstant, s'especifica que les canalitzacions que transportin fluids calents, hauran de separar-se convenientment, per evitar el sobreescalfament dels conductors elèctrics. Actualment molts tipus de conductes d'aire condicionat tenen un aïllament tèrmic, que disminueix eficaçment la transferència de calor cap a l'exterior.

D'altra banda, els falsos sostres són àmbits en els que poden aparèixer instal·lacions executades amb menys cura, perquè no es veuen i no sempre s'inspeccionen⁴¹ completament.

Tot plegat explica que existeixi la possibilitat que els conductors elèctrics puguin estar pròxims a aquest tipus de canalitzacions. Facilita que pugui produir-se un contacte accidental. Per exemple, si es perden les condicions aïllants de cables instal·lats a prop (a l'aire, en safates, en canalitzacions deteriorades, etc); o en una estesa que aprofiti com a suport els conductes d'aire condicionat.

2.2 Experiments d'ejecció d'espurnes d'origen elèctric en conductes d'alumini

2.2.1 Introducció als experiments

L'aproximació a l'estudi de l'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric, es porta a terme mitjançant experiments de laboratori electrotècnic en BT. Es generen arcs de separació, ocasionats per la circulació de corrents forts de curtcircuit transitoris entre elèctrodes i cossos metàl·lics. Es reproduïxen situacions de contacte accidental entre conductors actius i masses. Com a cossos metàl·lics s'utilitzen conductes d'alumini tubulars i panells aïllants revestits d'alumini, utilitzats en la construcció de sistemes de ventilació i d'aire condicionat per conductes. S'han escollit aquests tipus de cossos, entre les múltiples possibilitats existents, per estudiar al mateix temps el sinistre singular descrit a l'apartat 2.1.3.1, que s'utilitza com a fil conductor.

S'experimenta amb diferents nivells de tensió ($U_{ef}=230V$ i $U_{ef}=400V$) i proteccions elèctriques amb diversos temps d'obertura. Es consideren factors ambientals com l'efecte de la circulació d'aire i la humitat; així com diferents configuracions geomètriques. S'utilitzen tècniques d'anàlisi microscòpic i amb EDX per complementar l'anàlisi forense del material assajat.

Aquests experiments tenen la finalitat de contribuir a il·lustrar i analitzar l'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric, com a font d'ignició elèctrica. En particular aborda també la problemàtica associada a les espurnes d'alumini, amb una habilitat per produir la ignició de combustibles fàcilment inflamables superior, en relació amb altres tipus d'espurnes.

Es té en consideració que el fenomen es pugui produir després de l'inici del foc, a conseqüència de la destrucció dels aïllaments. En aquest cas les partícules ejectades poden tenir un efecte propagador de l'incendi, generant focus secundaris.

⁴¹ En els casos que és obligatòria la inspecció per part d'una entitat d'inspecció i control (EIC), com per exemple en el cas d'edificis de pública concurrència.

La metodologia emprada als experiments està concebuda perquè de forma econòmica i relativament senzilla, puguin servir per il·lustrar aquesta casuística amb una finalitat docent.

2.2.2 Equipament general d'assaig

Els experiments es porten a terme a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB (UPC). S'utilitza un equipament d'assaig que es basa en un regulador d'inducció trifàsic de 400kVA, 230V/0-460V, $f=50\text{Hz}$. Permet treballar amb corrents de curtcircuit transitòriament. S'alimenta mitjançant els debanats de baixa tensió (de set borns) d'un transformador de distribució trifàsic 630kVA, 25kV/400V/230V, $f=50\text{Hz}$, $u_{cc}=4,5\%$. La instal·lació d'aquest transformador també està preparada per realitzar curtcircuits, connectant les càrregues directament al seu secundari. La plataforma d'assaig es mostra a la Fig.A.2 de l'annex A. D'altra banda, a l'annex C.1 es detallen alguns treballs de millora, adaptació i anàlisi de la plataforma d'assaig que s'han realitzat.

Per mesurar tensions, s'utilitzen transformadors de tensió (TT) de mesura. Per mesurar corrents, s'utilitzen transformadors d'intensitat (TI) de mesura, que es connecten a un shunt calibrat amb connector BNC. Els instruments de mesura són de classe 0,5. Les cadenes de mesura es connecten, mitjançant cables coaxials, a un oscil·loscopi digital de 200MS/s i 200MHz.

La zona d'ejecció de partícules es protegeix amb pantalles de metacrilat; o bé amb una cambra d'assaigs destructius amb parets de vidre i unes dimensions de 1000x500x500mm. Eventualment es realitzen sense protecció per observar l'abast espacial de l'ejecció de partícules sense confinament.

2.2.3 Experiments amb conductes de ventilació d'alumini tubulars

2.2.3.1 Materials i muntatge

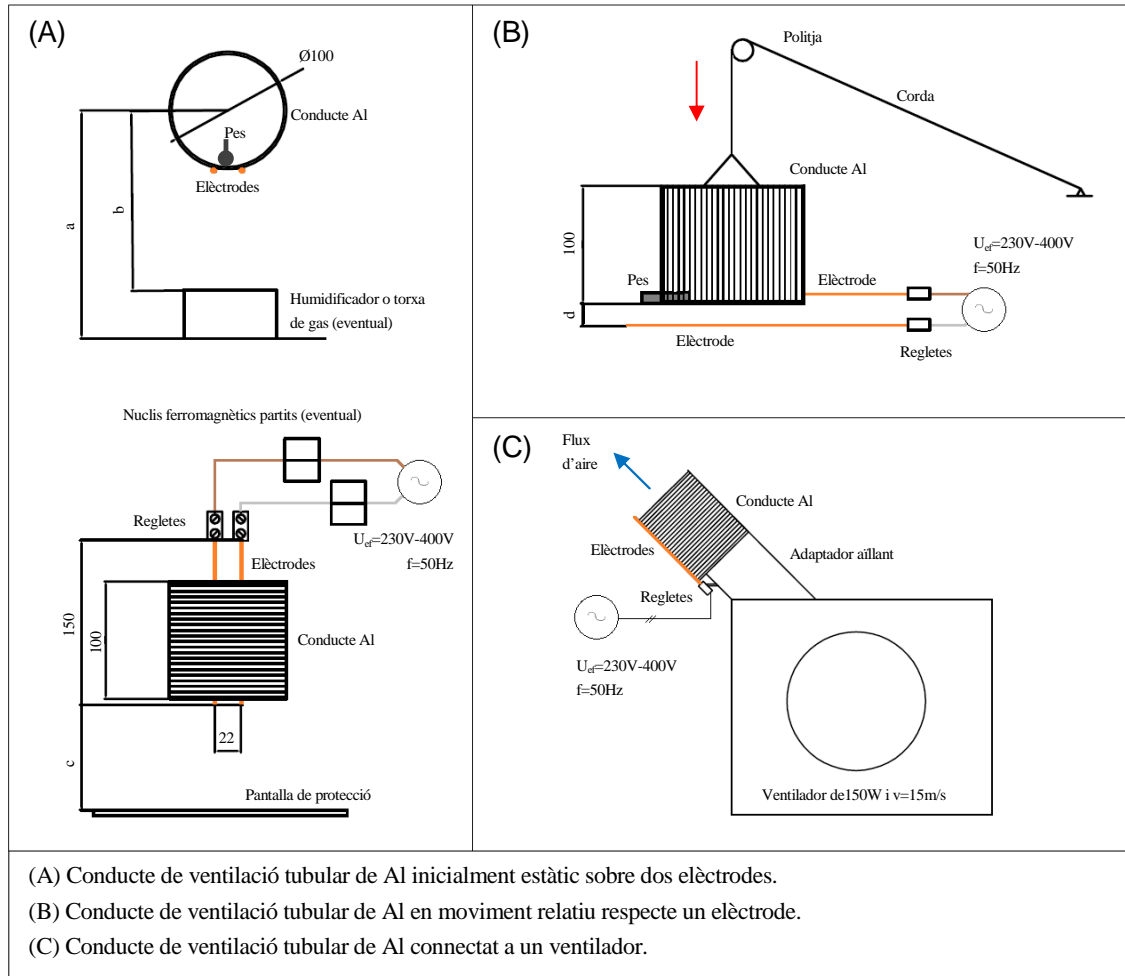
Els muntatges experimentals i els materials emprats es presenten de forma gràfica a la Fig.2.3. Es defineixen tres configuracions experimentals (A), (B) i (C).

2.2.3.1.1 Muntatge A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes

El muntatge associat a la configuració (A) permet realitzar curtcircuits amb arc de separació, entre dos elèctrodes i un conducte tubular semiflexible d'alumini, utilitzat en sistemes d'extracció de fums i ventilació en edificis.

Els elèctrodes són rígids i normalment de coure, atès que és el material conductor preferentment utilitzat en les instal·lacions interiors d'edificis. Eventualment s'utilitzen elèctrodes d'alumini, per observar l'evolució del color de les partícules d'alumini ejectades, sense que partícules de coure incandescentes procedents dels elèctrodes, dificultin les observacions. La composició de la superfície del tub d'alumini, on es produeix el contacte amb els elèctrodes, s'ha determinat mitjançant una anàlisi amb EDX. Es mostren els resultats a la taula 2.1.

Davant del muntatge és col·loca una pantalla de protecció de metacrilat, habitualment ubicada a una distància de $c=0,5\text{m}$. Ocasionalment pot retirar-se per no limitar la projecció de les partícules.


Fig.2.3 Croquis de les configuracions experimentals amb conductes tubulars d'alumini.

Anàlisi EDX	Masses atòmiques en tant per cent (%)			
	Al	O	Fe	Mn
Espectre 1	94,19	4,17	1,19	0,46
Valors màxims (sobre 5 espectres)	96,05	4,19	2,02	0,56
Valors Míנים (sobre 5 espectres)	93,80	2,27	1,00	0,26

Taula 2.1 Anàlisi EDX de la superfície d'un tub d'alumini usat en sistemes de ventilació.

El tub semiflexible d'alumini s'estén uniformement a un 50% de la seva longitud màxima. Es tallen trams d'una longitud de 100mm. Aquests trams s'utilitzen en les repeticions de l'experiment. El tub se suporta sobre els elèctrodes, per gravetat i sense utilitzar connectors. Els elèctrodes són fixats mitjançant dues regletes de connexió. Reprodueix un contacte accidental. Un pes s'utilitza eventualment per incrementar la pressió de contacte i observar el seu efecte. El contacte entre tub i elèctrodes també podria realitzar-se, perforant-lo amb una agulla i introduint posteriorment els

elèctrodes en els forats. Aquesta modalitat d'assaig va ser utilitzada en les primeres proves. Es produeixen uns efectes que permeten il·lustrar la casuística de forma similar a quan s'utilitzen pesos. No obstant, dificulta la repetibilitat de l'experiment en les mateixes condicions, la mesura de la superfície d'alumini destruïda i la comparació de resultats.

Els elèctrodes s'alimenten, utilitzant l'equip d'assaig descrit a l'apartat 2.2.2, des de dues d'un sistema trifàsic simètric amb $U_{ef}=230V$, o bé $U_{ef}=400V$. Es protegeixen mitjançant un interruptor automàtic de $I_N=40A$ i corba amb característica de dispar de tipus C (IA1). És un interruptor automàtic d'ús general en instal·lacions interiors en edificis. Aquest interruptor es pot curtcircuitar, mitjançant un contactor, per simular una fallada de la seva actuació.

Aigües amunt es protegeix amb un interruptor automàtic de caixa moldejada de $I_N=250A$, amb una intensitat de dispar magnètica de $I_m=1,6kA$ (IA2). És un interruptor d'ús comú en quadres generals de BT. En cas de curtcircuit actua més tard que l'interruptor (IA1). L'ús d'aquest interruptor permet observar l'efecte d'un curtcircuit de major duració i intensitat, si els petits interruptors automàtics que hi ha aigües avall no actuen.

Eventualment es pot afegir un grup de nuclis ferromagnètics laminats partits en els cables d'alimentació, a prop del punt de curtcircuit. Limiten el corrent de curtcircuit subtransitori.

L'humidificador s'utilitza eventualment, per generar vapor d'aigua i condensació a la zona de contacte entre els elèctrodes i el tub. Serveix per analitzar el seu efecte en el desenvolupament de l'arc de separació i l'ejecció de partícules associada.

La torxa de gas butà s'utilitza ocasionalment per introduir flames, reproduint una situació de foc a la perifèria de la zona de contacte entre el tub i els elèctrodes. S'utilitza per realitzar una primera aproximació a l'estudi del possible efecte de les flames sobre el tub i sobre el procés d'ejecció de partícules. En ambdós casos la separació b és ajustable.

2.2.3.1.2 Muntatge B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode

El muntatge associat a la configuració (B) permet realitzar curtcircuits amb arc de separació, entre un elèctrode i el tub d'alumini, sotmesos a una diferència de potencial i a una situació de moviment relatiu entre ells. Reprodueix una situació de fallada de la fixació del cos metàl·lic o del conductor. Els components i l'alimentació elèctrica tenen les mateixes característiques que en el muntatge A.

Un elèctrode connectat a una fase de la font d'alimentació, està separat inicialment una distància (d), ajustable, del tub. Quan s'allibera la corda, el tub, connectat a una altra fase de la font d'alimentació mitjançant un segon elèctrode, cau sobre el primer elèctrode i es produeix el curtcircuit. La velocitat pot ser controlada mitjançant un sistema de politges i un pes.

2.2.3.1.3 Muntatge C: conducte tubular connectat a un ventilador

El muntatge associat a la configuració (C) permet realitzar curtcircuits amb arc de separació, entre dos elèctrodes i el tub d'alumini, mentre pel seu interior hi circula un flux d'aire a temperatura

ambient. Reprodueix l'efecte de la circulació d'aire forçada sobre les espurnes ejectades. Els components i l'alimentació elèctrica tenen les mateixes característiques que en el muntatge A.

Per produir la circulació d'aire a l'interior del tub s'utilitza un ventilador de flux axial. S'acobra al tub mitjançant un acoblament de material aïllant, fet a mida. La unió mecànica no s'ha de realitzar a la zona de contacte entre els elèctrodes i el tub, perquè impediria la circulació de partícules al seu interior. L'elèctrode es fixa mitjançant una regleta de connexió, unida al ventilador mitjançant un suport. El contacte entre els elèctrodes i el tub és superficial, no s'usen connectors.

2.2.3.2 Metodologia

2.2.3.2.1 Configuració A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes

Es pesa amb una balança de precisió el tram de tub d'alumini. S'implementa el muntatge A, segons s'ha especificat a l'apartat 2.2.3.1. S'aplica una tensió alterna sinusoidal simètrica de $U_{ef}=230V$ i $f=50Hz$ als elèctrodes. Es produeix un curtcircuit. Pot ser interromput per l'actuació de la protecció (IA1). Es registren oscil·logrames de tensió i corrent.

L'experiment es filma amb una càmera ràpida que captura fotogrames a una velocitat de 1250fps. Al mateix temps es fotografia, en mode continu, amb una càmera reflex a 3fps. Les fotografies de la càmera reflex permeten observar amb major definició i menor distorsió cromàtica, els successos que apareixen a la filmació. S'utilitzen temps d'exposició ràpids, de l'ordre de 1/2000s-1/8000s, per observar les partícules i temps d'exposició lents per descriure la trajectòria de les partícules. Eventualment s'utilitzen filtres de protecció inactiva per fotografiar els instants inicials.

Després dels assajos es torna a pesar el tub. Es mesura la superfície afectada per una desaparició de material, ocasionada per l'ejecció de partícules. S'inspeccionen les partícules ejectades des del tub. Es mesuren algunes d'aquestes partícules, que es consideren representatives. S'analitza amb una lupa electrònica i es fotografia la superfície del tub; així com algunes de les partícules ejectades. Ocasionalment s'utilitza un microscopi electrònic, per observar detalls i les partícules més petites. També es realitza una anàlisi EDX d'una mostra de la zona de contacte entre els elèctrodes i el tub.

Es realitzen repeticions de l'experiment, substituint el tram de tub per altres amb les mateixes característiques, procedents del mateix conducte. Se segueixen els mateixos procediments. Quan els experiments tenen una finalitat únicament il·lustrativa, si el tram de tub no s'ha deformat durant l'assaig, pot girar-se un cert angle per aprofitar-lo per realitzar noves repeticions.

Posteriorment es realitzen repeticions de l'experiment, seguint la mateixa metodologia, introduint les següents variacions de forma independent:

- S'aplica una tensió alterna sinusoidal de $U_{ef}=400V$ i $f=50Hz$.
- S'anul·la la protecció (IA1) perquè actuï l'interruptor automàtic (IA2), amb major temps d'obertura davant d'un curtcircuit.
- Es limita el corrent de curtcircuit amb els nuclis laminats ferromagnètics.
- S'augmenta la pressió de contacte entre el tub i els elèctrodes utilitzant pesos.

- Es genera vapor d'aigua amb l'humidificador. Es realitza el curtcircuit en presència de vapor d'aigua en la zona de contacte (amb i sense condensació superficial).
- Es genera una flama amb la torxa de gas butà i s'apropa a la zona de contacte. Es realitzen repeticions amb diferents valors de separació entre la flama i el tub.

