Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile
CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO
Direzione Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Gli incendi di natura elettrica

a cura del
NUCLEO INVESTIGATIVO ANTINCENDI
Capannelle – ROMA

CORPO NAZIONALE VIGILI DEL FUOCO
NIA
NUCLEO INVESTIGATIVO ANTINCENDI
MELIOR DE CINERE SURGO

SETTEMBRE 2017

Stampa a cura dell'Ufficio di Pianificazione, Controllo e Sviluppo della Formazione
Servizio Documentazione Centrale

Gli incendi di "natura elettrica" rappresentano una categoria d'interventi molto frequenti nell'ambito dell'attività di soccorso tecnico svolta dai Vigili del Fuoco.

Infatti, le nostre abitazioni, come i posti di lavoro o di intrattenimento sono attualmente caratterizzati da una notevole presenza di apparecchi elettrici ed elettronici.

L'utilizzo quotidiano dell'energia elettrica e la consolidata confidenza con tutte le apparecchiature talvolta portano a sottovalutare la possibilità che essa possa essere causa o effetto di un incidente.

La presente pubblicazione è stata elaborata al fine di fornire utili elementi per l'interpretazione dei segni di danno termico prodotti da incendi di "natura elettrica", attraverso cui poter risalire all'individuazione della zona d'origine dell'evento nonché alla determinazione della causa mediante una rigorosa indagine condotta con metodo scientifico.

Il documento si avvale sia della raccolta di un'ampia documentazione inerente l'investigazione sugli incendi di "natura elettrica" sia dei risultati di una serie di prove sperimentali condotte dal Nucleo Investigativo Antincendi mirate allo studio della dinamica di un incendio di "natura elettrica" e alla caratterizzazione dei segni di danno termico che ne possono derivare.

La pubblicazione è stata curata dall'ing. Michele Mazzaro, Dirigente del N.I.A., che si è avvalso del supporto e dell'esperienza investigativa del personale del Nucleo Investigativo Antincendi e di personale esperto del Corpo.

Ing. Tolomeo LITTERIO
Direttore Centrale per la Prevenzione
e la Sicurezza Tecnica

Sommario

Introduzione **2**
1. STATISTICHE **3**
2. FENOMENOLOGIA DEGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA **9**
2.1 Gli incendi di natura elettrica 9
2.2 Anomalie di funzionamento e guasti elettrici 10
2.2.1 Avarie, difetti, meccanismi e modi di guasto 10
2.2.1.1 Guasti di isolamento 12
2.2.1.2 Guasti ai terminali di collegamento 15
2.2.1.3 Guasti ai conduttori 21
2.2.2 Fenomeni elettrici associati agli eventi di guasto 22
2.2.2.1 Sovratensioni 23
2.2.2.2 Sovracorrenti (sovraccarico e cortocircuito) 24
2.2.2.3 Correnti di guasto verso terra 30
2.2.2.4 Guasti d'arco 32
2.3 La fisica del trasferimento di calore dai guasti elettrici 34
2.3.1 L'effetto Joule 34
2.3.2 Scintille ed arco elettrico 36
2.4 Durata dei guasti ed energia totale rilasciata dai guasti 42
2.5 Mappa concettuale delle cause d'innesco 44
2.6 Importanza dei sistemi di protezione 50
3. METODOLOGIE INVESTIGATIVE SUGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA **54**
3.1 Importanza dell'indagine sull'incendio di natura elettrica 54
3.2 Metodi di indagine sull'incendio di natura elettrica 59
3.3 Esame degli apparecchi elettrici 63
3.4 Segni elettrici (Electrical Pattern) 64
3.4.1 Indicazioni di archi elettrici sui conduttori 64
3.4.2 Indicazioni di calore sui conduttori 64
3.4.3 Indicazioni di sovracorrrenti sui conduttori 65
3.5 Mappatura degli archi 66
3.6 La metodologia della mappatura degli archi utilizzata dopo un incendio di prova 68
3.7 Osservazione delle perlinature 69
3.8 Spettroscopia e spettrometria 72
3.9 AES, ESCA e SIMS 73
3.10 Metallografia 74
3.11 Raggi X 81
4. SEGNI ELETTRICI (Electrical Patterns) **82**
5. CASI REALI: ESEMPI DI INDAGINI SVOLTE DAL NIA **91**
5.1 Incendio di un appartamento non generato da cause elettriche 91
5.2 Incendio di un appartamento provocato da un frigorifero 98
5.3 Incendio in un istituto scolastico 101
6. PROVE SPERIMENTALI ESEGUITE DAL PERSONALE DEL NIA **107**
6.1 Il surriscaldamento di una spina a causa di un cattivo contatto 107
6.2 Individuazione di un'anomalia su un interruttore di comando luce 114
6.3 L'utilizzo della termocamera per rilevare anomalie e surriscaldamenti dovuti ad Effetto Joule 116
6.4 Individuazione di un'anomalia sull'interruttore di un quadro elettrico 117
6.5 Individuazione di un'anomalia su un pannello fotovoltaico 118
6.6 Lampade alogene e rischio incendi 119
6.7 Incendio di una multipresa 122
7. BIBLIOGRAFIA (non esaustiva) **127**

Introduzione

Nel corso degli ultimi trenta anni, le nostre abitazioni, come i posti di lavoro o di intrattenimento, sono stati drasticamente trasformati dalla presenza di apparecchi elettrici. Televisori, frigoriferi, forni a microonde, macchine da caffè, lavastoviglie, aspirapolvere, phon, rasoi, computers, stampanti laser e moltissimi altri utilizzatori elettrici rappresentano, ormai, i simboli del progresso e del benessere dell'uomo.

L'utilizzo quotidiano dell'energia elettrica, per via della sua scontata e necessaria presenza, viene spesso sottovalutata come causa o effetto di un incidente. La corrente elettrica può essere molto pericolosa, specialmente in un ambiente dove è facile andare incontro ad errori, spesso anche banali, ma che possono portare a conseguenze molto gravi per la sicurezza nostra e di chi ci sta attorno.

L'elettricità infatti non può essere percepita direttamente, ma è possibile osservarne alcuni effetti come ad esempio: il calore (ferri da stiro, forni, stufe, phon, saldatrici, scaldabagni, lampade ad incandescenza), il magnetismo (motori elettrici, elettrocalamite) o la luminosità (led, lampade a scarica o ad induzione), ecc..

La diretta percezione dell'elettricità è legata soltanto ai sui effetti fisiopatologici derivanti da un contatto accidentale (diretto o indiretto) con parti in tensione, che può determinare il passaggio di una corrente attraverso il corpo umano e che vanno dal lieve fastidio a danni anche mortali, oppure effetti d'arco che possono determinare anche ustioni.

L'elettricità mentre si muove nel circuito elettrico, o comunque attraverso un qualsiasi materiale conduttivo, determina sempre un fisiologico sviluppo di calore che, oltre a rappresentare una perdita di energia, provoca un aumento di temperatura dei componenti. Negli apparecchi termici, quali ad esempio i forni, le stufe, gli scaldabagni elettrici questo è un effetto desiderato che ne consente il funzionamento ma che, d'altra parte, sollecita soprattutto gli isolanti e può causarne il danneggiamento graduale o, nei casi più gravi, la distruzione completa, con possibile innesco di incendi.

La causa degli incendi di "natura elettrica", pertanto, ha spesso origine all'interno del sistema considerato ed è associata ad un qualche tipo di guasto elettrico o malfunzionamento che produce la perdita di alcune caratteristiche o funzioni del sistema. Questo tipo di incendi sono in genere considerati accidentali, anche se possono verificarsi incendi dovuti a eventi naturali (fulmini) e di natura dolosa (mediante manomissione di impianti e apparecchi).

1. STATISTICHE

Anche se il margine di incertezza resta comunque ampio a causa della modalità e dei tempi di raccolta delle informazioni, le statistiche relative alla ricerca delle cause d'incendio possono dare un'idea dell'entità del fenomeno degli incendi dovuti a cause elettriche.
D'altra parte occorre evidenziare che le statistiche disponibili in Italia sugli infortuni elettrici e sulle cause elettriche d'incendio, oltre ad essere poche, non si basano su dati raccolti in maniera coerente da un unico organismo; la situazione non è molto differente per gli studi disponibili condotti all'estero: di vario genere ed eseguiti su basi differenti e quindi molto disomogenei fra loro.
Tuttavia, gli elementi che la letteratura mette a disposizione sono però sufficienti per concludere che, fra le cause accertate d'incendio, quella elettrica ha un peso notevole.

In Italia si verificano, in media, tra i 30 000 e i 50000 incendi all'anno negli edifici civili.

Secondo uno studio condotto su 500 «incendi di grande rilevanza» accaduti in dieci anni (CNVVF - Laboratorio di Elettrotecnica del Centro Studi ed Esperienze - decennio 1990-1999) le percentuali di quelli di origine elettrica, distinte per attività, sono:

- locali commerciali e scuole: 14%
- locali di pubblico spettacolo: 14%
- strutture alberghiere: 18%
- case di riposo: 34%.

Uno studio condotto dal Comando provinciale dei Vigili del Fuoco di Torino nel 1986 ha attribuito la causa elettrica a 274 casi su 1019, corrispondenti al 27%. Da questi dati si può ragionevolmente assumere che in Italia tra il 10% e il 20% degli incendi sono di origine elettrica.

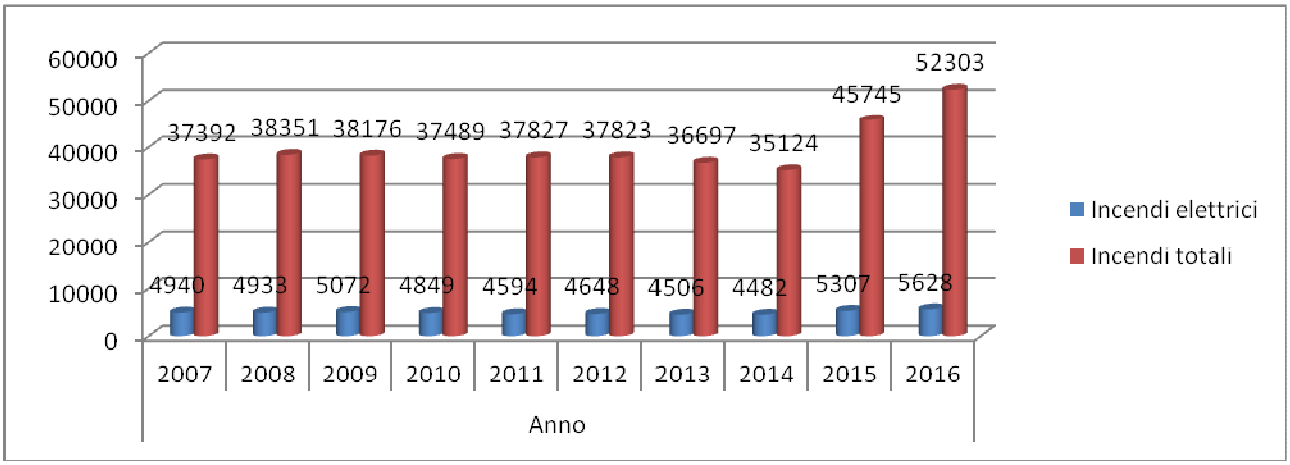
I risultati relativi a 76 casi dei 274 di cui allo studio indicato, indagati tempestivamente dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica del Politecnico di Torino, su permesso della Procura di Torino, ancorché poco significativi dal punto di vista statistico per l'esiguità dei dati, sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 1.B - Percentuale di incendi provocati da componenti elettrici (Italia: 76 incendi di origine elettrica).

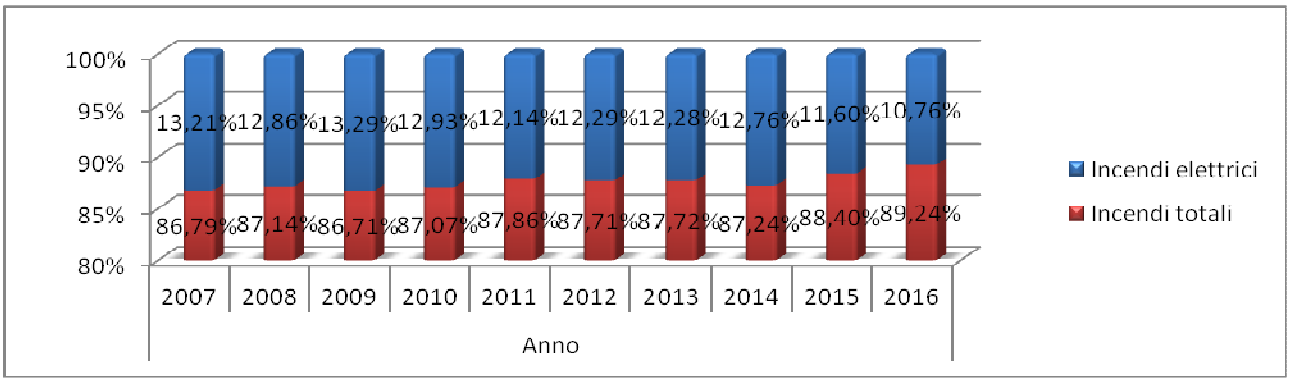
Componenti elettrici	*Numero incendi elettrici*	*Percentuale (%)*
Televisori	16	21
Condutture elettriche	14	18
Quadri elettrici	6	8
Apparecchi d'illuminazione	5	6,5
Lavastoviglie/lavabiancheria	4	5,4
Prese a spina	4	5,4
Contatori elettrici	4	5,4
Frigoriferi/congelatori	4	5,4
Caricabatterie	2	2,6
Interruttori	2	2,6
Aspiratori	2	2,6
Condizionatori	1	1,3
Coperte riscaldanti	1	1,3
Forni elettrici	1	1,3
Insegne luminose	1	1,3
Relè passo-passo	1	1,3
Stufe elettriche	1	1,3
Zanzariere	1	1,3
Altro	6	8
Totale	*76*	*100*

Tratta da Gli incendi elettrici – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005

Una parziale conferma può essere desunta dalle statistiche effettuate su dati estratti da STAT-RI-WEB per gli anni 2007-2016.



Incendi elettrici e generici in abitazioni residenziali (estratti da STAT-RI-WEB)



Incendi elettrici e generici in abitazioni residenziali (estratti da STAT-RI-WEB)

Nel biennio 1994-95 TuttoNormel, in collaborazione con l'Istituto Italiano del Marchio di Qualità (IMQ), ha condotto uno studio sulle notizie giornalistiche relative agli incendi, pubblicato su TNE 2/97, secondo il quale su 1294 notizie di incendio pubblicate da giornali di tutta Italia il 40% era imputato a cause elettriche. La stessa indagine ha mostrato che la maggior frequenza di incendi di natura elettrica si ha negli edifici civili (38%); al secondo posto sono gli stabilimenti industriali (17%).

Luogo	Numero incendi elettrici	Percentuale (%)
Edifici civili	492	38
Stabilimenti industriali	220	17
Locali commerciali	117	9
Bar-ristoranti	77	6
Uffici	52	4
Locali medici	35	2,7
Strutture alberghiere	26	2
Laboratori artigianali	26	2
Ambienti agricoli	19	1,5
Scuole	19	1,5
Altro	211	16,3
TOTALE	1294	100

Ancora meno organiche sono le statistiche relative al tipo di componente elettrico causa d'incendio, sia in Italia sia all'estero, perché condotte su basi differenti o in settori troppo specifici. Le statistiche condotte all'estero indicano percentuali di incendi di origine elettrica negli edifici variabili fra il 21% della Russia, il 30% del Regno Unito e il 42% della Finlandia.

Tabella 1.D - Percentuale di incendi provocati da componenti elettrici (Stati Uniti d'America: 149 900 incendi di origine elettrica).

Componenti elettrici	*Numero incendi elettrici*	*Percentuale (%)*
Apparecchi per cucinare	56 962	38
Impianto elettrico	41 972	28
Apparecchi di riscaldamento	10 493	7
Condizionatori	4497	3
Altri apparecchi	20 986	14
Altro	14 990	10
Totale	*149 900*	*100*

Tratta da *Gli incendi elettrici* – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005

Tabella 1.F - Percentuale di incendi provocati da componenti elettrici (Russia: 60 168 incendi di origine elettrica).

Componenti elettrici	*Numero incendi elettrici*	*Percentuale (%)*
Condutture elettriche	35 259	58,6
Televisori	4032	6,7
Quadri elettrici	3008	5
Altro	17 869	29,7
Totale	*60 168*	*100*

Tratta da *Gli incendi elettrici* – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005

Tabella 2.A - Cause elettriche di incendio (su 2523 incendi di origine elettrica accaduti in Finlandia)

Causa elettrica d'incendio	*Numero incendi elettrici*	*Percentuale (%)*
Cortocircuito o guasto a terra	1892	75
Sovrariscaldamento	126	5
Cattivo contatto	76	3
Installazione impropria	25	1
Altri guasti elettrici	404	16
Totale	*2523*	*100*

Tratta da *Gli incendi elettrici* – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005

In generale, comunque, al di là dei riferimenti numerici, si coglie immediatamente una certa commistione e confusione nell'indicare come causa più probabile d'incendio componenti, fenomeni fisici, modi e meccanismi di guasto.

Tabella 2.B - Cause elettriche d'incendio (su 110 incendi di origine elettrica nelle abitazioni di dieci città degli Stati Uniti d'America).

Causa elettrica d'incendio	*Numero incendi elettrici*	*Percentuale (%)*
Circuiti principali e quadri elettrici	15	14
difetto di isolamento	5	
guasto a terra o sovraccarico	4	
danneggiamenti meccanici e sovratensioni	2	
sconosciuto	4	
Circuiti terminali	32	29
danno meccanico o installazione impropria	9	
cattivo contatto	8	
guasto a terra	4	
impiego di condutture improprie	3	
sovraccarichi	2	
sconosciuto	6	
Cavi flessibili e spine	28	25
danno meccanico o cattivo contatto	11	
sovraccarico del cavo flessibile	6	
sovraccarico della presa a spina	2	
presa danneggiata	2	
difetto d'isolamento, acqua, coperte elettriche	6	
sconosciuto	1	
Prese e cassette di derivazione	20	18
cattivo contatto	8	
danno meccanico	3	
sovraccarico	2	
collegamento improprio, spina inserita male	3	
sconosciuto	4	
Apparecchi d'illuminazione	14	13
cattivo contatto, collegamento improprio	5	
danno meccanico	3	
sovracorrente	2	
lampada di potenza eccessiva	3	
difetto d'isolamento	1	
Trasformatore a bassissima tensione	1	1
Totale	*110*	*100*

Tratta da *Gli incendi elettrici* – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005 in riferimento a NBSIR 83-2803 - *Analysis of Electrical Fire Investigations In Ten Cities* - John R. Hall, Jr., Richard Bukowski and Alan Gomberg - U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, National Bureau of Standards, National Engineering Laboratory, Center for Fire Research, Washington, DC 20234, Decmber 1983, Final Report

2. FENOMENOLOGIA DEGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA

2.1 Gli incendi di natura elettrica

Con pochissime eccezioni, ogni scenario d'incendio contiene elementi di prova, riconducibili, in qualche modo, alla presenza di una qualche "attività elettrica" che devono attentamente essere esaminati affinché possano essere confermati o esclusi come causa di incendio. Quella dell' "attività elettrica" è una locuzione utilizzata comunemente dagli investigatori quando ci si riferisce a guasti o malfunzionamenti associati ai sistemi elettrici. Il termine è per sua natura generico e può riferirsi sia ad una causa che al suo effetto. Gli incendi talvolta sono erroneamente attribuiti ad una fonte elettrica semplicemente a causa della presenza, sul luogo individuato come il punto di origine, di attrezzature, conduttori o dispositivi elettrici danneggiati.

Da queste considerazioni scaturiscono alcune problematiche relative alla confusione che si può generare rispetto alla possibilità di identificare il coinvolgimento nell'incendio di una parte del sistema elettrico con la causa stessa che ha generato l'incendio stesso ipotizzandone, così, la natura elettrica.

La dicitura "natura elettrica" merita quindi alcuni chiarimenti. Questa non sta ad indicare semplicemente un incendio originato da un dispositivo alimentato da energia elettrica. Se così fosse, allora, un incendio causato dall'accensione di abiti posizionati troppo vicino a un apparecchio radiante elettrico o, parimenti, l'incendio di una friggitrice, causato dal surriscaldamento dell'olio di cottura sul piano di cottura elettrico, potrebbero essere classificati come natura elettrica. La "natura elettrica" di un incendio è invece definita dal coinvolgimento diretto di un flusso di corrente elettrica, spesso causato da guasti elettrici o malfunzionamenti all'interno del sistema, ma non esclusivamente, che produce la perdita di alcune caratteristiche e/o funzioni del sistema o dalla presenza di elettricità statica.

Affinché si verifichi un incendio è necessario che coesistano, nello stesso luogo e istante, il combustibile, il comburente e una sorgente di ignizione di energia sufficiente ad iniziare la reazione di combustione. Tra le diverse possibili sorgenti di ignizione da prendere in considerazione, l'innesco associato a fenomeni elettrici è solo uno dei tanti che può garantire un innesco efficace (Competent Ignition Source).

In effetti, la definizione di "incendio di natura (o origine) elettrica", e ancor più quella di "incendio elettrico" mutuata dal mondo anglosassone, è alquanto impropria e qualche volta addirittura fuorviante.

La terminologia che dovrebbe essere correttamente utilizzata è quella di "**incendio innescato da fenomeni termici associati all'energia elettrica**".

Ai fini dell'individuazione delle sorgenti di pericolo che potrebbero generare le condizioni per l'innesco elettrico di un incendio, i sistemi per utilizzare l'energia elettrica possono essere classificati in:

- **impianti elettrici utilizzatori** (insieme di tutti i circuiti di alimentazione, comprendenti cavi ed apparecchiature di manovra, sezionamento, interruzione, protezione, ecc., tra il punto di consegna e le prese a spina, incluse, o i morsetti di alimentazione, esclusi, degli apparecchi fissi)
- **apparecchi elettrici utilizzatori** (qualunque tipo di apparecchio utilizzatore alimentato elettricamente compresi il cavo e la spina di alimentazione dedicati, forniti dal costruttore)
- **organi di collegamento mobile** (o "dispositivi per connessioni elettriche temporanee", dispositivi che, pur non facendo parte né dell'impianto elettrico, né degli apparecchi elettrici utilizzatori, consentono di effettuare il collegamento elettrico dell'uno agli altri, come ad esempio le prolunghe, le prese multiple - "ciabatte", gli adattatori, ecc.).

Guasti o malfunzionamenti elettrici sono quindi precursori degli incendi di natura elettrica. L'esame delle anomalie di funzionamento e degli eventi di guasto può essere affrontato in diversi modi:

- individuare l'atto o l'omissione che porta al fallimento dei dispositivi di protezione;
- la classificazione degli eventi di guasto in base alla natura funzionale del dispositivo o alla parte di esso che ha fallito;
- lo studio della fisica di base degli eventi di guasto.

2.2 Anomalie di funzionamento e guasti elettrici

2.2.1 Avarie, difetti, meccanismi e modi di guasto

Il termine incendio di natura elettrica prende in considerazione quei casi in cui avarie dei componenti/apparecchiature elettrici portano a fenomeni di surriscaldamento e/o d'arco elettrico, seguiti dall'accensione e dalla combustione del materiale isolante negli impianti,

apparecchiature e organi di collegamento mobili stessi e talvolta anche di materiale combustibile nell'ambiente che li ospita.

Il termine guasto o malfunzionamento comprende quei casi in cui il sistema elettrico non riesce a svolgere la propria normale funzione a causa di una qualche avaria di un componente o di un'apparecchiatura.

Il termine «difetto» si riferisce alla causa prossima o immediatamente precedente di un guasto. Questo può essere sotto forma di una condizione fisica visibile o misurabile.

Il termine "modalità di guasto" considera le modifiche visibili o misurabili delle proprietà o dell'aspetto del componente che cede per primo durante il processo che precede un guasto del componente d'impianto o dell'apparecchiatura. Non comprende le osservazioni sui componenti adiacenti danneggiati a seguito del primo guasto.

Il significato è piuttosto diverso quando si parla di un "meccanismo di guasto". In questo contesto, il termine "meccanismo" si riferisce ad un processo fisico o chimico interno che termina in un guasto del materiale, del componente o dell'apparecchiatura. Ad esempio, un certo tipo di guasto può comportare fenomeni fisici come l'ossidazione o l'effetto di riscaldamento della corrente elettrica. In generale, esistono diversi meccanismi di guasto che corrispondono a diversi possibili difetti che si concludono nella stesso modo di guasto.

In ogni evento di guasto esiste una certa sequenza di processi invisibili che possono essere fisici o chimici, il cui punto finale è il fallimento così come lo vediamo. Solo una volta determinata e compresa la sequenza dei processi o il vero meccanismo di guasto sarà possibile determinare la causa effettiva dell'evento.

Gli incendi di natura elettrica partono da componenti/apparecchiature del sistema elettrico dovuti a difetti nella progettazione, fabbricazione, installazione o manutenzione degli stessi.

Escludendo per il momento i fulmini e le scariche elettrostatiche, le cause di incendi di natura elettrica si riducono sostanzialmente a quattro. Per analizzare completamente il problema è auspicabile distinguere chiaramente tra questi quattro possibili modi di guasto dovuti a diverse classi di difetti nelle installazioni elettriche:

- sovraccarico,
- guasti di isolamento (difetti o deterioramento),
- guasti ai terminali di collegamento (collegamenti inadeguati o allentati, deterioramento della pressione di contatto),
- guasti ai conduttori (rotti o danneggiati - sezione ridotta).

Sebbene il sovraccarico non possa definirsi propriamente come un difetto ma, più correttamente, come una condizione anomala di funzionamento in quanto si verifica in un circuito elettricamente sano che può portare, nel tempo, a cortocircuiti e dispersioni, esso è di solito il risultato di un sistema difettoso di progettazione o di aggiunte impreviste o non autorizzate alle installazioni. A volte, tuttavia, il sovraccarico delle macchine elettriche può verificarsi a causa di difetti nei macchinari azionati, quali pompe o altre macchine.

2.2.1.1 Guasti di isolamento

I guasti di isolamento sono generalmente dovuti al degrado dell'isolamento, sia come conseguenza del normale invecchiamento, sia come conseguenza di alcuni difetti di progettazione, produzione, manutenzione o utilizzo. Mentre i metalli possono mantenere le loro proprietà meccaniche quasi indefinitamente, pochissimi materiali isolanti sono immuni rispetto a tale tipo di degrado e non esiste un metodo assolutamente affidabile e pratico per monitorare, continuamente, le condizioni dell'isolamento. Inoltre, i materiali isolanti sono facilmente danneggiati a causa di abrasioni, effetti ambientali, danni meccanici, surriscaldamento e attacchi di roditori.

I materiali che costituiscono la gran parte dei componenti dei sistemi elettrici sono soggetti, a causa delle sollecitazioni applicate in servizio, a processi di degradazione progressiva che ne possono causare la rottura in tempi più o meno brevi. Tali processi sono particolarmente aggressivi nei confronti degli isolamenti detti non autoripristinanti (specialmente di tipo solido), che per tale motivo costituiscono quasi sempre il punto debole del sistema elettrico, tanto che nella gran parte dei casi i guasti sono associati a difetti (rotture) di isolamento dei componenti. Ciò significa che le sollecitazioni possono causare nel tempo la perdita della caratteristica primaria dell'isolamento: la capacità di tenuta alla tensione applicata.

La rottura di un isolamento soggetto a tensione consiste nella "scarica dell'isolamento" cioè in un fenomeno irreversibile. La scarica si manifesta pressoché istantaneamente, se le sollecitazioni applicate superano certi livelli critici. Più spesso essa è conseguenza di un processo più o meno lungo, detto invecchiamento, consistente in una progressiva ed irreversibile degradazione dell'isolamento, provocata dalle sollecitazioni applicate. La velocità con cui l'invecchiamento procede aumenta al crescere del livello delle sollecitazioni di cui si riportano le principali tipologie:

- sollecitazione elettrica, causata dal campo elettrico applicato, quindi dalla tensione;

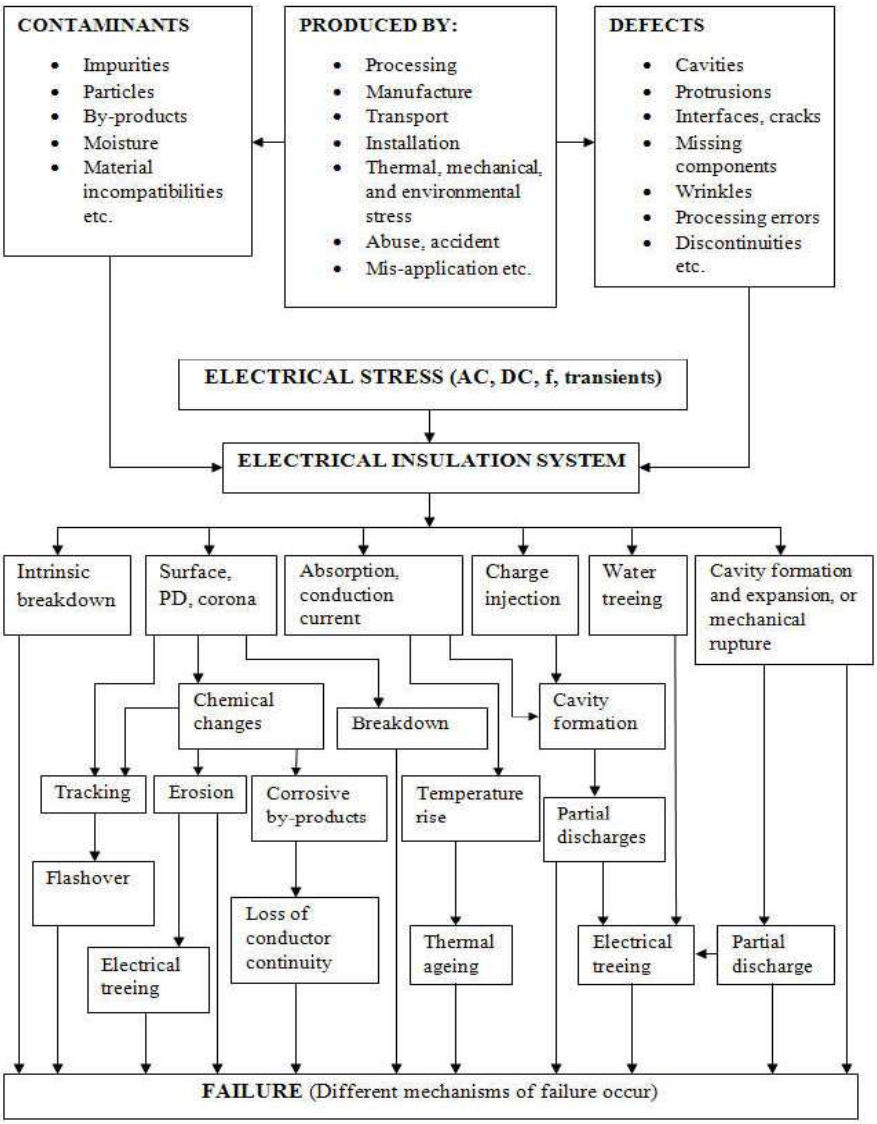
- sollecitazione termica, causata dalla temperatura;
- sollecitazione meccanica, di natura statica (trazione, flessione, compressione) o dinamica (vibrazione);
- sollecitazione ambientale (inquinamento, salsedine, umidità, radiazione solare e cosmica, corrosione).

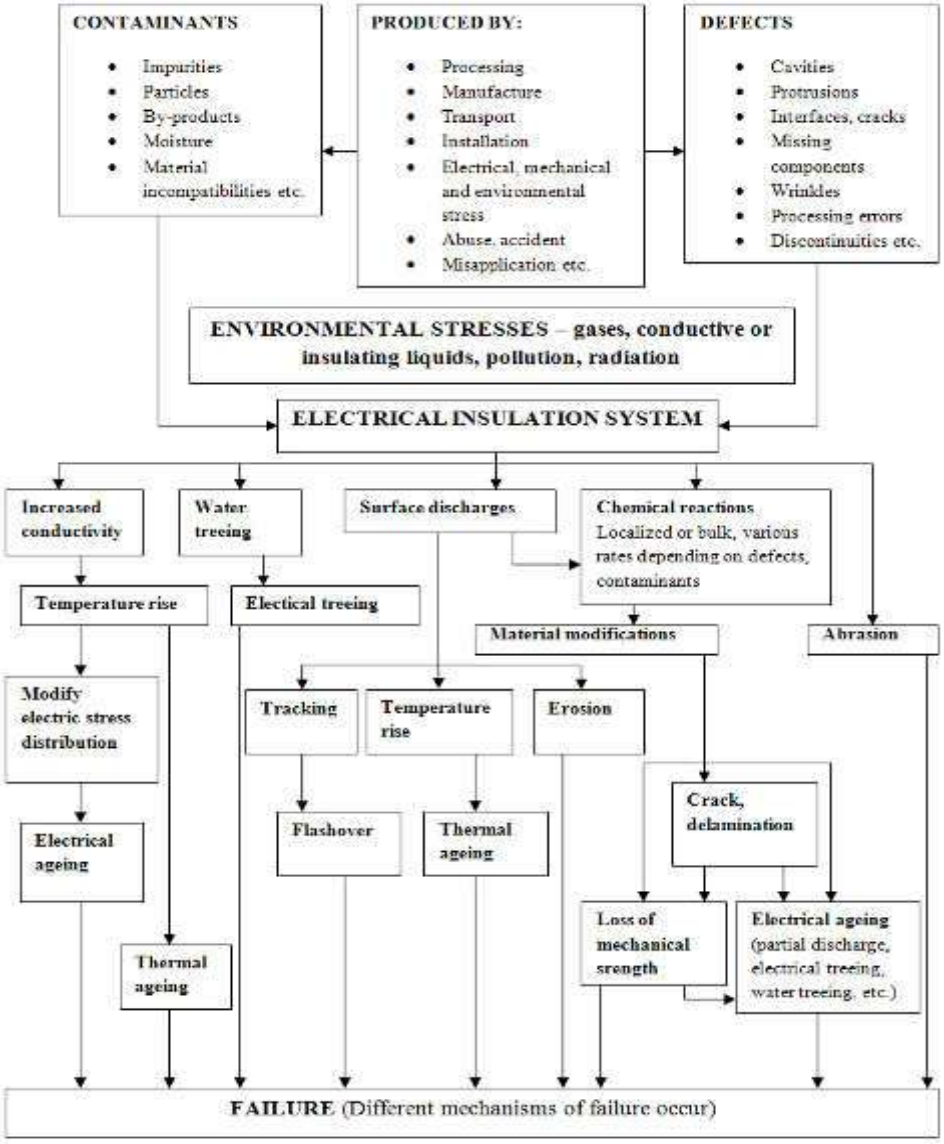
Le sollecitazioni elettriche e termiche sono in genere le più gravose, in quanto tensione e temperatura sono pressoché sempre applicate a tali componenti ed ai relativi isolamenti, i quali, se di tipo anche solo parzialmente organico, sono particolarmente sensibili ai processi degradativi innescati, in special modo, da sollecitazione elettrica e sollecitazione termica. Fra queste due, a loro volta, gli studi più recenti sottolineano che la sollecitazione più rilevante per gli isolamenti elettrici è in genere quella elettrica. Anche la sollecitazione meccanica (che si può manifestare come trazione, flessione, vibrazione, etc.) e l'inquinamento ambientale sono però in grado di degradare le proprietà dell'isolamento fino a portarlo (o a concorrere) alla rottura, specie in talune applicazioni. L'azione combinata di più sollecitazioni, presenti contemporaneamente, può portare ad effetti d'invecchiamento superiori a quelli che sarebbero causati dalle diverse sollecitazioni se applicate separatamente.

I meccanismi con cui la sollecitazione elettrica e termica degradano gli isolamenti provocandone l'invecchiamento sono assai complessi per quanto riguarda la sollecitazione termica e sono riconducibili, principalmente, a fenomeni di degradazione chimico-fisica (ossidazione) attivata dalla temperatura.

Le sollecitazioni elettriche e termiche collaborano nel processo di invecchiamento, poiché ad esempio il campo elettrico riduce significativamente l'energia di attivazione delle reazioni chimiche termicamente attivabili (favorendole), mentre la temperatura aumenta la disponibilità di cariche elettriche nell'isolamento, per favorire i suddetti processi di degradazione elettrica.

Per dare un'idea della complessità dei fenomeni si riportano le seguenti flow-chart tratte dalla pubblicazione EN 60505:2012 - Evaluation and qualification of electrical insulation systems:


CONTAMINANTS
Impurities
Particles
By-products
Moisture
Material incompatibilities etc.
PRODUCED BY:
Processing
Manufacture
Transport
Installation
Thermal, mechanical, and environmental stress
Abuse, accident
Mis-application etc.
DEFECTS
Cavities
Protrusions
Interfaces, cracks
Missing components
Wrinkles
Processing errors
Discontinuities etc.
ELECTRICAL STRESS (AC, DC, f, transients)
ELECTRICAL INSULATION SYSTEM
Intrinsic breakdown
Surface, PD, corona
Absorption, conduction current
Charge injection
Water treeing
Cavity formation and expansion, or mechanical rupture
Chemical changes
Breakdown
Cavity formation
Tracking
Erosion
Corrosive by-products
Temperature rise
Partial discharges
Flashover
Loss of conductor continuity
Thermal ageing
Electrical treeing
Partial discharge
Electrical treeing
FAILURE (Different mechanisms of failure occur)



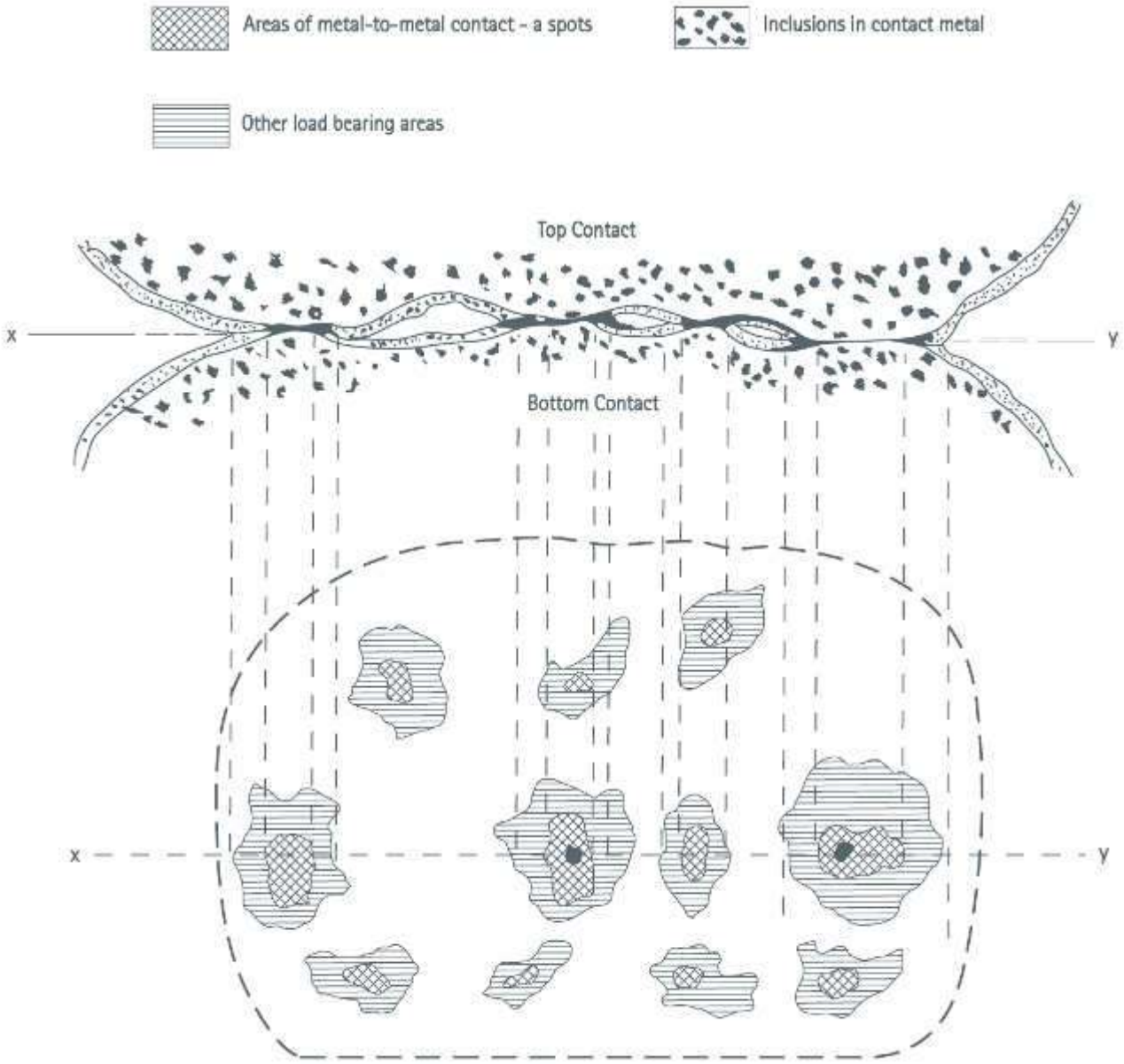
I guasti di isolamento possono essere minimizzati ma non completamente eliminati.

I difetti o il deterioramento dell'isolamento elettrico possono causare cortocircuiti e fenomeni d'arco continuo, seguito da accensione dei materiali isolanti combustibili. Le temperature dell'arco elettrico sono estremamente elevate e i materiali combustibili nelle vicinanze prendono fuoco a meno che l'arco si estingua entro una frazione di secondo.

2.2.1.2 Guasti ai terminali di collegamento

In quasi tutti i sistemi elettrici ci sono una serie di punti in cui la corrente elettrica viene fatta passare da un conduttore all'altro attraverso un semplice contatto diretto.

Su una scala microscopica, tutte le superfici, anche quelle apparentemente più lisce, rivelano una certa rugosità. Le asperità sono costituite da picchi e avvallamenti la cui dimensione e distribuzione dipendono dal processo produttivo.

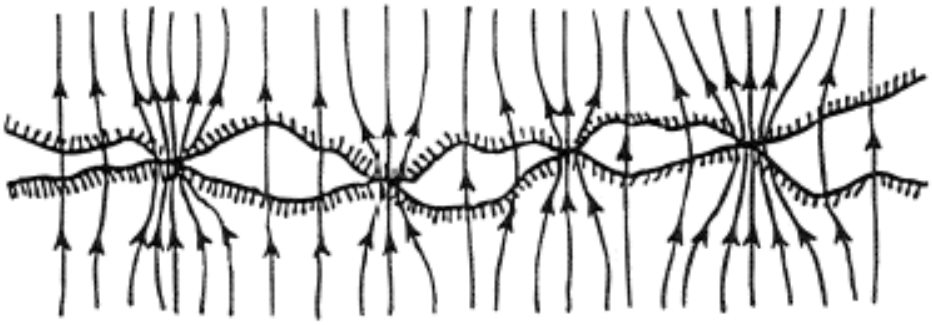


Sezione trasversale e piano di un contatto tipico - tratto da David Chapman - Copper in Electrical Contacts Copper Development Association Publication No 223 - European Copper Institute Publication No Cu0169 - July 2015

Quando due superfici vengono poste in contatto, il loro accoppiamento avverrà solo attraverso le asperità che si toccano e cioè con una serie di punti discreti. D'altra parte è anche probabile che la superficie di contatto sia interessata, in qualche misura, da fenomeni di ossidazione o altri contaminanti. Quando le superfici di contatto vengono

poste in contatto sotto pressione, la pellicola di ossido viene forata e le sommità delle superfici si deformano, risultando costituite da un gran numero di contatti di metallo-metallo di piccole dimensioni, noti come “a-spot”.

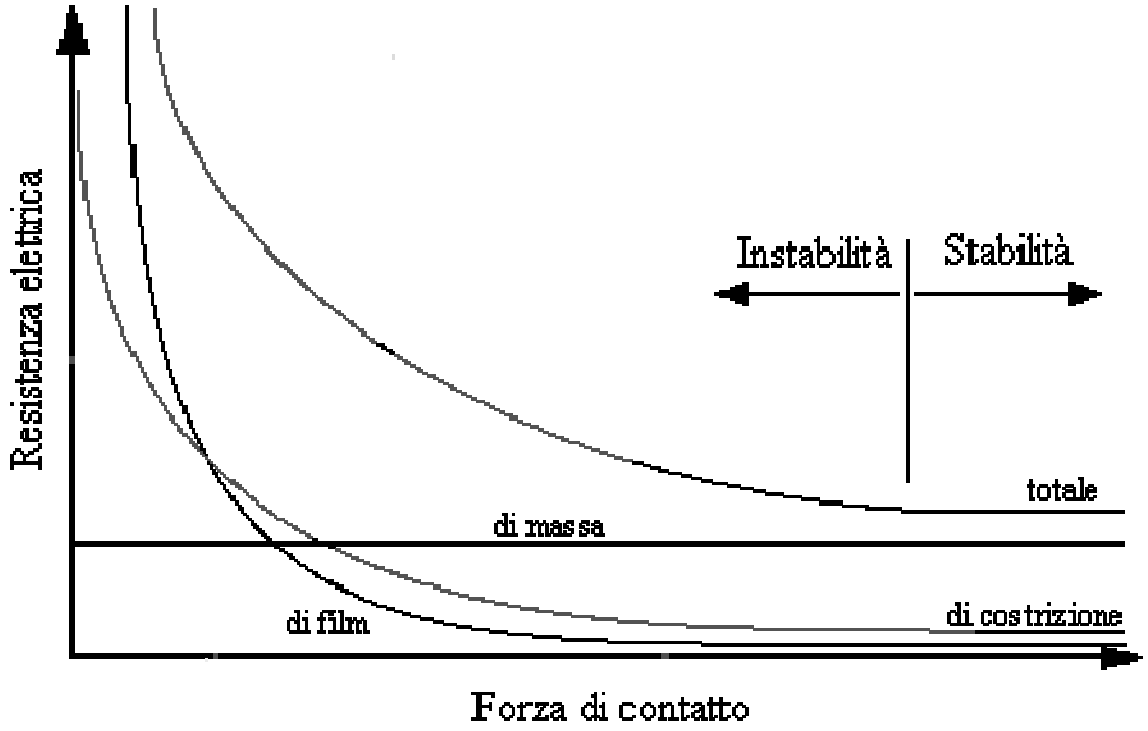
L'area effettiva di contatto elettrico è solo una piccola frazione, meno dell'1%, dell'area apparente della superficie di contatto in massa. Le linee di corrente elettrica sono distorte in quanto la corrente è concentrata per fluire attraverso le aree di contatto discrete, riducendo il volume di materiale coinvolto nella conduzione e aumentando così la resistenza.



Ciò è indicato come “resistenza di costrizione” dell'interfaccia. La presenza di eventuali contaminanti o ossidi aumenta ulteriormente la resistenza.

Quando la pressione aumenta, le superfici si avvicinano, creando un più alto numero di aree di contatto tra le asperità. L'insieme delle resistenze degli “a-spot” si comportano come se fossero in parallelo.

I contatti tra le asperità si formano, con più probabilità, “a grappoli” (cluster) poiché nelle vicinanze di un “a-spot” la distanza tra le due superfici è minore. Si pensi all'analogia con montagne e vallate: è più probabile che si abbiano più picchi di altezze simili in un gruppo montuoso che un unico picco emergente da una pianura. Quindi la resistenza di costrizione conterrà un altro termine che tiene conto delle distribuzione degli “a-spot” in un cluster (resistenza di macrocostrizione). Questo termine si comporta come una resistenza: infatti la corrente dapprima è costretta a deviare per fluire nell'area del cluster e poi qui è ulteriormente deviata per fluire nelle microaree degli “a-spot”.



Tratto da http://www.ing.unitn.it/~colombo/Connettori/CAPITOLI/Fisica%20del%20contatto.html

L'elevata resistenza di contatto (che implica un'alta caduta di tensione tra i contatti), detta "**resistenza localizzata**", porta ad un aumento della temperatura in un punto che limita la capacità di carico di corrente dei contatti. L'aumento della forza di contatto riduce la resistenza del contatto, ma la forza maggiore aumenta l'usura e implica la necessità di una costruzione più robusta che potrebbe non essere appropriata nell'applicazione (ad esempio un interruttore miniaturizzato che deve reagire in tempi brevissimi).

Il deterioramento di un connettore ben progettato procede lentamente, ad una velocità determinata dalla natura di una serie di processi diversi operanti nella zona di contatto e nell'ambiente. Questa fase iniziale persiste per molto tempo senza causare cambiamenti notevoli, tuttavia, quando la resistenza al contatto aumenta sufficientemente per aumentare la temperatura locale, si verificherà un deterioramento auto-accelerante, derivante dall'interazione dei processi termici, chimici, meccanici ed elettrici e la resistenza di contatto aumenterà bruscamente. Quindi, nessun peggioramento sarà osservabile fino alle fasi finali della vita del connettore.

I guasti dei contatti di pressione sono in gran parte dovuti al degrado della pressione meccanica di contatto a causa di un numero di fenomeni fisici come l'espansione/contrazione termica, lo scorrimento, il restringimento, l'usura, la deformazione

elastica e la vibrazione. Nella figura seguente si mostra la complessità del modo di guasto "surriscaldamento" e dei numerosi meccanismi di guasto coinvolti.

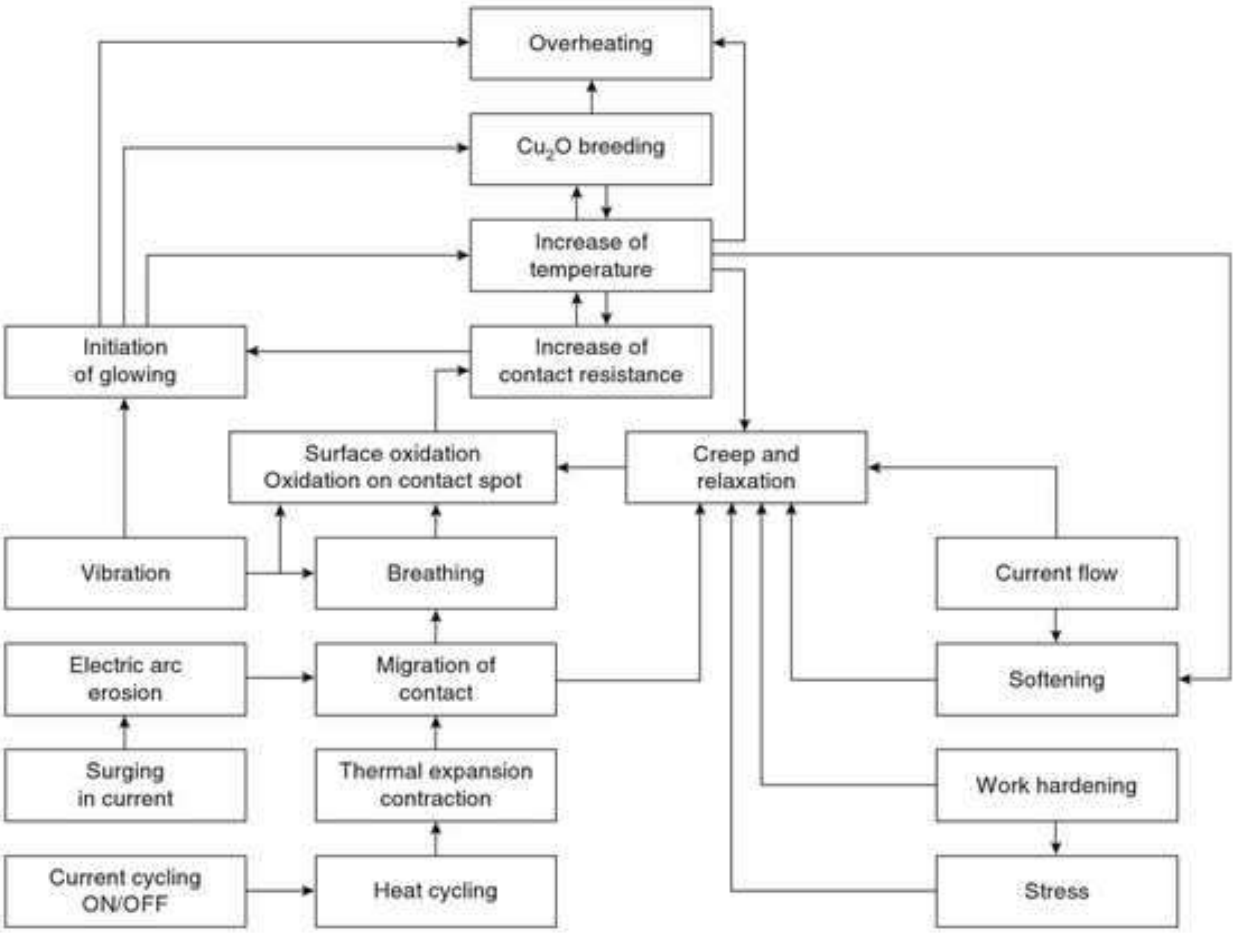
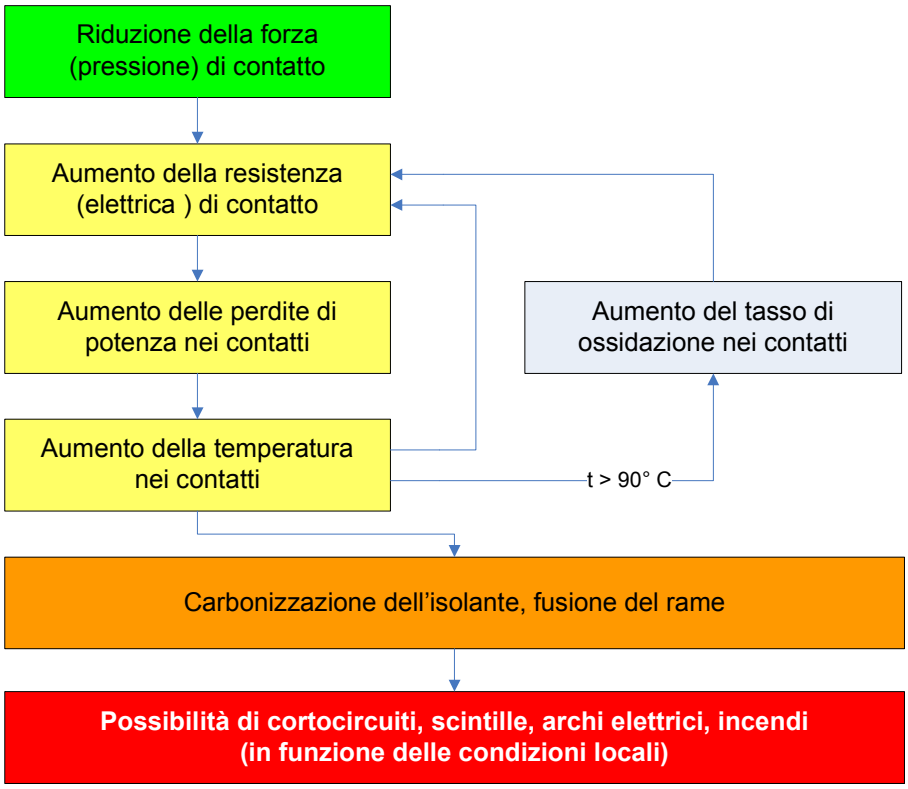


Fig. 22.12 Mechanisms for overheating at electrical connections, as outlined by Kuroyanagi et al [52] (From Ignition Handbook, used by permission)

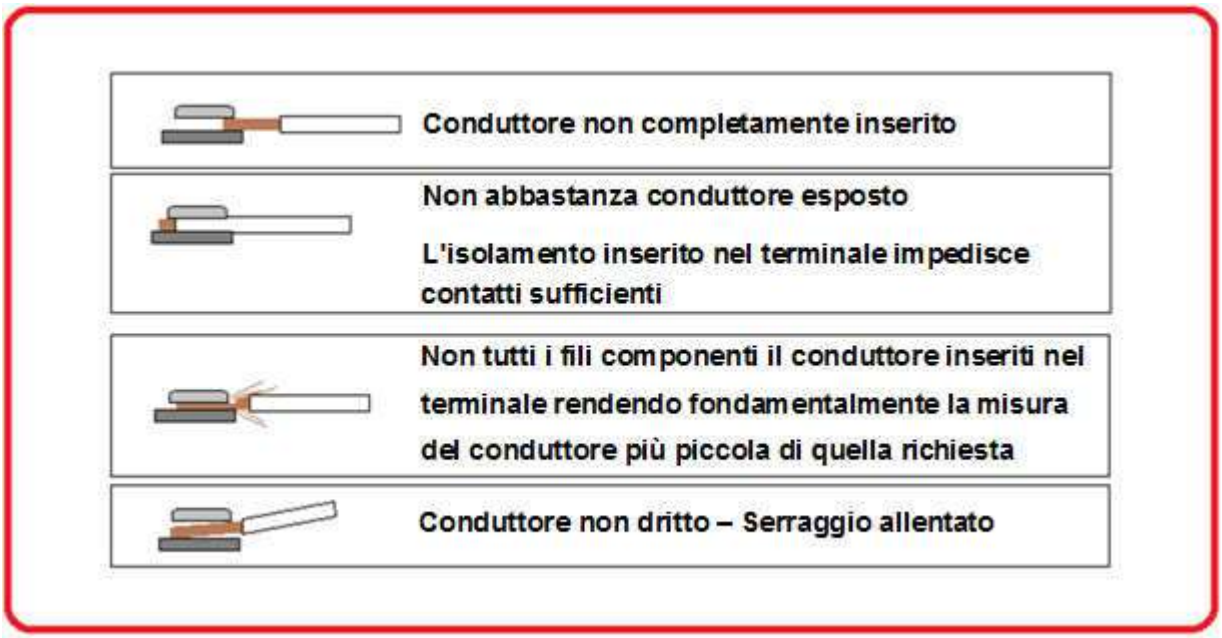
Tratto da: Vytenis Babrauskas, Chapter 22 - Electrical fires - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

Il deterioramento e il guasto dei contatti di pressione (**cattivi contatti**) tra vari componenti dell'installazione elettrica possono provocare scintille, surriscaldamento localizzato e incendio di materiale isolante combustibile.



Ciclo vizioso (semplificato) innescato dall'allentamento di un contatto

In questi casi inizialmente potrebbe non esserci alcun arco, ma il surriscaldamento è sufficiente per avviare un incendio. I corti circuiti e l'arco potrebbero verificarsi in seguito, ma non sarebbero la causa dell'incendio.



Esempi tipici di cattivi contatti

2.2.1.3 Guasti ai conduttori

Le rotture o i danneggiamenti dei conduttori sono generalmente dovuti a vibrazioni, a eccessive sollecitazioni meccaniche e talvolta a causa dell'uso di materiale qualitativamente al di sotto dello standard previsto.

Quando la sezione di un conduttore viene ridotta in un certo punto, come mostrato nella figura sottostante, la distribuzione della corrente viene modificata e le perdite elettriche locali sono notevolmente aumentate. La diminuzione della sezione utile genera un addensamento di corrente nel punto in cui il cavo è stato parzialmente tagliato dando origine ad una **resistenza localizzata** e ad una maggiore dissipazione di calore per effetto Joule. Tuttavia, a causa dell'alta conduttività termica di tutti i conduttori elettrici, il calore viene portato via dalla discontinuità e viene dissipato in ambiente per la lunghezza del conduttore su entrambi i lati della discontinuità. Nella maggior parte delle circostanze pratiche, l'aumento locale della temperatura è trascurabile.

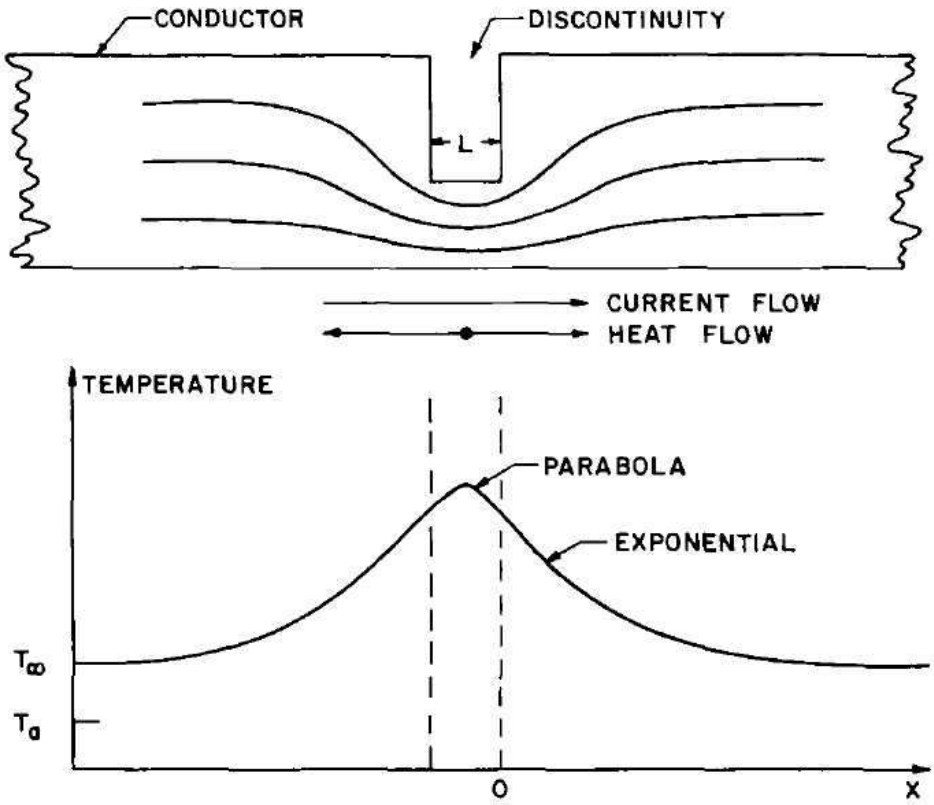
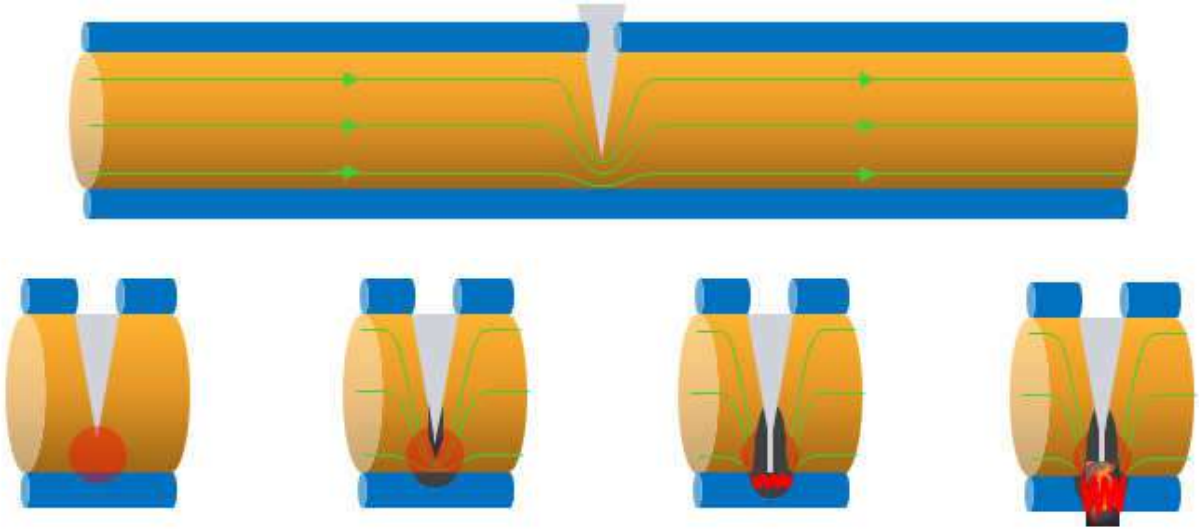


Figure 1. Discontinuity in a conductor and temperature distribution.

Tratto da: BERNARD BELAND, Heating of Damaged Conductors - Fire Technology

In condizioni particolari, quali un eccessivo isolamento termico o la presenza prolungata di correnti di consistente intensità, questo aumento di temperatura locale può provocare il surriscaldamento del rame che si ossida e, intorno ai 1250 °C, avvia il processo di fusione (solitamente in prossimità della corrente di picco). Questo comporterà la costituzione di un piccolo traferro in grado di formare l'arco elettrico. In corrispondenza del guasto, l'isolante avvierà un processo di carbonizzazione al termine del quale, in presenza di un arco stabilizzato, è possibile che si generino incendi.



Evoluzione del fenomeno Tratto da: AFDD – Arcing Fault Protection - Siemens

2.2.2 Fenomeni elettrici associati agli eventi di guasto

Indipendentemente dal sistema, dal meccanismo o dal problema, i guasti elettrici sono connessi ad una delle due grandezze elettriche, tensione e corrente, e al tempo associato.
In un sistema elettrico possono quindi verificarsi condizioni anomale di funzionamento o guasti. Le prime derivano da scostamenti temporanei di determinate grandezze (ad es. tensioni, correnti, frequenza, temperature) dai valori nominali. I secondi possono avere diversa natura, ad es. cedimento dell'isolamento, rottura di conduttori.
Quando il dispositivo, in esercizio, funziona con valori nominali (cioè assorbe la corrente nominale, a tensione e frequenza nominali) si dice che lo stesso sta funzionando in "condizioni nominali". Spesso il dispositivo elettrico assorbe una potenza inferiore a quella nominale ed anche la corrente sarà inferiore al suo valore nominale.
Quando un sistema elettrico non funziona rispettando le specifiche elettriche per le quali è stato progettato e il valore di tensione e/o di corrente è superiore al valore nominale, il

funzionamento del sistema è considerato anomalo. Se l'anomalia (di tensione e/o corrente e/o frequenza) è limitata nel tempo e in ampiezza, probabilmente è dovuta ad un semplice disturbo derivante dall'inserzione/distacco di un altro dispositivo o ad una interferenza momentanea (ad esempio quando si avvia una macchina asincrona trifase la corrente allo spunto è pari a 6-8 volte la corrente nominale). Se, invece, l'anomalia permane nel tempo e/o ha un'ampiezza di gran lunga superiore rispetto a quella nominale, allora si è in presenza di un guasto.

Ad alcune condizioni anomale di funzionamento, oppure ai guasti, sono associati sovratensioni e/o sovracorrenti, talora anche molto significative.

2.2.2.1 Sovratensioni

Per sovratensione si intende un anomalo aumento della tensione rispetto al normale valore di esercizio. Si individuano due principali tipologie di sovratensioni:

- ***sovratensione di origine interna***, dovuta al funzionamento stesso dell'impianto elettrico;
- ***sovratensione di origine esterna***, dovuta a cause esterne al sistema stesso;

Le sovratensioni di origine interna, a loro volta, possono suddividersi in due tipi:

- ***di manovra, SEMP (Switching ElectroMagnetic Pulse)*** dovute ad una brusca alterazione della condizione di regime all'interno di una rete elettrica che provocano la nascita di fenomeni transitori ovvero di onde di sovratensione ad alta frequenza o oscillatorie smorzate. Questo tipo di sovratensioni possono essere generate da: manovre di interruzione o commutazione di circuiti, manovre di comando, avviamento o arresto di motori, inserzioni di batterie di condensatori. Questo tipo di sovratensioni, rispetto a quelle di origine atmosferica, hanno un minore contenuto energetico ma si manifestano con frequenza maggiore; hanno una durata breve e a causa dell'elevato valore di picco e del brusco fronte di salita, provocano un forte logorio dei sistemi elettrici in modo particolare delle apparecchiature elettroniche;
- ***temporanee a frequenza di rete, TOV (Temporary Over Voltage)*** indicate nella Norma IEC 60364-5-534 sono quelle che possono verificarsi a causa di guasti nella rete in bassa o media tensione o a manovre, con durata superiore a 5 secondi: rottura del conduttore di neutro (neutro flottante) con conseguente squilibrio delle tensioni di fase; guasti di isolamento fase/massa o fase/ terra su un circuito a

neutro isolato; intervento di scaricatori su linee MT con conseguente innalzamento del potenziale di terra dell'impianto; guasto MT/BT in cabina.

Le sovratensioni di origine esterna, invece, possono suddividersi in due categorie:

- ***sovratensioni a formazione lenta, dipendenti da fenomeni di induzione elettrostatica (ESD – Electro Static Disharge)*** con accumulo di cariche elettriche che generano campi elettrostatici molto elevati che possono dare luogo a tensioni di diversi kV e provocare una corrente di qualche ampere;
- ***sovratensioni impulsive, LEMP (Lighting ElectroMagnetic Pulse)*** caratterizzate da forma d'onda impulsiva tipiche delle fulminazioni dirette sulla linea elettrica o in vicinanza di essa.