2.2.3.2.2 Configuració B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode

Es pesa amb una balança de precisió el tram de tub d'alumini. S'implementa el muntatge B, segons s'ha especificat a l'apartat 2.2.3.1. S'aplica una tensió alterna sinusoidal simètrica de $U_{ef}=230V$ i $f=50Hz$ als elèctrodes. Es fa caure el tub i es produeix un curtcircuit. La circulació de corrent pot ser interrompuda per l'actuació de la protecció (IA1). Es registren oscil·logrames de tensió i corrent.

L'experiment es filma amb una càmera ràpida que captura fotogrames a una velocitat de 1250fps. Al mateix temps es fotografia, en mode continu, amb una càmera reflex a 3fps.

Després de l'assaig s'analitzen les mostres seguint la metodologia exposada per la configuració A. Es realitzen repeticions de l'experiment.

2.2.3.2.3 Configuració C: conducte tubular connectat a un ventilador

Es pesa amb una balança de precisió el tram de tub d'alumini. S'implementa el muntatge C, segons s'ha especificat a l'apartat 2.2.3.1. S'engega el ventilador i es comprova amb un anemòmetre la velocitat de l'aire. S'aplica una tensió alterna sinusoidal simètrica de $U_{ef}=230V$ i $f=50Hz$ als elèctrodes. Es produeix un curtcircuit que es interromput per l'actuació de la protecció (IA1). Es registren oscil·logrames de tensió i corrent.

L'experiment es filma amb una càmera ràpida que captura fotogrames a una velocitat de 1250fps. Al mateix temps es fotografia, en mode continu, amb una càmera reflex a 3fps.

Després de l'assaig s'analitzen les mostres seguint la metodologia exposada per la configuració A. Es realitzen repeticions de l'experiment.

2.2.3.3 Descripció, resultats i discussió

2.2.3.3.1 Configuració A: conducte tubular inicialment estàtic sobre dos elèctrodes

2.2.3.3.1.1 Descripció del procés d'ejecció d'espumes i del seu vol

Alguns fotogrames representatius de la seqüència típica de successos que tenen lloc després de l'aplicació de tensió als elèctrodes en la configuració experimental A, es mostren a Fig.2.4.

En el fotograma (a) es presenta el muntatge relatiu a la configuració (A), segons s'ha especificat a l'apartat 2.2.3.2.1, abans d'aplicar tensió als elèctrodes.

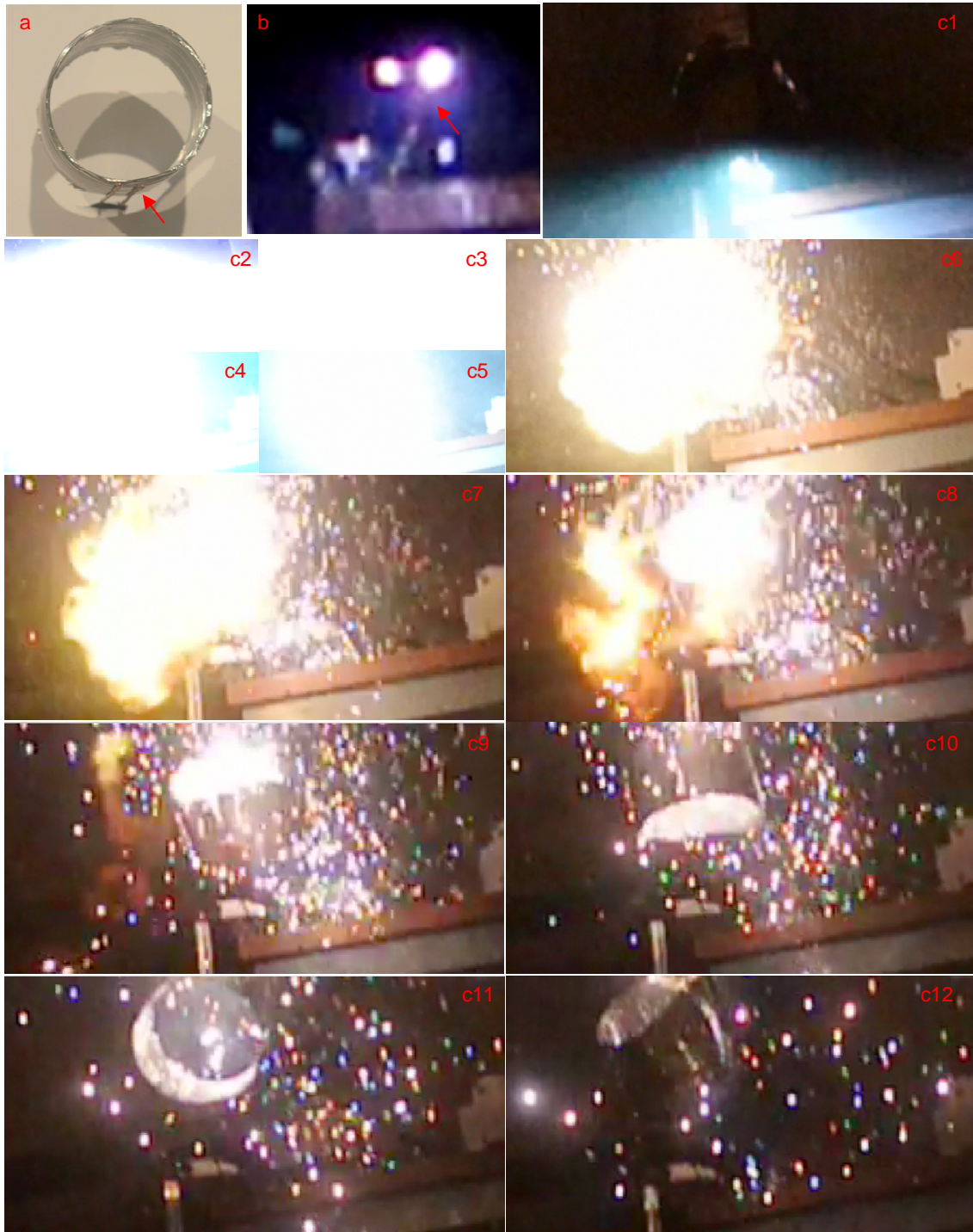


Fig.2.4 Selecció de fotogrames relatives a la filmació de la configuració experimental A. (A.f. Martí, M.).

En el fotograma (b) es mostra la imatge més propera al començament del curtcircuit, que s'ha capturat en les repeticions de l'experiment portades a terme. Correspon a un instant situat entre l'inici i un temps de 0,8ms. Il·lustra l'inici del curtcircuit amb arc entre els elèctrodes i el conducte. S'observa llum blanca intensa, localitzada a la zona de contacte entre cadascun dels dos elèctrodes i la superfície del tub. Es pot relacionar amb la llum emesa per l'arc de separació que s'estableix entre ells i les primeres partícules d'alumini en combustió.

La seqüència d'imatges (c), és una selecció de fotogrames relativa a la filmació a 1250fps d'un assaig en el que s'ha aplicat una tensió de $U_{ef}=230V$.

El fotograma c1 correspon a un instant situat entre l'inici i un temps de 0,8ms. S'observa un flaix de llum blanca intensa, envoltada de llum blavosa, en el punt de contacte entre els elèctrodes i el tub. Es pot relacionar amb la emissió lluminosa típica de l'arc elèctric i de partícules d'alumini en combustió. S'inicia una explosió d'origen elèctric. Acústicament es percep un espetec intens i sec. Es relaciona amb les ones de xoc que es produeixen.

L'arc elèctric assoleix temperatures superiors als $5000^{\circ}C$ en el canal ionitzat. En els forats on es desenvolupa l'arc es concentra una gran quantitat d'energia. Pot transferir energia suficient com per fondre l'alumini en la zona de contacte i provocar l'ejecció de partícules en combustió, que volen a una temperatura molt elevada. Les ones de pressió poden contribuir a propulsar les partícules foses. Els camps magnètics locals també poden transmetre energia cinètica a les partícules.

Al fotograma (c2), 0,8ms després del (c1), s'observa una expansió de l'emissió lluminosa. Visualment es percep una esfera de llum blanca. Creix fins assolir un diàmetre màxim (s'estima de l'ordre de 700mm). Posteriorment es contreu fins un diàmetre de l'ordre de 200mm (quan desapareix la llum blavosa, tot i que es manté una esfera de llum blanca intensa que eclipsa el tub). Aquest procés té una duració de l'ordre de 12ms i s'il·lustra parcialment en els fotogrames (c1-c5).

D'altra banda, l'oscil·lograma de tensió i corrent de l'assaig permet observar què succeeix durant aquest període a nivell elèctric. Es mostra a la Fig.2.5. En aquest cas, el curtcircuit s'inicia en un moment en que la tensió instantània és de $U_i=294V$. S'assoleix una intensitat de curtcircuit subtransitòria màxima de 3,42kA. El petit interruptor automàtic (IA1) interrompt els corrents forts en un temps de l'ordre de 2ms. Aquest rang temporal correspon als fotogrames (c1-c3) de la Fig.2.4.

L'oscil·lograma de tensió mostra la seva evolució vista des de la xarxa, aigües amunt de l'interruptor (IA1). S'observa una caiguda de tensió durant el curtcircuit i una sobretensió transitòria durant el restabliment de la tensió.

La intensitat registrada entre els elèctrodes i el tub després de 0,2ms des de l'inici, és de l'ordre de 1,5kA. Transcorregut un temps de 1,2ms des de l'inici, assoleix els 3,42kA. En general els corrents forts propicien que augmenti la temperatura en els punts de contacte. Si es produeix fusió de material, pot aparèixer arc elèctric de separació en els forats resultants.

Els corrents forts també produeixen grans esforços electrodinàmics. És perceptible en els fotogrames (c6-c10) de la Fig.2.4, com el tub s'eleva per sobre dels elèctrodes, mentre descriu un moviment de rotació. Després cau a terra per gravetat. El moviment dels elèctrodes que impulsa el tub, es ocasionat per esforços electrodinàmics. Aquest moviment facilita el desenvolupament de l'arc en l'espai que s'allibera.

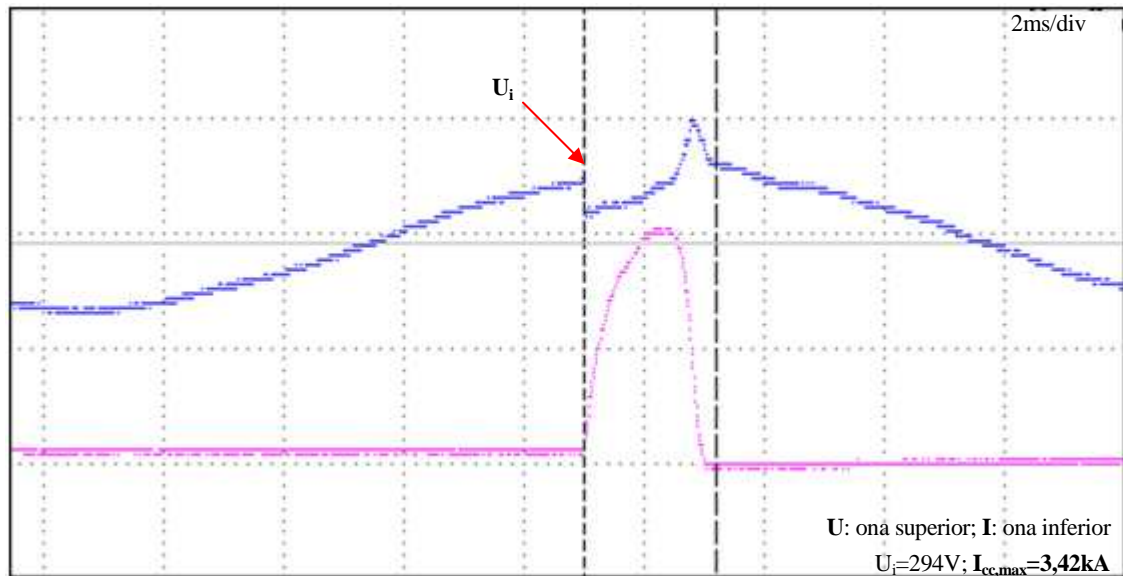


Fig.2.5 Oscil·logrames de tensió i corrent associats a l'assaig representat a la Fig.2.4.

Tornant a la Fig.2.4, després dels fotogrames (c1-c5), al fotograma (c6), s'observen flames i l'ejecció d'una gran quantitat de partícules incandescents o en combustió (aquest procés comença 13,6ms després de c1). Les flames evolucionen cromàticament des d'un color groc-blanc cap a taronja i vermell, a mesura que disminueix la temperatura (v. fotogrames c7-c9). S'extingeixen en un temps de 28ms des del fotograma (c1).

Inicialment les partícules ejectives es mouen de forma direccional, allunyant-se del tub radialment en totes direccions. Moltes emeten una llum blanca brillant intensa. S'associa l'alumini en combustió (pot assolir una temperatura de l'ordre de 3200°C, com s'ha definit a l'apartat 1.3.3.1 del cap.1). La velocitat de les partícules d'alumini en combustió ha estat estimada, de forma aproximada a partir de les filmacions, en un rang de 8-12m/s durant aquesta etapa. Aquest procés té una duració de l'ordre de 10ms des del fotograma (c6). Posteriorment, cauen generalment per gravetat. Es produeix un efecte de pluja de partícules. Normalment ho fan de forma més lenta, amb velocitats de l'ordre de 2-4m/s. Aquest procés es mostra als fotogrames (c8-c12). També s'observa que part de les partícules han estat ejectives cap a l'interior del tub. Emeten la llum blanca que emana del conducte.

Durant la pluja, el temps que les partícules emeten llum és variable. Les partícules més grans es mantenen enceses més temps. Tenen una major massa, el que els permet acumular una major energia calorífica, abans d'abandonar la zona d'elevades temperatures. També tenen proporcionalment una menor superfície de bescanvi tèrmic. L'ordre de magnitud dels temps d'emissió lumínica registrats en aquest experiment, van des de poques dècimes de segon a 5 segons. No obstant, encara que deixin d'emetre llum, continuen calentes fins que assoleixen la temperatura ambient (les partícules calentes també poden produir la ignició de materials fàcilment inflamables).

Les partícules ejectades des dels punts de contacte, són majoritàriament partícules d'alumini en combustió que emeten llum blanca. No obstant, també s'observen algunes partícules que emeten una llum groguenca. Es relaciona amb el color de la llum que acostuma a emetre l'alumini quan es troba a una temperatura propera al punt d'ignició (situat en un rang de l'ordre de 1727-1927°C, com s'ha detallat i citat anteriorment a l'apartat 1.3.3.1.1, del cap.1).

Entre aquestes partícules apareixen altres que presenten incandescència de color taronja o vermellós. Es relacionen amb partícules de coure incandescent ejectades des dels elèctrodes. En alguns casos també podrien correspondre a partícules de ferro incandescent (element que es troba en la superfície del tub en petita proporció, com s'ha mostrat a la taula 2.1). El nombre de partícules taronges i vermelles disminueix en gran mesura si es realitza l'experiment amb elèctrodes d'alumini. Demuestra que, en bona mesura, provenen dels elèctrodes.

Aquestes característiques cromàtiques de les partícules, no identificables a la filmació, són observables a les fotografies de major definició, obtingudes durant repeticions de l'experiment en les mateixes condicions. A la Fig.2.6 es mostren alguns exemples.

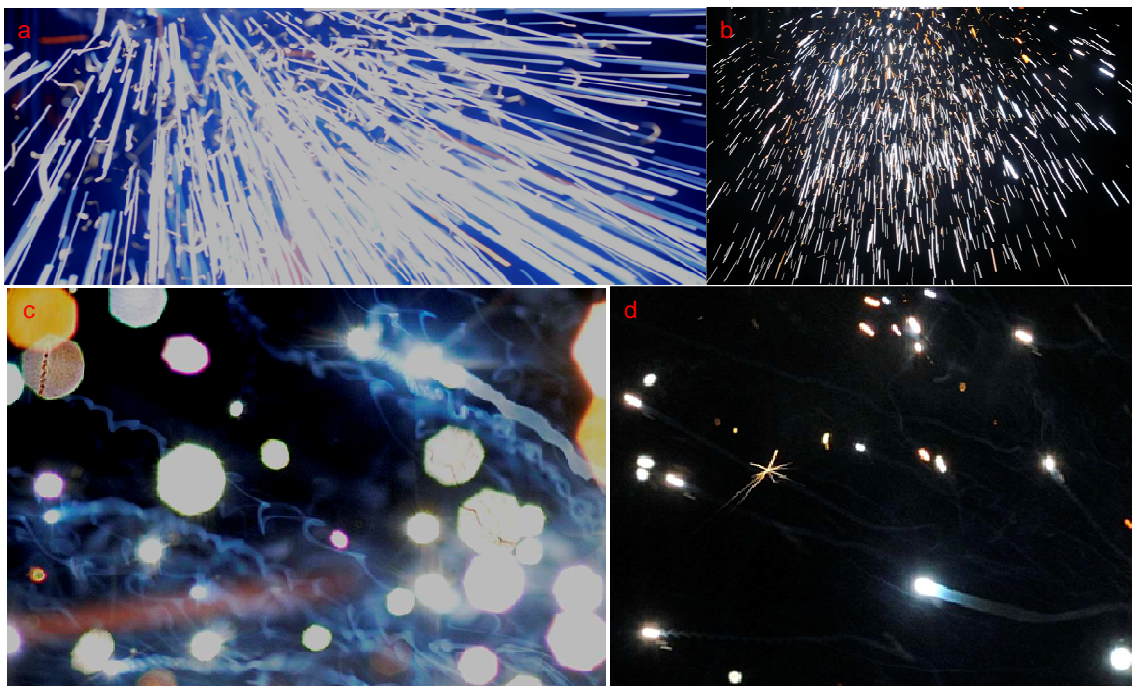


Fig.2.6 Trajectòries de partícules de Al relatives a la configuració experimental A. (A.f. Martí, M.).