Le sovratensioni producono effetti negativi soprattutto sugli isolamenti dei componenti e sulle apparecchiature elettriche.

2.2.2.2 Sovracorrenti (sovraccarico e cortocircuito)

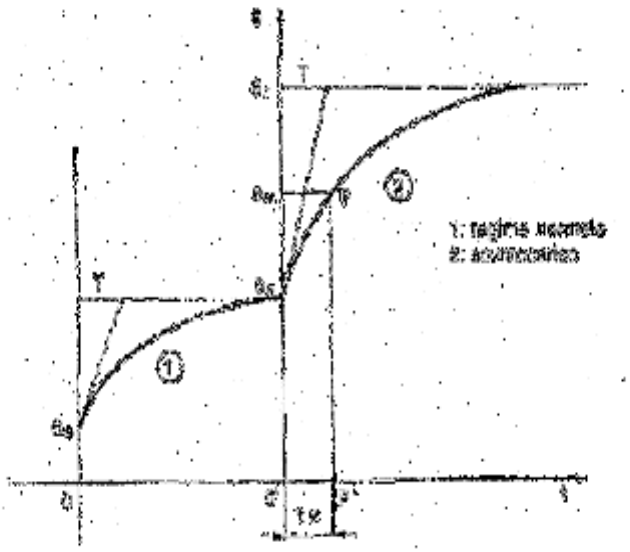
Quando un'apparecchiatura/dispositivo funziona con una corrente superiore al valore nominale si dice che è attraversata da una sovracorrente. Anche in questo caso possono presentarsi due situazioni diverse, a seconda che la sovracorrente sia dovuta ad un sovraccarico (condizione anomala), non dovuto a un guasto circuitale, o ad un corto circuito (guasto) costituito dal contatto accidentale fra due conduttori a tensione diversa.

Il **sovraccarico** è tipico di un sistema elettricamente sano ma che, a seguito di determinate condizioni di funzionamento, eroga o assorbe una corrente superiore a quella di progetto (corrente nominale). Una situazione tipica di sovraccarico è quella che si verifica in una civile abitazione in cui più dispositivi (forno elettrico, lavatrice, phon, ecc.) sono azionati contemporaneamente. In tale situazione può accadere che dopo un po' di tempo intervengano le protezioni per disalimentare tutto il sistema. Altra situazione tipica di natura funzionale è quella relativa all'avviamento di un motore trifase che, come è stato già detto, allo spunto può assorbire fino a 6-8 volte la corrente nominale. Il sovraccarico è spesso considerato semplicemente come un carico eccessivo. Una condizione di sovraccarico può verificarsi ugualmente se il carico è normale, ma la tensione di alimentazione diventa anormalmente eccessiva. I fattori che causano questi ultimi tipi di sovraccarichi possono quindi includere i fenomeni di sovratensione pocanzi citati o l'alimentazione elettrica con forma d'onda inappropriata (distorsione armonica o sovraccarico armonico). In tutte queste situazioni le sollecitazioni al sistema sono

sostanzialmente di tipo termico, ossia provocano delle sovratemperature. Le parti isolanti dei sistemi elettrici (ad esempio le guaine esterne dei conduttori) sono progettati per garantire la loro funzione fino a determinate temperature. Un eccesso di temperatura sollecita in maniera abnorme gli isolanti producendo due tipi di effetti. Il primo è legato ad un'alterazione della funzione isolante e quindi ad un invecchiamento precoce dell'isolante stesso, che pertanto dovrà essere sostituito prima del previsto. Il secondo aspetto è legato alla sicurezza del sistema; infatti, a causa dell'alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'isolante possono verificarsi scariche elettriche o veri e propri cortocircuiti. In questo secondo caso l'anomalia evolve in guasto.

La temperatura che l'elemento conduttore può raggiungere deve essere adeguata alle caratteristiche dell'isolante che lo riveste, in relazione alla propria temperatura massima di funzionamento. Al superare della temperatura ammessa, l'isolante ha un decadimento rapido, quanto più alto è il valore della temperatura. Oltre una certa soglia l'isolante perde le caratteristiche di solidità e tende a liquefarsi o incendiarsi. Nel caso di sovraccarico, la temperatura assume l'andamento riportato nella figura, in cui la prima zona corrisponde al regime normale e la seconda al sovraccarico.

Per durata di vita dell'isolante ad una certa temperatura si intende il tempo per cui l'isolante può sopportare, in modo continuo, tale temperatura, prima che le sue caratteristiche elettriche, e soprattutto meccaniche, decadano in modo inaccettabile.

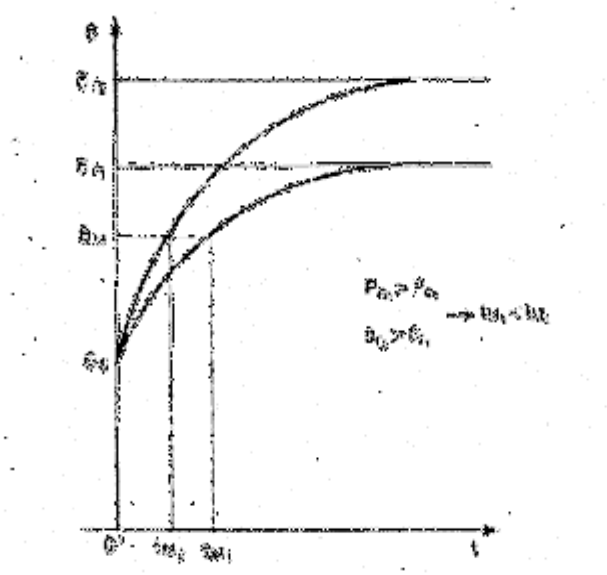


Curva ideale di riscaldamento.

Per ogni tipo di isolante è definita una temperatura massima di funzionamento θ_s che non deve essere superata, nel servizio ordinario, per assicurare al cavo una conveniente durata.

Alla massima temperatura ammissibile (θ_M) deve corrispondere un tempo massimo t_M per cui il sovraccarico può essere tollerato.

Se la potenza che genera il sovraccarico aumenta, il tempo massimo t_M per cui il sovraccarico può essere tollerato diminuisce.



Confronto fra sovraccarichi di diversa entità.

La portata calcolata tenendo in considerazione la dipendenza:

- dal tipo di isolante, cioè dalla sua attitudine a sopportare la temperatura (θ_s);
- dai parametri che influiscono sulla produzione del calore (ρ, r – rispettivamente resistività e raggio della sezione);
- dai fattori che influenzano lo scambio termico tra cavo e ambiente circostante quali:
    - temperatura ambiente,
    - numero e modalità di posa dei conduttori (in cunicolo, in canalina, in condotto, in tubo, ecc.). Cioè θ_a è il coefficiente di conducibilità termica tra conduttore e ambiente.

Per la gomma G7 (mescola a base di EPR) la massima temperatura di funzionamento è di 90 °C, mentre per il PVC è di 70 °C; a queste temperature corrisponde una vita di circa trenta e venti anni, rispettivamente.

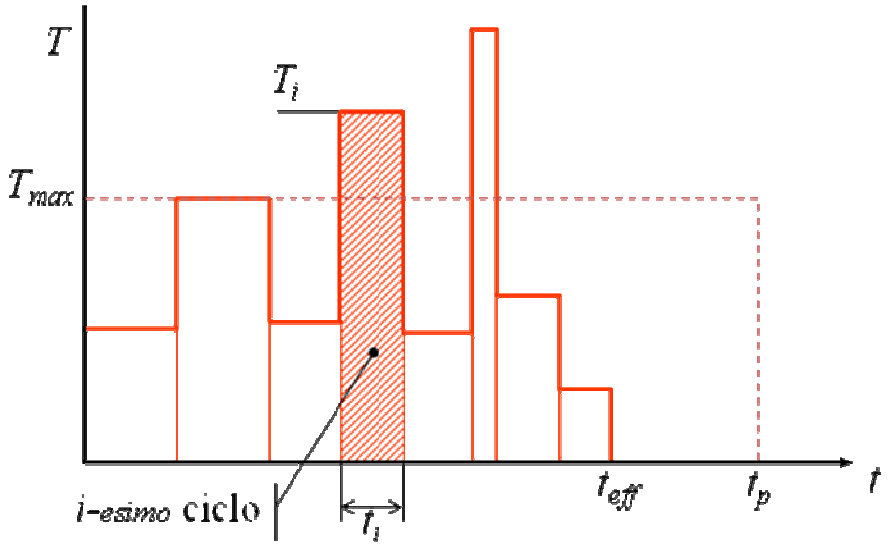
Un cavo percorso a regime da una corrente pari alla sua portata, se installato nelle condizioni cui la portata si riferisce, assume la temperatura θ_s corrispondente ad una conveniente durata di vita.

Ogni sovracorrente (superiore alla portata) abbrevia la vita del cavo rispetto a quella corrispondente alla temperatura massima di funzionamento θ_s.

Se la durata t della sovracorrente è sufficientemente lunga in relazione alla costante di tempo termica del cavo, il cavo raggiunge la temperatura di regime θr, diversamente raggiunge una temperatura θ intermedia tra θ_s e θ_r.

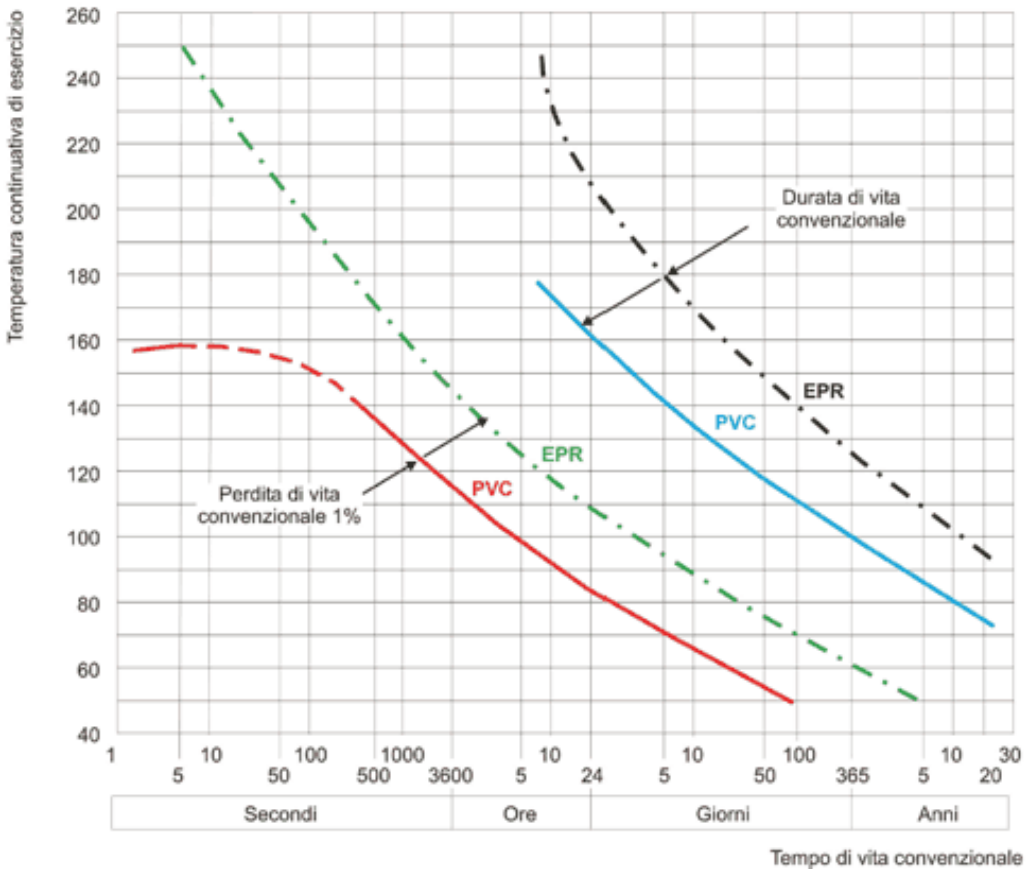
Durante la sua vita operativa un materiale isolante è in genere sottoposto a carichi variabili nel tempo in relazione a

- passaggio da vuoto a carico,
- diverse condizioni operative,
- sovraccarichi di breve durata dovuti a guasti od anomalie



La temperatura del materiale è quindi non costante nel tempo, e in alcuni casi si ha è > è$_M$; questo determina una durata di vita effettiva minore di quella di progetto: $t_{eff} < t_p$.

In sede europea si ritiene tollerabile una perdita di vita del cavo complessiva del 10% (rispetto alla durata di vita convenzionale) per eventi di sovracorrente. Supposto pari a 100 il numero medio atteso di tali eventi durante l'intera vita del cavo, ne discende una perdita di vita convenzionalmente accettabile dello 0,1% per ogni evento di sovracorrente.



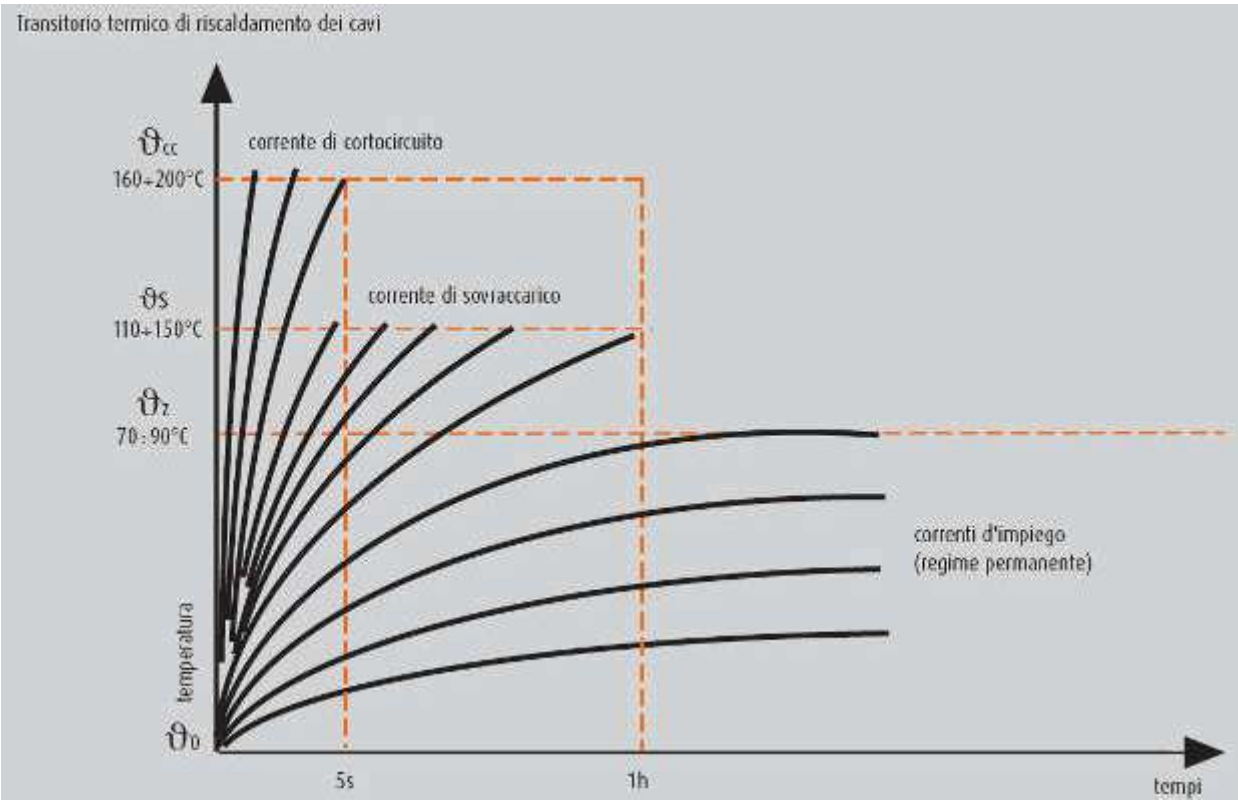
Andamento del tempo di vita della perdita di vita convenzionali per cunduttori isolati in PVC ed in EPR.
Tratto da: LA SICUREZZA DEGLI IMPIANTI ELETTRICI - Domenico Di Giovanni - Edizioni CEI)

A differenza del sovraccarico, il **cortocircuito** rappresenta un guasto del sistema elettrico. Per guasto si intende un cedimento casuale e involontario dell'isolamento di uno o più cavi in tensione verso massa o fra loro, o, più in generale, tra parti a differente tensione di macchine o impianti; è un evento accidentale che può verificarsi dappertutto nel sistema elettrico. Tale situazione si verifica quando due punti a tensione diversa vengono direttamente a contatto; la causa di un cortocircuito può anche essere ricercata in una manovra difettosa. Può accadere, ad esempio, che due o più cavi sottoposti ad azione abrasiva, asportando l'isolante, mettano in contatto le anime di rame; può essere un solo cavo che, colpito da un corpo estraneo provocante la rottura dell'isolante, consente di toccare un punto a massa. In questa situazione, come noto, si può generare il passaggio di una corrente elevatissima tra i due punti in avaria; quindi partendo da una situazione di riposo o di regime normale, l'impedenza della linea crolla a valori bassissimi e la corrente cresce vertiginosamente verso l'alto cercando una nuova situazione di equilibrio elettrico. In questo caso si parla di cortocircuito franco e le sollecitazioni non sono solo di tipo

termico ma anche di tipo elettrodinamico. Le forze dinamiche dipendono dal quadrato della corrente di cortocircuito (valore di picco) e le sollecitazioni termiche dal quadrato del suo valore efficace e dalla sua durata.

Quando il guasto avviene con un contatto tra parti attive in cui la resistenza non è trascurabile, il cortocircuito è definito "non franco" (o mediato) e la corrente che si stabilisce non assume i valori elevati di un cortocircuito franco, ma è più simile alla corrente dovuta ad un sovraccarico.

- Cortocircuito
  - Trifase
  - Bifase
  - Monofase
    - Fase e neutro
    - Fase e massa
      - Massa collegata a terra (TT)
      - Massa collegata al conduttore di protezione (TN-S)



Tratto da: bTicino – Distribuzione - Criteri di progettazione - Guida Tecnica 08

Mentre il sovraccarico, per le limitate correnti in gioco, può essere tollerato per qualche tempo essendo il fenomeno termodinamico lento e "diabatico" (cioè una parte del calore sviluppato al passaggio di questa corrente viene scambiato con l'ambiente esterno), per il cortocircuito, al contrario, il fenomeno è velocissimo e quasi adiabatico, cioè solo una

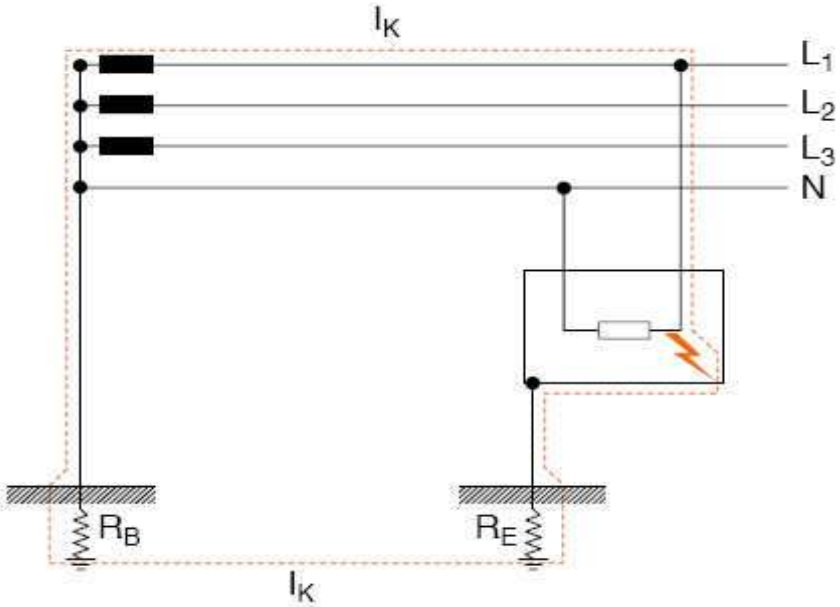
piccola parte del calore sviluppato dalle perdite per effetto della corrente viene scambiato con l'esterno.

Il cortocircuito si manifesta generalmente sotto forma di archi elettrici che danneggiano parti del sistema elettrico, ma anche altro. Questo è uno dei pochi eventi che rendono visibile la corrente.

2.2.2.3 Correnti di guasto verso terra

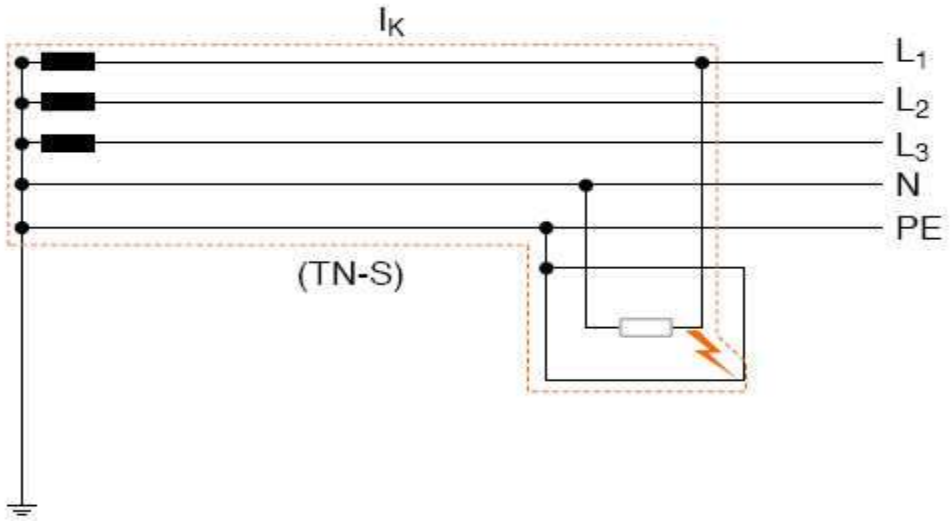
Trattasi di correnti che si instaurano a seguito di un guasto, quale il cedimento dell'isolamento, fra una fase e la terra. L'entità del guasto a terra e le conseguenze che derivano dal contatto con masse in tensione sono legate in modo determinante allo stato del neutro del sistema di alimentazione e alla modalità di connessione delle masse verso terra.

Nel sistema TT il neutro e le masse sono collegati a due impianti di terra elettricamente indipendenti e la corrente di guasto a terra ritorna quindi al nodo di alimentazione attraverso il terreno



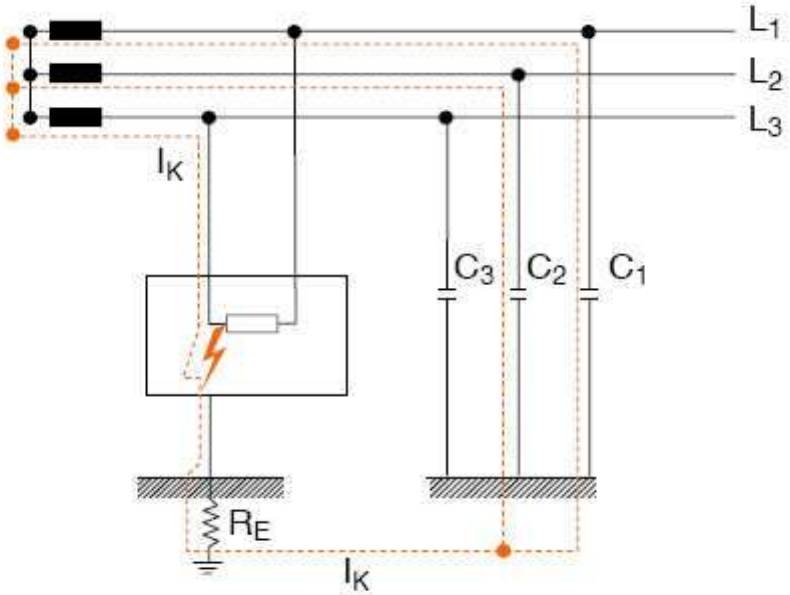
Tratto da: ABB - Quaderni di Applicazione Tecnica N.3 - Sistemi di distribuzione e protezione contro i contatti indiretti ed i guasti a terra

Nei sistemi TN la corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso un collegamento metallico diretto (conduttore PE o PEN) senza praticamente interessare il dispersore di terra.



Tratto da: ABB - Quaderni di Applicazione Tecnica N.3 - Sistemi di distribuzione e protezione contro i contatti indiretti ed i guasti a terra

Il sistema elettrico IT non ha parti attive collegate direttamente a terra ma può avere parti attive collegate a terra tramite un'impedenza di valore elevato La corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso l'impianto di terra delle masse e le capacità verso terra dei conduttori di linea.



Tratto da: ABB - Quaderni di Applicazione Tecnica N.3 - Sistemi di distribuzione e protezione contro i contatti indiretti ed i guasti a terra

sistema di distribuzione	principali applicazioni	valore tipico delle correnti di guasto a terra	Note
TT	installazioni domestiche e similari; piccole industrie alimentate in bassa tensione	10÷100 A	Il sistema di distribuzione TT è utilizzato quando non è possibile garantire la distribuzione del conduttore di protezione (PE) e si preferisce affidare all'utente la responsabilità della protezione dai contatti indiretti.
TN	industrie e grossi impianti alimentati in media tensione	valori simili al guasto monofase	Il sistema TN è un sistema con il quale viene distribuita l'energia alle utenze che dispongono di propria cabina di trasformazione; in questo caso è relativamente semplice garantire il conduttore di protezione.
IT	industrie chimiche e petrolchimiche, impianti in cui è fondamentale la continuità di servizio	µA ÷ 2 A in funzione dell'estensione dell'impianto; in caso di doppio guasto a terra la corrente di guasto assume valori tipici dei sitemi TT o TN a secondo del collegamento delle masse rispetto a terra	Questo tipo di sistema risulta essere particolarmente adatto nei casi in cui deve essere garantita la continuità di servizio in quanto la presenza di un primo guasto non dà luogo a correnti di valore elevato e/o pericoloso per le persone.

Tratti da: ABB - Quaderni di Applicazione Tecnica N.3 - Sistemi di distribuzione e protezione contro i contatti indiretti ed i guasti a terra

Tali correnti sono limitate dalle resistenze di terra e quindi non sempre determinano l'intervento dei dispositivi di protezione contro le sovracorrenti, pur essendo in grado di innescare un incendio.

Per evitare che ciò accada quando è maggiore il rischio di incendio e la conduttura non è per sé stessa in grado di impedire l'innesco (conduttura non incassata e cavi con guaina combustibile), le norme prevedeno l'uso di interruttori differenziali con corrente di intervento differenziale massima di 0,3 A sia sui circuiti di distribuzione che terminali e di 1 A sui circuiti di alimentazione dei servizi di sicurezza per necessità di continuità di servizio.

2.2.2.4 Guasti d'arco

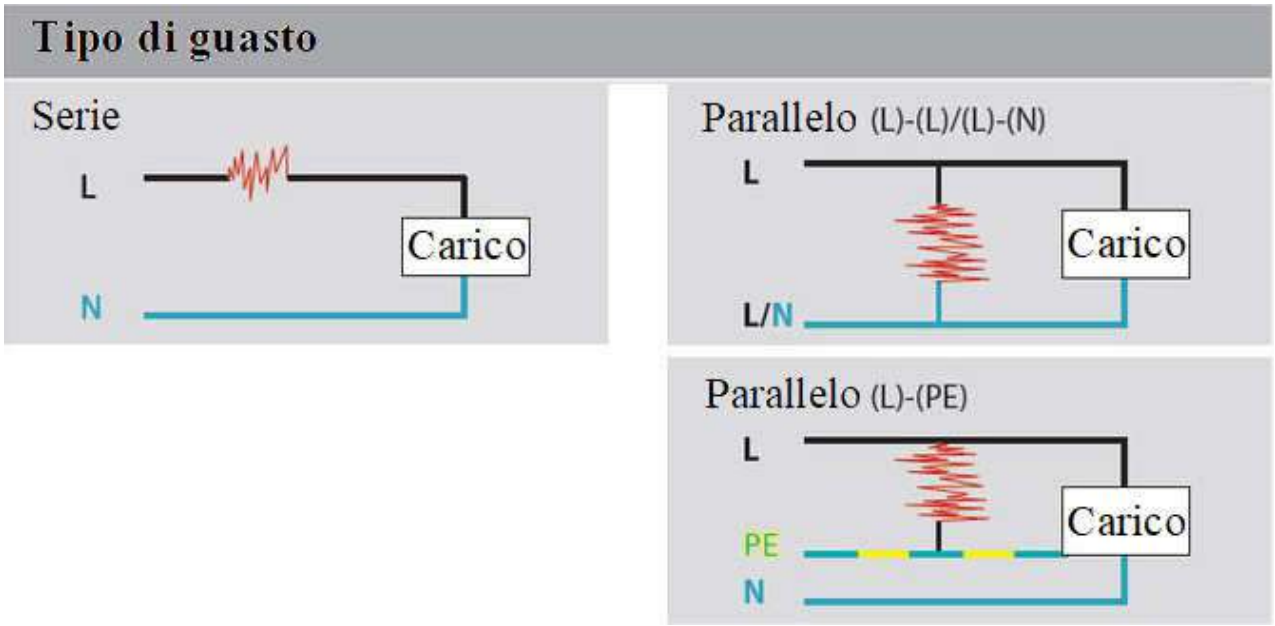
I guasti d'arco sono classificati in tre tipi: guasti d'arco serie, guasti d'arco parallelo (tra fase e fase o tra fase e neutro) e guasti d'arco a terra. La disposizione topologica di quest'ultimo tipo di guasto è identica a quella dell'arco parallelo poiché il carico non è in serie con l'arco.

- **Archi serie:** Gli archi in serie interessano un unico conduttore attivo (in effetti, in certe condizioni, è possibile considerare attivo anche il neutro). Possono aver origine, ad esempio, in presenza di contatti non saldi (nel caso di serraggio inadeguato dei morsetti) o di rottura del conduttore. Questa tipologia di guasto non presenta correnti di dispersione verso terra ed inoltre, a causa dell'esistenza di un'impedenza d'arco di guasto, le correnti sono generalmente inferiori alle correnti nominali dei carichi in

quanto l'arco elettrico va ad aumentare l'impedenza globale del circuito, rendendo improbabile che un dispositivo di protezione da sovracorrente intervenga. Questa tipologia di guasto può oggi essere essere protetta grazie all'impiego di dispositivi detti AFDD (Arc Fault Detection Device).

- **Archi parallelo:** I guasti da arco in parallelo possono essere causati, ad esempio, dall'invecchiamento del materiale isolante o dalla presenza di sporco conduttivo tra i conduttori di linea. Nel caso di guasti in parallelo tra il conduttore di fase (L) e il conduttore di protezione (PE), la corrente scorre attraverso l'arco elettrico tra il conduttore di fase e il conduttore di terra stesso. In questo caso, la protezione antincendio è affidata all'interruttore differenziale perché gli interruttori magnetotermici e i fusibili non sono in grado di rilevare il guasto.

  Nel caso di guasti in parallelo tra il conduttore di fase (L) e il conduttore di neutro (N), invece, la corrente scorre attraverso l'arco elettrico tra il conduttore di fase e il conduttore di neutro bypassando il carico. Tale corrente è generalmente molto intensa e non fluisce attraverso il conduttore di terra. In questo caso, i dispositivi di protezione da sovraccarico e cortocircuito, quali interruttori automatici e fusibili, offrono generalmente una protezione. L'intervento efficace di questi dispositivi dipende però dalle impedenze in gioco nel circuito di guasto e dal valore della tensione d'arco: alti valori di impedenza d'arco possono infatti limitare l'efficacia delle protezioni.



In questi casi, i dispositivi AFDD possono offrire una protezione aggiuntiva.

2.3 La fisica del trasferimento di calore dai guasti elettrici

Per costituire una fonte di accensione, il sistema elettrico deve essere alimentato con tensione/corrente in maniera tale che venga si manifesti localmente una temperatura sufficientemente elevata. Tali punti caldi possono causare l'accensione del materiale isolante o del combustibile vicino alle apparecchiature elettriche. Una considerazione sui meccanismi di guasto rivela che, anche se le cause dirette "*proximate causes*" possono essere molteplici, esistono solo alcuni modi principali, sebbene differiscano per diversi aspetti per cui l'isolamento elettrico o i combustibili nelle vicinanze di componenti e apparecchi elettrici possono infiammarsi. L'innesco di un incendio di natura elettrica, avviene essenzialmente come conseguenza del verificarsi uno dei seguenti fenomeni:

- lo sviluppo di calore per effetto Joule;
- lo sviluppo di una elevata energia dovuta all'arco elettrico;
- fonti di calore esterne.

Il riscaldamento esterno può causare la rottura dell'isolamento dei conduttori e può provocare l'arco tra i fili nei circuiti. La maggioranza dei problemi di riscaldamento esterno è causata da un incendio preesistente quindi, i conduttori, sono tipicamente "vittime" dell'incendio piuttosto che una causa. Tuttavia, esistono alcune situazioni in cui il riscaldamento esterno può contribuire alla causa iniziale dell'incendio. Ogni incendio, indipendentemente dalla sua causa, coinvolge solitamente i sistemi elettrici che, una volta colpiti, possono rilasciare grandi quantità di energia a temperature elevate ed indurre l'incendio a divampare ulteriormente. Tali casi possono dirsi incendi di "natura elettrica" solo se è accertato che:

a) l'incendio non avrebbe assunto proporzioni gravi in assenza di assorbimento di energia elettrica, e
b) il sistema di protezione era inefficace o non funzionante.

In molti casi l'incendio di natura elettrica può essere il risultato di una combinazione di tutti i diversi meccanismi, pertanto non devono essere considerati come cause mutuamente esclusive d'incendio.

2.3.1 L'effetto Joule

Una delle conseguenze del passaggio di una corrente elettrica in un circuito è un aumento della temperatura. Il conduttore attraversato da una corrente elettrica si riscalda per effetto dell'attrito causato dagli urti del flusso di cariche elettriche contro gli atomi costituenti il

conduttore stesso. In altre parole, in esso avviene una trasformazione di energia elettrica in calore. Quanto sopra si può spiegare tenendo conto del concetto di resistenza elettrica: il mezzo conduttore entro cui avviene il passaggio di corrente elettrica si oppone alla circolazione della corrente, richiedendo un dispendio di energia perché tale circolazione avvenga. Gli elettroni passando da un potenziale inferiore ad un potenziale superiore, cedono energia potenziale elettrica; questa viene dissipata in calore attraverso l'aumento dell'agitazione molecolare dovuto agli urti tra gli elettroni e gli atomi del reticolo cristallino.
La variazione di temperatura (gradiente di temperatura Δθ) è proporzionale al quadrato della corrente:

$$\Delta\theta = k \cdot I^2$$

ove:

- I è la corrente che circola nel circuito elettrico interessato;
- k è una costante che dipende dalla resistenza R del circuito (conduttori, ecc.).