Al fotograma (a) es mostra la projecció de partícules inicial, en una repetició de l'experiment en la que s'han usat elèctrodes d'alumini. Es posa de manifest una trajectòria de les partícules força direccional i una predominança de partícules d'alumini que emeten llum blanca. S'observa alguna partícula d'alumini que grogueja. També algunes de vermelles (es poden associar al ferro).

Al fotograma (b), que correspon a un experiment amb elèctrodes de coure com el de la Fig.2.4, s'observa un major nombre de partícules incandescent de color taronja, procedents dels elèctrodes de coure. S'observa la direccionalitat inicial de les partícules. A l'apartat B.1.2, de l'annex B, es mostra un experiment complementari que també contribueix a il·lustrar-ho.

Als fotogrames (c) i (d) es mostren detalls de les partícules incandescentes, a partir de fotografies realitzades amb un temps d'exposició menor (1/500s). S'observen partícules d'alumini en combustió i l'emissió de llum blanca brillant característica. També les esteles de fum que deixen al seu pas. Senyalen la trajectòria de les partícules i s'observa que algunes tenen forma de tirabuixó.

El vol de les partícules té una duració variable. Després de l'impuls inicial, pot finalitzar quan xoquen contra una superfície. Sovint al refredar-se s'apaguen i s'hi adhireixen al solidificar-se. Altres vegades reboten i continuen volant en combustió i/o calentes. En general, cauen per gravetat fins que s'apaguen a l'aire o impacten contra el terra, on poden mantenir-se incandescentes durant uns segons. Quan la combustió finalitza, es refreden i el seu color evoluciona cap a groc o ataronjat, fins que deixen d'emetre llum (tot i que continuen calentes). Quan les partícules impacten contra superfícies o combustibles fàcilment inflamables, poden constituir un focus d'incendi.

Durant el vol de les partícules d'alumini s'han observat, de forma recurrent, diversos efectes singulars. Els més representatius es presenten a la Fig.2.7.

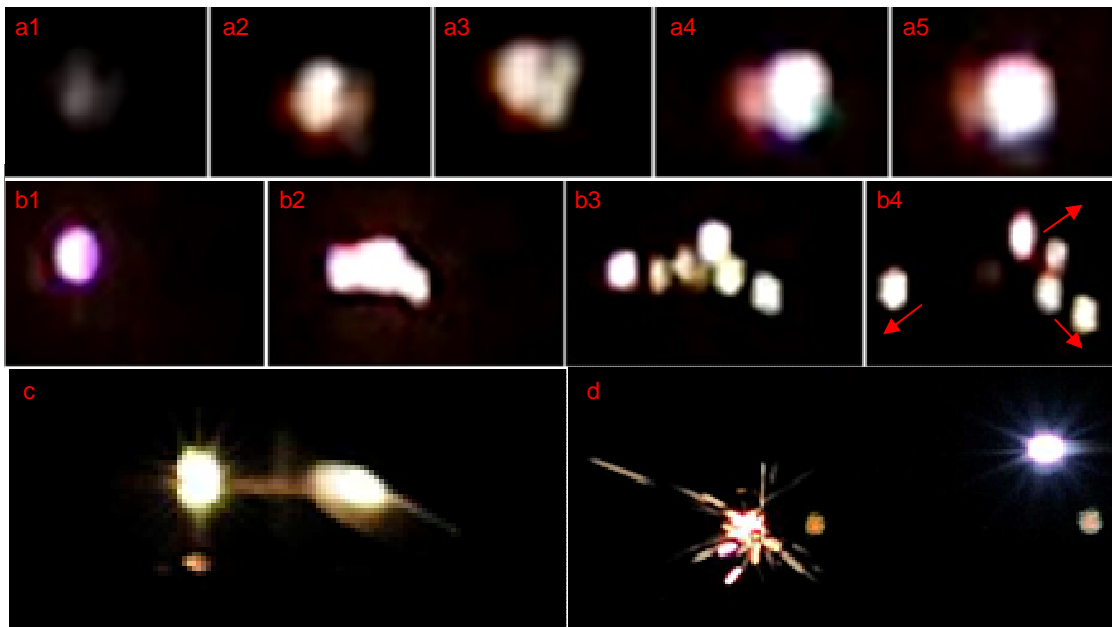


Fig.2.7 Efectes singulars produïts durant el vol de les partícules de Al ejectades. (A.f. Martí, M.).

A la seqüència (a1-a5), es mostra l'encesa d'una partícula d'alumini durant el seu vol. Al fotograma (a1), s'observa una partícula de Al que cau per gravetat sense emetre llum. Soltadament, al fotograma (a2), s'encén i emet una llum de color groc-blanc. Evoluciona durant 3,2ms amb aquest cromatisme, fins que comença a emetre una llum blanca molt brillant, característica de l'alumini en combustió. Continua caient emetent aquesta llum. Aquest efecte de transició és perceptible a ull nu.

L'existència de reaccions químiques a l'espurna, que generin calor addicional durant el seu vol, podria estar relacionada amb l'aportació d'energia que es posa de manifest en aquest cas. Un exemple és l'oxidació del ferro (el Fe és present a la composició del tub), quan es troba a una temperatura elevada, que produeix òxid de ferro (III) i allibera calor. Els efectes de transició lumínica i cromàtica, associats a les partícules incandescentes i en combustió d'alumini, són

utilitzats en la pirotècnia. Per exemple, una espurna que conté alumini i carboni (o altres metalls com el titani), pot emmagatzemar energia calorífica en aquests elements que es va transmetent a l'alumini, fins que s'eleva suficientment la seva temperatura com perquè es produeixi la seva ignició [100]. Produeix l'efecte visual de variar el seu color de groc a blanc.

A la seqüència (b1-b5), es mostra la creació de diverses partícules incandescentes, a partir d'una sola. Al fotograma (b1) s'observa una partícula d'alumini en combustió que cau per gravetat. De cop, la partícula comença a expandir-se com es mostra al fotograma (b2) (l'expansió es produeix en 2,4ms aproximadament). Al fotograma (b3), de l'ordre de 4ms després de (b2), s'observa que la partícula s'ha dividit en 6. Al fotograma (b4), de l'ordre de 5,6ms després de (b3), una partícula s'ha apagat, però les altres cinc continuen volant emetent llum blanca i seguint trajectòries diferents. Al fotograma (c), s'observa un procés anàleg, en el que es formen dues partícules a partir d'una.

Al fotograma (d), s'observa una forma característica d'extinció de les partícules d'alumini durant el vol. Arriba un moment en que el color de la partícula evoluciona de blanc a groguenc. Després es disgrega en petites partícules projectades en totes direccions. Posteriorment, s'apaguen ràpidament, en un temps de l'ordre de menys de 2ms.

Un altre efecte característic són els canvis de trajectòria sobtats. Són ocasionats per una acceleració diferent a la produïda per la gravetat. Per exemple, una partícula pot estar caient per gravetat. Sobtadament, experimenta una acceleració amb component horitzontal. Gira, augmenta la seva velocitat i comença a desplaçar-se horitzontalment. Degut a aquest efecte, la partícula també pot desplaçar-se cap avall o cap amunt amb un cert angle d'inclinació. La casuística recorda al funcionament dels propulsors que es basen en el principi d'acció i reacció. A la Fig.2.8 es mostren imatges associades a una llarga exposició, que permeten observar la trajectòria de les partícules i alguns d'aquests canvis de direcció.

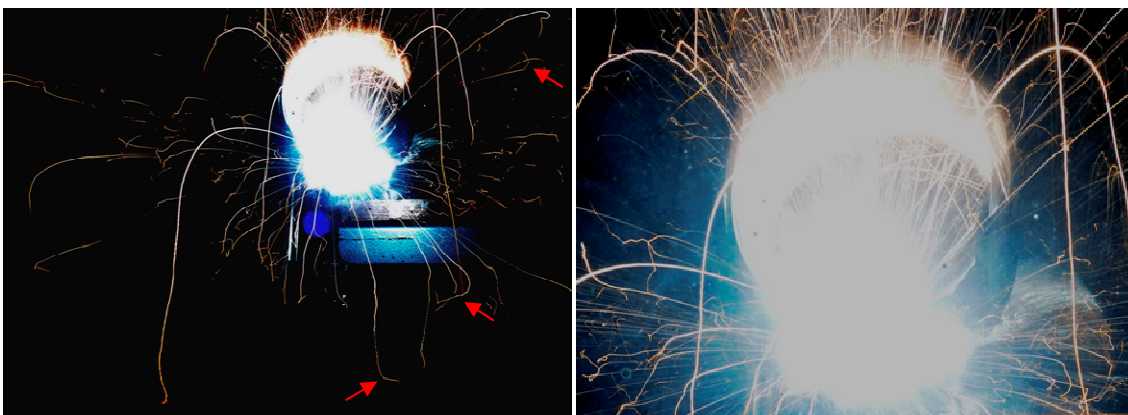


Fig.2.8 Trajectòries de les partícules d'alumini ejectades des del tub. (A.f. Martí, M.).

2.2.3.3.1.2 Variabilitat d'espurnes ejectades amb una mateixa tensió eficaç

Al realitzar repeticions de l'experiment amb una determinada tensió eficaç, s'ha observat variabilitat en la violència de l'explosió inicial i la quantitat d'espurnes ejectades des del tub.

A la Fig.2.9, s'il·lustra que el nombre de partícules ejectades és diferent en funció de la repetició. També es mostra el detall de la zona de contacte entre el tub i els elèctrodes, quan s'eleva per l'impuls ocasionat pels esforços electrodinàmics. Són visibles forats en la superfície del tub, relacionats amb les partícules que han estat ejectades. La superfície de conducte foradada, és superior en les repeticions de l'experiment en que es produeix una major ejecció d'espurnes.

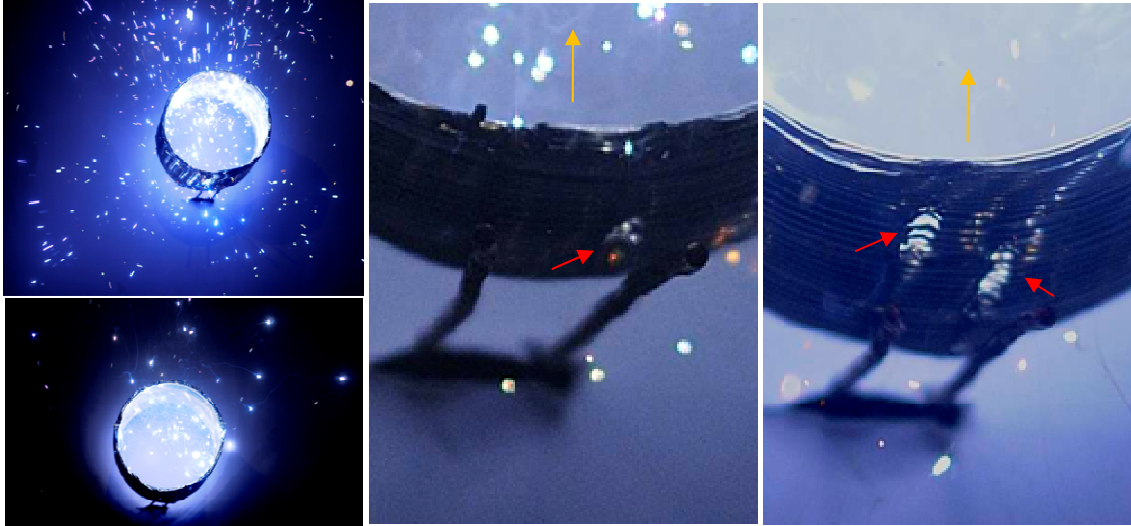


Fig.2.9 Il·lustració de la variabilitat d'ejecció d'espurnes durant els experiments. (A.f. Martí, M.).

Aquest fet s'ha relacionat amb la variació de la tensió instantània i el punt de la senoide en que es produeix el curtcircuit. Influeix en els corrents de curtcircuit que s'assoleixen, els esforços electrodinàmics, el desenvolupament de l'arc i la quantitat d'espurnes ejectades.

A la Fig.2.10 es mostren oscil·logrames de tensió i corrent corresponents a tres repeticions de l'experiment, en les que la tensió instantània en el moment de produir-se el curtcircuit és diferent.

A l'assaig (a), la tensió eficaç és de $U_{ef}=230V$. La tensió instantània en el moment que s'inicia el curtcircuit és de l'ordre de magnitud de la tensió de pic $U_i=327V$ (en el semiperíode negatiu). El petit interruptor automàtic (IA1) limita el corrent de curtcircuit subtransitori. La duració de l'impuls inicial de corrent de curtcircuit és de $t_{cc}=2ms$ (aquest temps ha oscil·lat en les repeticions de l'assaig, fins arribar a un valor de l'ordre dels 3ms). S'obté una intensitat de curtcircuit de cresta màxima de $I_{cc,max}=3,72kA$. Posteriorment, es registra un esmoreïment del corrent, des d'un valor de l'ordre de 300A, fins que s'assoleix el zero en un temps de l'ordre de 25ms. Els efectes electrodinàmics impulsen el tub cap amunt i el separen dels elèctrodes, com s'ha mostrat a la Fig.2.4 i a la Fig.2.9. Es produeix arc de separació i ejecció d'espurnes.

A l'inspeccionar el tub es troben dues fileres de forats en la zona de contacte dels elèctrodes amb el tub (amb diàmetres ubicats en un rang de l'ordre de 2-5mm). El tub es ondulat, pel que el contacte amb els elèctrodes es discontinu. Dóna lloc a una seqüència de forats regular. També es troben marques i solcs en alguns punts de contacte en els que no s'ha arribat a produir foradament. L'aspecte d'aquests forats es mostra a la Fig.2.17 de l'apartat 2.2.3.3.4.

A l'assaig (b), la tensió eficaç és de 230V. La tensió instantània en el moment que s'inicia el curtcircuit és un valor intermedi del semiperíode negatiu de 182V. Es registra una intensitat de curtcircuit màxima de 2,25kA, inferior a la de l'assaig (a). Els temps són del mateix ordre de magnitud. Els efectes electrodinàmics impulsen el tub, s'observa arc de separació i ejecció d'espurnes. La quantitat de partícules ejectades és apreciablement inferior que en l'assaig (a). A l'inspeccionar el tub es troben forats, marques i solcs, a la zona de contacte amb els elèctrodes. La superfície foradada és inferior que en l'assaig (a).

A l'assaig (c), la tensió eficaç és de 230V. La tensió instantània en el moment que s'inicia el curtcircuit és un valor proper al pas per zero de 11V (semiperíode negatiu i disminuint cap a zero). Es registra una intensitat de curtcircuit màxima de 283A, significativament inferior a la dels assaigs (a) i (b). La duració del curtcircuit també és inferior ($t_{cc}=0,8ms$). La circulació de corrent s'interromp en el pas per zero. No s'observa moviment del tub, arc elèctric, ni ejecció d'espurnes. A l'inspeccionar el tub no es troben forats.

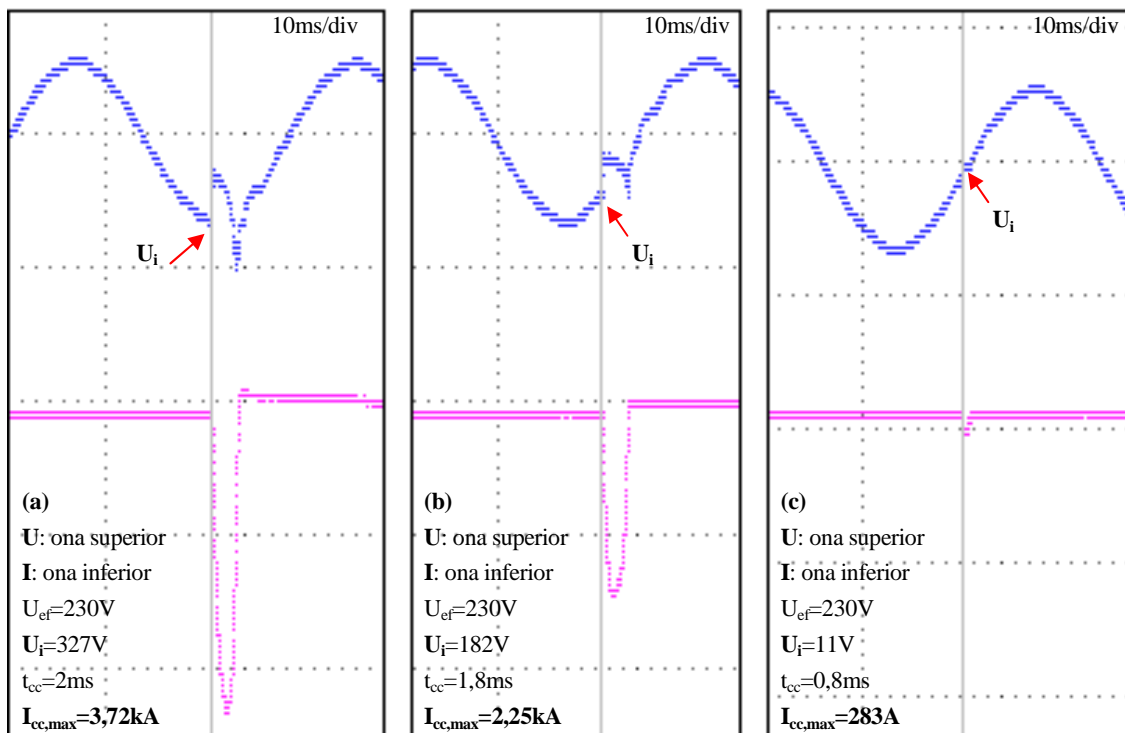


Fig.2.10 Variació de la intensitat a les repeticions de l'experiment amb $U_{ef}=230V$.

Quan la intensitat de curtcircuit que s'assoleix és baixa, els esforços electrodinàmics que produeixen un moviment relatiu entre els elèctrodes i el tub i l'increment de temperatura en la zona de contacte són menors. Es dificulta el desenvolupament de l'arc que ocasiona l'ejecció de partícules. L'instant en que es produeix el curtcircuit, en relació amb la variació sinusoidal de les magnituds elèctriques, influeix en l'ejecció d'espurnes i la perillositat de la font d'ignició.

2.2.3.3.1.3 Estimació de la quantitat de material ejectat en forma d'espurnes

Una possible metodologia per quantificar la variació del nombre d'espurnes ejectades des del tub, és comptar les partícules, a partir d'una seqüència de fotogrames de l'experiment. Presenta la

complexitat tècnica que requereix una càmera d'alta definició i velocitat; així com amb una baixa aberració cromàtica (que permeti distingir els diferents tipus de partícules en funció del color). Els efectes d'encesa i multiplicació de les partícules d'alumini, detallats a l'apartat 2.2.3.3.1.1, dificulten el seguiment de les partícules. Un processament informàtic de les imatges, permetria realitzar una anàlisi de forma sistemàtica i automàtica. S'ha donat algun primer pas en aquest sentit, a partir de l'anàlisi d'imatges amb Matlab (es detalla a l'annex B.3).

Una forma més accessible de quantificar aquesta variabilitat empírica, és mesurar la massa que ha perdut el tub a causa de l'ejecció de partícules. La metodologia emprada consisteix en pesar el tub abans i després de l'assaig. Permet calcular posteriorment el diferencial de massa. Els resultats són una aproximació, perquè algunes de les partícules ejectives, quan xoquen contra les parets del tub, s'hi adhereixen fortament al solidificar-se.

Una altra possibilitat és mesurar la superfície de material perduda pel tub. La seva geometria tubular i superfície ondulada; així com la fragilitat de la perifèria de les zones foradades, dificulta aquesta tasca. La metodologia que s'ha fet servir per realitzar una aproximació, és la de crear models amb paper que encaixin en els contorns irregulars dels forats. Posteriorment es despleguen i es fotografien. Es calcula l'àrea de les figures resultants amb l'anàlisi de les imatges per ordinador. D'altra banda, aquesta metodologia no permet quantificar la pèrdua de material associada a l'ejecció de partícules que no ocasiona forats; sinó que dona lloc a solcs o marques superficials, sense arribar a perforar el tub.

A la taula 2.2 es detallen les estimacions de les variacions de massa i superfície del tub, que s'han registrat durant els assaigs (a), (b) i (c), els oscil·logrames de tensió i corrent dels quals s'ha mostrat anteriorment a la Fig.2.10. Permeten establir un ordre de magnitud per aquests valors. S'observa que la reducció de la tensió i el corrent màxim de curtcircuit, comporta una disminució de la massa ejectada del tub i la pèrdua de superfície associada.

Configuració A ($U_{ef}=230V$)	U_i (V)	$I_{cc,max}$ (kA)	Δm (mg)	ΔS (mm ²)
Assaig (a)	327	3,72	-53,2	-230
Assaig (b)	182	2,25	-22,9	-98
Assaig (c)	11	0,283	$\cong 0$	0

Taula 2.2 Variabilitat de la pèrdua de massa i superfície del tub en diferents assajos.

2.2.3.3.1.4 Efecte de l'augment de la tensió eficaç

Al realitzar repeticions de l'experiment augmentant la tensió eficaç entre els elèctrodes a 400V, s'ha observat que el nombre d'esdeveniments en el que es produeixen explosions violentes i una ejecció d'espurnes gran augmenta. No obstant, mentre el petit interruptor automàtic protegeix la instal·lació, el corrent màxim de curtcircuit i els temps associats, són de l'ordre de magnitud dels

obtinguts amb l'experiment efectuat a una tensió eficaç de 230V. No s'ha pogut quantificar en els assajos realitzats, que la màxima massa ejectada en forma de partícules des del tub hagi augmentat de forma rellevant respecte la que s'obté en la casuística més severa de l'experiment realitzat a una tensió eficaç de 230V.

A la Fig.2.11 es mostren els oscil·logrames de tensió i corrent d'una repetició de l'experiment amb la configuració A, realitzat a una tensió eficaç de 400V. El corrent de curtcircuit de cresta que s'ha registrat és de $I_{cc,max}=3,83kA$. Si es compara amb el corrent 3,72kA, obtingut a l'assaig (a) realitzat amb $U_{ef}=230V$ (v. Fig.2.10), s'observa que són del mateix ordre de magnitud. La tensió instantània en l'instant que s'inicia el curtcircuit és de l'ordre de $\sqrt{2}$ vegades superior a l'assaig realitzat amb $U_{ef}=400V$. Els temps associats al curtcircuit que s'han registrat també es troben en un rang del mateix ordre de magnitud.

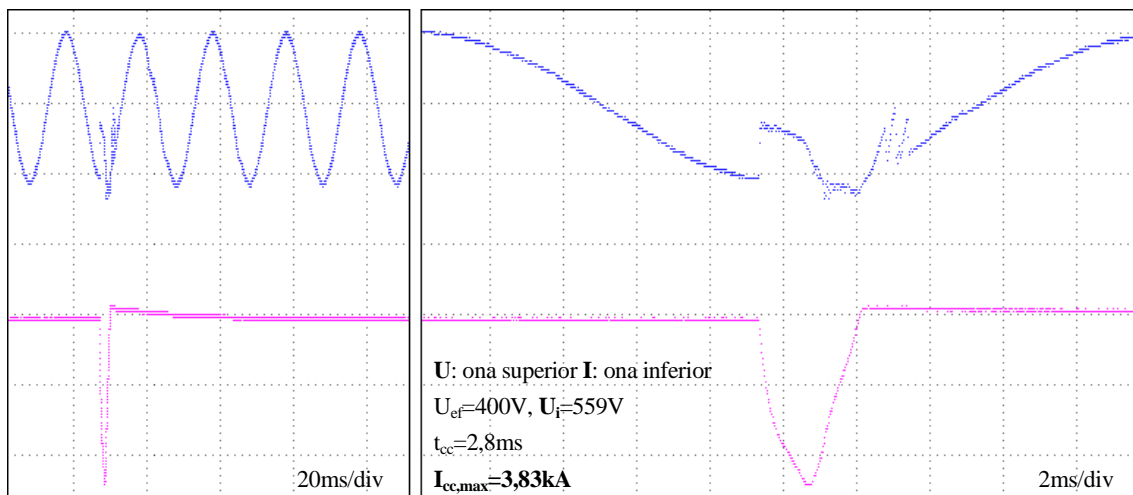


Fig.2.11 Oscil·logrames de tensió i corrent a l'experiment amb $U_{ef}=400V$.

Malgrat això, un nivell de tensió de 400V augmenta la probabilitat que es produeixi el curtcircuit en un instant de la senoide amb un nivell de tensió elevat. Un nivell de tensió més elevat podria afavorir el desenvolupament de l'arc i una major ejecció d'espurnes. Incrementaria la perillositat en relació amb el risc d'ignició elèctrica associada a aquesta casuística, en relació amb la que es dona amb un nivell de tensió de 230V.

2.2.3.3.1.5 Efecte de l'augment del temps d'actuació de la protecció elèctrica

Al repetir l'experiment utilitzant únicament com a protecció l'interruptor automàtic de caixa moldejada (IA2), amb un temps d'actuació superior al del petit interruptor automàtic (IA1), s'ha observat que l'ejecció d'espurnes augmenta significativament.

A la Fig.2.12 es mostren els oscil·logrames de tensió i corrent d'una de les repeticions de l'experiment amb $U_{ef}=230V$. Es produeix un primer curtcircuit en un punt del semiperíode positiu en el que la tensió instantània de la xarxa és de 218V i està decreixent. S'observa un impuls de corrent de curtcircuit que assoleix un màxim de 2,41kA i té una duració de 2,8ms. Finalitza en el pas per zero de la tensió. La relació entre el corrent i el temps no ha estat suficient per disparar l'interruptor automàtic. Seixanta milisegons després es produeix un segon curtcircuit. La filmació

mostra que el tub es ejectat cap amunt durant el primer curtcircuit i torna a caure posteriorment sobre els elèctrodes, produint-se el segon curtcircuit.

El segon curtcircuit es produeix en un punt del semiperíode negatiu en el que la tensió instantània de la xarxa és de 182V i està augmentant. S'observa un impuls de corrent de curtcircuit que assoleix un màxim de 5,67kA i té una duració de 8,8ms. La tensió tendeix a prendre un valor nul, atès que el corrent de curtcircuit subtransitori es interromput per l'acció de l'interruptor automàtic (IA2). Es registra un esmoreïment del corrent fins que tendeix a zero.

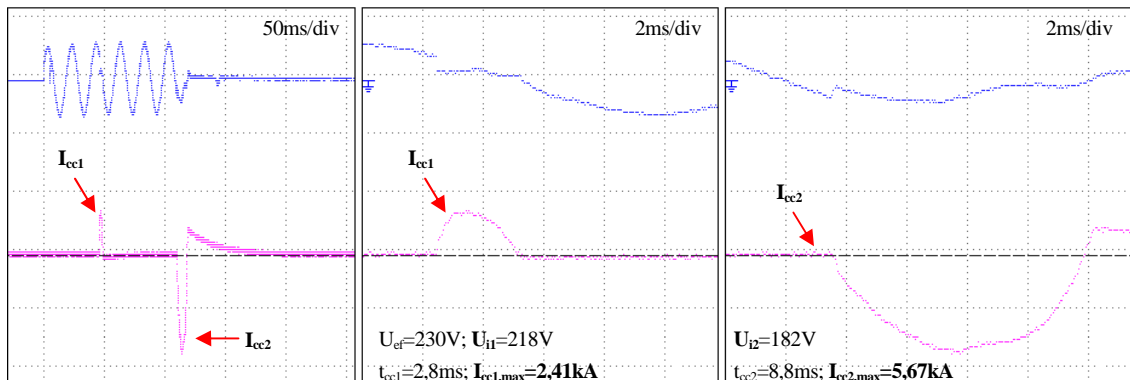


Fig.2.12 Oscil·logrames de tensió i corrent a l'experiment amb la protecció IA2.

El segon curtcircuit és més violent que el primer i que els que s'havien registrat en les proves en les que s'havia usat el petit interruptor automàtic (IA1). Produeix una ejecció d'espurnes significativament superior. En relació amb aquest segon curtcircuit es mesura una reducció de la superfície del tub de 956mm² i una massa perduda de 231mg. Es produeixen forats grans en la zona de contacte amb els elèctrodes, enlloc de la seqüència de forats descrita pel cas en que s'havia utilitzat la protecció (IA1). El seu aspecte es mostra a la Fig.2.17 de l'apartat 2.2.3.3.4.

A la Fig.2.13 es mostra de forma gràfica un ordre de magnitud per l'increment percentual de massa i superfície perduda pel tub, en relació amb l'assaig més sever que s'ha registrat amb l'interruptor automàtic (IA1). S'observa que l'increment de corrent i temps de curtcircuit comporta un augment significatiu de l'ejecció de material en forma d'espurnes des del tub.

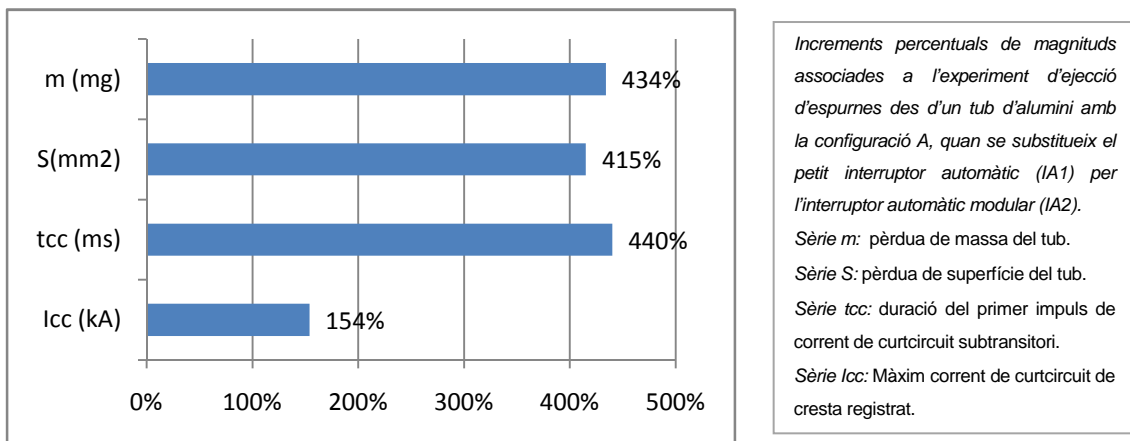


Fig.2.13 Increments de massa i superfície perduda amb diferents interruptors automàtics.

A la Fig.2.14 es mostra una comparació, visual i qualitativa, entre la quantitat de partícules ejectives quan es realitza l'experiment en les condicions més severes amb l'interruptor automàtic (IA1), (fotograma a); en relació amb el segon curtcircuit de l'experiment amb la protecció (IA2), descrit a la Fig.2.12 (seqüència de fotogrames b). Els fotogrames (a) i (b1) corresponen a un temps d'un ordre de magnitud similar des de l'inici dels curtcircuits. S'observa que la quantitat de partícules ejectives és perceptiblement major, quan el corrent i temps de curtcircuit són superiors. Està relacionat amb la major pèrdua de superfície i massa del tub.

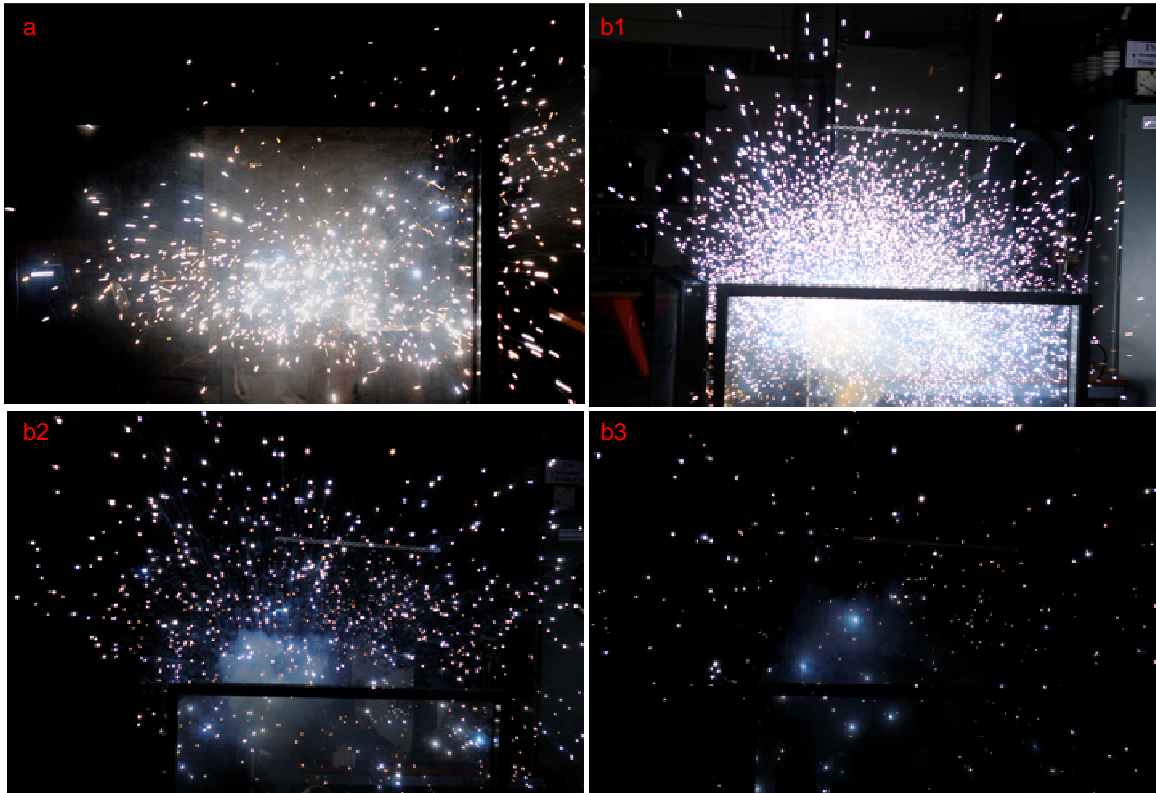


Fig.2.14 (a) Fotograma relatiu a l'experiment amb l'interruptor automàtic IA1. (b) Seqüència de fotogrames relatiu a l'experiment amb l'interruptor automàtic IA2 (temps entre fotogrames $\cong 1/3s$). (A.f. Martí, M.).