Poiché la resistenza R di un conduttore è proporzionale alla resistività elettrica ρ, che a sua volta aumenta con la temperatura, il fenomeno si auto esalta. Infatti essendo:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

ove:

- l è la lunghezza del conduttore;
- S è la sezione del conduttore;

ρ è la resistività del materiale che dipende dalla temperatura secondo la seguente relazione:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_0 \cdot \theta)$$

L'aumento di corrente innalza la temperatura, che a sua volta provoca l'aumento della resistenza R.
La legge di Joule afferma che un conduttore di resistenza R, attraversato da una corrente continua I, trasforma in calore, in un intervallo di tempo Δt, la seguente quantità di energia ΔE:

$$\Delta E = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

La temperatura continuerà ad aumentare dunque finché il calore prodotto entro il corpo, per effetto Joule, risulterà superiore al calore smaltito dal corpo attraverso la sua superficie esterna, fino a quando, cioè, non si raggiungerà l'equilibrio termico.

2.3.2 Scintille ed arco elettrico

È il caso di soffermarsi e fare un po' di chiarezza sulla distinzione, niente affatto banale, fra scarica elettrica, o scintilla (spark), e arco elettrico. La differenza principale tra i due fenomeni consiste nel fatto che, pur essendo ambedue un trasferimento di elettroni attraverso uno spazio, una "scintilla" è un evento transitorio; mentre un arco elettrico è un evento sostenuto nel tempo.

Una **scintilla** (elettrostatica o meno) consiste in una brusca scarica elettrica che si verifica allorché un campo elettrico, sufficientemente elevato, crea un canale elettricamente conduttivo ionizzato attraverso un mezzo normalmente isolante, ad esempio in aria o in miscele di aria o altri gas. La rapida transizione da uno stato non conduttore a uno stato di conduzione produce una breve emissione di luce e un suono schioccante o detonante. La durata del fenomeno è di norma inferiore al millisecondo. La scintilla si crea quando il campo elettrico applicato supera la rigidità dielettrica del mezzo interposto. Per l'aria, in condizioni standard, questo valore si aggira intorno ai 30 kV/cm, ma diminuisce facilmente con l'umidità o sotto l'influsso di radiazioni ionizzanti come ad esempio i raggi ultravioletti. Nelle fasi iniziali, gli elettroni liberi nello spazio sottoposto al campo elettrico sono accelerati dallo stesso. Essi si scontrano con le molecole d'aria, creano ioni ed elettroni supplementari che appena liberati vengono anch'essi accelerati. Gli elettroni e ioni esponenzialmente crescenti creano rapidamente regioni dell'aria nel tagliato per diventare elettricamente conduttivo in un processo chiamato "rottura dielettrica". Una volta che lo spazio isolante si rompe, il flusso di corrente è limitato solamente dalla carica disponibile (per una scarica elettrostatica) o dall'impedenza dell'alimentazione esterna. Se l'alimentazione continua a fornire corrente, la scintilla evolverà in flusso continuo chiamato un arco elettrico. Una scintilla elettrica può verificarsi anche all'interno liquidi o solidi isolanti, ma i meccanismi di degradazione sono significativamente diversi da quelli relativi alle scintille nei gas.

La definizione di scintilla (spark) resta comunque ambigua visto che essa può intendersi anche come particella luminosa, un piccolo frammento di materiale solido in fiamme o incandescente che si muove attraverso l'aria e che può riscontrarsi durante un fenomeno

d'arco quando il metallo dei terminali fra cui si verifica l'arco fonde ed espelle le particelle dal punto di arco. Tale definizione, per quanto non sia la più corretta, riesce a raccordare tra loro le definizioni di scintilla elettrica con quella di scintilla meccanica.

Pertanto nell'ambito dell'investigazione degli incendi di natura elettrica è uso comune intendere per scintille elettriche l'emissione da parte dell'arco di particelle incandescenti e la scarica elettrica transitoria come un caso particolare di arco elettrico non sostenuto.

L'**arco** si verifica quando l'elettricità cerca di scavalcare una lacuna in un conduttore causando una "scarica elettrica luminosa ad alta temperatura". La corrente d'arco letteralmente salta attraverso un vuoto d'aria. L'aria viene ionizzata e l'arco viene mantenuto finché l'alimentazione non viene disattivata da un dispositivo di protezione. La temperatura dell'arco è di diverse migliaia di gradi e varia a seconda della caduta di tensione, della corrente e del tipo di conduttore.

L'arco elettrico può cedere calore all'ambiente esterno per conduzione, convezione e irraggiamento. Il fenomeno dell'irraggiamento sembra trascurabile, come causa d'incendio, per i materiali posti a distanze dell'ordine dei centimetri dall'arco.

La conduzione interessa principalmente i conduttori sui quali l'arco si innesca e i materiali che si trovano direttamente a contatto con essi, e raramente è causa d'incendi.

Il fenomeno dell'arco è temibile perché assume carattere esplosivo, con proiezione di particelle incandescenti (rame fuso nei normali conduttori) e possibilità di sfondamento dei contenitori (armadi elettrici). Il fenomeno può essere amplificato per lo sviluppo di gas o vapori esplosivi conseguenti alla decomposizione, proprio per l'effetto dell'arco, di isolanti liquidi, vernici, grassi, oli per condensatori o trasformatori (es. incendio di trasformatore, scoppio di condensatori di rifasamento, ecc.). L'arco e le sue proiezioni riescono ad innescare materiali di piccolo spessore come fibre di nylon e acrilico, carta leggera, sacchetti di plastica e simili. L'arco non riesce ad innescare materiali solidi di un certo spessore, ma se si verifica un arco di durata prolungata, a causa del cattivo funzionamento o progettazione delle protezioni (interruttori e fusibili deteriorati), si possono avere incendi di sostanze combustibili anche se dotate di notevole spessore (fenomeno di arco persistente). I motivi di non accensione, quindi, sono almeno due: (1) un oggetto solido estrae calore dall'arco, e l'arco si può spegnere se un solido viene inframmezzato; (2) il materiale può essere ablato in modo talmente rapido da non potersi accendere.

Gli archi elettrici possono essere provocati dall'azione stessa delle fiamme, quando queste attaccano i conduttori (fase e neutro) sotto tensione e danneggiano o carbonizzano il loro

isolamento: la formazione di un arco può aver luogo attraverso l'isolamento bruciacchiato dei conduttori senza che avvenga il contatto tra i due fili.

Alcune prove effettuate nei laboratori dell'Istituto Galileo Ferraris di Torino, hanno mostrato che sottoponendo ad archi elettrici di grande potenza e di breve durata i materiali plastici comunemente utilizzati nelle costruzioni elettriche, questi non venivano innescati. Viceversa, erano innescati da archi di bassa potenza e lunga durata. Per effettuare queste prove sono state utilizzate sovracorrenti sino a 5000 A, per una durata di 10 ms (millisecondi). I risultati delle prove hanno dimostrato che non è possibile in tal modo innescare alcun materiale di uso elettrotecnico, anche se posto a contatto con l'arco. Ciò concorda con l'analisi teorica: l'energia trasmessa al materiale in un così breve lasso di tempo è insufficiente per provocarne l'innesco. L'onda d'urto provocata dall'arco stesso tende, inoltre, a raffreddare e spengere il materiale eventualmente innescato. Invece nel caso della prova con deboli correnti di lunga durata, riferita ad un impianto protetto con un interruttore automatico di limitazione della potenza contrattuale di 3 kW, si è utilizzata una corrente di 30 A per la durata di 3 secondi. A seconda del tipo di materiale costituente il provino in esame, si è riscontrato lo sviluppo di fiamme e, in qualche caso, anche la distruzione del provino stesso. Sono state effettuate anche delle prove per verificare la possibilità di combustione di materiale posto in prossimità di un arco che emette particelle metalliche fuse. Tra i materiali sottoposti a prova, quello più facilmente incendiabile è risultato essere il cotone: i provini di quest'ultimo, posti nelle vicinanze (a distanze comprese tra pochi cm e circa un metro) di un arco elettrico appositamente creato (con intensità di corrente sino a 7000 A), sono stati tutti innescati.

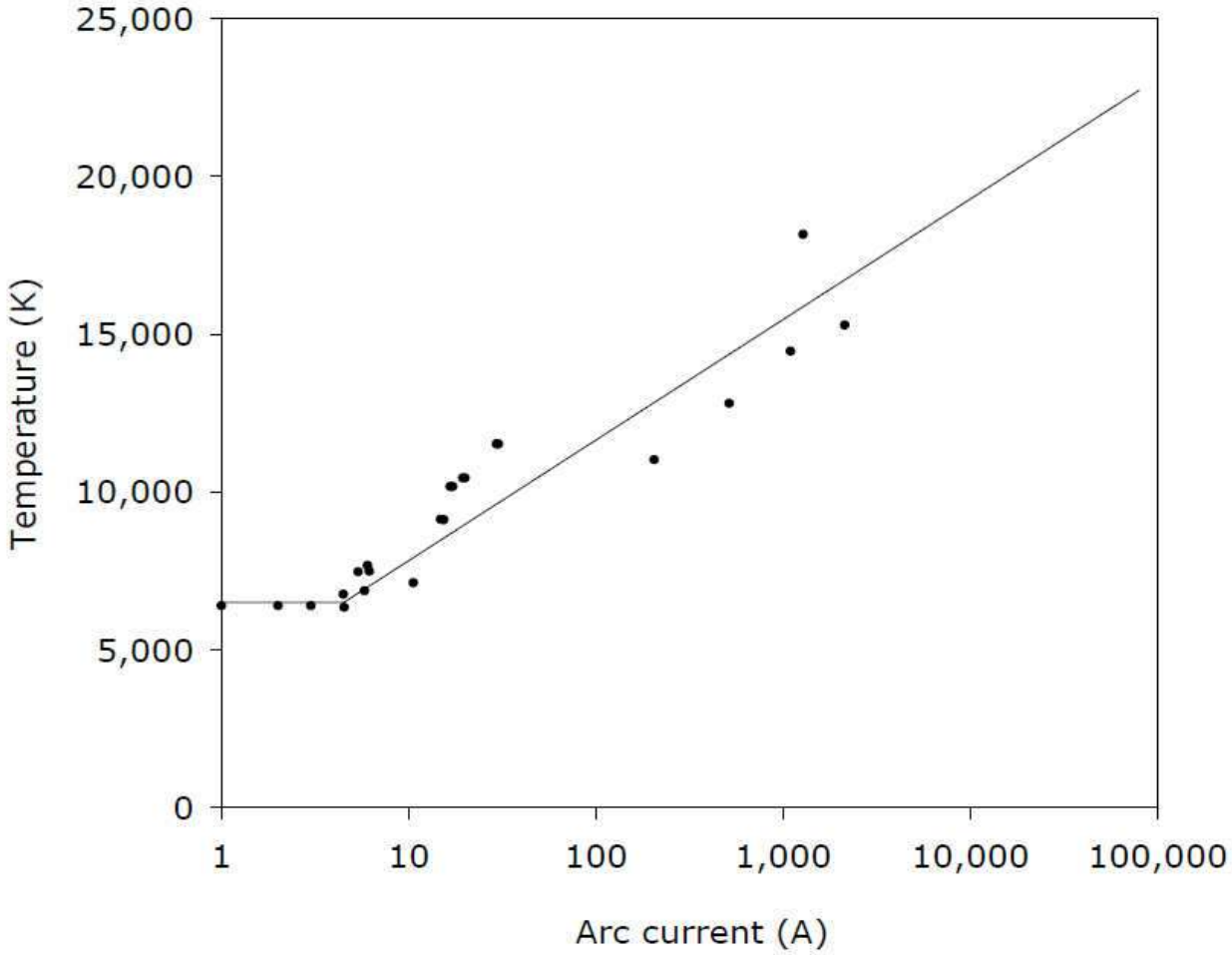
Fisicamente, il circuito può offrire un percorso involontario per la corrente d'arco facendola fluire tramite contaminazioni conduttive o prodotti di pirolisi, fornendo così tre vie principali di percorso dello stesso:

1. attraverso i materiali isolanti,
2. attraverso la superficie dei materiali isolanti, o
3. attraverso l'aria.

Arco in aria

Le temperature di un arco in aria sono elevatissime. Gli archi a bassa corrente raggiungono una temperatura di circa 6.000 ° C, mentre le correnti più elevate portano a temperature ancora più alte. Anche se queste temperature sono notevolmente superiori

alle temperature di accensione di materiali combustibili, non tutti i combustibili che incontrano un arco si accendono. Un arco richiede un delicato bilancio termico, pertanto è probabile che un arco con una bassa corrente, piuttosto che innescare l'incendio, venga estinto se un oggetto solido interrompe il suo percorso.



Babrauskas, V., Ignition Handbook, Fire Science Publishers/Society of Fire Protection Engineers, 2003.

La ionizzazione dell'aria è influenzata da archi e fiamme preesistenti. Se ci sono stati grandi eventi d'arco in un sistema, sono emesse significative quantità di gas. Questi gas ionizzanti hanno il potenziale di influenzare altri circuiti e innescano nuovi eventi d'arco. Le fiamme contribuiscono anche alla ionizzazione dell'aria e all'arco aggiuntivo. La creazione di questo arco aggiuntivo crea uno scenario di auto-perpetuazione per gli archi tale da continuare durante un incendio, fintanto che il circuito elettrico resta energizzato.

Tuttavia, quando si considerano circuiti a tensione 230 V o inferiore, l'innesco nell'aria è spesso il risultato di un altro meccanismo. Con gli elettrodi fissi, una tensione di 230 V (325 V picco) non porterà all'arco, in quanto è un valore al disotto del valore limite

Paschen (340 V). È invece possibile causare facilmente archi in circuiti pari a pochi volt, aprendo il circuito, cioè provocando un "arco di separazione" (parting arc). Un arco di separazione si verifica quando il percorso dell'elettricità viene interrotto, ad esempio un conduttore elettrico si separa da una connessione. Per il breve momento in cui il conduttore inizia ad allontanarsi, il flusso dell'elettricità tenterà di continuare a penetrare attraverso lo spazio di separazione, generando una scarica elettrica. L'allontanamento di due parti metalliche che erano originariamente in contatto diretto tra loro (ad es. a seguito di vibrazioni o dilatazione termica) può dare origine ad archi elettrici che generano una forte dissipazione termica, portando alla fusione del materiale che risalda la connessione. Giunti in questa situazione un ulteriore riscaldamento porterebbe alla rottura del legame fuso e alla creazione di brevi archi elettrici instabili. I risultati di questo processo sono alte temperature sulle parti metalliche, una forte ionizzazione dell'aria, continui inneschi e estinzioni dell'arco (ad ogni passaggio per lo zero).

Arco attraverso un percorso carbonizzato

L'arco in un percorso carbonizzato è spesso considerato sinonimo di tracciamento dell'arco (**arc tracking**), anche se in senso stretto quest'ultimo ha un campo di applicazione più stretto e si riferisce solo a un percorso carbonizzato creato autoprodotto dal flusso di corrente elettrica. In particolare il fenomeno cosiddetto "arco attraverso un percorso carbonizzato" si riferisce ad archi che attraversano l'isolamento a causa della carbonizzazione dell'isolamento (**arcing through char**). Il tracciamento dell'arco è un meccanismo di guasto elettrico progressivo che porta alla creazione di un percorso carbonizzato lungo la superficie di un isolante non conduttore che collega due conduttori elettrici.

Con l'eccezione di alcuni materiali quali vetro, ceramica e mica, la maggior parte degli isolanti sono composti organici contenenti carbonio. La degenerazione dell'isolante a causa del calore produce perciò una carbonizzazione che trasforma l'isolante in un semiconduttore. Una volta stabilito un percorso conduttivo carbonizzato, esistono le condizioni perché il flusso corrente (corrente di dispersione) possa attraversarlo e si possa innescare l'arco e l'accensione.

I percorsi carbonizzati possono anche essere creati con mezzi esterni, ad esempio il riscaldamento imposto da una fonte di calore esterna sul materiale. Nel caso estremo, un incendio che investe l'isolamento elettrico può carbonizzarlo.

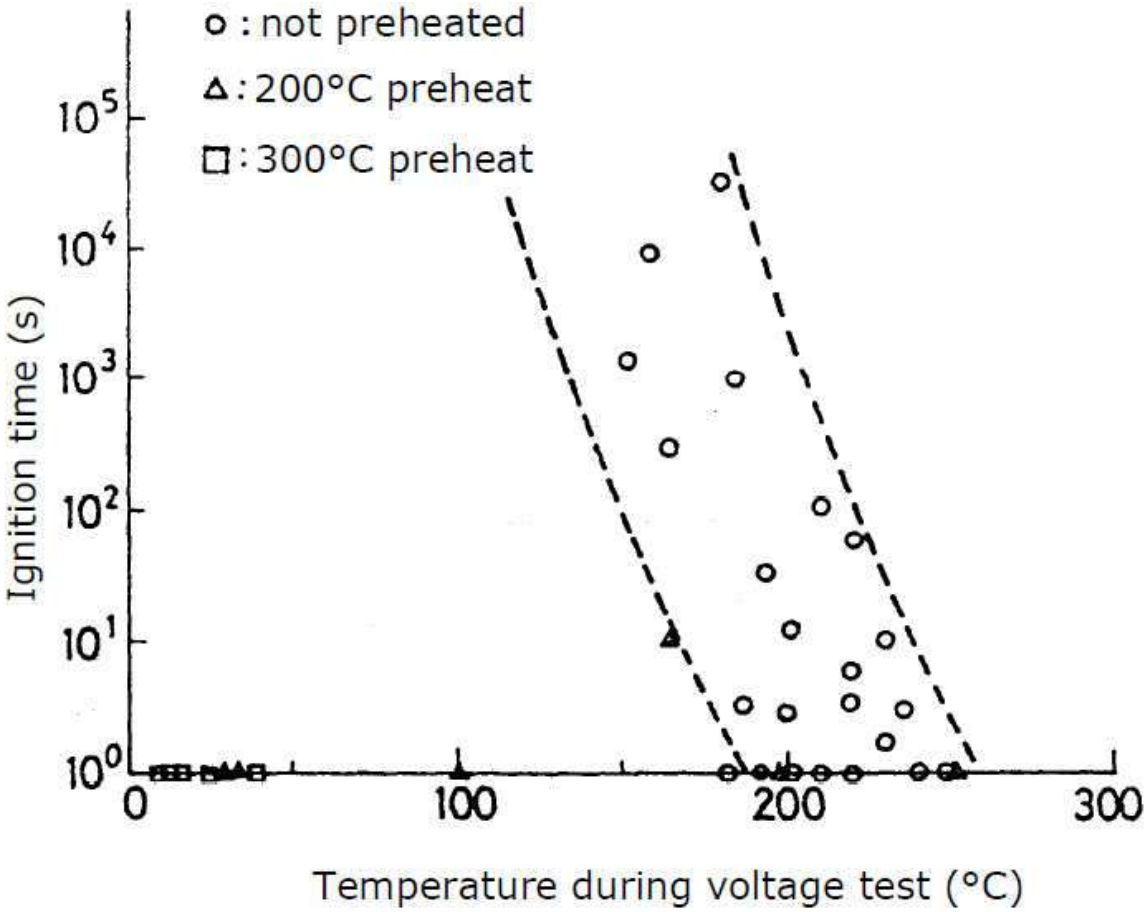
L'arco in un percorso carbonizzato è tipicamente classificato in due tipi: tracciamento umido (wet tracking) e tracciamento a secco (dry tracking). Il tracciamento umido può verificarsi se la superficie dell'isolamento è bagnata o inquinata (il tracciamento umido non si verifica se l'acqua è distillata). Il tracciamento a secco è meno comune e comporta la formazione di un percorso carbonizzato in assenza di umidità.

Alcuni tipi di materiali isolanti, in determinate condizioni, se sottoposti ad elevati gradienti di tensione sono suscettibili di rottura. Ad esempio le plastiche termoindurenti come la bakelite sono particolarmente vulnerabili. Laddove tali materiali vengano utilizzati per separare i terminali a tensione di rete o superiore, può verificarsi il tracciamento. Ciò è spesso avviato, come detto, da condizioni umide, in cui un sottile film d'acqua che si condensa sul materiale consentirà ad una piccola corrente di dispersione di scorrere tra i terminali.

L'effetto di riscaldamento di questa corrente tende ad asciugare l'acqua e a bloccare il flusso di corrente, nonché a causare la rottura della superficie dell'isolante, pirolizzando il materiale per lasciare una pista parzialmente conduttiva di carbonio. La corrente che attraversa questo sottile strato di carbonio provoca una degradazione dell'isolante che produce una traccia di carbonio e un maggiore flusso di corrente. Mentre il tracciamento può richiedere settimane, mesi o anni per iniziare effettivamente, una volta che si stabilisce un buon percorso il processo può rapidamente degenerare fino a quando si sviluppa un elevato flusso di corrente attraverso il materiale danneggiato. Tali flussi sono spesso accompagnati da arco elettrico, che può svilupparsi in gran parte del percorso di guasto. Inizialmente la corrente di guasto sarà limitata dalla resistenza del materiale carbonizzato, ma il flusso può aumentare mentre l'arco si sviluppa. In definitiva l'arco potrebbe causare l'accensione dei gas di pirolisi risultanti o l'accensione con o senza fiamma di materiali vulnerabili adiacenti.

È noto che le scariche elettriche associate ad archi superficiali, note come scintillazioni, sono eventi a bassa temperatura ed a bassa energia. Ma se il processo continua senza ostacoli, può verificarsi l'arco in aria tra due conduttori: quest'ultimo presenterà temperature elevate e può essere abbastanza distruttivo.

È stato dimostrato che, quando l'isolamento in PVC è esposto ad una temperatura tra i 200 °C e i 300 °C, nell'isolamento si verifica una significativa carbonizzazione. Ciò rende l'isolamento in grado di accendersi più rapidamente ed a temperature molto più basse.



Tratto da: Babrauskas, V, How Do Electrical Wiring Faults Lead to Structure Ignitions? pp. 39-51 in Proc. Fire and Materials 2001 Conf., Interscience Communications Ltd., London (2001)..

2.4 Durata dei guasti ed energia totale rilasciata dai guasti

Diversi tipi di guasti hanno durate diverse. Le anomalie a bassa impedenza sono in genere guasti di breve durata. Un interruttore estinguerà un guasto a bassa impedenza, (ad esempio cortocircuito fase-neutro) in circa un ciclo (0,020 secondi). Nel calcolo dell'energia totale liberata durante un guasto, l'investigatore deve prendere in considerazione la velocità di rilascio del calore (potenza), P, e la durata del guasto, T_{guasto}. L'energia totale di guasto rilasciata, W_{guasto}, è approssimata da:

$$W_{guasto} = P \cdot T_{guasto}$$

Se consideriamo un guasto di cortocircuito fase-neutro, in bassa tensione, si può facilmente vedere che un tasso di rilascio di energia di guasto da 100 kilowatt, corrispondente ad una corrente di cortocircuito di 435 A, rilascerà solo circa 2000 Joule di energia termica, assumendo che il guasto venga eliminato in circa un ciclo. Per capire

quanto vale questa quantità di energia si rammenta che un joule è pari a 0,239 calorie, (1 caloria è pari a 4,187 Joule). Una caloria è la quantità di energia termica necessaria per aumentare la temperatura di un grammo d'acqua di un grado di Celsius.

Così, 2000 Joule equivalgono a 478 calorie in grado cioè di elevare la temperatura di circa mezzo litro d'acqua di un solo grado C.

Un guasto di lunga durata rilascerà molta più energia di un guasto di breve durata. Consideriamo un guasto per resistenza localizzata in un circuito a bassa tensione. Supponiamo che una connessione del circuito abbia subito contaminazione e si sia verificata la corrosione causando una resistenza localizzata di 1 ohm.

Inoltre consideriamo una corrente di 10 Ampere che scorre attraverso il circuito e la resistenza localizzata. La corrente è vista dalle protezioni come una normale corrente di funzionamento.

Il tasso di rilascio di calore del guasto è dato da:

$$P = I^2 \cdot R_{guasto} = 100\ Watt$$

Successivamente, si supponga che la durata del guasto sia di 10 giorni. La durata totale del guasto in secondi è data da:

$$T_{guasto} = 10\ giorni \cdot 24 \frac{ore}{giorno} \cdot 60\ \frac{minuti}{ora} \cdot 60\ \frac{secondi}{minuto} = 864.000\ secondi$$

L'energia totale rilasciata dal guasto è data da:

$$W_{guasto} = 100\ Watt \cdot 864.000\ secondi = 86.400.000\ Joule = 86{,}4\ MJ$$

Cioè energia sufficiente per far bollire (assumendo perdite nulle verso l'ambiente circostante) circa 250 Kg d'acqua. Tale rilascio di calore in uno spazio confinato, come una scatola di derivazione all'interno di un muro, avrebbe un effetto profondo sui materiali plastici all'interno della stessa.

Infine, si può considerare un guasto ad alta impedenza assumendo una corrente di guasto di 10 Ampere in un sistema a 230 Volt. La corrente di guasto a 10 Ampere non sarebbe in grado di far intervenire l'interruttore di protezione. Il guasto potrebbe proseguire per un tempo indefinito. Il tasso di rilascio di calore è dato da:

$$P = V \cdot I = 230\ Volt \cdot 10\ Ampere = 2300\ Watt$$

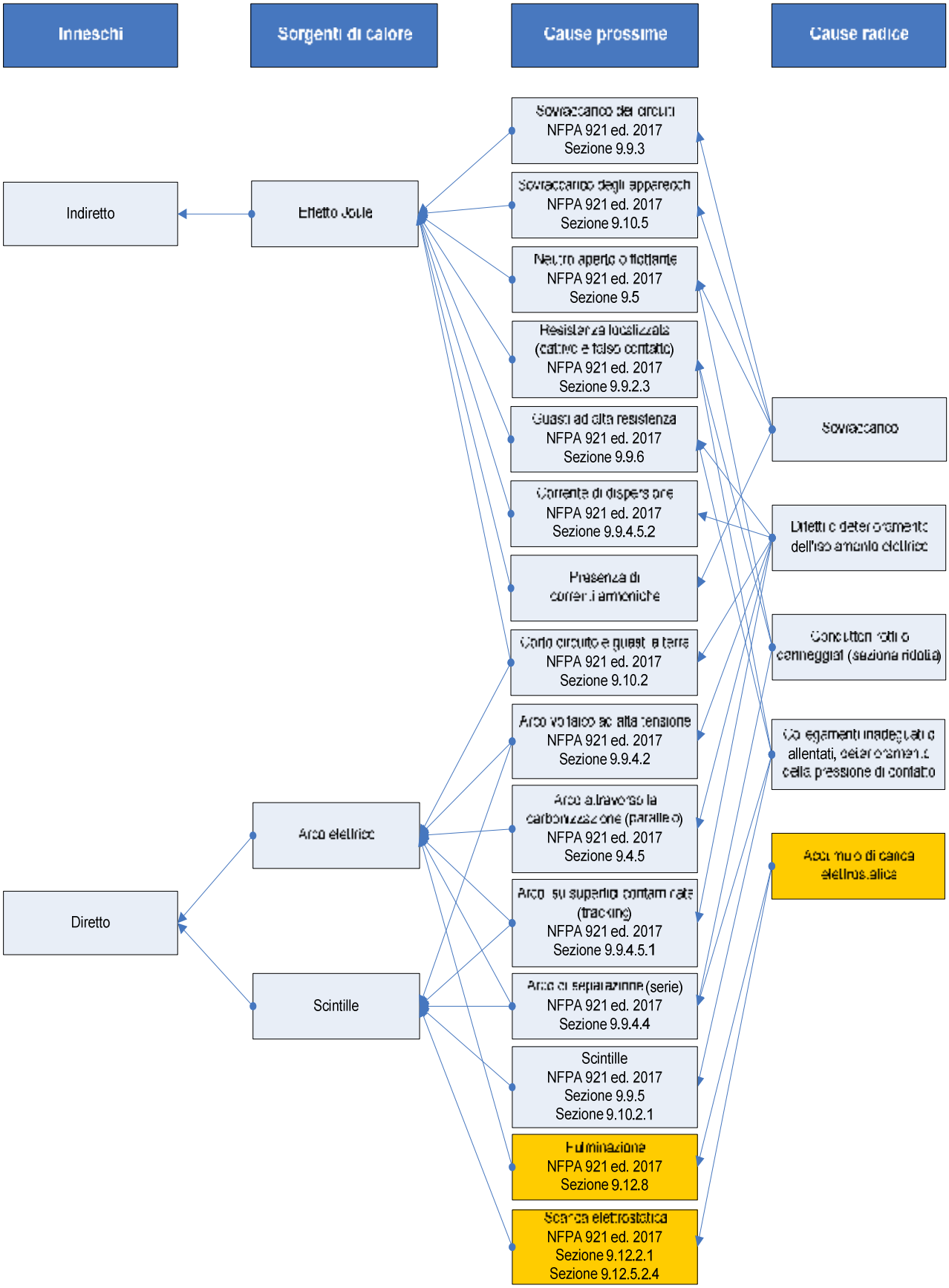
Una durata di guasto di una sola mezza giornata rilascerebbe circa 96,36 MJ di energia. Questa quantità di energia è nello stesso ordine di grandezza dell'energia rilasciata dal guasto per resistenza localizzata dell'esempio precedente. La differenza è la durata più breve di guasto di sole 12 ore.

L'esistenza di guasti ad alta impedenza e connessioni ad alta resistenza è ben documentata. L'isolamento dei conduttori che è di natura organica può degradare e può aver luogo il tracciamento dell'arco. L'assorbimento dell'umidità tramite l'isolamento può causare piccoli percorsi di corrente, portando alla pirolisi dell'isolamento (arco attraverso un percorso carbonizzato). L'applicazione di calore indesiderato all'isolamento può portare anche direttamente alla pirolisi. Il tracciamento dell'arco produce un guasto ad alta impedenza nel sistema elettrico che può portare ad un possibile innesco dell'incendio. Si sviluppano guasti ad elevata resistenza a causa di corrosioni o collegamenti impropriamente realizzati. Gli investigatori devono concentrarsi sui guasti elettrici ad alta impedenza e sulle connessioni ad alta resistenza, al contrario di guasti a bassa impedenza, nel valutare le possibili cause dell'incendio.

In sintesi, i guasti ad alta impedenza sono suscettibili di essere di lunga durata e sono una fonte di accensione molto più probabile per i combustibili solidi rispetto ai guasti a bassa impedenza. I guasti ad alta impedenza possono non lasciare alcuna traccia del loro accadimento poiché il percorso originale della corrente di guasto può essere stato completamente bruciato nell'incendio. Le temperature raggiunte durante un guasto ad alta impedenza non possono raggiungere il punto di fusione del rame. I conduttori lasciati nel sito del guasto ad alta impedenza possono non mostrare alcuna traccia del guasto, una volta esaminati dopo l'incendio.

2.5 Mappa concettuale delle cause d'innesco

Dopo quanto esposto nei paragrafi precedenti è possibile rappresentare una mappa concettuale che tenga insieme le cause, i processi e i fenomeni fisici che possono portare all'innesco di incendi di natura elettrica.