D'altra banda, l'efecte "rebot" del tub sobre els elèctrodes descrit, s'ha repetit en més ocasions. Posa de manifest la possibilitat que quan els esforços electrodinàmics produeixen un moviment relatiu entre els elèctrodes; i el curtcircuit no assoleix una relació de corrent i temps suficient per disparar les proteccions, pot desencadenar-se una seqüència de curtcircuits amb arc. En conseqüència també una seqüència d'ejeccions d'espumes, fins que actua la protecció elèctrica o desapareix el material combustible. Aquesta casuística incrementa la perillositat de la font d'ignició.

2.2.3.3.1.6 Efecte de la limitació del corrent mitjançant reactàncies

Al col·locar un grup de nuclis partits ferromagnètics laminats en els cables d'alimentació, s'ha observat que el corrent de cresta de curtcircuit disminueix (eventualment s'ha incrementat l'efecte connectant reactàncies en sèrie). No obstant, es retarda l'actuació de la protecció i la duració del

curtcircuit augmenta. Quan el temps de curtcircuit augmenta, s'ha observat que l'ejecció de partícules augmenta. No obstant, aquesta metodologia no ha permès quantificar de forma clara i comparable, la disminució del material ejectat des del tub ocasionat per la limitació del corrent, en relació amb els experiments anteriors.

2.3.3.1.7 Efecte de l'increment de pressió en el punt de contacte

A l'augmentar la pressió en el punt de contacte, introduint diferents pesos en l'interior del tub, s'ha observat un efecte de reducció de la quantitat d'espurnes ejectades. L'ordre de magnitud del pes dels trams de tub amb els que es realitza l'experiment és de quatre grams. Amb un pes addicional de 12g, es comença a percebre una disminució de la quantitat de partícules ejectades.

Quan el pes s'incrementa significativament, per exemple en 120g, augmenta la pressió de contacte, però també augmenta la força que cal realitzar perquè es produeixi un moviment relatiu entre el tub i els elèctrodes. El corrent de curtcircuit arriba a valors màxims similars que en els experiments sense el pes i la protecció elèctrica també actua de forma similar. Quan es produeix el curtcircuit és acústicament perceptible un espetec intens, associat a ones de xoc que impacten contra el tub. No obstant, tot i que es produeixen marques en els punts de contacte, l'ejecció de partícules i la massa perduda pel tub han arribat a reduir-se de l'ordre d'un 70% en les mateixes condicions (també es pot visualitzar aquest efecte fixant el tub als elèctrodes amb grapes o serjants).

Aquest efecte es pot relacionar amb que al limitar el moviment entre els elèctrodes i el tub, es dificulta el desenvolupament de l'arc de separació en els forats generats. D'altra banda, a l'incrementar la pressió de contacte i disminuir la resistència, l'increment puntual de la temperatura en els punts de contacte al circular corrents de curtcircuit pot ser inferior. Els dos efectes dificulten que es produeixi la fusió de material i sigui ejectat. També fa més difícil l'evacuació de partícules des de la zona de contacte elèctric i el contacte amb l'aire que actua com a agent oxidant. Un contacte accidental, sense connectors, incrementa la severitat de l'ejecció d'espurnes.

2.2.3.3.1.8 Efecte de la humitat

Al generar vapor d'aigua en la zona de contacte, en una primera etapa no s'han registrat canvis significatius en els resultats experimentals descrits. No obstant, al produir-se condensació si que s'ha observat un rellevant efecte limitador de l'ejecció d'espurnes. L'efecte d'annexió dels electrons a les molècules d'aigua dificulta el desenvolupament de l'arc elèctric [101]. L'aigua també produeix un efecte refrigerant. La condensació en la superfície del tub, s'ha observat que redueix la perillositat de la casuística.

2.2.3.3.1.9 Efecte de l'apropament de flames

Per realitzar una primera aproximació a l'estudi de la casuística en presència de foc, s'ha acostat una flama procedent d'una torxa de gas butà a diferents distàncies de la zona de contacte. El foc afavoreix l'aparició i desenvolupament de les descàrregues elèctriques, a causa que produeix un augment de la conductivitat del medi (per l'increment de temperatura, la ionització, l'aportació de

partícules conductores, etc). L'efecte és més significatiu quan les flames afecten completament als elèctrodes. Disminueix quan s'incrementa la distància de separació entre les flames i els elèctrodes. En alta tensió té unes conseqüències rellevants, algunes de les quals són tractades al cap.3. En aquest cas, quan l'incendi ja ha començat, l'ejecció d'espurnes a causa d'un curtcircuit produït per la destrucció dels aïllaments podria tenir un efecte propagador.

S'ha observat que a l'apropar la flama a la zona de contacte ràpidament es produeix la fusió del tub, a causa del baix punt de fusió de l'aliatge que el conforma i espessor. Impedeix realitzar l'experiment amb unes condicions comparables en relació amb els anteriors. No obstant, permet observar que les marques de la fusió produïda per les flames són diferents que les que s'obtenen quan la fusió és d'origen elèctric (v. Fig.2.17 de l'apartat 2.2.3.3.4). Si les flames s'allunyen, no s'observen uns resultats significativament diferents, amb nivells de tensió de $U_{ef} \leq 400V$.

2.2.3.3.2 Configuració B: conducte tubular en moviment relatiu respecte un elèctrode

Aquesta configuració permet realitzar el curtcircuit entre dos cossos que es troben inicialment a potencial diferent i en moviment relatiu entre ells, a causa d'un contacte produït per una col·lisió accidental. El tub cau per gravetat sobre l'elèctrode, des d'una alçada de 30mm.

A la Fig.2.15 es mostren dues repeticions de l'assaig. Al fotograma (a), obtingut durant una llarga exposició⁴², s'observa que quan el tub entra en contacte amb l'elèctrode, es produeix llum blanca brillant intensa al voltant de la zona de contacte. També una ejecció d'espurnes que s'allunyen del tub en totes direccions des d'aquesta zona. Al fotograma (b), es mostra una captura amb un temps d'exposició menor (1/400s). S'observa que generalment les partícules emeten una llum blanca brillant (alumini en combustió), tot i que també són perceptibles algunes espurnes de color ataronjat (procedents generalment de l'elèctrode de coure). Presenta analogia amb el que succeïa a la configuració A. S'observa com algunes partícules, que impacten sobre la superfície ubicada per sota del tub, reboten i continuen volant en combustió.

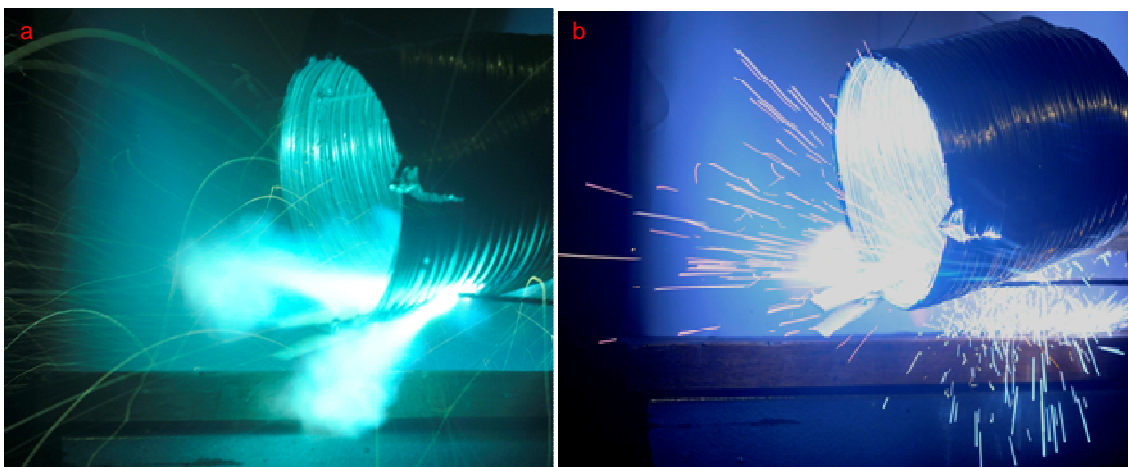


Fig.2.15 Seqüència de fotogrames relativa a la configuració experimental B. (A.f. Martí, M.).

⁴² Captura de llarga exposició amb una velocitat d'obturació de 1s, realitzada amb un filtre de protecció inactiva.

Els oscil·logrames de corrent i l'actuació de les proteccions elèctriques, són anàlegs als obtinguts durant els experiments realitzats amb la configuració A. La quantitat d'espurnes ejectades i la reducció de massa en el tub, és inferior perquè es produeix un contacte amb un únic elèctrode. No obstant, presenten una reducció proporcional en funció de la reducció de la superfície de contacte. Els forats que es produeixen en el tub també tenen unes característiques similars.

D'altra banda, la dinàmica de l'experiment afavoreix un efecte de rebot del tub sobre els elèctrodes, que pot ocasionar una seqüència de curtcircuits i d'ejeccions d'espurnes, quan les condicions són favorables (segons s'ha descrit a l'apartat 2.2.3.3.1.4)

2.2.3.3.3 Configuració C: conducte tubular connectat a un ventilador

En la configuració experimental C, s'acobla el tub a un ventilador per simular l'efecte de la circulació forçada d'aire al seu interior, durant el desenvolupament del defecte. La velocitat de l'aire a la sortida del tub és de 15m/s.

A la Fig.2.16 es mostra una seqüència de fotogrames d'una de les explosions més violentes obtingudes durant les repeticions de l'experiment. S'ha realitzat a una tensió eficaç de 230V, amb l'interruptor automàtic modular (IA2) com a protecció. El corrent de curtcircuit de cresta registrat és de 6,7kA i la duració del primer impuls de corrent de curtcircuit subtransitori de 9,3ms.

Al fotograma (a) s'observa un flaix inicial de llum brillant blanca intensa, similar al que s'ha descrit en els experiments realitzats amb la configuració A. S'observa l'ejecció de partícules d'alumini de color blanc o groguenc que emanen del flaix en totes direccions.

Al fotograma (b), 1/3s després de (a), s'observen centenars de partícules incandescentes o en combustió volant. Les partícules en combustió emeten una llum blanca més intensa, mentre que les partícules a una temperatura inferior a la d'ignició de l'alumini groguegen. Algunes d'aquestes partícules incandescentes amb cromatisme groc, s'ha observat que entren en combustió durant el vol i passen a emetre llum blanca (en consonància amb els efectes descrits a l'apartat 2.2.3.3.1.1). També s'observen partícules que han arribat a terra, on es mantenen en combustió o incandescentes. Se situen en un radi de l'ordre de 0,5m al voltant del ventilador.

Al fotograma (c), un segon després de (a), s'observa que continua la pluja d'un gran nombre de partícules que emeten llum, tot i que ha disminuït significativament el seu nombre respecte el fotograma (b). S'estima que algunes d'aquestes partícules han assolit més de 4m d'alçada. Es troben desenes de partícules incandescentes o en combustió al terra (les partícules d'alumini en combustió poden assolir una temperatura de l'ordre de 3200°C).

Al fotograma (d), tres segons després de (a), encara s'observen algunes partícules incandescentes caient. La pluja finalitza definitivament 2/3 de segon després. El nombre de partícules incandescentes o en combustió que es troben al terra ha augmentat respecte el fotograma anterior. Quan finalitza la combustió de les partícules d'alumini el color de la llum que emeten canvia a groc. La última partícula en combustió deixa d'emetre llum blanca de l'ordre de 4,6 segons després

de (a). La última partícula incandescent s'apaga un segon després. Tot i així continuen calentes fins que assoleixen la temperatura ambient. A l'inspeccionar el terra després de l'experiment, es troben centenars de flocs o pols de cendra. Alguns rastres es troben a distàncies superiors als 5m des de l'origen. D'altra banda, el tub presenta forats d'una naturalesa i dimensions similars a les que s'han registrat en els experiments amb la configuració A, realitzats amb unes condicions similars.



Fig.2.16 Seqüència de fotogrames relatives a la configuració experimental C. (A.f. Martí, M.).

S'observa que la circulació forçada d'aire afavoreix la dispersió de les partícules ejectades. La velocitat de l'aire impulsa i disgrega les partícules, que abasten distàncies superiors si són ejectades

cap a l'exterior del tub. La circulació d'aire a través de la geometria tubular del conducte, facilita el contacte de les partícules d'alumini amb l'element oxidant aire, el que pot afavorir la combustió.

L'abast espacial durant el vol i els temps de permanència en el terra de partícules d'alumini a temperatures molt elevades, registrats en aquest experiment, posen de manifest que aquesta font d'ignició pot tenir una elevada perillositat, en relació amb la generació o propagació d'incendis o explosions, en presència de combustibles fàcilment inflamables.

2.2.3.3.4 *Descripció de l'estat del tub i dels elèctrodes després dels assajos*

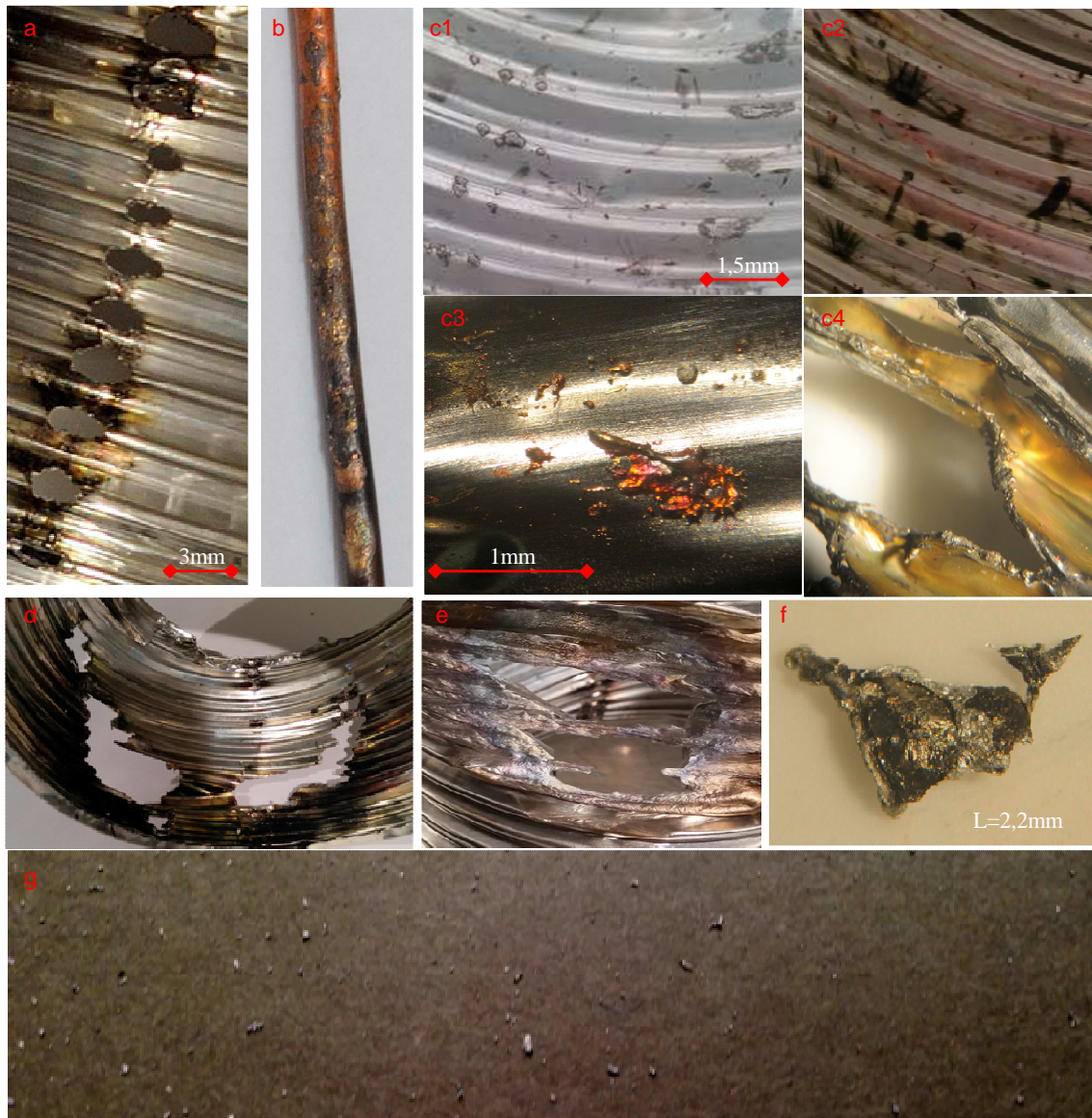
Es presenta un recull de mostres procedents de repeticions dels experiments descrits a la Fig.2.17.