Inneschi
Sorgenti di calore
Cause prossime
Cause radice
Indiretto
Effetto Joule
Diretto
Arco elettrico
Scintille
Sovraccarico dei circuiti
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.3
Sovraccarico degli apparecchi
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.10.5
Neutro aperto o fluttuante
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.5
Resistenza localizzata
(cattivo e falso contatto)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.2.3
Guasti ad alta resistenza
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.6
Corrente di dispersione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.5.2
Presenza di
correnti armoniche
Corto circuito e guasti a terra
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.10.2
Arco voltaico ad alta tensione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.2
Arco attraverso la
carbonizzazione (parallelo)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.4.5
Arco su superficie contaminata
(tracking)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.5.1
Arco di separazione (serie)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.4
Scintille
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.5
Sezione 9.10.2.1
Fulminazione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.12.8
Scarica elettrostatica
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.12.2.1
Sezione 9.12.5.2.4
Sovraccarico
Difetti o deterioramento
dell'isolamento elettrico
Conduttori ottici o
danneggiati (sezione ridotta)
Collegamenti inadeguati o
allentati, deterioramento
della pressione di contatto
Accumulo di carica
elettrostatica

La mappa concettuale riportata tiene insieme le cause radice, ovvero i difetti la cui eliminazione previene l'accadimento di uno specifico evento avverso, le cause prossime, il problema, cioè i meccanismi che, in una sequenza naturale e continua, non interrotti da qualsiasi causa efficiente, producono il danno e senza i quali non si sarebbe verificato, e le sorgenti di calore, cioè i sintomi. Tralasciando in questa sede l'accumulo di carica elettrostatica, che merita una trattazione a se, in condizioni ordinarie sono identificabili solo quattro cause radice:

- sovraccarico
- guasti di isolamento
- guasti ai terminali di collegamento
- guasti ai conduttori

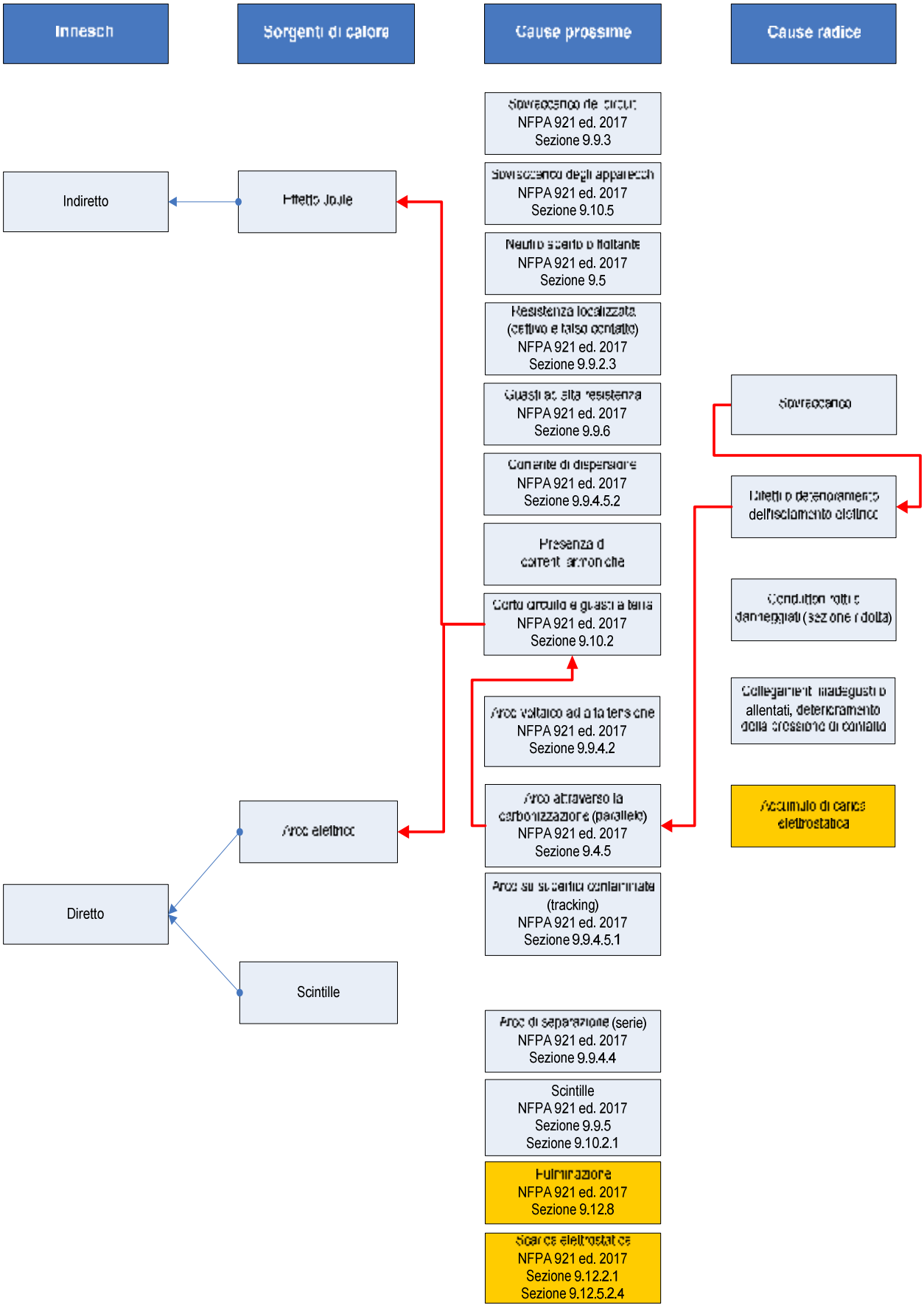
che possono attivare tutti i meccanismi o problemi per cui è possibile si verifichi l'innesco di natura elettrica. Dalla mappa concettuale emerge chiaramente che:

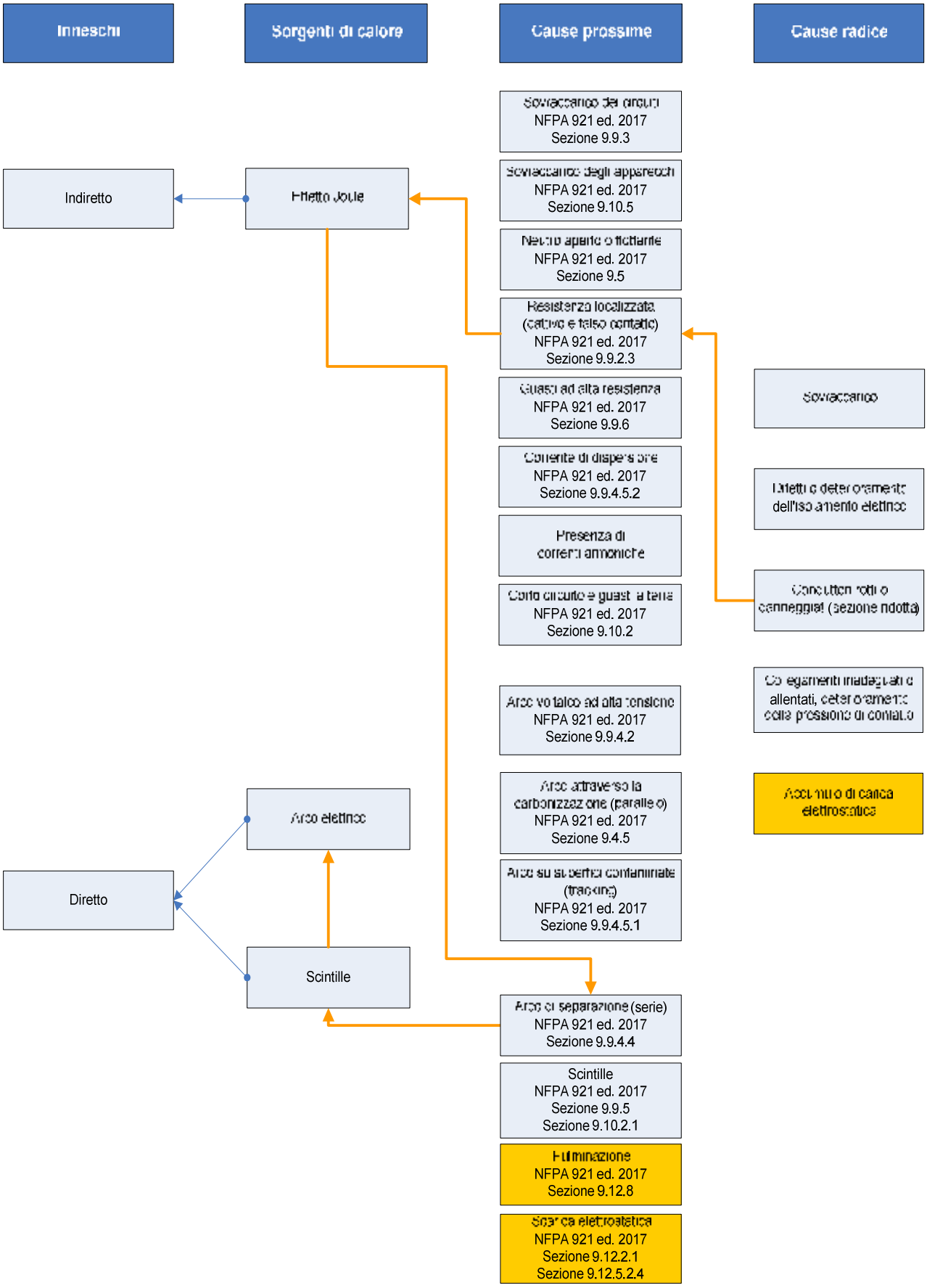
- ogni singolo problema può avere più di una "causa radice";
- ogni singola "causa radice" può incidere su più di un problema.

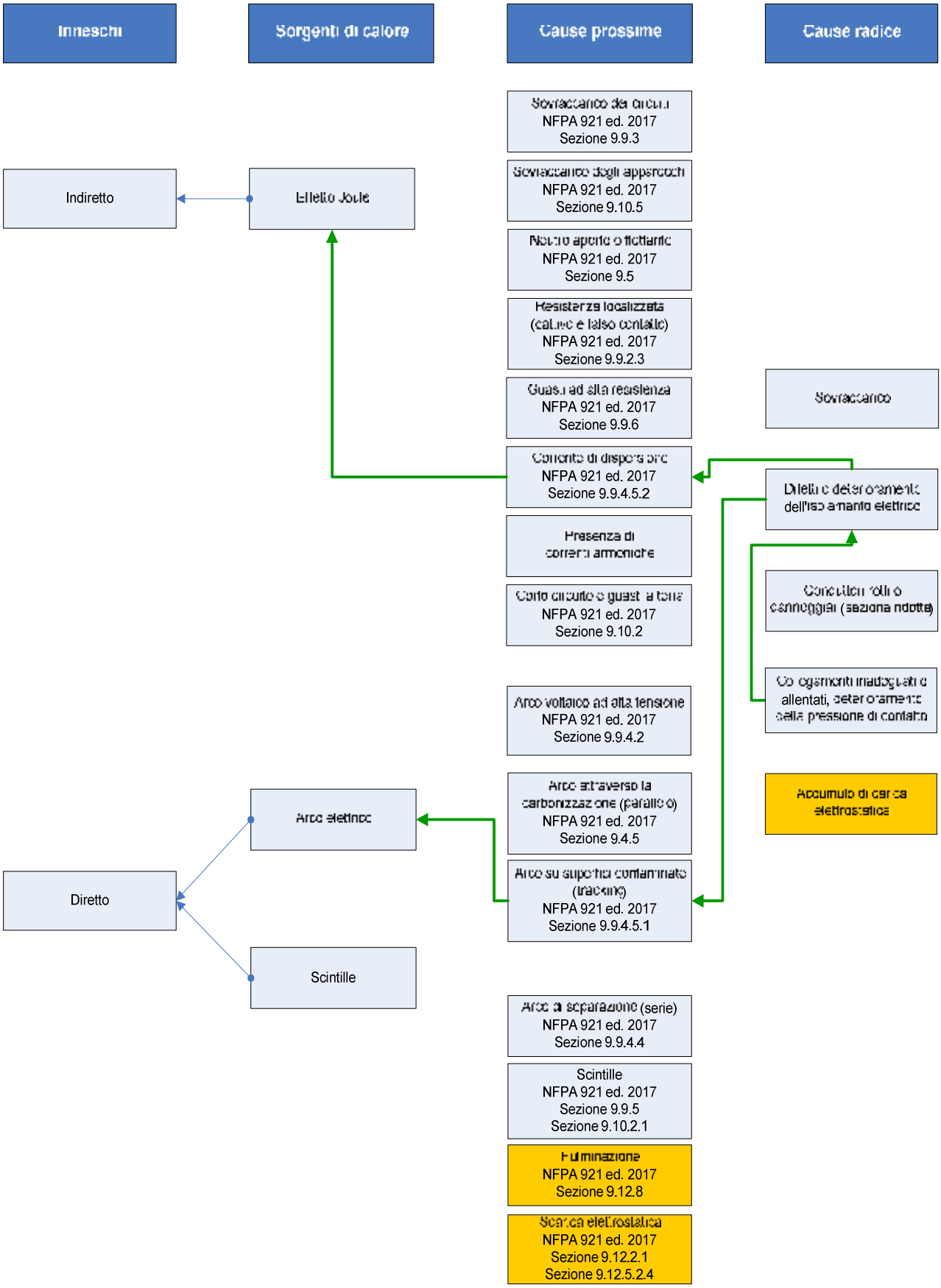
Come già detto, nella maggior parte dei casi l'incendio di natura elettrica può essere il risultato di una combinazione diversi meccanismi che non possono e non devono essere considerati come cause mutuamente esclusive d'incendio.

È comune, quindi, per gli investigatori rilevare la presenza di diversi meccanismi di accensione dell'incendio. Molti incendi, ad esempio, sono causati da conduttori che inizialmente si surriscaldano e quindi deteriorano l'isolamento. La pirolisi dell'isolamento del conduttore può modificarne le proprietà elettriche in maniera tale che la corrente inizi a fluire attraverso l'isolamento stesso. Si avviano così fenomeni d'arco che accendono i combustibili nelle vicinanze. Tenendo conto della mappa concettuale riportata nella figura precedente nel seguito si riportano alcuni esempi delle sequenze più comuni di eventi durante un incendio elettrico quali:

1. Scarsa connessione e sovracorrente,
2. Degrado termico dell'isolamento,
3. Rilascio di gas ionizzanti,
4. Formazione del carbonio internamente ed esternamente sull'isolamento,
5. Archi elettrici,
6. Ignizione.


Innesch
Sorgenti di calore
Cause prossime
Cause radice
Indiretto
Effetto Joule
Sovraccarico dei circuiti NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.3
Sovraccarico degli apparecchi NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.10.5
Neutro scarico o fluttuante NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.5
Resistenza localizzata (difettoso e falso contatto) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.2.3
Guasti ad alta resistenza NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.6
Corrente di dispersione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.5.2
Presenza di correnti armoniche
Corto circuito e guasti a terra NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.10.2
Arco voltaico ad alta tensione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.2
Arco attraverso la carbonizzazione (parallelo) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.4.5
Arco su superficie contaminata (tracking) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.5.1
Arco elettrico
Diretto
Scintille
Arco di separazione (serie) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.4
Scintille NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.5 Sezione 9.10.2.1
Fulminazione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.12.8
Scariche elettrostatiche NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.12.2.1 Sezione 9.12.5.2.4
Sovraccarico
Difetto o deterioramento dell'isolamento elettrico
Conduttori rotti o danneggiati (sezione ridotta)
Collegamenti inadeguati o allentati, deterioramento della superficie di contatto
Accumulo di carica elettrostatica


Inneschi
Sorgenti di calore
Cause prossime
Cause radice
Indiretto
Effetto Joule
Sovraccarico dei circuiti
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.3
Sovraccarico degli apparecchi
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.10.5
Neutro aperto o fictiziario
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.5
Resistenza localizzata
(cattivo e falso contatto)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.2.3
Guasti ad alta resistenza
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.6
Corrente di dispersione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.5.2
Presenza di
correnti armoniche
Corto circuito e guasti a terra
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.10.2
Arco voltaico ad alta tensione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.2
Arco attraverso la
carbonizzazione (parallelo)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.4.5
Arco su superfici contaminate
(tracking)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.5.1
Arco di separazione (serie)
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.4.4
Scintille
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.9.5
Sezione 9.10.2.1
Fulminazione
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.12.8
Scarica elettrostatica
NFPA 921 ed. 2017
Sezione 9.12.2.1
Sezione 9.12.5.2.4
Sovraccarico
Difetti o deterioramenti
dell'isolamento elettrico
Conduttori rotti o
danneggiati (sezione ridotta)
Collegamenti inadeguati o
allentati, deterioramento
della pressione di contatto
Accumulo di carica
elettrostatica
Arco elettrico
Diretto
Scintille


Inneschi
Sorgenti di calore
Cause prossime
Cause radice
Sovraccarico dei circuiti NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.3
Sovraccarico degli apparecchi NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.10.5
Neutro aperto o fluttuante NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.5
Resistenza localizzata (cattivo e falso contatto) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.2.3
Guasti ad alta resistenza NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.6
Corrente di dispersione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.5.2
Presenza di correnti armoniche
Corto circuito e guasti a terra NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.10.2
Arco voltaico ad alta tensione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.2
Arco attraverso la carbonizzazione (parallelo) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.4.5
Arco su superficie contaminata (tracking) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.5.1
Arco di separazione (serie) NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.4.4
Scintille NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.9.5 Sezione 9.10.2.1
Fulminazione NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.12.8
Scarica elettrostatica NFPA 921 ed. 2017 Sezione 9.12.2.1 Sezione 9.12.5.2.4
Indiretto
Effetto Joule
Arco elettrico
Diretto
Scintille
Sovraccarico
Difetto o deterioramento dell'isolamento elettrico
Conduttori rotti o cannegiati (sezione ridotta)
Collegamenti inadeguati o allentati, deterioramento della pressione di contatto
Accumulo di carica elettrostatica

2.6 Importanza dei sistemi di protezione

La protezione delle condutture elettriche dalle sovracorrenti è affidata a dispositivi di interruzione posti a monte delle condutture stesse e dimensionati in modo tale da limitare le sollecitazioni termiche associate ad ogni evento di sovracorrente entro soglie ritenute convenzionalmente tollerabili. Fusibili, relè di corrente, relè differenziali e interruttori automatici sono alcuni degli usuali dispositivi di protezione in uso.

La protezione da sovraccarico è generalmente affidata allo stesso apparecchio che fornisce la protezione dal cortocircuito: l'interruttore magnetotermico, che contiene uno sganciatore termico (la lamina bimetallica la cui deformazione provoca l'intervento del dispositivo contro le sovracorrenti) ed uno sganciatore magnetico (una bobina che, attraversata dalla corrente di cortocircuito, attira un'ancora metallica e provoca l'intervento dell'interruttore). Ma la protezione da sovraccarico e da cortocircuito può essere affidata a due apparecchi distinti. La norma CEI 64-8, sulla protezione dei cavi contro i sovraccarichi, prescrive le note condizioni:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \qquad I_f \leq 1{,}45 \cdot I_Z$$

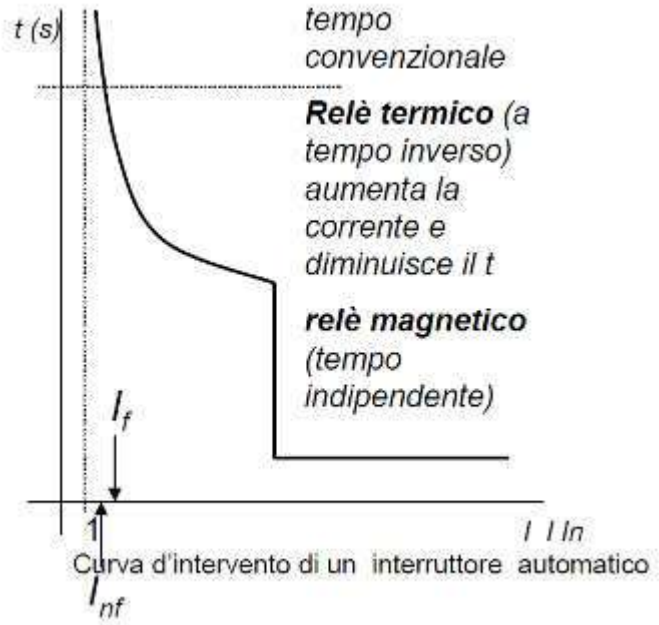
essendo I_B la corrente di impiego del circuito, I_Z la portata in regime permanente della conduttura, I_n la corrente nominale del dispositivo di protezione e I_f la corrente convenzionale d'intervento, ovvero la corrente che, nelle condizioni stabilite dalle norme, assicura l'intervento del dispositivo di protezione entro il tempo convenzionale. In pratica I_f è uguale alla corrente di funzionamento per gli interruttori automatici ed alla corrente di fusione per i fusibili del tipo gG.

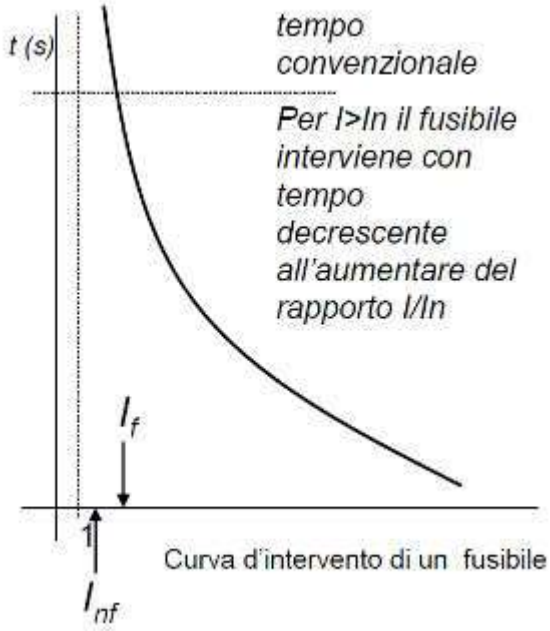
Il valore 1,45 rappresenta un compromesso fra le esigenze di sicurezza (un sovraccarico del 45% è consentito per una durata massima pari al tempo convenzionale), e quelle di sfruttamento della conduttura. Si comprende infatti facilmente come il cavo sia:

- tanto meno protetto quanto più ampio è l'intervallo $[I_Z \div I_f]$; per sovraccarichi di piccola entità il dispositivo di protezione potrebbe intervenire in tempi molto lunghi (con temperature inammissibili per il suo isolamento) o, nel caso peggiore, non intervenire affatto;
- tanto meno utilizzato quanto più ampio è l'intervallo $[I_B \div I_Z]$.

Per una verifica più puntuale della protezione del cavo si dovrebbe accertare che la caratteristica di intervento tempo-corrente del dispositivo di protezione si mantenga in ogni

punto al di sotto di una curva limite di sovraccaricabilità del cavo stesso, ricavabile fissando una soglia di tollerabilità per la sollecitazione termica associata ad ogni evento di sovracorrente.





La protezione delle condutture in cavo dai cortocircuiti è affidata a dispositivi di interruzione che:

- siano in grado di interrompere e chiudere la massima corrente presunta di cortocircuito;
- realizzino l'interruzione delle correnti di guasto in tempi sufficientemente brevi da evitare effetti termici che potrebbero danneggiare le condutture.

In altri termini l'isolamento dei cavi non deve mai superare la massima temperatura di cortocircuito θ_F stabilita dalle norme. Più in particolare:

- i materiali termoplastici (come il PVC) non devono superare la temperatura di rammollimento di 160 °C;
- i materiali elastomerici (come l'EPR) non devono superare temperature massime stabilite fra 200 e 250 °C in base allo specifico tipo di isolante.

Per limitare la temperatura entro il valore stabilito, nell'ipotesi di riscaldamento adiabatico, è necessario che l'energia specifica lasciata passare dal dispositivo di protezione non superi quella massima sopportabile dal circuito a valle, ovvero:

$$I^2 \cdot t \leq K^2 \cdot S^2$$

essendo I la corrente di cortocircuito termicamente equivalente, t la durata del cortocircuito, K un coefficiente dipendente dal materiale conduttore e dal tipo di isolamento ed S la sezione del cavo.

Gli interruttori differenziali sono dispositivi amperometrici di protezione che intervengono quando in impianto si verifica una dispersione significativa verso terra. Essi calcolano costantemente la somma vettoriale delle correnti di linea del sistema monofase o trifase e, finché la somma è pari a zero, permettono l'alimentazione elettrica delle utenze, interrompendola rapidamente se la somma supera un valore prestabilito in funzione della sensibilità del dispositivo.

Per far fronte alle sovratensioni indotte negli impianti o negli apparecchi dalle correnti di fulmine vengono impiegati talvolta speciali dispositivi chiamati "limitatori di sovratensione". La scelta ed il dimensionamento di tali dispositivi fa sempre parte di una corretta progettazione. L'installazione deve essere effettuata a regola d'arte.

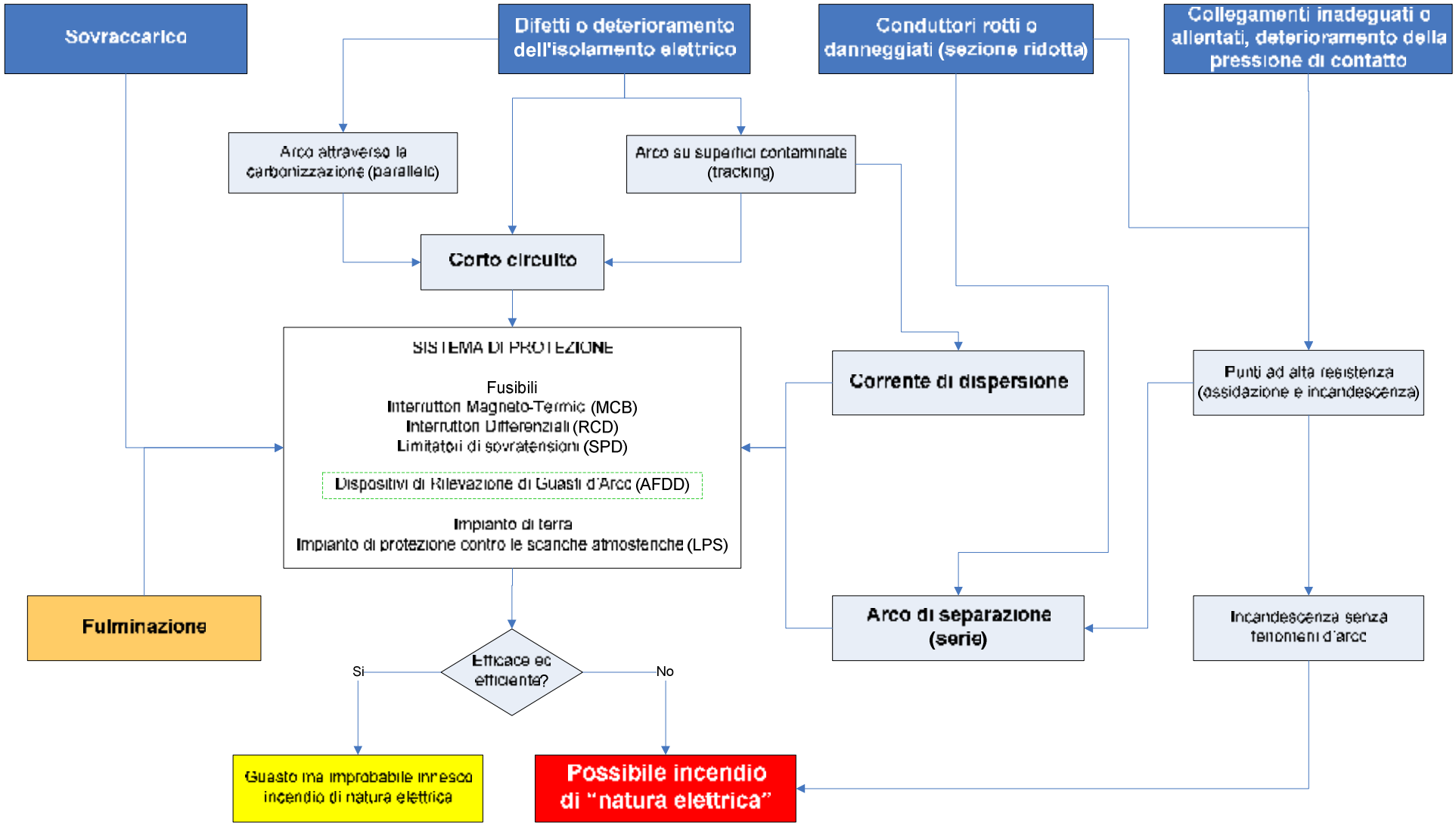
Mentre i guasti di isolamento e i sovraccarichi sono eventi più frequenti dei guasti ai collegamenti e ai conduttori, gli incendi più probabili sono dovuti a queste ultime due cause. L'apparente paradosso è spiegato dal fatto che tutte le installazioni elettriche sono dotate di dispositivi automatici di protezione atti ad intervenire quando si verifichi un'anomalia di funzionamento come il sovraccarico o un guasto di isolamento come un cortocircuito.

Purtroppo, non esiste alcun dispositivo disponibile per uso generale atto a rilevare specificamente i guasti dovuti alla presenza di collegamenti inadeguati o allentati, il deterioramento della pressione di contatto o di conduttori rotti o danneggiati. Per ovviare, sebbene solo parzialmente, a quest'ultimo tipo di problema, sono oggi disponibili dispositivi di rilevamento dell'arco elettrico (Arc Fault Detection Device – AFDD). Dal momento che buona parte dei questi guasti evolve dal surriscaldamento locale a fenomeni d'arco, tali dispositivi sono in grado di riconoscere dallo spettro armonico della corrente che fluisce attraverso il circuito monitorato la presenza di archi elettrici di tipo serie.

Nonostante il verificarsi di guasti, gli incendi possono essere pressoché completamente impediti:

a. dalla disponibilità di un efficace sistema di protezione, e
b. dalla manutenzione di quel sistema di protezione che ne garantisce l'efficienza.

Nucleo Investigativo Antincendi



3. METODOLOGIE INVESTIGATIVE SUGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA

Il nostro sistema penale, nella maggior parte dei casi che coinvolgono un incendio, ravvisa una qualche responsabilità di natura penale, dolosa o colposa. Oltre l'evidente e differente entità di responsabilità tra dolo e colpa, esiste comunque la possibilità che l'incendio si sia sviluppato per cause naturali e ambientali, indipendenti dalla volontà o dall'attività umana. In caso di incendio fortuito, i danni da incendio conseguenti rientrano nell'ambito della risarcibilità di una polizza assicurativa. È altresì evidente che la quantificazione dei danni da incendio, se pur generalmente ingenti, può assumere un aspetto quasi marginale viste le possibili implicazioni giuridiche di tipo civile e penale sulle responsabilità inerenti alle cause che hanno provocato l'incendio.

3.1 Importanza dell'indagine sull'incendio di natura elettrica

Il codice penale italiano raggruppa le ipotesi di incendio doloso o colposo, nel libro II titolo VI "Dei delitti contro l'incolumità pubblica" e titolo XIII - "Dei delitti contro il patrimonio" (art. 635). Tra reati connessi alla pubblica incolumità ed in particolare all'estinzione incendi, nell'ambito dell'argomento trattato, troviamo:

- **incendio doloso** (artt. 423, 425 C.P.)
- **incendio colposo** (art. 449 C.P.)
- **danneggiamento seguito da incendio** (art. 424 C.P.)

Questi articoli considerano i reati delitti contro l'incolumità pubblica poiché un incendio possedendo una capacità offensiva indeterminabile, potrebbe esporre a pericolo di vita o di danni alla salute un numero imprecisato di persone. Nell'art. 423 (chiunque cagiona un incendio…,) il Codice non delinea il carattere di incendio, poiché è sottinteso che il reato incendio non può identificarsi nella semplice attività di appiccare il fuoco a qualche cosa. Per la legge è piuttosto un fuoco distruttore di vaste proporzioni che tende a diffondersi ed è difficile da spegnere. In sede di accertamento è quindi importante rilevare: l'esistenza di una condotta idonea (attiva o omissiva) che abbia posto in essere l'evento; le caratteristiche dell'evento in ordine alla vastità, diffusibilità e difficoltà di estinzione; l'esistenza di una situazione di pericolo per le persone.

I due concetti di fuoco e di incendio sono fra loro distinti: si ha incendio solo quando il fuoco divampa irrefrenabilmente, in vaste proporzioni, con fiamme che si propagano con potenza distruttrice (Cass. Pen. Sez. IV 2805 del 20/2/1989). Questo significa che, mentre

nel caso di evento doloso ogni fuoco è identificabile come incendio, in caso di colpa si rileva solo la descrizione legale dell'incendio.

Occorre poi distinguere le tipologie di incendio: incendio provocato per raggiungere fini criminosi più gravi oppure incendio come conseguenza di azioni differenti compiute dell'autore, pertanto, secondo la legge, non prevedibile. Questo impone una grossa differenza tra un'azione che mira a provocare un incendio e un'altra destinata a danneggiare con il fuoco. Ne consegue che, se l'incendio non divampa, il reato si configura come tentativo di provocare un incendio.

Esiste inoltre una stretta interdipendenza fra responsabilità civile e penale conseguente all'accertamento del "profilo di colpa" addebitabile ad un determinato soggetto imputato nell'ambito del processo penale riguardante, ad esempio, il propagarsi di un incendio: a tale accertamento consegue l'obbligo per il condannato al risarcimento del danno - da qui la responsabilità civile - in favore del soggetto danneggiato.

Da ciò si deduce che i due profili di responsabilità, quello civile, che obbliga il convenuto al risarcimento del danno, e quello penale, che è fonte di una sanzione penale pecuniaria o detentiva, seppur diversi nei loro tratti essenziali sono strettamente connessi. Sussisterà il primo, quello civile, nella misura in cui un soggetto si renda autore di una condotta non rispettosa di specifiche previsioni contrattuali. Vi sarà invece responsabilità penale qualora il soggetto realizzi comportamenti che, ancorché non siano sanciti da previsioni contrattuali, integrino fattispecie di reato, con il conseguente obbligo risarcitorio avente natura extracontrattuale ex art. 2043 c.c.

Si può quindi affermare che dalla commissione del reato di incendio colposo, previsto e punito dall'art. 449 c.p., derivano, a carico del soggetto condannato, due profili di responsabilità concorrenti e connessi che lo assoggettano alla esecuzione della pena e al risarcimento del danno in favore di chi ha subito le conseguenze del fatto-reato.

Ciò premesso, l' analisi del metodo di imputazione della responsabilità in sede penale dei reati ha diretto interesse per la materia in oggetto - incendio colposo, contravvenzioni e delitti di lesione o omicidio colposi a carico di progettisti, fabbricanti, installatori e utilizzatori del sistema elettrico.

Come detto, la "natura elettrica" di un incendio è definita dal coinvolgimento diretto di un flusso di corrente elettrica o di elettricità statica spesso causati da guasti elettrici o malfunzionamenti all'interno del sistema che produce la perdita di alcune caratteristiche o funzioni del sistema. Guasti e malfunzionamenti possono riguardare:

- gli impianti elettrici utilizzatori;
- gli apparecchi elettrici utilizzatori;
- gli organi di collegamento mobile.

Le cause della colpa possono essere di varia natura:

- colpa generica:
  - negligenza (omesso compimento di un atto dovuto - mancanza di impegno, di attenzione, d'interessamento nel compimento dei propri doveri, nell'espletamento delle mansioni affidate);
  - imprudenza (atteggiamento di chi, per sventatezza, per eccessiva audacia, per trasgressione delle norme dettate dalla ragione o dall'esperienza, agisce in modo da mettere in pericolo sé stesso o altri o comunque non valuta sufficientemente le possibili conseguenze dannose dei propri atti),
  - imperizia (mancanza di abilità e di esperienza, soprattutto nelle cose che riguardano la propria professione).
- colpa specifica per inosservanza di:
  - leggi;
  - regolamenti;
  - ordini;
  - disposizioni.

Senza entrare ulteriormente negli aspetti giuridici, poiché esulano dai fini della presente pubblicazione, le distinzioni appena fatte rilevano fortemente sui profili di responsabilità, sia civile che penale, conseguenti all'accertamento del "profilo di colpa" addebitabile ad un determinato soggetto imputato e soprattutto su chi sia imputabile (progettisti, fabbricanti, installatori o utilizzatori).

Si comprende chiaramente l'importanza e la delicatezza di un'indagine riguardante il propagarsi di un incendio determinatosi per cause di "natura elettrica" negli:

- impianti elettrici non realizzati a regola d'arte (es.: errato dimensionamento condutture e/o delle protezioni, prescrizione di materiale non idoneo, mancanza del coordinamento delle protezioni sovracorrenti, ecc.);
- impianti elettrici non realizzati a regola d'arte a causa di errata esecuzione (es.: difformità di materiali e componenti rispetto a quelli previsti in progetto, uso di prese domestiche per apparecchiature elettriche con elevati assorbimenti e utilizzo

continuo, apparecchiature con basso grado di protezione, collegamenti elettrici instabili, ecc.);

- impianti elettrici non conformi al luogo di installazione e all'uso previsto (es.: per cambio di destinazione d'uso);
- impianti elettrici non manutenuti a regola d'arte (es.: materiali e componenti che presentano segni di degrado e/o usura, come contatti di interruttori, pulsanti, prese, conduttori elettrici e che non vengono sostituiti e/o opportunamente serrati, ecc.) o interventi manutentivi effettuati da personale non competente;
- riparazioni o modifiche di impianti effettuate da persone non qualificate;
- apparecchi utilizzatori, o organi di collegamento mobili, non realizzati a regola d'arte (non conformi alla normativa di prodotto);
- apparecchi utilizzatori non mantenuti a regola d'arte (es.: apparecchiature elettriche che con il tempo si riempiono di polvere e limitano l'areazione e quindi aumentano il surriscaldamento) o utilizzati in difformità alle istruzioni del costruttore (apparecchiatura fornita con spina schuko inserita a forza in una normale presa bipasso, televisore o lettore DVD incassato dentro il mobile o frigorifero incassato in una risega senza sufficiente areazione, ecc.);
- cattiva gestione degli organi di collegamento mobili (es.: utilizzo di prolunghe, prese multiple - "ciabatte" - o adattatori, con carichi elettrici consistenti non in maniera temporanea ma fissa);
- modifiche non autorizzate degli apparecchi utilizzatori (es.: sostituzione della spina schuko fornita con l'apparecchiatura con una normale presa spina).

Uno studio pubblicato nel 1990 ha fornito una sintesi dei fattori causali limitatamente a sistemi di distribuzione elettrica nell'edilizia residenziale. Dall'esame di questi fattori causali, si vede chiaramente che la causa principale tende ad essere l'incompetenza nell'installare, utilizzare o modificare i sistemi elettrici.

	Total		Age of Dwelling (Years)					
Contributing Factors	Number	Percent	≤10	11-20	21-30	31-40	> 40	Unknown
Improper Alterations	55	37	1	2	9	7	29	7
Improper Initial Installation	30	20	4	4	8	3	7	4
Deterioration due to aging	25	17	2	3		5	9	6
Improper use	23	15	1	1	2	5	13	1
Inadequate electrical capacity	22	15			4	1	16	1
Faulty product	17	11	2	3	2	1	8	1
Unknown	9	6				2	4	3
Total	149*	100%*	10	13	25	24	86	23

* Note- Totals are greater than 100% since multiple factors were coded in 31 cases.

CPSC Staff Study on Electrical Fires - Smith, Linda E., and Dennis McCoskrie, "What Causes Wiring Fires in Residences?"Fire Journal, Vol 84, No. 1, Jan/Feb. 1990.

In 31 casi dei 149 eventi d'incendio esaminati sono stati rilevati molteplici fattori, pertanto, il numero reale di fattori causali esaminati è di 181 e la tabella precedente può essere riscritta nel seguente modo.

Fattore causale	**Numero**	**Percentuale**
Modifiche improprie all'impianto	55	**30,4%**
Esecuzione iniziale non corretta	30	**16,6%**
Deterioramento a causa dell'invecchiamento	25	**13,8%**
Uso improprio	23	**12,7%**
Capacità (portata) elettrica inadeguata	22	**12,2%**
Prodotti in avaria	17	**9,4%**
Sconosciute	9	**5%**
Totali	**181**	**100%**

3.2 Metodi di indagine sull'incendio di natura elettrica

Esiste un consistente numero di fattori che possono giocare un ruolo decisivo in ogni tipo d'incendio. Nel corso di un'indagine relativa ad un incendio, di cui si sospetta che le cause possano essere attribuite a fenomeni elettrici, sarà probabilmente necessario ricorrere all'analisi da parte di esperti per ottenere risultati accurati e sostenibili. L'applicazione attenta dei principi e procedimenti scientifici, in combinazione con una chiara comprensione di come l'elettricità e il fuoco si comportano, è il modo migliore per ridurre al minimo il rischio di una valutazione errata.

Come detto in precedenza, l'incendio di natura elettrica è sicuramente l'evento più grave legato all'impiego dell'energia elettrica ed derivato da difetti e malfunzionamenti in conseguenza di una cattiva progettazione/realizzazione, di una carente o inesistente manutenzione o dello scorretto utilizzo di:

- impianti elettrici utilizzatori;
- apparecchi elettrici utilizzatori;
- organi di collegamento mobile.

Come requisito minimo, perché un difetto o malfunzionamento elettrico possa essere considerato una possibile causa, devono sussistere tre condizioni fondamentali:

- al momento dell'incendio il circuito doveva essere alimentato;
- deve essersi verificata una qualche "attività elettrica" inusuale;
- deve essersi creato il calore sufficiente nonché la temperatura minima necessaria perché il primo elemento nella sequenza dell'incendio abbia potuto prendere fuoco.

Oltre a questi fattori, deve esser valutata la possibilità del verificarsi di scariche atmosferiche o di eventi generati dall'accumulo di cariche elettrostatiche.

In un'indagine relativa ad un incendio di sospetta di natura elettrica, è di fondamentalmente importanza, al fine della determinazione delle cause, che l'attività investigativa sia preliminarmente rivolta alla conoscenza di quale sia la tipologia e la configurazione impiantistica oggetto di indagine e alla sua contestualizzazione nell'ambito della struttura in cui essa è stata inserita.

La possibilità di verificare l'esistenza di documentazione progettuale che attesti il corretto dimensionamento delle condutture dell'impianto nonché del sistema di protezione dello stesso, della documentazione attestante la conformità della realizzazione dell'impianto

elettrico alla "buona tecnica", delle certificazioni o delle marcature relative ad apparecchiature e macchinari, ha infatti un notevole peso. Così come la disponibilità del registro di manutenzione che attesti l'avvenuto controllo e gli interventi di manutenzione, la tracciabilità di eventuali trasformazioni nel corso della vita dell'impianto e, infine, se si possono essere manifestate anomalie di funzionamento o la presenza di difetti già individuati. Non meno importante è la possibilità di assumere informazioni in merito alle condizioni di esercizio e sulla presenza di eventuali materiali combustibili nei locali interessati dall'evento. Fondamentali sono anche le eventuali testimonianze dirette che possono riferirsi a eventi quali:

- sensazione di formicolio mentre si sta toccando un apparecchio elettrico o parti dell'impianto che non dovrebbero trovarsi in tensione;
- apparecchi elettrici o parti dell'impianto che risultano al tatto più caldi del normale;
- frequenti interventi dei dispositivi di protezione;
- effetto flicker ("sfarfallamento") o oscuramento delle luci;
- rumori ed odori insoliti;
- segni di bruciature sulle spine o le prese di corrente o su qualsiasi altra parte dell'impianto elettrico e delle apparecchiature (nerofumo);
- mancanza improvvisa di energia elettrica;
- danneggiamento degli isolamenti come cavi od interruttori che mostrano conduttori scoperti.

Gli incendi di natura elettrica sono spesso diagnosticati sulla base di evidenze circostanziali, come la posizione d'innesco dell'incendio, la presenza di cavi e componenti elettrici in quell'area, il tempo apparente di combustione, eccetera.

Dal momento che vi è un gran numero di danni intorno al vero centro di guasto, di solito non è possibile distinguere tra causa ed effetto quando si esaminano componenti falliti o bruciati. Spesso accade che non vengano prelevati campioni perché la loro rilevanza non appare chiara. Ciò è particolarmente vero nel caso di conduttori fusi. Anche se è un compito relativamente semplice determinare se un particolare tratto di conduttore è stato fuso da un sovraccarico elettrico o dal calore generato dall'incendio, il fatto che la fusione abbia causato l'incendio, o che l'incendio abbia causato un cortocircuito elettrico che ha causato la fusione, è spesso indeterminabile. Di conseguenza, le scene di incendio più

gravi negli edifici, dotati di elettricità, presenteranno conduttori che sono stati fusi da un cortocircuito elettrico, indipendentemente dal fatto che l'incendio sia o no di natura elettrica.

E' altresì evidente quali conclusioni errate possono essere raggiunte a causa di errori nell'interpretare gli elementi di prova visibili tra le macerie dell'incendio. Ci sono molte idee sbagliate per quanto riguarda l'individuazione delle cause degli incendi di natura elettrica.

Se non si possono identificare altre cause, sembra essere solita la reazione di attribuire l'incendio a "un cortocircuito elettrico nel cablaggio" e lasciare la responsabilità a questo, come se fosse un fenomeno naturale incontrollabile.

Anche se l'incendio fosse effettivamente dovuto a un difetto nell'installazione elettrica, un cortocircuito è sicuramente la causa meno probabile. È più probabile che la vera causa sia attribuibile ad un difetto nel sistema di protezione o ad un difetto in un connettore elettrico o in una morsettiera.

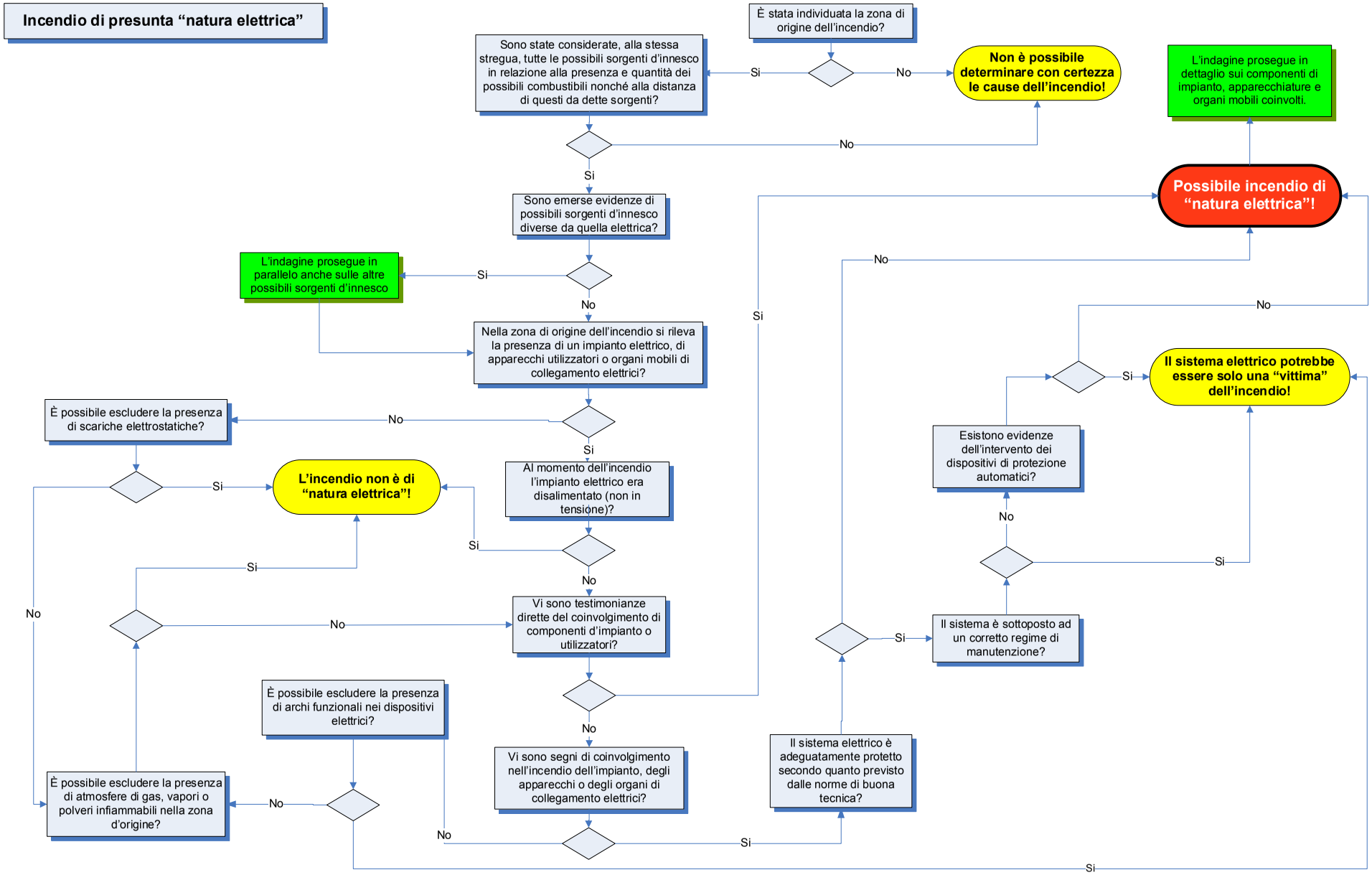
Nel caso di incendi, possiamo dire che un evento elettrico avrebbe potuto o no essere una fonte di accensione efficace. Il livello di certezza è determinato dall'affidabilità che l'investigatore ha nei dati, nell'analisi di tali dati e nella verifica delle ipotesi formulate.

Tale livello di certezza determina la formazione dell'opinione dell'investigatore che, come detto nel paragrafo precedente, rileva notevolmente nei procedimenti giudiziari in particolare quando venga richiesto per fornire perizie. Di conseguenza, anche nel processo decisionale seguito, rileva non poco l'utilizzo delle parole probabile e possibile:

- probabile sta infatti ad indicare che il livello di certezza corrisponde ad essere probabilmente più vero che no, la probabilità dell'ipotesi di essere vero è maggiore del 50%;
- possibile sta invece ad indicare che l'ipotesi può essere considerata credibile, ma che con i dati in possesso non può essere dichiarata probabile e richiede, quindi, ulteriori conferme. Il caso tipico è quello di più ipotesi comparabili (o equiprobabili).

Se il livello di certezza di un parere è semplicemente "sospetta", il parere non si qualifica come un parere di esperti. Se il livello di certezza è solo "possibile", il parere dovrebbe essere specificamente espresso come "possibile". Solo quando il livello di certezza è considerato "probabile" un parere dovrebbe essere espresso con ragionevole certezza.

Nucleo Investigativo Antincendi



3.3 Esame degli apparecchi elettrici

Se si ritiene che un incendio possa essere stato provocato da un apparecchio elettrico, o se quest'ultimo deve essere esaminato al fine di escludere che possa esserne stato la causa, prima di prendere qualsiasi decisione al riguardo è necessario svolgere un esame accurato secondo la seguente procedura:

- seguire la traccia dell'alimentazione elettrica,
- controllare le condizioni dei dispositivi di protezione in caso di sovracorrente,
- prendere nota delle posizioni di tutti gli interruttori e i comandi.

Verificare inoltre, se:

1) L'apparecchio elettrico era in funzione al momento dell'incendio.
2) L'interruttore dell'apparecchio era acceso.
3) L'apparecchio era utilizzato per l'uso per cui era stato concepito.
4) Era stato installato correttamente e in un luogo appropriato
5) L'apparecchio era stato modificato o riparato.

Individuare, infine:

1) Il tipo di elettrodomestico, la marca e il modello (controllare etichette e placchette).
2) Età dell'apparecchio e storia completa del suo utilizzo.
3) Modalità di funzionamento.

Le istruzioni d'uso e di installazione della casa di produzione, se conservate dall'utente, possono rivelarsi preziose ed includono spesso informazioni tecniche, fotografie e diagrammi. Se esiste un apparecchio elettrico identico ma non danneggiato, si possono fare dei confronti.

Può essere utile esaminare l'apparecchio danneggiato presso un laboratorio dove, dopo essere stato imballato in modo adeguato e trasportato, può essere smontato in condizioni sicure. Il laboratorio garantisce un ambiente più pulito e sicuro rispetto al luogo dell'incendio, dove piccoli componenti possono essere facilmente smarriti o tralasciati. Certe procedure di laboratorio, come la radiografia o la resinatura dei meccanismi di accensione, possono essere utili nel determinare la posizione dei contatti, ecc.

Durante tutte le fasi dell'esame dell'apparecchio è importante registrare ogni informazione e documentare fotograficamente e con video tutta l'attività.

3.4 Segni elettrici (Electrical Pattern)

Quando un cavo conduttore si scalda a causa di una sovracorrente, la struttura cristallina del rame cambia e vi è della ossidazione sulla superficie. Se il conduttore raggiunge la temperatura di fusione, si formano delle bolle dai gas che fuoriescono (impurezze). Alcune parti del filo possono fondersi, fino alla rottura del filo stesso e alla comparsa di un piccolo arco elettrico nel punto della separazione. La prima separazione interrompe la corrente, il filo inizia a raffreddarsi e si possono produrre una o più sporgenze (segmentazione) o rotture parziali del cavo raffreddato. Tra le rotture o le sporgenze, la superficie è relativamente intatta ad eccezione delle bolle. Questa sorta di segmentazione si può osservare, oltre che sui cavi di rame rigido, anche in cavi di alluminio e di nichelcromo.
Le estremità delle rotture spesso sono arrotondate con una grossa goccia. A volte si può trovare una piccola goccia e uno spruzzo di rame fuso sul filo a monte della rottura. Spesso vi è una goccia grande fino a due volte e mezzo il diametro del filo. È importante rilevare che le gocce di rame fuso da sovracorrente generalmente presentano lo stesso aspetto tipico di estremità fuse dall'incendio, quindi occorre prudenza nell'esame e nella valutazione delle caratteristiche del resto del filo, prima di giungere ad una conclusione definitiva.

3.4.1 Indicazioni di archi elettrici sui conduttori

1) Formazione di bolle.
2) Parti saldate.
3) Superfici crivellate.
4) Schizzi di metallo.

Gli effetti delle prime tre indicazioni riportate possono essere confusi con quelli tipici dei metalli che entrano in lega ma un'analisi di laboratorio potrà confermare la natura del danno.

3.4.2 Indicazioni di calore sui conduttori

1) Ossidazione.
2) Rigonfiamento.
3) Fusione (estremità appuntite).
4) Ispessimento.

5) Formazioni sferiche.
6) Conduttori sfilacciati saldati per fusione.

3.4.3 Indicazioni di sovracorrrenti sui conduttori

1) Materiale termoplastico di isolamento danneggiato o fusione generalizzata del materiale isolante.
2) Fusione laterale dei conduttori.

I cortocircuiti sono dei guasti determinati dal contatto tra due parti del circuito tra cui è presente una tensione. Sono provocati dal cedimento di un isolamento, dall'interposizione di un oggetto conduttore o di un liquido tra parti in tensione, rotture meccaniche, ecc.
La corrente, limitata da impedenze generalmente trascurabili rispetto a quelle dei carichi, risulta di gran lunga maggiore di quella di normale funzionamento del circuito e può provocare danni quasi istantaneamente sia per effetti termici, sia per effetti elettromeccanici (I = V/R, ad es. I = 220/0,1 = 2200 A).
Il comportamento termico dei cavi in cortocircuito segue un andamento differente rispetto a quello in sovraccarico. Infatti, lo sviluppo di calore è talmente intenso e veloce che il fenomeno del riscaldamento degli isolanti viene considerato adiabatico, e cioè senza scambio termico con l'esterno. Tutto il calore sviluppato contribuisce all'aumento di temperatura del cavo, il cui isolante può prendere fuoco direttamente o innescare sostanze infiammabili con cui si trova a contatto o in prossimità, originando incendi o, in presenza di atmosfere esplosive, esplosioni.
Altre conseguenze del cortocircuito possono essere la deformazione, la rottura e la proiezione di oggetti per effetti elettrodinamici, l'esplosione di componenti per l'elevato sviluppo di energia e la produzione di archi elettrici (l'arco scioglie il rame e l'esplosione sparge gocce incandescenti tutto intorno, con possibilità d'innesco di un incendio).
Segni tipici di riscaldamento dovuto a cortocircuito o sovracorrente:

- Involucro isolante staccato, rigonfio o che presenta bruciature che procedono dall'interno verso l'esterno per tutta la lunghezza del filo con sezione costante.
- Perdite di lucentezza del rame per tutta la lunghezza del filo con sezione costante.
- Molteplici punti di origine dell'incendio lungo la conduttura elettrica ed in particolare nei punti di attraversamento con elementi combustibili.
- Segni di sfiammate e fusioni nell'interruttore posto a protezione del circuito.

3.5 Mappatura degli archi

La difficoltà che l'investigatore incontra nell'esame delle tracce è nella differenziazione tra causa ed effetto. Persino una traccia di arco elettrico in corrispondenza del punto di origine dell'incendio non prova necessariamente un'origine di natura elettrica. Come in tutti gli scenari di incendio, un'accurata individuazione del punto di origine facilita il compito.

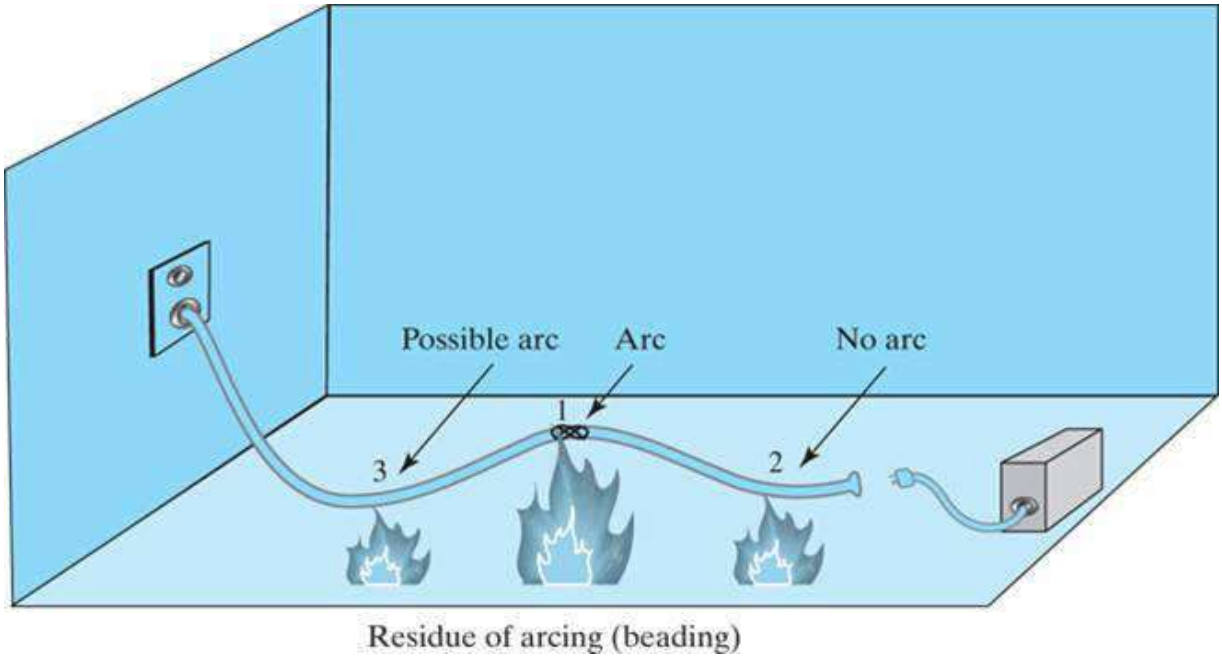
Le operazioni da eseguire per stabilire se un incendio è o meno di natura elettrica, sono le seguenti:

- Devono essere tracciati tutti i circuiti e definiti i carichi di corrente.
- Quando i conduttori sono spezzati, una misurazione della sezione trasversale o il conteggio dei pezzi di filo può rappresentare il solo modo per tracciare il percorso delle parti rimaste.
- Esaminare i dispositivi di protezione contro i sovraccarichi; il tipo di rottura del fusibile può dare delle indicazioni. I fili dei fusibili che si spezzano a causa di un modesto sovraccarico tendono a fondersi. Quando la causa è un corto è probabile che si verifichi una vaporizzazione dei fili del fusibile. Per ottenere questa informazione in caso di fusibili a cartuccia, sarà necessario un esame con i raggi X. Nell'esaminare fusibili ed interruttori automatici è buona prassi studiarne uno alla volta per poi riporli al loro posto.
- Occorre documentare accuratamente la scena. Annotare informazioni in modo dettagliato è fondamentale.

Lo strumento principale per la determinazione dell'origine di un incendio consiste nell'analisi dei percorsi dell'incendio, anche se la cosa è tutt'altro che semplice in caso di incendio generalizzato (flashover).

I circuiti di un impianto elettrico domestico di solito sono tutti alimentati quando si presenta un incendio. Gli effetti dell'incendio sui conduttori vanno dallo stress degli isolanti fino alla fusione dei conduttori.

In caso di cedimento dell'isolante si possono verificare fenomeni d'arco elettrico tra i conduttori di fase, il neutro e la terra. Durante l'incendio i circuiti rimangono alimentati, a meno che non sia coinvolto subito il quadro di distribuzione. Eventualmente l'incendio o l'intervento dei vigili del fuoco può provocare la disalimentazione dei circuiti elettrici. Quindi eventuali guasti elettrici si presentano nelle prime fasi dell'incendio.



Tratto da: John D. DeHaan, David Icove Kirk's Fire Investigation, 7th edition 2012.

La sequenza di questi eventi può aiutare l'investigatore nel distinguere i circuiti che erano alimentati durante l'incendio da quelli che non lo erano. L'investigatore può individuare la posizione in cui l'incendio ha attaccato i circuiti elettrici prima che venissero disalimentati. Quindi può confrontare le posizioni dei residui carbonizzati dagli archi. La posizione degli archi sull'impianto elettrico (mappatura degli archi) può rivelare dove l'incendio è iniziato e come ha attaccato l'isolamento dei conduttori in tensione.

<u>Come procedere:</u>

- Identificare l'area di ricerca riportandola su un disegno.
- Individuare tutti i punti nel sistema di distribuzione in cui si sono verificati gli archi. Tale operazione può essere tutt'altro che semplice (individuazione dei conduttori, delle scatole di derivazione, dei carichi, ecc.)
- Determinare se il rame dei conduttori si è fuso per un arco o per riscaldamento ambientale.
- Annotare le caratteristiche fisiche delle perlinature.
- Riportare tutte le posizioni sulla piantina.

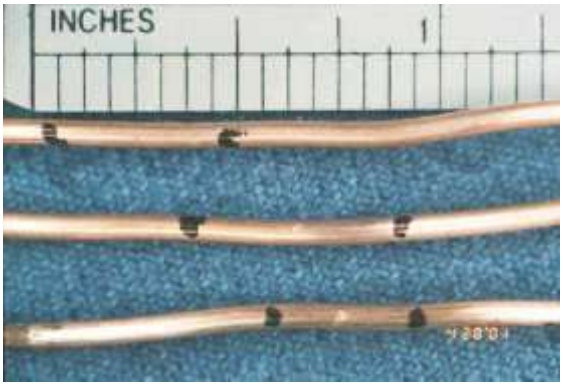
Un'ipotesi che sta alla base della mappatura degli archi è che l'incendio si espande uniformemente in tutte le direzioni e mantiene la sua forma circolare centrata sul punto di

origine. Come ormai sappiamo, può essere difficile distinguere le cause di fusione dei conduttori. In genere l'arco elettrico è più localizzato.

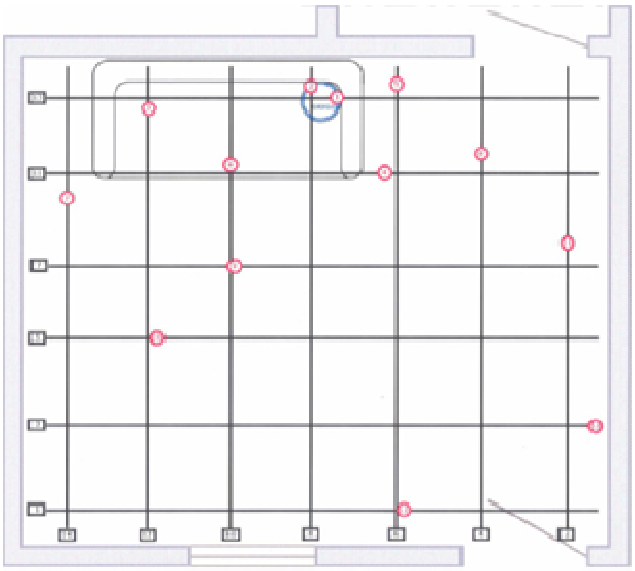
3.6 La metodologia della mappatura degli archi utilizzata dopo un incendio di prova

La foto che segue mostra lo scenario costruito durante un incendio di prova che si è eseguito negli USA, dopo il quale si è utilizzata la metodologia della mappatura degli archi per risalire alle cause che hanno fatto scaturire le fiamme.
Il tipo di danno e i segni sul muro avrebbero potuto indurre gli investigatori a stabilire che l'incendio si era innescato nella zona sinistra del divano, forse provocato da una lampada alogena. Invece l'incendio era stato innescato da un arco elettrico scaturito dalla griglia di cavi inguainati vincolati al soffitto su strutture metalliche.

Dopo una minuziosa applicazione della metodologia della mappatura degli archi, sui cavi conduttori rinvenuti sono stati evidenziati i segni provocati dagli archi elettrici (vedi foto che seguono).



A seguire un esempio di piantina o schizzo planimetrico utilizzato per la mappatura degli archi, riferito sempre all'esperimento di cui abbiamo parlato sopra.



ARC LOCATIONS - CELL # 3

Tratte da: Daniel L. Churchward, Ryan M. Cox & David Reiter ARC SURVEYS AS A MEANS TO DETERMINE FIRE ORIGIN IN RESIDENTIAL STRUCTURES

Nonostante la validazione sperimentale del sistema della mappatura degli archi, e la sua semplicità teorica, non sempre lo stesso è decisivo nella comprensione della natura dell'incendio (se riconducibile a cause elettriche o meno) o sulla sua evoluzione, in particolare per le difficoltà oggettive legate al riconoscimento degli archi (soprattutto quando si tratta di stabilire se questi sono stati la causa scatenante dell'incendio o se si sono prodotti a seguito del coinvolgimento dei cavi conduttori nelle fiamme).

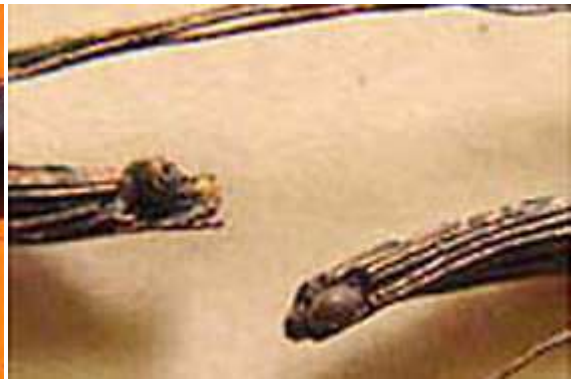
3.7 Osservazione delle perlinature

Gli Electrical Molten Marks (EMM) possono essere primari (arco causa dell'incendio) o secondari (arco provocato dall'incendio).

L'evidenza (le prove) dell'avvenuto arco in uno scenario post incendio sono, generalmente, di tre tipologie:

1. Notching (Intagli)
2. Beading (Perlinatura)
3. Spruzzi ad alta energia (High Energy Splatter)

Arcing evidence: notching*

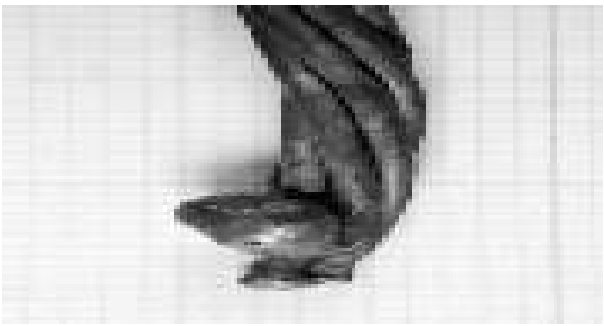


Arc severing & subsequent beading*

High energy splatter due to arcing*

*Tratte da: Electrical fire causation Dave Hines http://www.samaceng.com/articles/electrical-fire-causation/

Visto che la temperatura di fusione del rame (1085ºC) o dell'alluminio (660ºC), sono molto più basse rispetto alla temperatura raggiunta dall'arco elettrico, questi materiali fondono generando il fenomeno della perlinatura (Beads):



Tratto da: Babrauskas, V, Arc Beads from Fires: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?

Il rame dei conduttori, qualora non in tensione, se investito da un incendio comunque presenta segni di fusione, ma non segni di perlinatura:

Tratto da: Babrauskas, V, Arc Beads from Fires: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?

In generale, la presenza di perlinatura in uno scenario di incendio INDICA solamente che l'impianto elettrico era in tensione quando coinvolto dall'incendio, MA NON ASSICURA CHE LA CAUSA SIA DI TIPO ELETTRICO.

Il solo esame a vista della perlinatura NON è sufficiente per distinguere fra "perlinature vittima" e perlinature "causa". Da alcuni studi[1] relativi alla struttura del carbone nei residui carbonizzati in EMM primari e secondari preparati in laboratorio, è emerso che nei primari è presente grafite e carbone amorfo, mentre nei secondari solo carbone amorfo. Presso il Tokio Fire Department si è notato che i residui di carbonio si trovano più facilmente all'interno di perlinature "vittime", ma non all'interno di quelle "causa" dell'incendio.

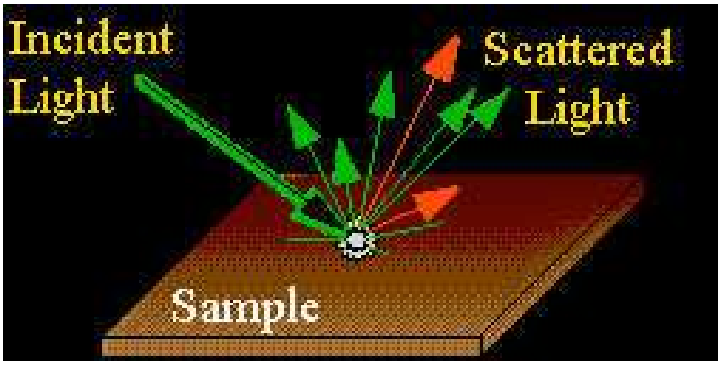
[1] Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S., and Isao, Y., **Determination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires** by DAS, National Institute of Testing and Evaluation, Kiryu, Gunma, Japan (2000).
Ishibashi, Y., and Kishida, J., **Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires,** pp. 83-90 in 1990 Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg. (1990).

Utilizzando la spettroscopia Auger (Auger Electron Spectroscopy – AES) si analizzano gli elementi chimici trovati sotto i primi 50-100 Angstrom della superficie interessata dall'arco. L'analisi valuta i prodotti di combustione presenti. Se l'arco è avvenuto in presenza di prodotti di combustione associabili solo all'isolante e a combustibili situati nelle immediate vicinanze del guasto, l'arco elettrico può aver causato l'incendio. In caso contrario, in presenza di prodotti di combustione derivanti da materiali lontani, il guasto è stato probabilmente causato dall'incendio.

Esistono anche altre tecniche di analisi dei conduttori, ad esempio lo Specific Gravity of Beads (SGB), ossia la misura del volume delle perlinature per distinguere gli archi primari da quelli secondari. Questo metodo misura il volume delle perlinature immerse in un liquido. C'è poi la "Termografia ad infrarossi", che viene usata prevalentemente nella manutenzione e nell'analisi preventiva degli impianti elettrici e può operare anche con l'impianto in funzione.