A la imatge (a) es mostra una seqüència de forats típica d'un experiment amb la configuració A i una tensió eficaç de 230V, quan s'utilitza com a protecció el petit interruptor automàtic (IA1). Correspon a l'assaig (a) descrit a l'apartat 2.2.3.3.1.2. El detall de la perifèria d'un forat es mostra a la imatge (c4). S'observa un contorn irregular i deformacions. Es poden relacionar amb l'acció de l'arc elèctric i les ones de xoc associades, que són perceptibles acústicament durant els experiments. També s'observa que en diverses zones la superfície presenta una coloració negra, groguenca i ocasionalment ataronjada.

A la imatge (b) es mostra l'estat d'un dels elèctrodes de coure després de l'experiment (a). S'observen mossegades, amb una seqüència coherent en relació amb els forats del tub, produïts en els punts de contacte. Es posa de manifest que s'ha ejectat una petita quantitat de material des de l'elèctrode. La superfície afectada presenta algunes zones negres i groguenques. S'observen alguns regalims i taques d'alumini. Tenen una amplada de l'ordre de poques dècimes de mil·límetre.

A les imatges (c1, c2 i c3) es mostren esquitxos sobre la superfície interior del tub, produïts per partícules ejectades des de la zona de contacte. S'hi han adherit fortament després d'impactar-hi i solidificar-se. La seva distribució és heterogènia i variable al repetir l'experiment en condicions similars. Les partícules d'alumini (color gris) adherides són abundants. En els casos més severs s'ha registrat una mitjana de l'ordre de 15 partícules/cm². Tenen uns diàmetres que normalment se situen en un rang de l'ordre de 0,01-1,7mm. Les partícules de coure adherides procedents de l'elèctrode (color vermell) són poc abundants (en un experiment se'n acostumen a registrar menys de 10). Tenen unes longituds de l'ordre de 0,2-1,5mm.

A la imatge (d) es mostren els forats resultants d'un experiment amb un curtcircuit de major duració i corrent de cresta màxim. Correspon a l'assaig descrit a l'apartat 2.2.3.3.1.4. Si es compara la superfície que ha estat ejectada en forma d'espurnes, es percep que és significativament superior a la que es perd a l'assaig (a). En aquest cas no s'observa una seqüència de forats, sinó que bona part del material adjacent a cada elèctrode, s'ha volatilitzat formant forats grans. Els forats en conjunt dibuixen una forma similar a una U o una V. Es relaciona amb una obertura dels elèctrodes en forma de V, observada durant els curtcircuits amb corrents més forts, que es produeix a causa dels esforços electrodinàmics.



a:Forats associats a un assaig iniciat en el pic de tensió del semiperíode negatiu (U decreixent), amb $U_{ef}=230V$ i la protecció (IA1), ($I_{cc,max}=3,72kA$, $t_{cc}=2ms$). **b:** Elèctrode coure després de realitzar a l'assaig (a). **c1/c2/c3:** detall de partícules de Al i Cu adherides a l'interior del tub, relatives a l'assaig (a). **c4:** detall de la perifèria d'un dels forats mostrat a (a). **d:** Forats associats a un assaig iniciat en $U_i=182V$ del semiperíode negatiu (U creixent), amb $U_{ef}=230V$ i la protecció IA2 ($I_{cc,max}=5,67kA$, $t_{cc}=8,8ms$). **e:** Forat produït per l'acció de les flames. **f:** partícula ejectada del tub que va arribar al terra en combustió durant l'assaig (a). **g:** partícules d'alumini sobre el terra després d'un assaig.

Fig.2.17 Mostres dels elèctrodes i del conducte tubular després dels experiments. (A.f. Martí, M.).

A la imatge (e) es mostra l'aspecte del tub després de ser afectat per un flama blava procedent d'una torxa de gas butà. S'observa que la geometria, textura i color dels rastres difereix dels que s'obtenen quan els forats són d'origen elèctric. Pot ajudar a distingir les dues casuístiques, tot i que també poden produir-se de forma conjunta.

A la imatge (f) es mostra una partícula ejectada des del tub que va arribar al terra en combustió durant l'assaig (a). Inspeccionant la zona annexa al punt en que es realitza l'experiment, es troben partícules i cendres amb diàmetres en un rang de l'ordre de 0,2mm-2,5mm (v. imatge (g)). A la

superfície del tub s'han observat amb microscopi, partícules adherides de dimensions inferiors, que probablement també arriben a terra en forma de pols atomitzada. Les partícules ejectades presenten formes diverses com s'observa a la imatge (f). No obstant, moltes tenen forma de volva, amb un aspecte similar al de les partícules adherides al tub mostrades a la imatge (c2).

D'altra banda, a la Fig.2.18 (a), es mostra una vista ampliada de la superfície original del tub, obtinguda mitjançant microscopi electrònic (escala gràfica de 200µm). S'observa una textura força homogènia amb una certa ondulació de traçat lineal.

A la Fig.2.18 (b), es mostra una vista, utilitzant la mateixa instrumentació i escala, d'una zona propera a un dels forats ocasionat durant un dels experiments. S'observa que la textura de la superfície ha variat i té un aspecte heterogeni. Presenta microcràters i rascades superficials. A la figura s'observa una partícula d'alumini adherida sobre la superfície de 24µm de longitud. Al voltant de la zona d'impacte s'observa una taca circular fosca.

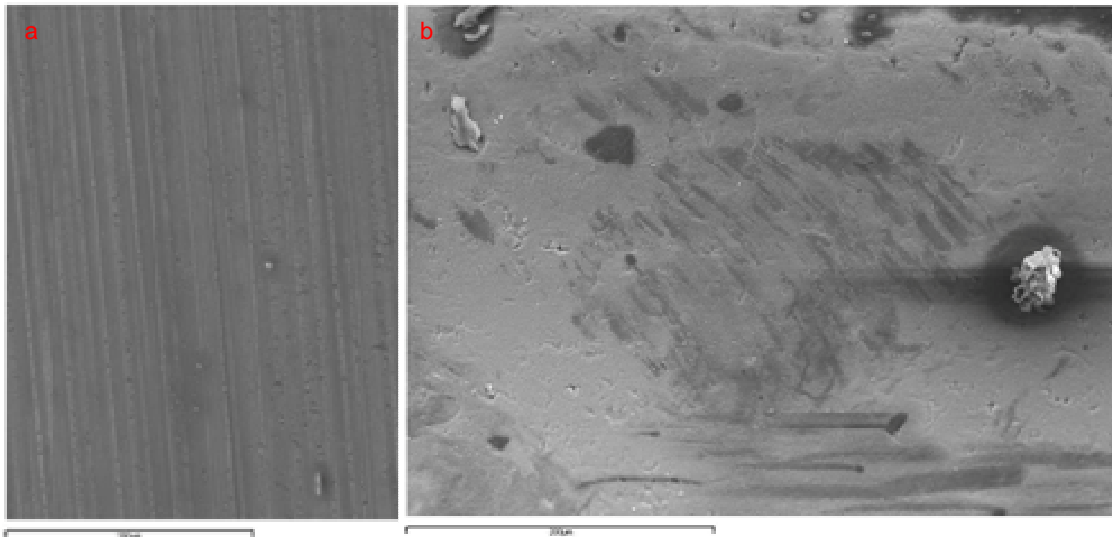


Fig.2.18 (a) Superfície del tub original vista amb microscopi electrònic (escala gràfica: 200µm). (b) Perifèria d'un forat produït durant l'experiment (escala gràfica: 200µm).

D'altra banda, a la Fig.2.19 es mostren gràficament els resultats⁴³ d'una anàlisi mitjançant EDX, de la composició en percentatges de massa atòmica de la superfície del tub. La gràfica (a) presenta els resultats relatius a una mostra de la perifèria dels forats, ocasionats durant els experiments, en la zona de color groc-ataronjat. La gràfica (b) mostra els resultats relatius a la zona negra. La gràfica (c) mostra els resultats relatius a la superfície del tub original.

S'observa en la gràfica (a) que en la zona groga-taronja apareix el coure en la composició superficial, amb un 9,37% en massa. Es relaciona amb la fusió de coure de l'elèctrode, que s'ha transferit al tub. És coherent amb la coloració d'aquesta zona. En la zona negra també es detecta un petit percentatge de coure (1,59%).

⁴³ Els valors de les gràfiques (a) i (b) provenen de la taula A.3, de l'annex A. Els de la gràfica (c) de la taula 2.1.

Respecte la composició original es produeix un augment del percentatge en massa d'oxigen. En la zona groga-taronja l'increment és de l'ordre d'un 7,3% i en la zona negra de l'ordre del 3,3%. Es relaciona amb els processos d'oxidació superficial associats a l'arc i la combustió.

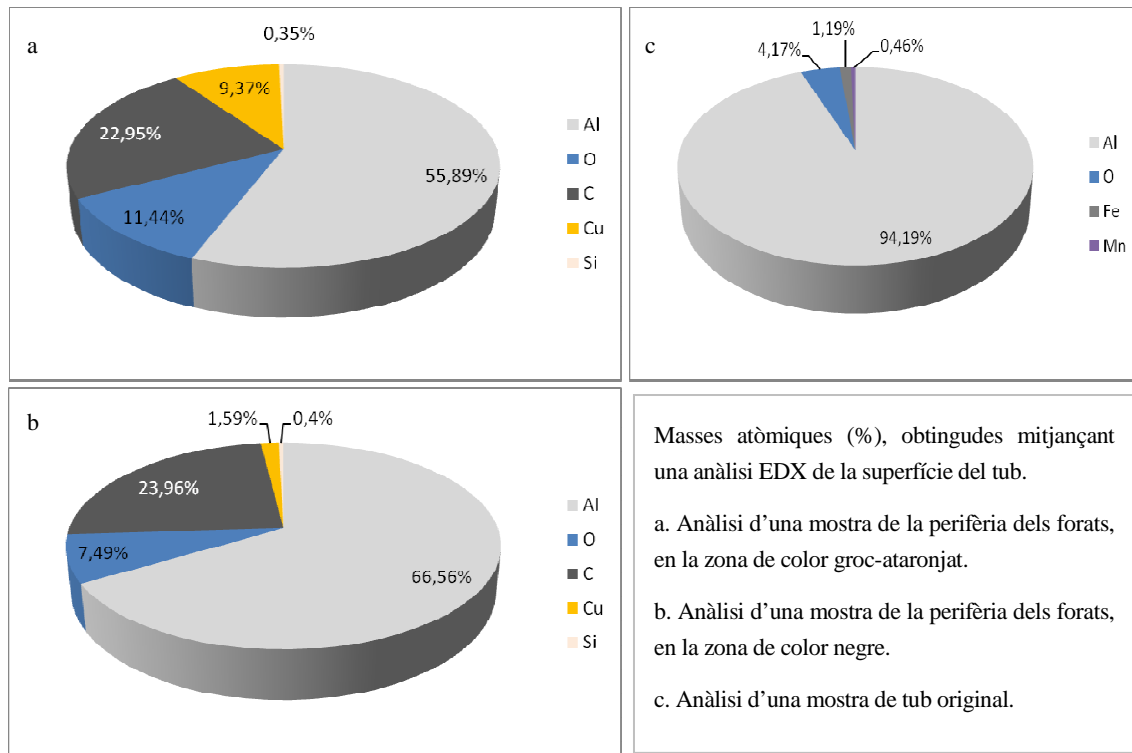


Fig.2.19 Comparació de la composició de diverses zones de la superfície del tub.

2.2.4 Experiments amb panells revestits d'alumini per conductes d'aire condicionat

2.2.4.1 Materials i muntatge

En aquests experiments es generen curtcircuits amb arc de separació, entre elèctrodes de coure i un panell recobert d'alumini utilitzat en la construcció de conductes d'aire condicionat. Reprodueix el contacte entre un conductor i la superfície d'un conducte d'aquestes característiques, quan existeix una diferència de potencial entre ells. A la Fig.2.20 es mostren les configuracions experimentals que es porten a terme, en funció del tipus de contacte entre conductors i panell (D i E).

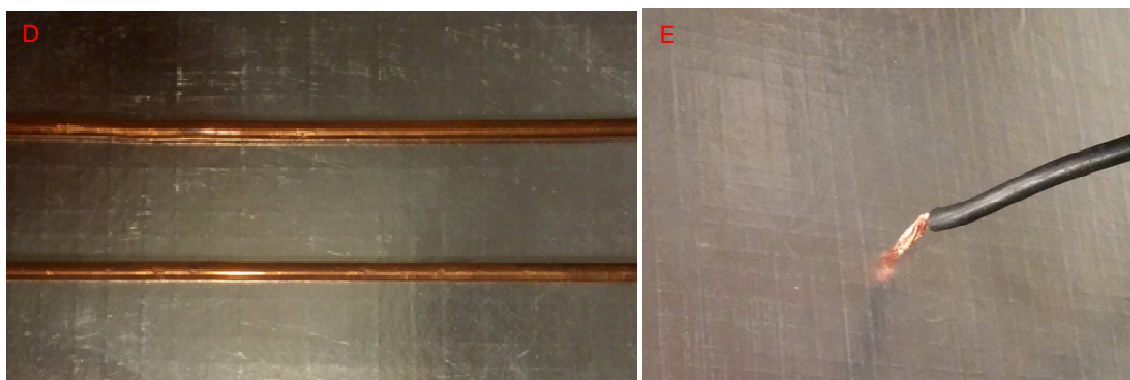


Fig.2.20 Tipus de contacte (D i E) entre elèctrodes de Cu i un panell recobert de Al. (A.f. Martí, M.).

2.2.4.1.1 Configuració D: panell en contacte amb conductors rígids de Cu

En la configuració (D), s'utilitzen dos elèctrodes de coure rígid. Tenen les mateixes característiques que els utilitzats en el muntatge (A), associat a l'experiment amb conductes tubulars, definit anteriorment a l'apartat 2.2.3.1. La distància de separació entre ells és ajustable (entre 10 i 25mm). Els elèctrodes es fixen pels seus extrems a dues regletes de connexió. El contacte és superficial, sense connectors. Els elèctrodes es connecten a dues fases d'un sistema trifàsic de corrent altern de BT. S'utilitza la mateixa font d'alimentació i proteccions elèctriques que en els experiments que s'han descrit a l'apartat 2.2.3. Es busca comparar els efectes produïts amb els observats a l'experiment del conducte tubular.

El panell és del tipus que s'utilitza habitualment en l'assemblatge de conductes d'aire condicionat en els edificis. Té un nucli de llana mineral, de 25mm de gruix, que actua com a aïllament tèrmic. La cara exterior està recoberta per una capa d'alumini. Actua com a barrera de vapor per evitar la condensació. Existeixen models amb recobriment mitjançant una làmina d'alumini i altres amb paper d'alumini. En general s'ha utilitzat un model fabricat amb paper kraft, amb un gruix de la lamina d'alumini de 50µm (eventualment s'ha utilitzat un panell recobert únicament d'una capa d'alumini del mateix gruix; s'ha observat que produeix uns efectes similars en quan a l'ejecció d'espurnes). La reacció al foc de la superfície exterior, segons el fabricant, és B s1 d0. Es tracta d'un combustible amb contribució molt limitada al foc (B), que emet fums de baixa opacitat (s1) i que no produeix la caiguda de gotes o partícules inflamables (d0); segons les especificacions del RD 842/2013 [102]. Entre el recobriment d'alumini i la llana mineral existeix un reforç fabricat amb una malla de fibra de vidre.

La composició de la superfície externa del panell s'ha determinat mitjançant un anàlisi amb EDX. Els resultats obtinguts es mostren a la taula 2.3.

Anàlisi EDX	Masses atòmiques en tant per cent (%) dels components del panell		
	Al	O	Fe
Espectre 1	96,99	2,43	0,59
Valors màxims (sobre 4 espectres)	97,48	2,50	0,59
Valors Mínims (sobre 4 espectres)	96,96	2,07	0,45

Taula 2.3 Anàlisi EDX de la composició d'un panell recobert d'alumini.

Els experiments es porten a terme a en un espai obert o a l'interior d'una cambra d'assaigs destructius (especificada a 2.2.2), per reproduir les condicions d'un espai confinat.