3.8 Spettroscopia e spettrometria

La spettroscopia è lo studio dell'interazione tra una radiazione e la materia. La spettrometria misura queste interazioni tramite spettrometri e spettrografi. L'effetto Raman (spettroscopia elettromagnetica) si presenta quando una luce monocromatica incidente (laser) eccita le molecole di un campione con una successiva dispersione (scattering) della luce.

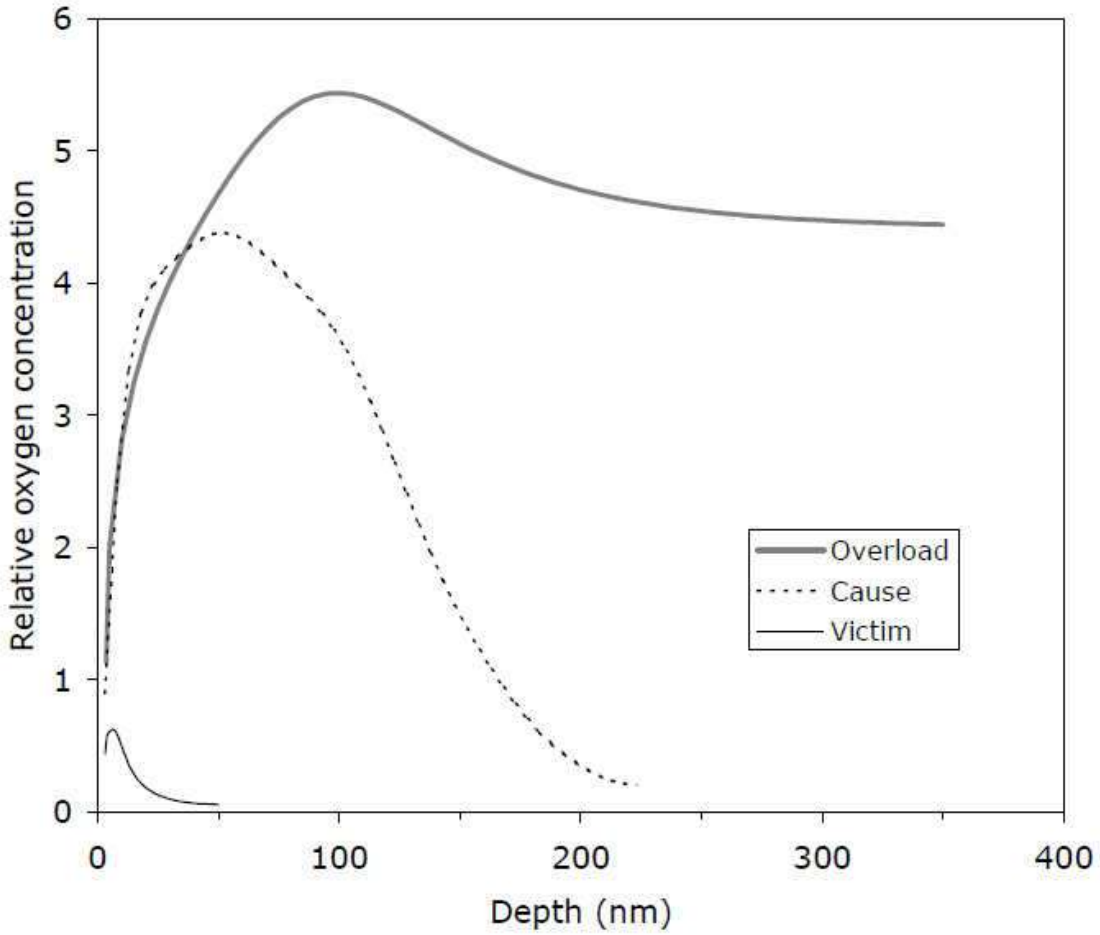


La maggior parte della luce emessa ha la stessa lunghezza d'onda della luce incidente (e viene filtrata), mentre una parte possiede una lunghezza d'onda diversa e viene inviata ad un rilevatore. Questa luce diffusa in maniera anelastica costituisce il "Raman scatter". Dipende dalla variazione di movimento delle molecole e serve per determinare la presenza di elementi diversi dal rame nei conduttori.

La spettroscopia Auger (spettroscopia elettronica) analizza la composizione di una superficie misurando l'energia degli elettroni emessi dalla superficie di un materiale quando viene irradiata con elettroni aventi energia compresa tra 2keV e 50 keV. Alcuni degli elettroni emessi dalla superficie hanno energia caratteristica dell'elemento da cui sono emessi.

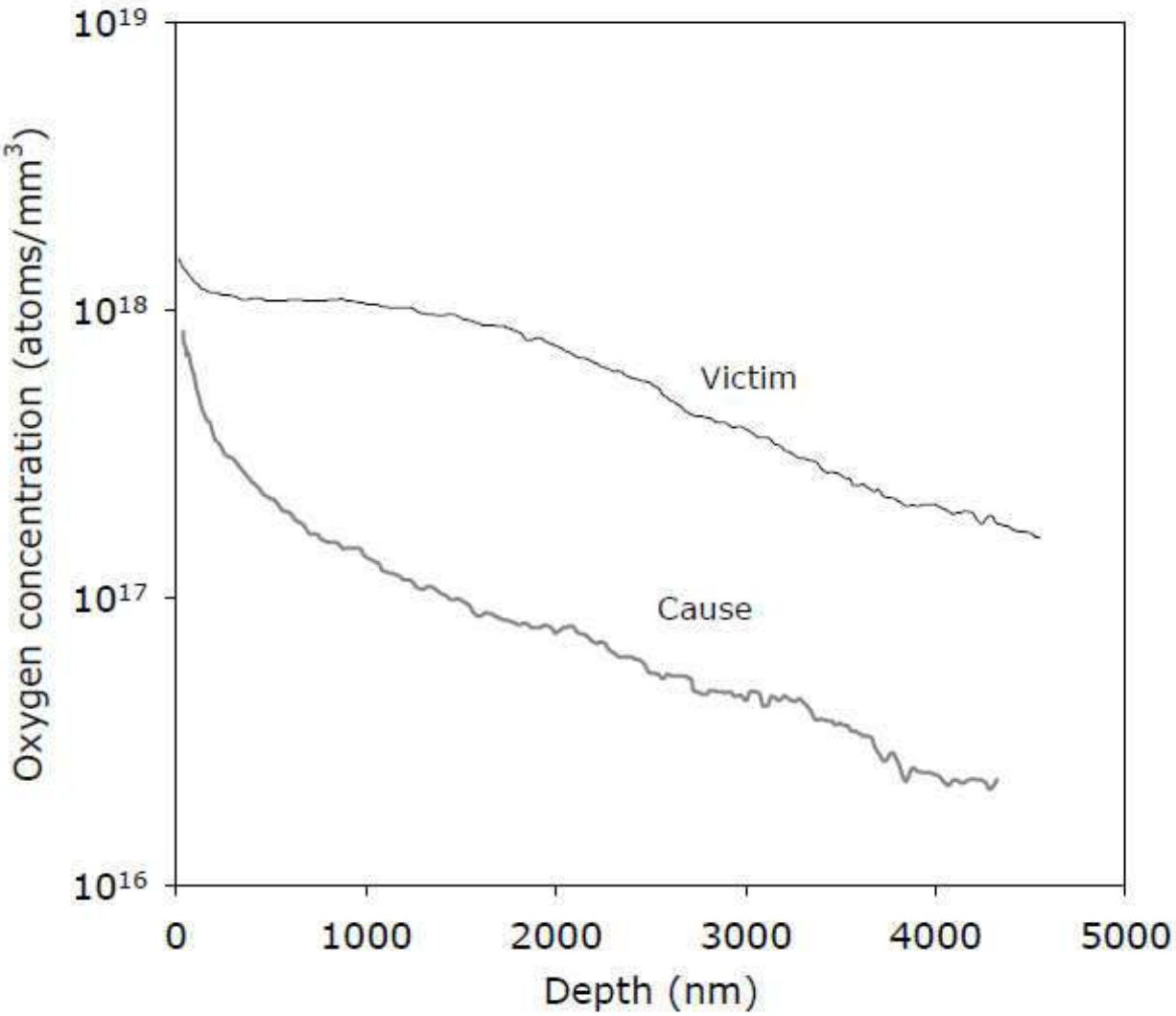
3.9 AES, ESCA e SIMS

Esistono numerose tecniche di analisi che consento di individuare la concentrazione di particolari elementi all'interno di un campione metallico:
Queste includono la spettroscopia elettronica Auger (AES), la spettroscopia elettronica per analisi chimica (ESCA) e la spettrometria di massa ionica secondaria (SIMS). Ognuna di queste tecniche, consentono di estrarre il profilo di profondità rispetto al profilo di concentrazione incidendo progressivamente le porzioni della superficie e esaminando uno strato inferiore.



Profili di concentrazione di ossigeno mostrati nel brevetto da MacCleary e Thaman. Il loro brevetto prevede che AES, ESCA o SIMS possano essere utilizzati a tal fine, ma il proprio lavoro ha utilizzato solo AES.

Tratto da: Babrauskas, V., Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? pp. 189-201 in Fire and Materials 2003, Interscience Communications Ltd., London (2003).



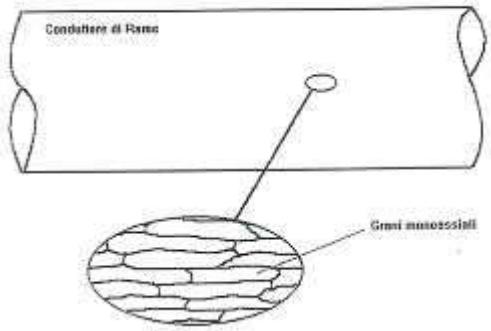
Profili di concentrazione di ossigeno, misurati da Satoh et al. utilizzando tecnica SIMS per esaminare 10 "branelli" recuperati da incendi dove è stata riconosciuta l'identità causa / vittima delle perlinature.
Tratto da: Babrauskas, V., Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? pp. 189-201 in Fire and Materials 2003, Interscience Communications Ltd., London (2003).

3.10 Metallografia

La metallografia consiste nello studio della struttura fisica dei metalli e delle leghe metalliche mediante l'utilizzo di un microscopio.

Se osserviamo un campione di rame al microscopio notiamo che la sua struttura metallografica, come quella di tutti i metalli, è caratterizzata dalla forma a "grani". Il rame

dei conduttori elettrici presenta una forma metallografica monoassiale, cioè con i grani disposti in senso longitudinale.



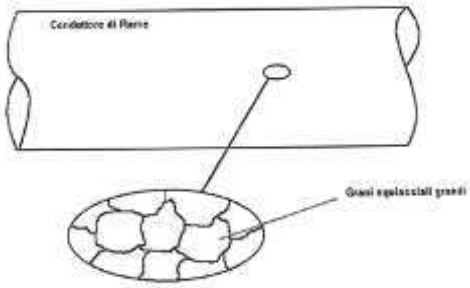
Rappresentazione di una sezione longitudinale di un conduttore di rame, normale, visto al microscopio.

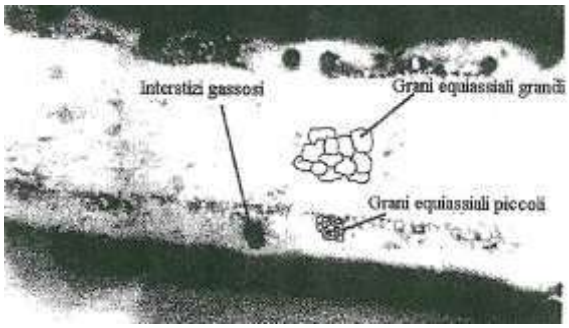
Il rame che si è avvicinato alla temperatura di fusione, senza raggiungerla, lentamente ricristallizzerà, cioè trasformerà la sua struttura metallografica in grani equiassiali di grandi dimensioni, per effetto del riscaldamento.

Il problema è rappresentato dal fatto che non vi è nulla negli effetti metallografici che possa far distinguere il riscaldamento elettrico dal riscaldamento da incendio.

La qual cosa rende di fatto impossibile comprendere se l'incendio è un incendio di natura elettrica oppure se lo stesso, scaturito per altre cause, ha successivamente coinvolto l'impianto elettrico provocandone il guasto (ed eventuali cortocircuiti o archi elettrici).

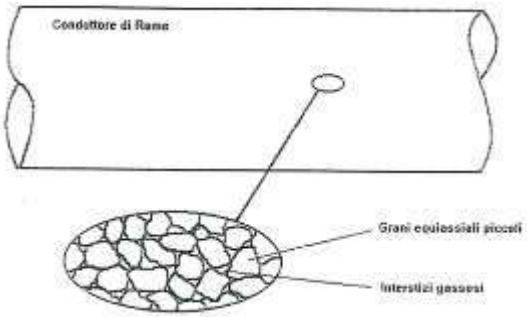
Vi sono tuttavia alcune differenze che tendono a mostrarsi e che possono essere colte nel corso di un esame attento da parte di un esperto. La fusione per incendio procede dall'esterno verso l'interno del conduttore, dunque lascia sempre un cuore non fuso, ma ricristallizzato con grani equiassiali di grandi dimensioni.

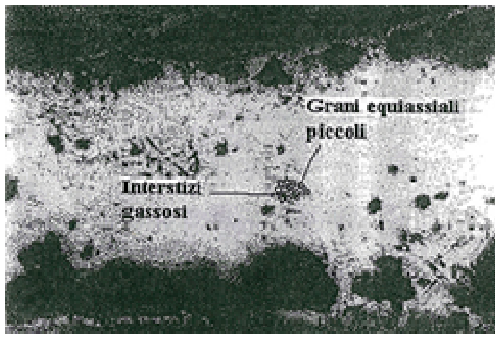




Poiché il riscaldamento dovuto a cause elettriche procede dall'interno verso l'esterno, vi è la tendenza a sciogliersi dell'intera sezione trasversale la quale, dopo la risolidificazione,

presenterà un aspetto metallografico caratterizzato da molti grani regolari più piccoli di quelli che si avrebbero con la ricristallizzazione.





La figura a sinistra rappresenta la sezione longitudinale di un conduttore di rame fuso da sovracorrente. A destra invece vediamo la sezione longitudinale di un cavo di rame fuso da un incendio. Esso presenta una struttura a grani equiassiali piccoli inframmezzati da interstizi gassosi.

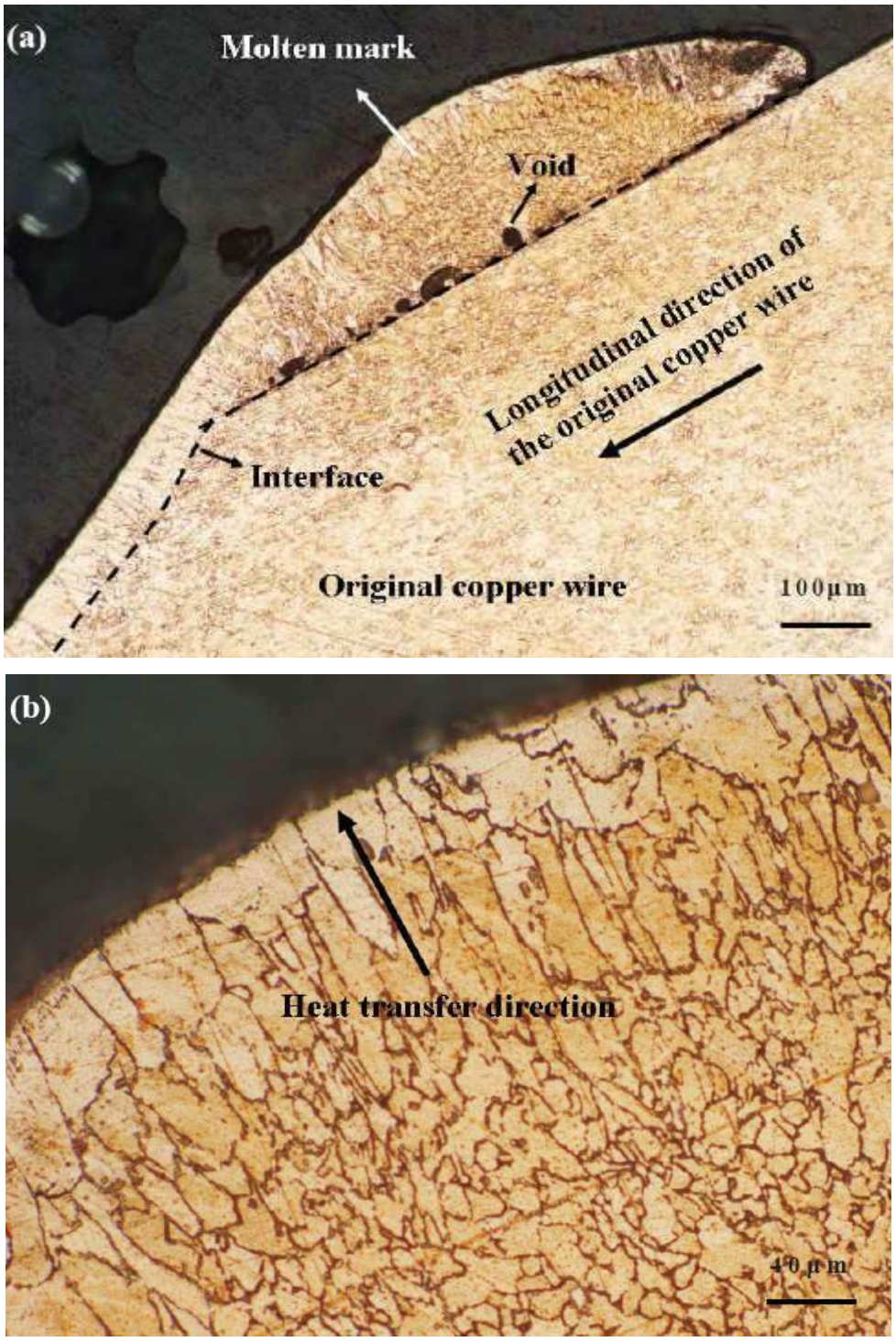
Riconfrontiamo ora tutte e quattro le figure, tenendo presente che le prime due della pagina precedente si riferiscono ad un cavo di rame fuso, coinvolto in un incendio scaturito per cause non elettriche, mentre le due figure sopra mostrano gli effetti provocati su di un cavo di rame fuso da un incendio scaturito a causa di una sovracorrente (incendio di natura elettrica).

Quando si esamina metallograficamente un conduttore intrecciato dopo che esso è stato parzialmente fuso da incendio o da una sovracorrente, si vedono chiaramente delle strisce di rame dendritico tra strisce adiacenti di grani equiassiali. Questo si verifica dove il rame fuso è colato tra i trefoli, i cui cuori non si sono fusi.

Bisogna tener conto del fatto che, nel caso del danno da arco elettrico (che di solito è il più evidente), non esiste alcuna caratteristica intrinseca in grado di mostrare se l'incendio è stato provocato dall'arco stesso o se esso sia la conseguenza di un esposizione al fuoco (scaturito per altre cause). In linea di massima il riscaldamento dovuto all'esposizione ad un incendio produce una fusione generalizzata, mentre il riscaldamento prodotto da un arco elettrico provoca effetti localizzati.

In tutte le investigazioni bisogna considerare la totalità delle informazioni disponibili prima di arrivare a una conclusione sull'impianto elettrico. Prima di tutto, è importante stabilire il punto di origine dell'incendio, e se questo coincide con una zona dove è presente un contatore, un quadro elettrico o degli interruttori magnetotermici, allora possiamo quanto

meno prendere in considerazione l'ipotesi che l'incendio sia di natura elettrica. Se invece rileviamo che i danni all'impianto (o ad alcuni dei suoi componenti) sono lontani rispetto al punto di origine, allora questi saranno una conseguenza dell'incendio e non la causa (per il loro coinvolgimento successivo).



Esempi di osservazione al microscopio da: Microscopic Investigation of a Copper Molten Mark by Optical Microscopy (OM) and Atomic Force Microscopy (AFM) - GAO Ao, ZHAO Chang-zheng, DI Man, GAO Wei, ZHANG Ming, XIA Da-wei

Figure 2 Overview photograph and SEM image of conductors fused by arcing through char.

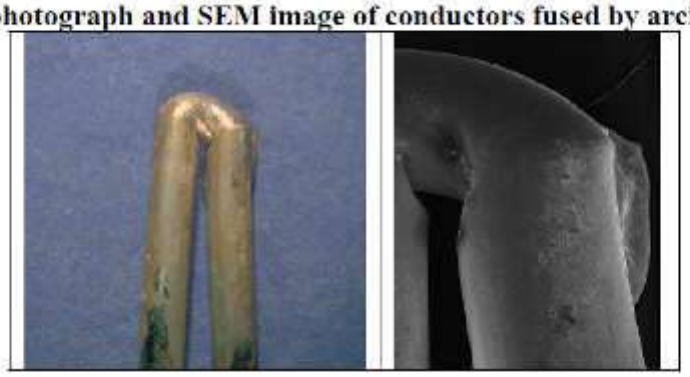
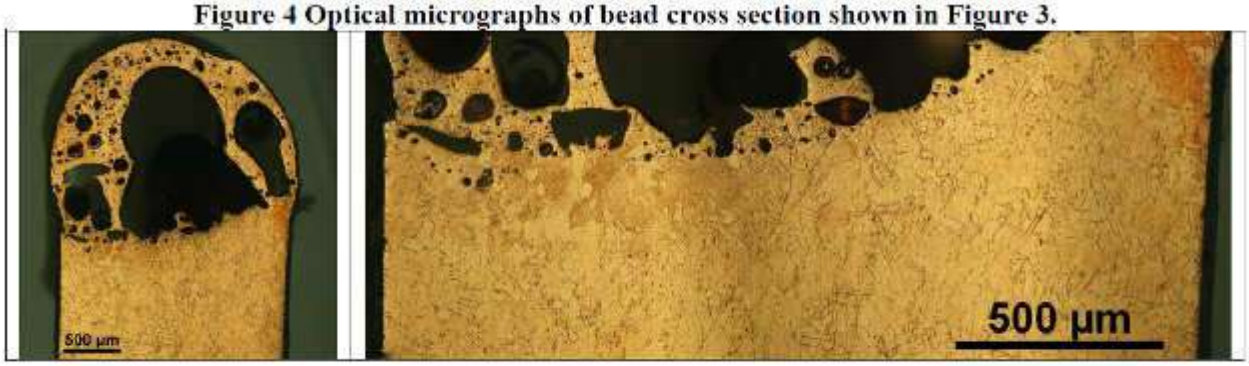


Figure 3 SEM images of arc bead interior.

Figure 4 Optical micrographs of bead cross section shown in Figure 3.



E.C. Buc, D. Reiter, J. Battley, T.B. Sing, T.M. Sing, METHOD TO CHARACTERIZE DAMAGE TO CONDUCTORS FROM FIRE SCENES

Figure 5 Stereomicroscope and optical micrographs of arc sites on solid and stranded conductors created in the laboratory.

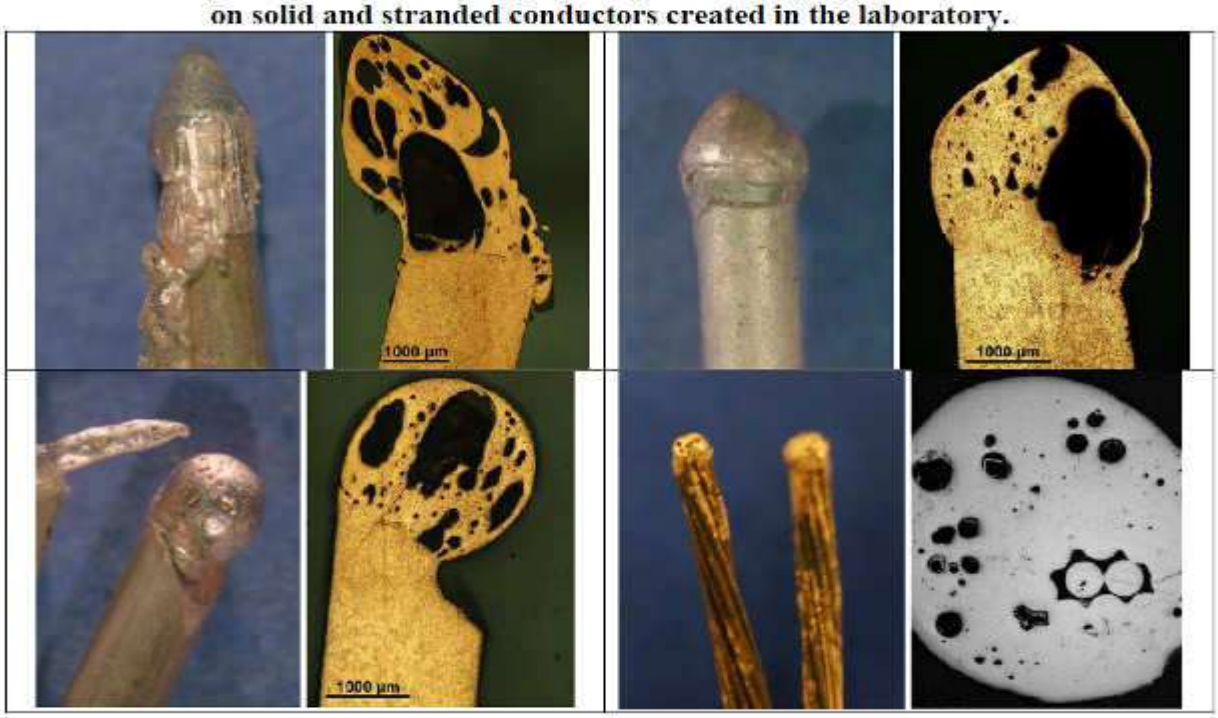


Figure 6 Stereomicroscope and optical micrographs of fire melting damage to solid and stranded conductors created in the laboratory.

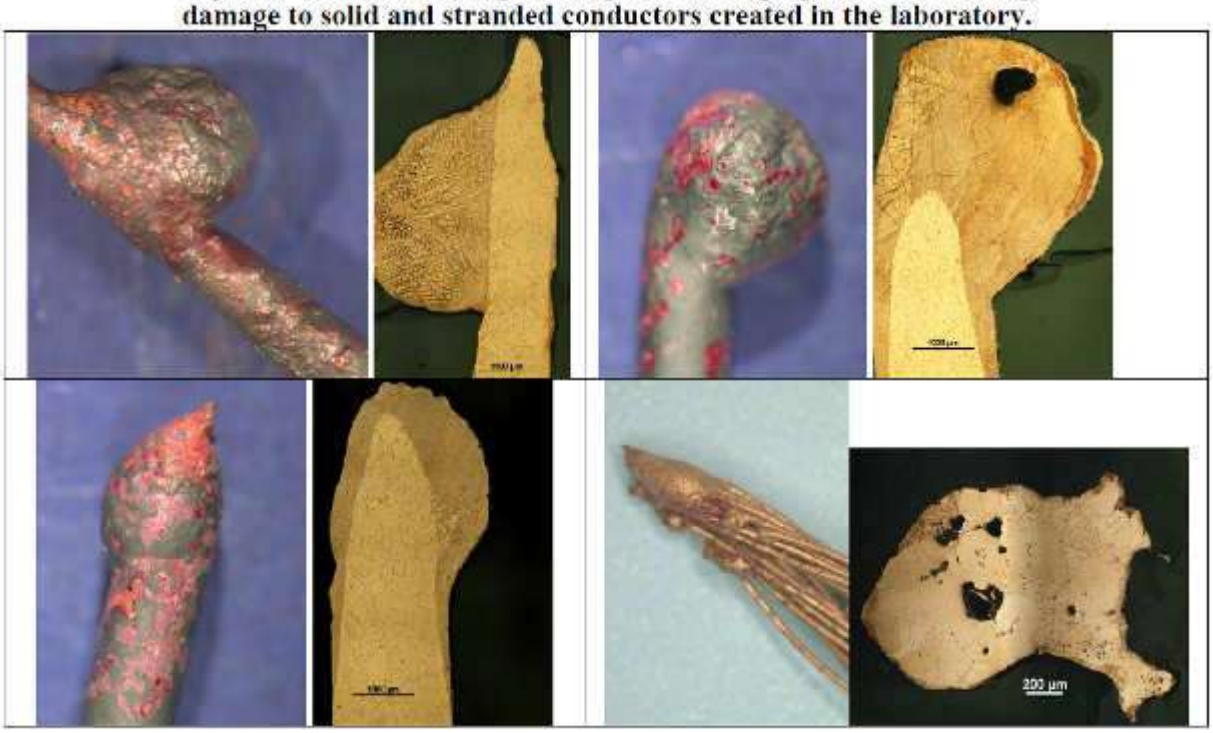
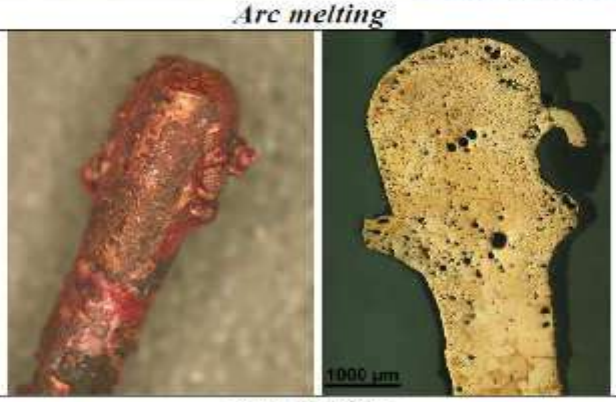


Figure 7 Stereomicroscope and optical micrographs of damage to solid conductors from the field.

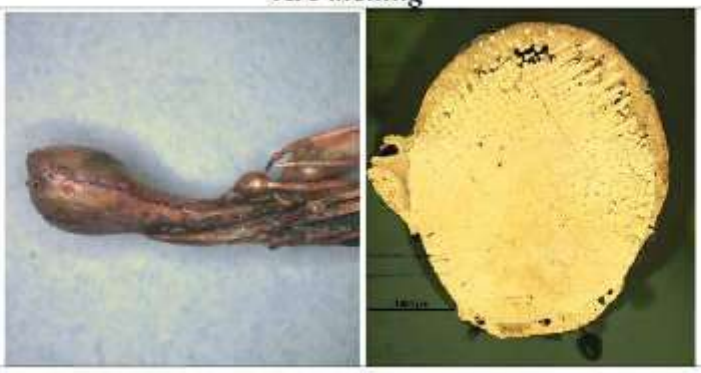
Arc melting



Fire melting

Figure 8 Stereomicroscope and optical micrographs of damage to stranded conductors from the field.

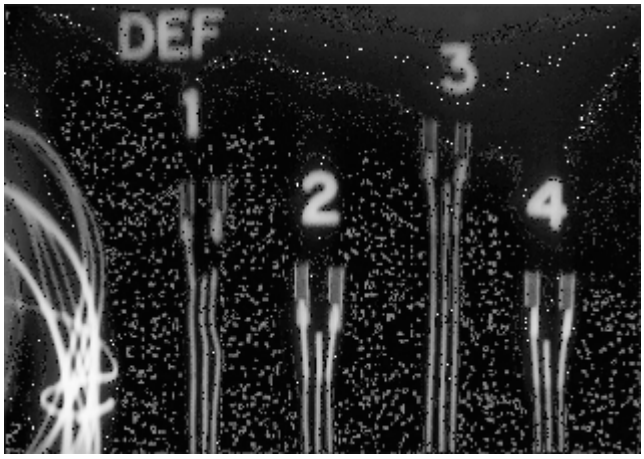
Arc melting



Fire melting

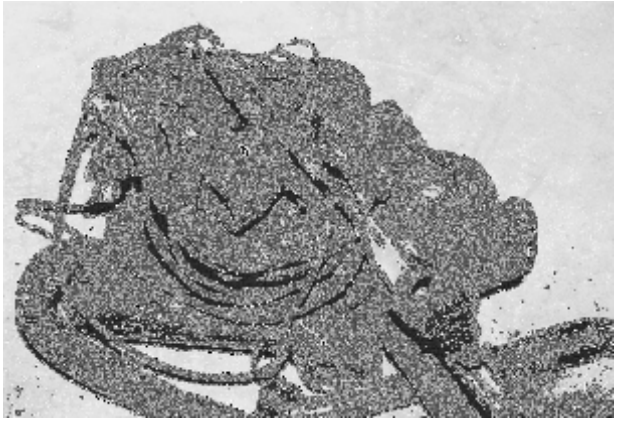
3.11 Raggi X

Nelle analisi di laboratorio si può ricorrere anche agli esami a raggi X per localizzare, ad esempio, dove è avvenuta la produzione del calore su un cavo e il guasto che ha determinato.



La radiografia di fianco è stata eseguita per comprendere le cause di un incendio provocato da un elettrodomestico. Si vedono chiaramente, sotto al numero 1, dei fili bruciati a causa di un arco elettrico, responsabile della produzione del calore che ha innescato l'incendio. Dalla radiografia si è riusciti a stabilire che la causa dell'incendio era riconducibile ad un errore in fase di assemblaggio, infatti il filo di terra e quello della fase erano troppo vicini. L'arco persistente che scaturiva durante il funzionamento dell'elettrodomestico, a lungo andare si è reso responsabile dell'innesco di un incendio.

È importante che l'eventuale smontaggio di un elettrodomestico incendiato e l'esame dei relativi circuiti interni venga effettuato da personale qualificato. Può capitare, infatti, che l'elettrodomestico non abbia preso fuoco per cause elettriche.