2.2.4.1.2 Configuració E: panell en contacte amb conductors flexibles de Cu

En la configuració (E), s'utilitza com a elèctrode un cable flexible amb conductor de coure i aïllament de PVC. El contacte es realitza pel seu extrem de forma superficial i puntual. El

conductor no se subjecta, de forma que pot moure's lliurement quan es produeixen esforços electrodinàmics durant el curtcircuit. Reprodueix un contacte accidental. L'elèctrode i el panell es connecten a les fases d'un sistema trifàsic de corrent altern de BT. S'utilitza la mateixa font d'alimentació i proteccions elèctriques que en els experiments que s'han descrit a l'apartat 2.2.3.

2.2.4.2 Metodologia

S'ubica el panell en un espai obert, en contacte amb els elèctrodes rígids o el conductor flexible, descrits a l'apartat 2.2.4.1. S'aplica una tensió alterna sinusoidal simètrica de $U_{ef}=230V$ o $U_{ef}=400V$ i $f=50Hz$ als elèctrodes o entre el conductor i el panell. Es produeix un curtcircuit que generalment es interromput per l'actuació de la protecció (IA1). Es registren oscil·logrames de tensió i corrent. L'experiment es filma amb una càmera ràpida que captura fotogrames a una velocitat de 1250fps. Al mateix temps es fotografia, en mode continu, amb una càmera reflex a 3fps. Es realitzen repeticions dels assajos.

Després de l'experiment es mesura la temperatura dels elèctrodes i el panell amb una càmera termogràfica. Es mesura la superfície afectada per una desaparició de material ocasionada per l'ejecció de partícules. S'inspeccionen i mesuren les partícules ejectades des del panell. Es fotografia la superfície del panell; així com algunes de les partícules ejectades. Es tornen a realitzar els assajos col·locant el panell confinat en la cambra d'assajos destructius descrita a l'apartat 2.2.2. Se segueix la mateixa metodologia que la descrita per un espai obert.

2.2.4.3 Descripció, resultats i discussió

2.2.4.3.1 Configuració D: panell en contacte amb conductors rígids de Cu

2.2.4.3.1.1 Descripció del procés d'ejecció d'espurnes i del seu vol

Quan es produeix el curtcircuit la seqüència de successos que té lloc és fonamentalment anàloga a la que s'havia descrit pel conducte tubular d'alumini a l'apartat 2.2.3.3.1.1. S'il·lustra a la Fig.2.21.

S'inicia amb una circulació de corrent fort amb arc elèctric. Es produeix una explosió i s'observa un flaix de llum blanca intensa, embolcallada per llum blavosa. Creix inicialment amb forma semiesfèrica, limitat inferiorment pel pla del panell. Després d'arribar al seu creixement màxim es contreu. De la base del flaix, en contacte amb el panell, s'observa que emanen en totes direccions les primeres espurnes d'alumini. Emeten una llum blanca brillant i intensa. Inicialment la seva trajectòria té un caràcter direccional i radial. Aquest procés té una duració que oscil·la en un rang de l'ordre de 7-12ms.

Posteriorment, s'observen flames i es produeix una pluja de partícules d'alumini. Les flames tenen un color ataronjat, tot i que també s'han observat flames amb coloració verda. S'associen a la combustió dels materials que hi ha sota la làmina d'alumini. En relació amb les partícules ejectades, s'observa un comportament, cromatisme i fenòmens de transició similars als descrits en el cas del conducte tubular. La pluja de partícules té una duració que en els casos més severos s'ha registrat que oscil·la en un rang de 0,5-1,5segons. Els temps de vol són inferiors als registrats en el cas del

conducte tubular. El temps que les partícules romanen enceses sobre una superfície també es inferior. Es relaciona amb el fet que les partícules tenen una massa inferior. Els temps màxims registrats de manteniment en combustió d'una partícula d'alumini ejectada són de l'ordre de 1,5s, des de l'inici de l'experiment.

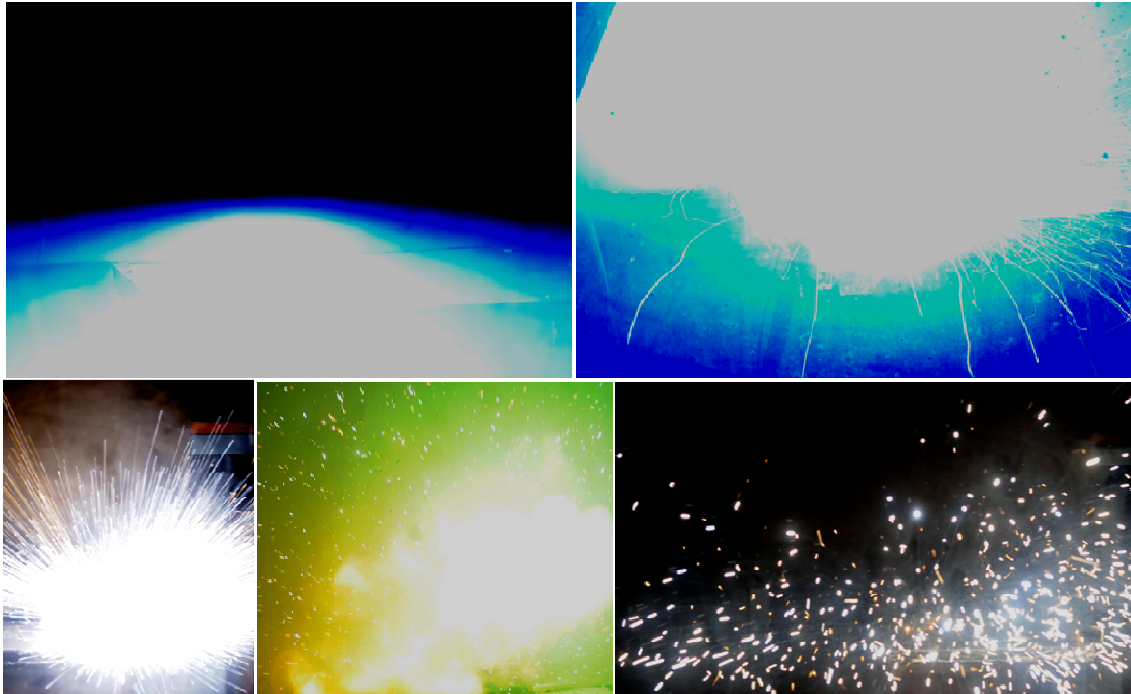


Fig.2.21 Fotogrames relatius a la configuració experimental D. (A.f. Martí, M.).

2.2.4.3.1.2 Estimació de la quantitat de material ejectat en forma d'espurnes

Els registres oscil·logràfics de tensió i corrent són bàsicament anàlegs als descrits pels cas del conducte tubular. S'ha observat que s'assoleixen corrents i temps màxims de curtcircuit similars, en les mateixes condicions. També s'ha registrat la interrupció de la circulació de corrent de curtcircuit subtransitori en el pas per zero, quan l'assaig s'inicia en un valor instantani de tensió reduït (de l'ordre de $U_i < 100V$).

La superfície d'alumini ejectada en forma d'espurnes també és superior quan els corrents i els temps de curtcircuit són majors. De la superfície del panell queda afectada la zona annexa als elèctrodes (v. Fig.2.26 de l'apartat 2.2.4.3.3). La quantitat d'alumini ejectada no és fàcilment quantificable amb la balança de precisió. És a causa que, en molts experiments, part del material que conforma el nucli del panell també és destruït. No es trivial quantificar quina part del diferencial de massa correspon a cada material.

No obstant aquesta massa pot ser estimada, a partir de la densitat de l'alumini ($2698kg/m^3$ [30]), la superfície destruïda i el gruix de la làmina d'alumini ($50\mu m$). En les repeticions de l'assaig amb unes condicions més destructives (amb corrents de curtcircuit de cresta màxims de l'ordre de $4kA$ i una duració de $3ms$ amb la protecció IA1), la superfície màxima ejectada registrada ha estat de $1572mm^2$. La massa d'alumini ejectada màxima estimada és de $212mg$.

2.2.4.3.1.3 Efecte del confinament en l'ejecció d'espurnes

A la Fig.2.22 es mostren fotogrames relatius a la repetició dels assajos, col·locant el panell confinat en una cambra d'assaigs destructius.

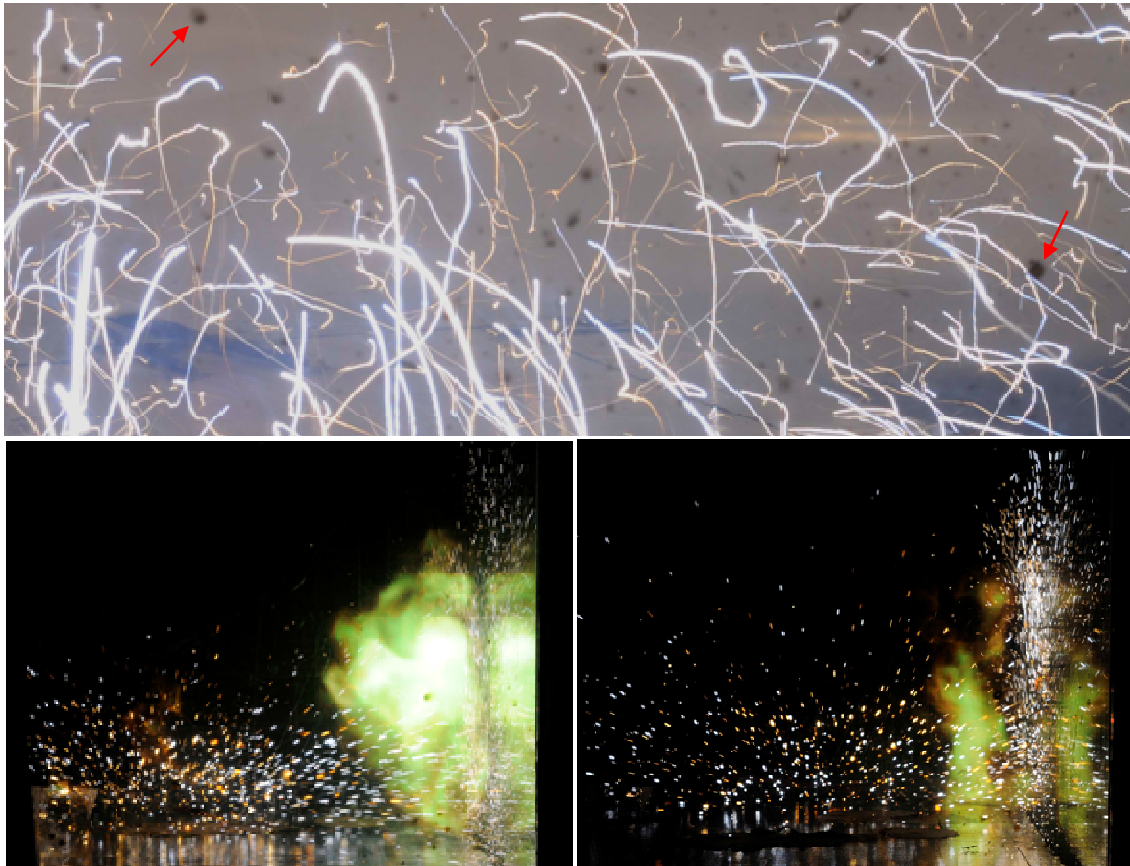


Fig.2.22 Fotogrames relatius a la configuració experimental D amb confinament. (A.f. Martí, M.).

S'observa que les flames i les espurnes impacten contra les parets transparents de la cambra. Les partícules poden adherir-se a la superfície i al solidificar-se deixen un rastre del seu impacte (v. taques fosques senyalades a la imatge superior). No obstant, s'observa que també poden rebotar o lliscar sobre la superfície. La seva trajectòria varia i continuen volant en combustió, incandescents o calentes. S'ha observat qualitativament que el material de la paret influeix en la quantitat de partícules que s'adhereixen, reboten o llisquen sobre la superfície. En funció del material que la composi i la inflamabilitat dels combustibles presents, la casuística pot augmentar el risc d'incendi.

2.2.4.3.2 Configuració E: panell en contacte amb conductors flexibles de Cu

2.2.4.3.2.1 Descripció dels efectes observats durant l'experiment

Quan l'experiment es realitza amb conductors flexibles de coure, en contacte amb la superfície del panell, la seqüència d'esdeveniments que té lloc és fonamentalment anàloga a la descrita per la configuració D.

No obstant, es produeix un desplaçament del conductor durant l'assaig, provocat per l'acceleració associada als esforços electrodinàmics i les ones de xoc, perquè el seu moviment no es troba

restringit i és flexible. Els comportaments observats són variables en funció de la repetició. Inicialment la punta del conductor acostuma a elevar-se (v. Fig.2.23). El conductor es desplaça amb component horitzontal sobre el panell. S'allunya del punt on es connecta el panell a l'altra fase. Habitualment deixa un rastre sobre la seva superfície que senyala la seva trajectòria (v. Fig.2.26 de l'apartat 2.2.4.3.3). A partir dels temps registrats a la filmació d'alta velocitat i l'anàlisi de les imatges i els rastres sobre la superfície del panell, s'ha estimat una velocitat de desplaçament, amb component horitzontal, màxima de 0,8m/s. S'han registrat desplaçaments de fins a 90mm.

Al voltant del punt de contacte inicial es produeix una destrucció local del recobriment d'alumini. La superfície destruïda és superior en els experiments amb un major corrent i temps de curtcircuit màxim associat. Acostuma a tenir una forma circular o el·lipsoïdal amb un contorn irregular (v. Fig.2.26 de l'apartat 2.2.4.3.3).

A la Fig.2.23 es mostren fotogrames relatius a tres repeticions de l'experiment. El fotograma (a) correspon a un assaig amb un corrent de curtcircuit de cresta màxim de 496A i una duració de 1,2ms. El fotograma (b) és relatiu a un assaig amb un corrent de curtcircuit de cresta màxim de 2,82kA i una duració del corrent subtransitori de 5,5ms. S'observa que la superfície afectada és superior en l'assaig (b). L'ejecció d'espurnes també va ser perceptiblement superior en aquest assaig. Al fotograma (b) s'observa que la punta del conductor s'ha elevat per sobre de la superfície del panell.

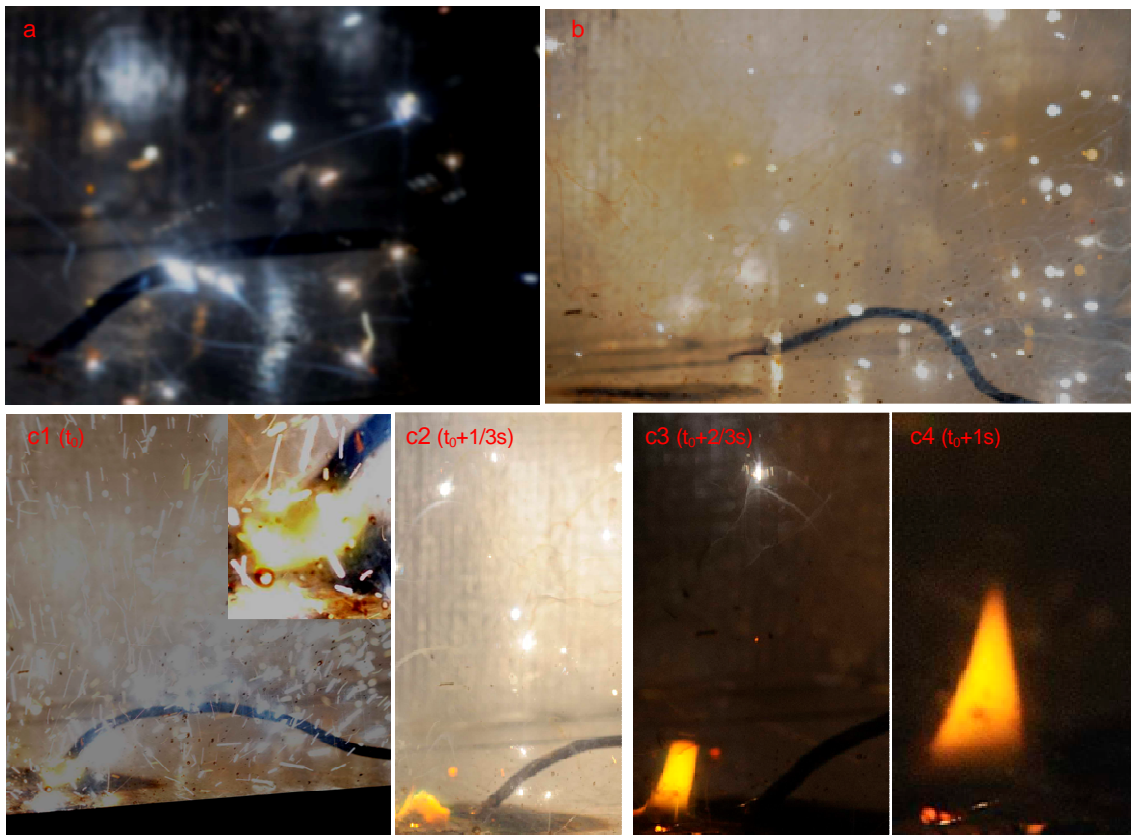


Fig.2.23 Fotogrames relatius a la configuració experimental E. (A.f. Martí, M.).

En algunes repeticions amb corrents de curtcircuit més forts, s'ha observat que pot produir-se una flama sobre la superfície del panell. El fotograma (c1) correspon a un assaig amb un corrent de curtcircuit de cresta màxim de 3,91kA i una duració de l'impuls de corrent subtransitori de 2,5ms. Es percep una ejecció d'espurnes significativament superior a la dels assaigs (a) i (b). En l'ampliació s'observa que la punta del conductor es troba per sobre de la superfície del panell, embolcallada en flames. Les flames també afecten a la superfície del panell on s'ha produït el contacte.

En el fotograma (c2) s'observa que de l'ordre de 1/3 de segon després, hi ha una flama de color taronja sobre el panell en la zona de contacte (a la superfície sota la flama ja no hi ha alumini que s'ha volatilitzat durant el curtcircuit). El conductor s'ha desplaçat una distància de l'ordre de 30mm, respecte la seva posició inicial.

En els fotogrames (c3 i c4) es mostra l'evolució de la flama durant el primer segon. Es manté encesa durant 1 segon més. La seva base té una longitud de l'ordre de 25mm. S'extingeix espontàniament. En les repeticions de l'experiment en aquestes condicions s'han observat flames amb unes característiques similars. Tot i que el panell té un bon comportament davant del foc i es tracta d'una flama de duració breu i dimensions reduïdes, en presència de materials fàcilment combustibles, pot augmentar el risc d'incendi respecte el que comporten les espurnes.

A la Fig.2.24 es mostra amb més detall la formació de les espurnes d'alumini. S'observa que emanen del punt de curtcircuit en combustió, emetent una llum blanca molt intensa. Les seqüències estan associades a experiments on el curtcircuit s'inicia amb tensions instantànies reduïdes. Donen lloc a corrents de cresta menors que acostumen a extingir-se en el pas per zero. En aquests casos l'interruptor automàtic pot no actuar. Es produeixen petits curtcircuits seqüencials.

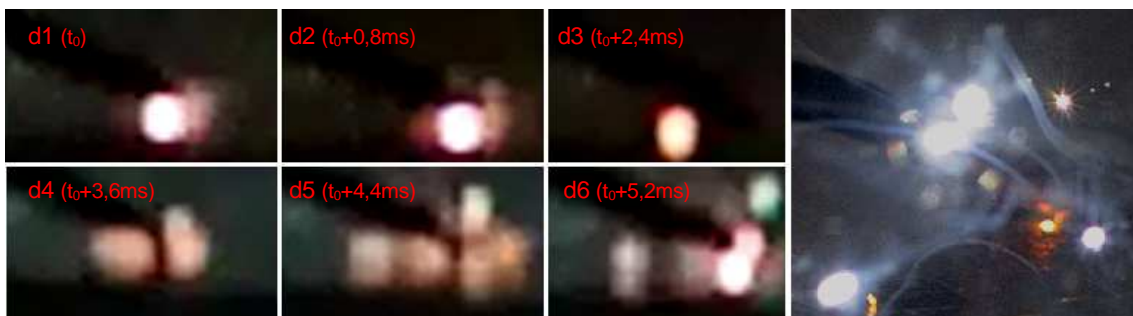


Fig.2.24 Seqüència de fotogrames relativa a la formació d'espurnes d'alumini (A.f. Martí, M.).

En els fotogrames (d1-d3) s'observa la formació i ejecció d'una única partícula. Després de 3,6ms, respecte (d1), es produeix una segona ejecció d'espurnes (d4). En aquest cas, es generen més partícules des del punt de curtcircuit. Segueixen trajectòries diverses en diferents direccions. Aquesta casuística pot emetre una petita quantitat d'espurnes de forma seqüencial, fins que el corrent assoleix un valor prou elevat, en relació amb el temps, com per disparar l'interruptor automàtic o s'exhaureix l'alumini en la perifèria del conductor.

A la Fig.2.25 es mostren els oscil·logrames de tensió i corrent dels assaigs (a), (b) i (c) il·lustrats a la Fig.2.23. A l'oscil·lograma (a) s'observa que s'assoleix un corrent de curtcircuit subtransitori

menor, fins el pas per zero. Es relaciona amb una ejecció de partícules inferior. Tot i que és un comportament que s'ha observat que és habitual quan el curtcircuit s'inicia a prop del zero de tensió, no sempre succeeix així. A l'oscil·lograma (b) es genera un curtcircuit amb un primer pic de corrent en el semiperíode negatiu de 364A. S'observa que l'evolució del corrent supera el pas per zero i continua augmentat fins assolir un valor de 2,82kA. L'oscil·lograma (c) correspon al curtcircuit amb major ejecció d'espurnes, en el que es genera una flama sobre el panell. S'observa que el defecte s'inicia a prop del pic de tensió. S'assoleix un corrent de curtcircuit de cresta de 3,91kA. L'interruptor automàtic actua, desconnectant el defecte de la xarxa.

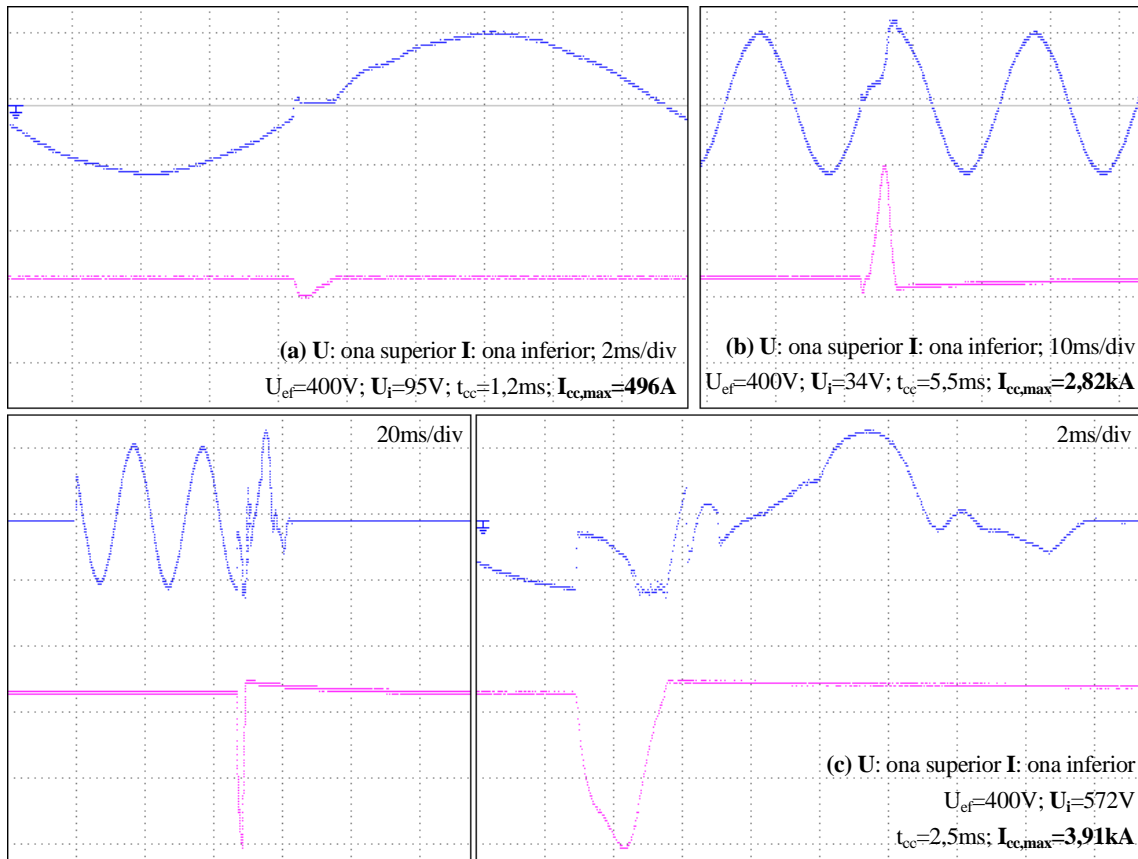


Fig.2.25 Oscil·logrames de tensió i corrent relatius a la configuració experimental E.

2.2.4.3.2.2 Estimació de la quantitat de material ejectat

Es mesura la superfície afectada. La massa d'alumini ejectat s'estima, a partir de la densitat de l'alumini, segons s'ha descrit a l'apartat 2.2.4.3.1.3. A la Taula 2.4 es mostren els resultats relatius als assaigs (a), (b) i (c) que s'han descrit anteriorment. Permeten establir un ordre de magnitud per aquests valors.

La superfície afectada i la massa ejectada, en general, augmenten amb la intensitat i la duració del curtcircuit. No obstant, en aquest experiment es produeix variabilitat en els resultats. És a causa de la variabilitat del moviment i el recorregut que segueix el conductor a cada repetició.

Assaig	$I_{cc,max}$ (kA)	t_{cc} (ms)	S (mm ²)	m (mg)
a	0,49	1,2	34	4,6
b	2,82	5,5	1350	182
c	3,91	2,5	613	82,7

Taula 2.4 Estimació de la quantitat d'alumini ejectat amb la configuració E.

2.2.4.3.3 Descripció de l'estat del panell i dels elèctrodes després dels assajos

Es presenta un recull de mostres procedents de repeticions dels experiments descrits a la Fig.2.26.



a: Anàlisi termogràfic dels elèctrodes un cop finalitzat un assaig amb la configuració D. **b:** Elèctrode de coure rígid i superfície del panell un cop finalitzat un assaig amb la configuració D. **c:** Superfície del panell un cop finalitzat un assaig amb la configuració E (corrent de curtcircuit de cresta fort, ≈ 4 kA, sense flama). **d:** Superfície del panell un cop finalitzat un assaig amb la configuració E (corrent de curtcircuit de cresta fort, ≈ 3 kA, s'estableix flama sobre el panell). **e:** Superfície del panell un cop finalitzat un assaig amb la configuració E (petit corrent de curtcircuit de cresta ≈ 300 A). **f:** Partícules i cendres d'alumini, procedents de la pluja d'espumes, dipositades sobre el panell després de l'assaig.

Fig.2.26 Mostres dels elèctrodes i de la superfície del panell després dels experiments. (A.f. Martí, M.).

A la imatge (a) es mostra una anàlisi termogràfica dels elèctrodes un cop finalitzat un assaig amb la configuració D. La temperatura màxima dels elèctrodes, en condicions de corrents de curtcircuit i temps més elevats, es troba en un rang de l'ordre de 80-100°C (en funció de la repetició). Permet observar la superfície del panell afectada. Es troba a una temperatura superior que la làmina d'alumini que es manté inalterada. La superfície del panell acostuma a presentar una temperatura de l'ordre de 40-60°C. A la imatge (b) es mostra l'aspecte d'un elèctrode de coure rígid i la superfície del panell, un cop finalitzat un assaig amb aquesta configuració. S'observa que la superfície afectada es troba principalment en la perifèria de l'elèctrode.

A les imatges (c), (d) i (e) es mostra la superfície del panell, un cop finalitzats assajos amb la configuració E. S'observen diferents graus d'afectació. La zona afectada augmenta amb el corrent i temps de curtcircuit. Es relaciona amb la diferent quantitat de partícules d'alumini ejectades en cada cas. La imatge (d) correspon a un experiment en el que s'ha produït una flama sobre el panell (com s'ha il·lustrat a la Fig.2.23). S'observa algun fragment de la capa de paper que hi ha sota la làmina d'alumini, i la llana (sota la malla), amb aspecte carbonitzat. També es visible una marca que senyala el camí que el conductor ha seguit al desplaçar-se (senyalat per la fletxa). En canvi a la imatge (c), s'observa que tot i que ha estat ejectada una superfície significativa de material, el paper que hi ha sota la làmina d'alumini es manté pràcticament intacte. En aquest cas no s'ha generat una flama sobre el panell. S'ha observat que quan el conductor tendeix a elevar-se més ràpid i allunyar-se del panell es produeix aquest efecte.

A la imatge (f) es mostren partícules i cendres d'alumini, procedents de la pluja d'espurnes i partícules calentes. Presenten longituds en un rang de l'ordre de 0,1-4mm i formes diverses. Algunes són fragments de làmina d'alumini que han estat arrancats durant l'explosió. No obstant, la majoria són restes d'espurnes d'alumini en combustió. Acostumen a manifestar-se en forma de volva o de pols atomitzada.

2.2.5 Síntesi dels efectes observats i propostes per prevenir-los

S'ha posat de manifest que una circulació de corrent fort de duració breu (subtransitori) amb arc elèctric de separació, en els nivells de BT convencionals, entre elèctrodes de coure i conductes amb una superfície d'alumini, dóna lloc a l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes. Es produeix una pluja de partícules d'alumini que volen a una temperatura molt elevada durant segons. Poden impactar contra superfícies o el terra i mantenir-se un cert temps en combustió, incandescents o calentes. En el cas de circulació forçada d'aire la projecció espacial augmenta. El fenomen podria ser més virulent si l'aire impulsat són fums calents.

Si les partícules entren en contacte amb materials fàcilment inflamables, poden comportar un risc d'ignició d'origen elèctric i esdevenir focus d'incendi o actuar com a propagadores o acceleradores del mateix. L'efecte del confinament pot incrementar els riscos. En el cas de panells recoberts d'alumini utilitzats en la fabricació de conductes d'aire condicionat, s'ha observat que, en alguns casos, pot produir-se una flama de petites dimensions que afecta al paper i l'aïllament que es troba sota la làmina d'alumini. Tot i que s'extingeix espontàniament en pocs segons, podria augmentar el

risc d'incendi associat a l'ejecció d'espurnes, en presència de combustibles. Existeixen panells incombustibles que poden mitigar aquest efecte.

La probabilitat que es produeixi aquesta casuística en condicions normals no sembla alta, sempre que els conductors elèctrics discorrin per l'interior de canalitzacions aïllants i les connexions es realitzin a l'interior de caixes de derivació. Darrerament ha proliferat el sistema de construcció amb falsos sostres, realitzats amb plaques de cartró guix. És habitual en edificis de pública concurrència i d'oficines; i comença a ser-ho en els habitatges. Es genera un espai confinat, en el que conviuen instal·lacions de diversos tipus. Les unitats interiors i els conductes de sistemes de ventilació i aire condicionat, acostumen a instal·lar-se en aquests espais. Si l'estesa de conductors d'alimentació del sistema de climatització, o altres línies de l'edifici, és realitza directament sobre aquests conductes, o bé en la seva perifèria, el risc de contacte entre el conductor i el conducte de ventilació augmenta (p.e. si l'aïllament del cable es deteriora amb el temps o es defectuós). Si a més existeixen connexions realitzades fóra de caixes, el risc augmenta encara més.

En cas d'incendi, es pot produir una destrucció de les canalitzacions de plàstic dels cables, o de les seves fixacions; i una pèrdua de les propietats aïllants del cable per l'acció de les flames. Si els conductors entren en contacte amb els conductes, pot produir-se una pluja d'espurnes que pot generar focus d'incendi secundaris, contribuir a elevar la temperatura i a propagar o accelerar l'incendi. El desplaçament de l'arc per l'espai ionitzat per l'incendi també pot contribuir-hi.

Una reglamentació o ordenances que prohibeixin explícitament l'estesa de conductors sobre els conductes de ventilació i aire condicionat amb superfície d'alumini, ajudarien a reduir aquests riscos i augmentar la seguretat. L'increment de les distàncies mínimes associades als paral·lelismes i creuaments, entre conductors elèctrics i aquest tipus de conductes, també podria contribuir-hi.

S'ha observat que la limitació del corrent i el temps de curtcircuit, limiten els efectes destructius i l'ejecció d'espurnes. Un dimensionament adequat i un correcte manteniment de les proteccions elèctriques ajuda a prevenir els efectes observats.

A nivell constructiu, es podria suggerir que quan les canalitzacions fossin de materials plàstics es muntés una cinta metàl·lica a la seva perifèria exterior, col·locada en llocs estratègics i connectada a terra. Provocaria el disparar de les proteccions diferencials quan els conductors hi entressin en contacte, abans del seu contacte amb els conductes d'alumini. No representaria un increment de costos elevat. En el cas de canalitzacions metàl·liques, una correcta connexió a terra de les mateixes (mantenint la continuïtat en les unions mecàniques entre diferents trams de la canalització) tindria el mateix efecte. D'altra banda, el recobriments amb material aïllant de la superfície exterior dels conductes impediria, en moltes situacions, que es pogués produir un contacte accidental i l'ejecció d'espurnes. Per exemple les làmines de polietilè poden ser usades com a barrera de vapor.

La formació dels instal·ladors és un altre aspecte a tenir en compte. Si tenen coneixement dels defectes que poden produir-se i de les seves conseqüències, és més probable que ho tinguin en consideració i incrementin les precaucions a l'hora d'executar les instal·lacions (especialment quan treballen en espais que no són visibles o fàcilment registrables).