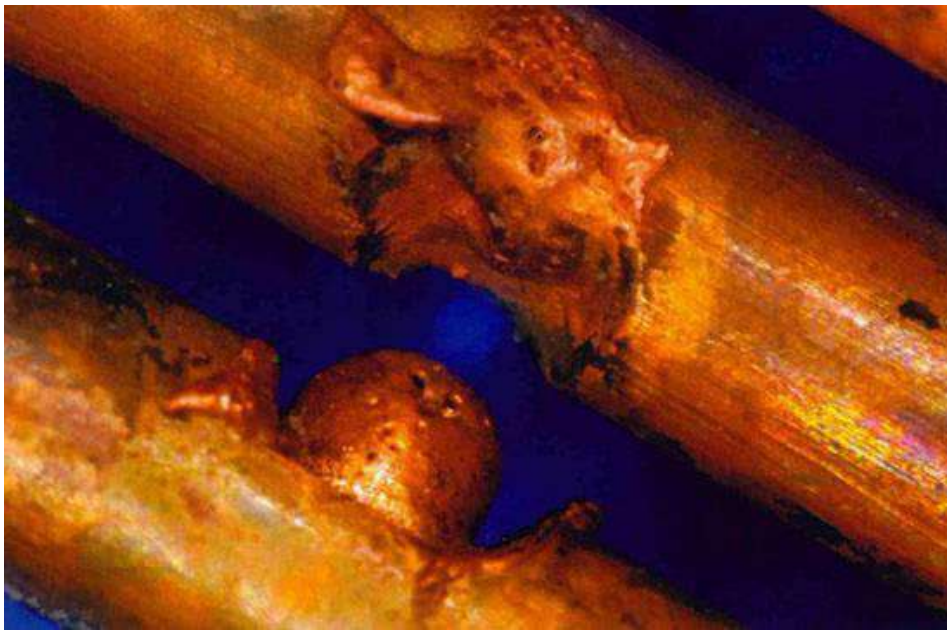


L'elettrodomestico delle due immagini sopra è rimasto coinvolto in un incendio, ma non ne è stata la causa (non era collegato all'alimentazione al momento dell'incendio). Le indagini hanno stabilito con certezza che l'incendio era scaturito per tutt'altre cause.

4. SEGNI ELETTRICI (Electrical Patterns)

A seguire una serie di foto che mostrano i segni elettrici più comuni, rilevabili sui cavi conduttori.

La foto sotto mostra una tipica perlinatura provocata da un arco elettrico. Si nota, in particolare, il trasferimento di massa dal conduttore di terra a quello di fase. Nei conduttori della foto notiamo l'elevata porosità nella zona fusa e la presenza di striature di fabbricazione nella zona non fusa.



J. Lentini, Scientific Protocols for Fire Investigation, 2008, p. 108.

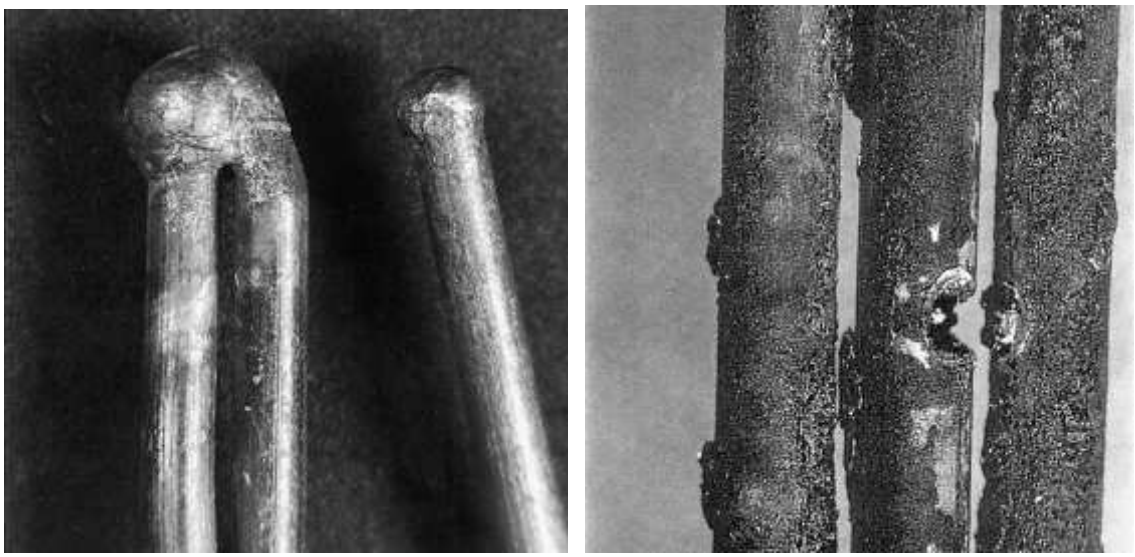
Nella foto seguente, tratta dall' Archivio fotografico del NIA, possiamo vedere invece una grossa goccia di rame fuso posta all'estremità di un cavo rigido di rame.

Le gocce di rame fuso da sovracorrente, cortocircuito o arco elettrico generalmente presentano lo stesso aspetto di quelle poste all'estremità di cavi conduttori fusi dal fuoco, pertanto non è semplice giungere ad una conclusione circa la genesi dell'incendio soltanto sulla base dei segni elettrici prodotti sui conduttori.

Archivio fotografico NIA

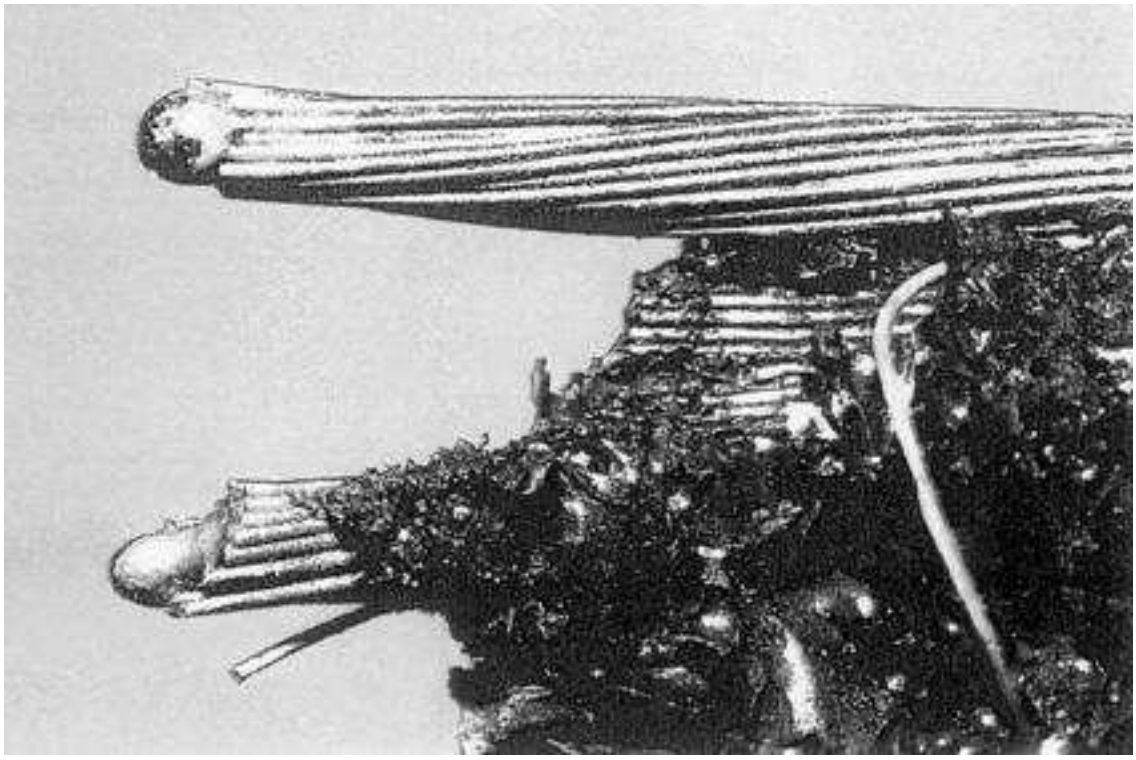
Di seguito una serie di segni prodotti dagli archi elettrici su cavi conduttori in rame rigido:

M. E. Benfer, D. T. Gottuk, Development and analysis of electrical receptacle fires, 2013, p. 165.

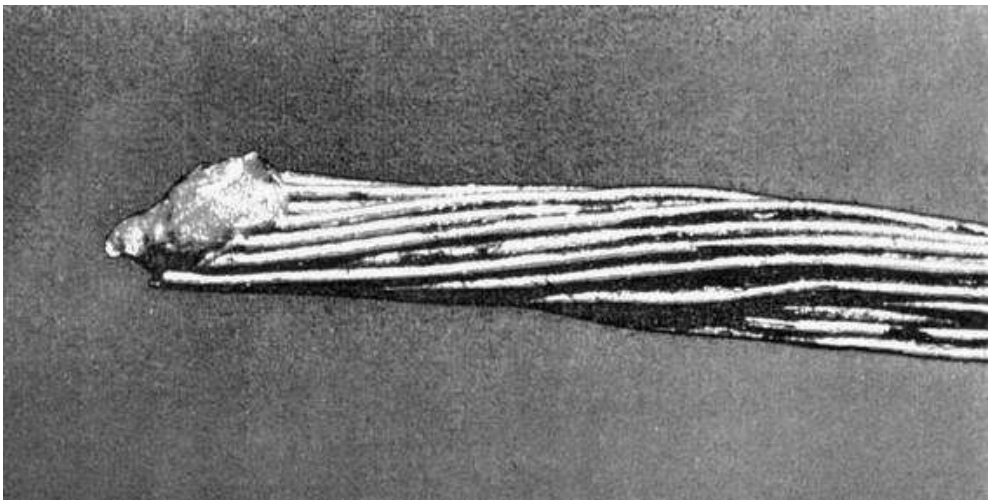


NFPA 921, 2011, pp. 86-87.

Le due immagini che seguono mostrano invece due conduttori in rame trefolato recisi da un arco elettrico:



NFPA 921, 2011, pp. 86-87.

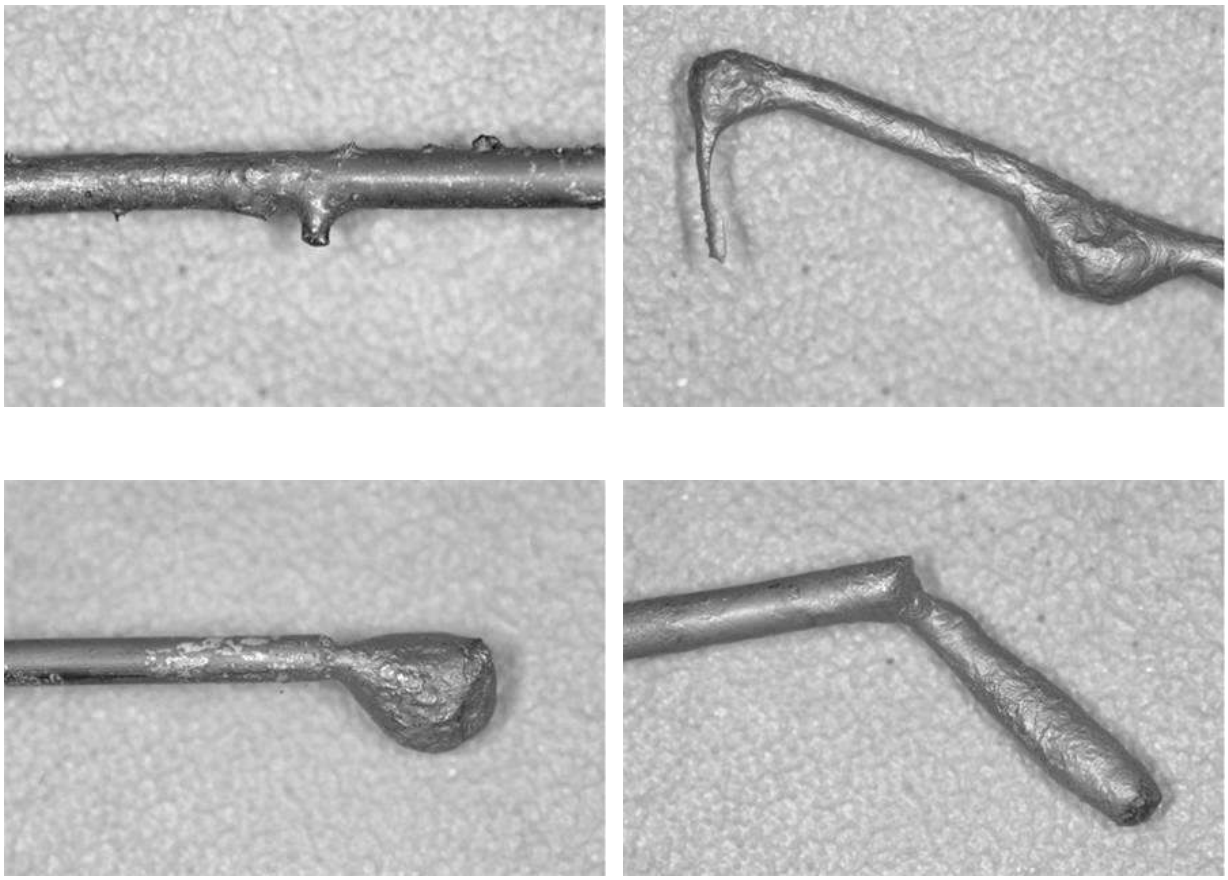


NFPA 921, 2011, pp. 86-87.

Vediamo ora dei segni di perlinatura e ossidazione sulle sezioni di rame dei cavi elettrici trefolati (le perlinature nei cavi trefolati risultano essere meno nette e più piccole rispetto a quelle che si riscontrano sui cavi a filo rigido).

Archivio fotografico NIA

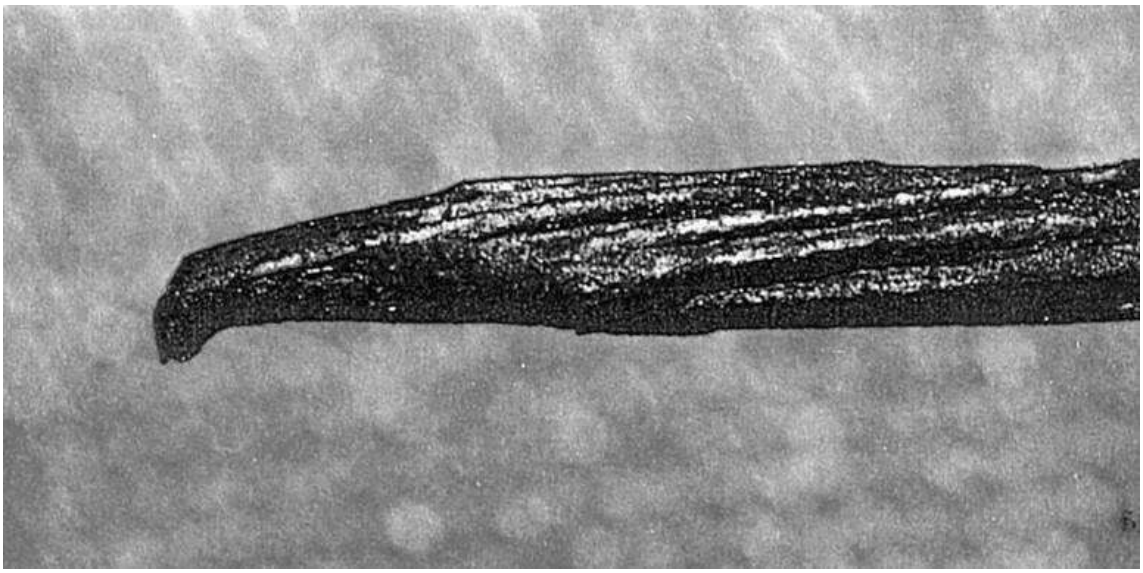
Seguono alcune foto che mostrano segni di fusione e perlinature prodotte sul rame di cavi elettrici a filo rigido esposti al fuoco:



John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, 2007.

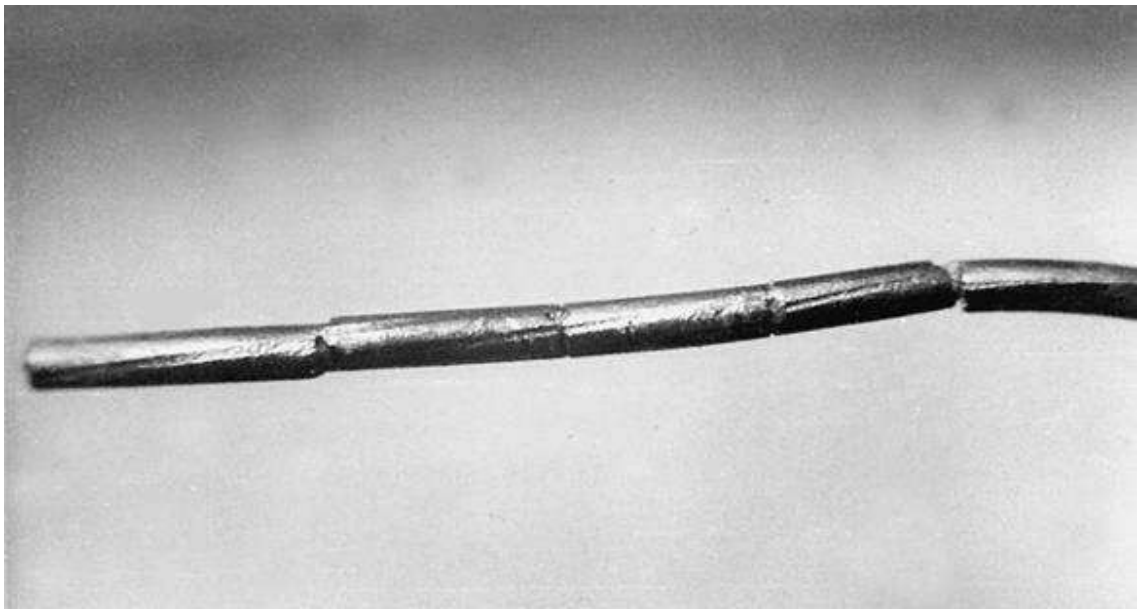
A seguire vediamo dei cavi di rame trefolato i cui fili si sono fusi e saldati insieme a causa di un incendio:

NFPA 921, 2011, p. 89.



NFPA 921, 2011, p. 89.

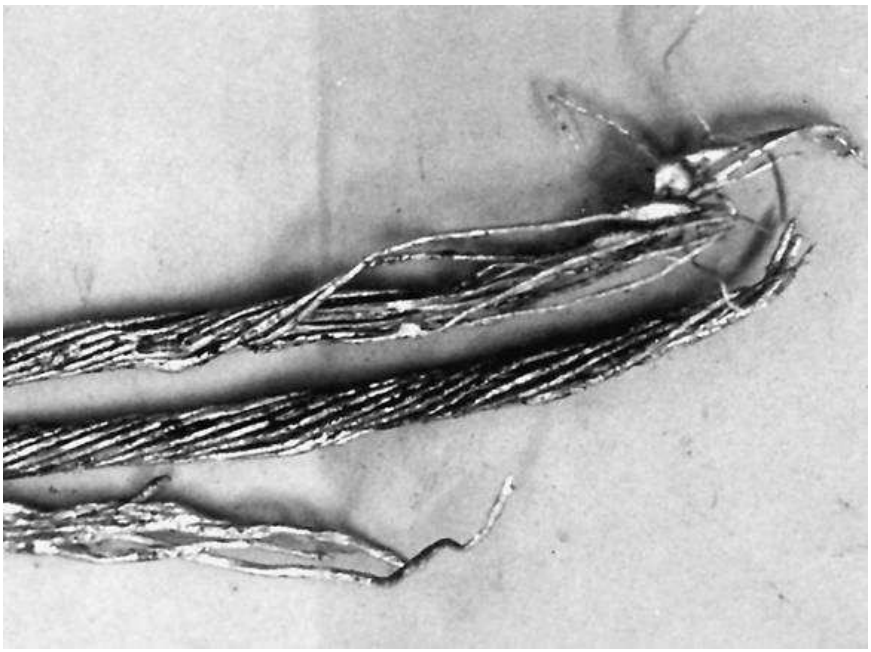
Non sempre i conduttori elettrici sono fatti di rame. Le immagini che vediamo qui mostrano i segni lasciati da un incendio su cavi in alluminio, rigido e trefolato.
Quello rigido dell'immagine di sotto è stato reciso in più punti da una sovracorrente. Si nota una sorta di segmentazione del cavo:



NFPA 921, 2011, p. 88.

I cavi trefolati dell'immagine che segue si sono fusi a causa di un incendio: si notano zone con "bulbi" ed estremità appuntite. Il coefficiente di espansione termica dell'alluminio è maggiore rispetto a quello del rame. Questo può provocare l'allentamento delle

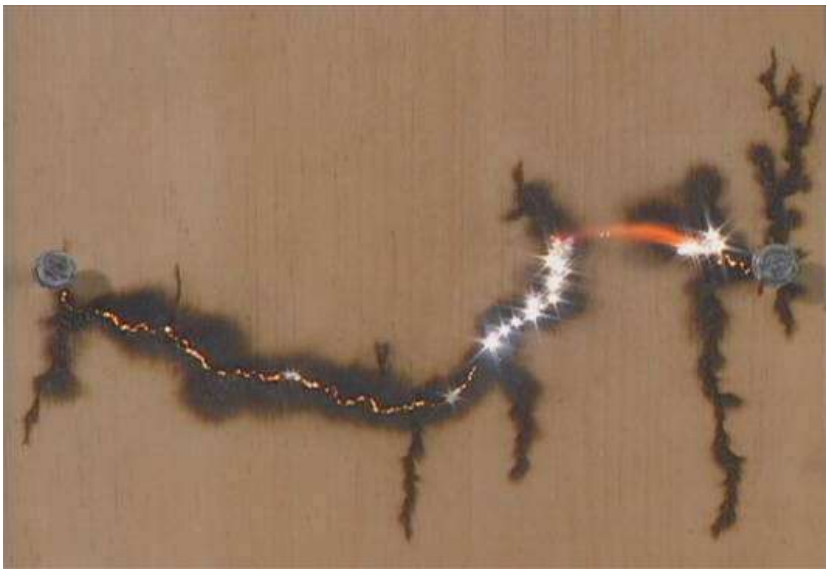
connessioni e quindi il surriscaldamento prodotto dal passaggio di corrente. In virtù di questo, in presenza di conduttori in alluminio bisogna utilizzare speciali connettori Al / Cu. Inoltre le connessioni tra i conduttori di alluminio e altri tipi di conduttori sono soggette a degradazione, per la produzione di ossido di alluminio, che ha proprietà isolanti.



NFPA 921, 2011, p. 89.

Vediamo infine, nelle immagini che seguono, i segni prodotti sulle superfici o sui conduttori dalle correnti di dispersione.

La foto seguente mostra i segni di carbonizzazione ramificata prodotta su una superficie di legno nel corso di una prova sperimentale: l'arco elettrico si è sviluppato tra le due estremità (alle quali era stata applicata una differenza di potenziale di 12 kV) di un trasformatore di tensione di un'insegna a neon, sul quale era stata gettata dell'acqua. È il tipico caso di segni provocati da correnti di dispersione (le quali in questi casi si trovano a scorrere attraverso percorsi alternativi, come anche accade nei casi degli isolanti "contaminati").

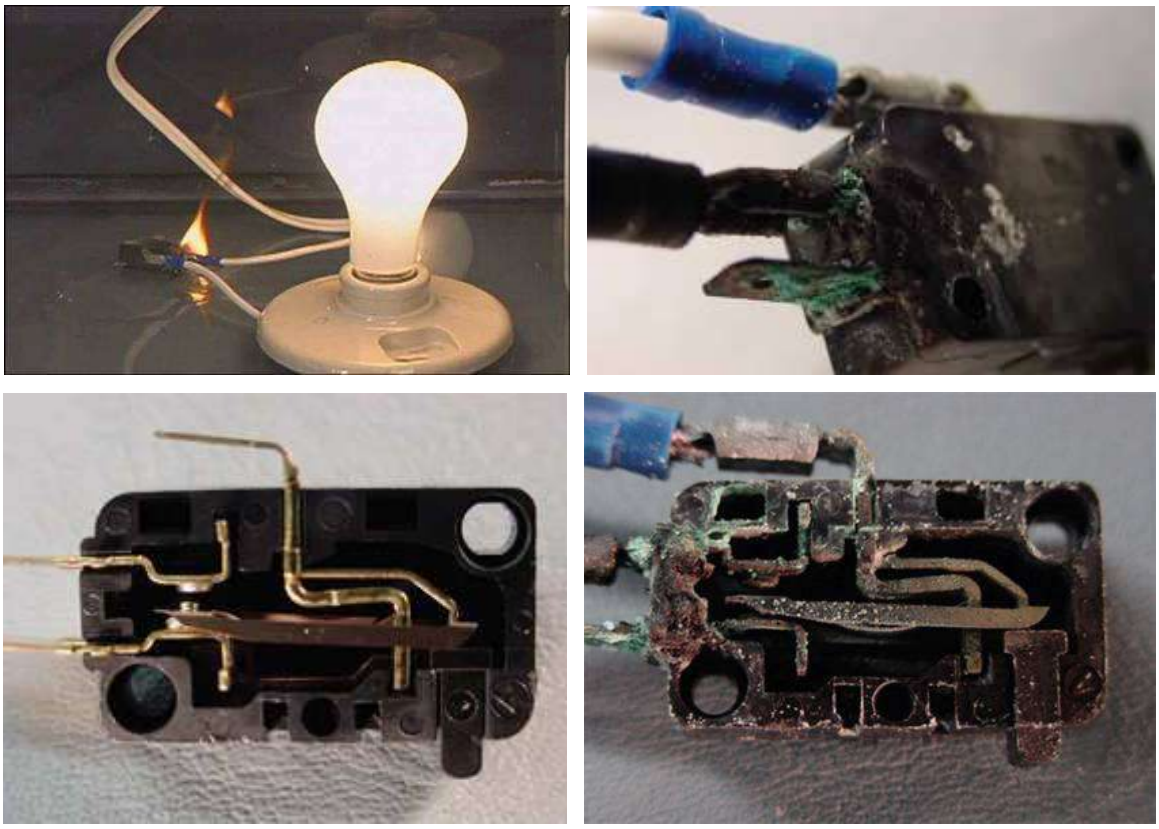


John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, 2007.

A seguire vediamo il segno provocato da una corrente di dispersione creata in laboratorio nel corso di una prova sperimentale: la corrente scorre attraverso le impurità che hanno "contaminato" la superficie isolante, in prossimità dei terminali della spina:

John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, 2007.

Per concludere, vediamo i segni che si sono prodotti nel corso di principi d'incendi innescati in altre prove sperimentali, attraverso le correnti di dispersione provocate in questo caso dall'acqua.

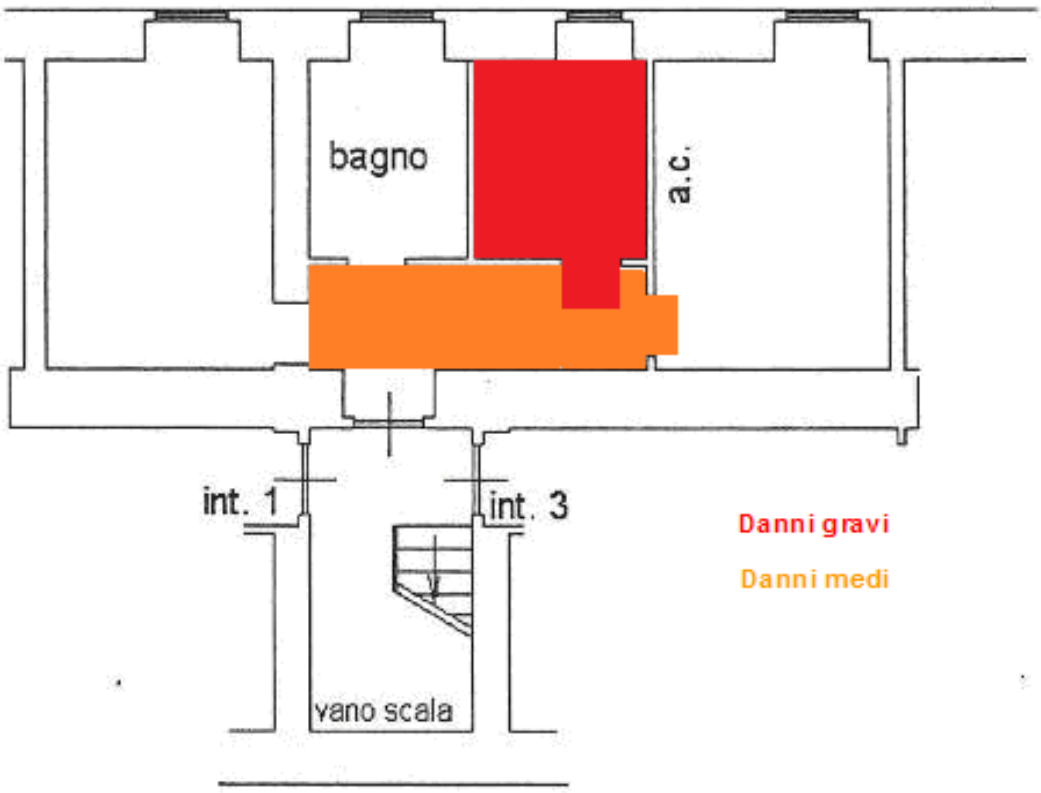


John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, 2007.

5. CASI REALI: ESEMPI DI INDAGINI SVOLTE DAL NIA

5.1 Incendio di un appartamento non generato da cause elettriche

L'incendio relativo a questa indagine si è sviluppato all'interno di un appartamento posto nel piano seminterrato in un edificio di civile abitazione. L'appartamento era composto da un soggiorno con angolo cottura, una camera da letto matrimoniale, un bagno, una cameretta e un piccolo corridoio di distribuzione tra i vari ambienti come rappresentato nella figura successiva.



L'appartamento, il giorno del sopralluogo, presentava gli infissi chiusi ad eccezione della finestra del locale cameretta (Foto n° 2) che risultava essere chiuso da un pannello di legno avvitato dall'esterno. Nel corso del sopralluogo si è provveduto ad accedere all'appartamento dalla porta principale e a rimuovere temporaneamente il pannello di legno per ottenere una maggiore visibilità nell'ambiente.

Foto n° 1

Foto n° 2

Da una prima analisi è emerso che il danneggiamento da incendio era localizzato principalmente nel locale cameretta (Foto n° 3 e n° 4), che risultava completamente distrutto negli arredi e negli infissi e la parte del corridoio antistante lo stesso (Foto n°5).

Foto n° 3

Foto n° 4

Foto n° 5

Gli altri ambienti, nell'ordine camera da letto matrimoniale (Foto n° 6), soggiorno con angolo cottura (Foto n° 7) e bagno (Foto n° 8), presentavano soltanto un danneggiamento parziale dovuto principalmente al calore dell'incendio.

Foto n° 6

Foto n° 7

Foto n° 8

A seguito di questa prima verifica dello stato dei luoghi è stato possibile affermare che l'incendio si è originato all'interno del locale cameretta.

Sulla base delle considerazioni sopra espresse, l'analisi dello stato dei luoghi si concentrava quindi sull'impianto elettrico ed in particolare:

- contatore ENEL, situato nel vano scala;
- quadro di protezione, situato nel corridoio in prossimità della porta d'ingresso;
- presenza del conduttore di protezione;
- prese a spina ed interruttori luce all'interno del locale cameretta.

Il contatore elettrico ENEL (Foto n° 9) risultava in posizione di disarmo e si notavano le due viti di fissaggio inferiori svitate.

Foto n° 9

Il conduttore di protezione giallo-verde risultava distribuito a partire dal contatore ENEL al quadro di protezione (Foto n° 10) dell'appartamento.

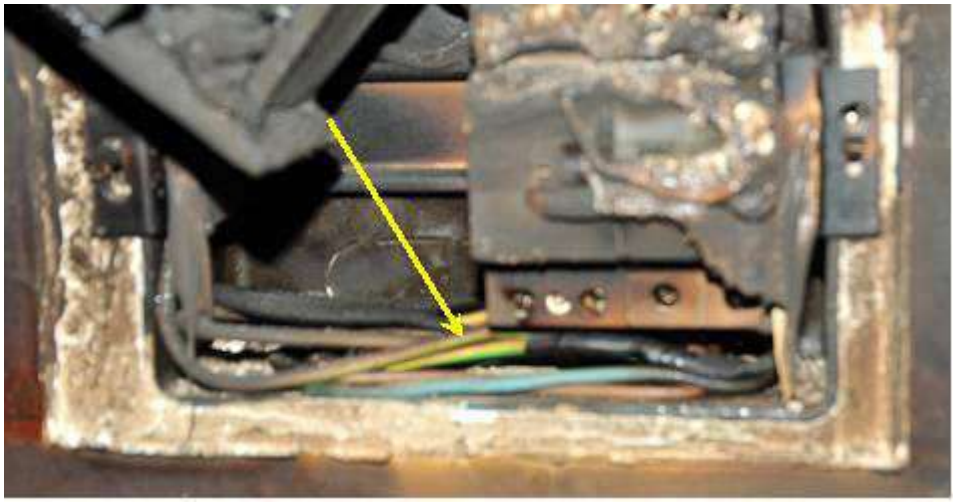


Foto n° 10

Si constatava la presenza del conduttore di protezione giallo-verde distribuito dal quadro di protezione dell'appartamento in alcune delle prese a spina. In particolare nel locale cameretta esaminato, si constatava la presenza di due prese a spina: la prima (Foto n° 11) sulla parete ospitante la finestra ad una altezza di circa 90 cm e la seconda (Foto n° 12) sulla parete adiacente destra ad un'altezza di circa 25 cm da terra, con la presenza di detto conduttore. In ambedue le prese erano inserite spine di alimentazione di utilizzatori completamente combuste dall'incendio. Tutti i conduttori di alimentazione all'interno delle suddette prese si presentavano pressoché integri.

Foto n° 11

Foto n° 12

La presa (Foto n° 13) e l'interruttore luce (Foto n° 14) posti sulla parete ospitante la porta d'ingresso della cameretta, risultavano completamente combusti. Si constatava che le alte temperature raggiunte avevano consumato completamente il materiale di rivestimento isolante non permettendo di identificare la tipologia di conduttore. La presenza di tre conduttori distinti di rame portava ad ipotizzare la corrispondenza con il conduttore di fase, di neutro e conduttore di protezione.

Foto n° 13

Foto n° 14

Una ulteriore presa (Foto n° 15) veniva rinvenuta sulla parete divisoria con il locale bagno completamente integra, poiché protetta dalla struttura del letto, e non alimentante alcun utilizzatore.

Foto n° 15

Su tutti i conduttori esaminati all'interno della cameretta non si rilevavano tracce di fenomeni conseguenti a sovracorrenti derivanti da guasti su impianti elettrici quali arco elettrico, microfusione dei conduttori e/o perlinature. Alcune particelle che si potevano osservare sui conduttori di rame nudi erano dovute a residui di materiale isolante combusto (Foto n° 13 e 14).

Il quadro elettrico (Foto n° 16) di protezione all'ingresso dell'appartamento era equipaggiato con blocco interruttore magneto-termico differenziale. Il suddetto interruttore

risultava nella posizione di intervento della protezione (interruttore aperto) sia della sezione differenziale che della sezione termico/magnetica e bloccato in detta posizione a causa della parziale fusione dei materiali plastici.

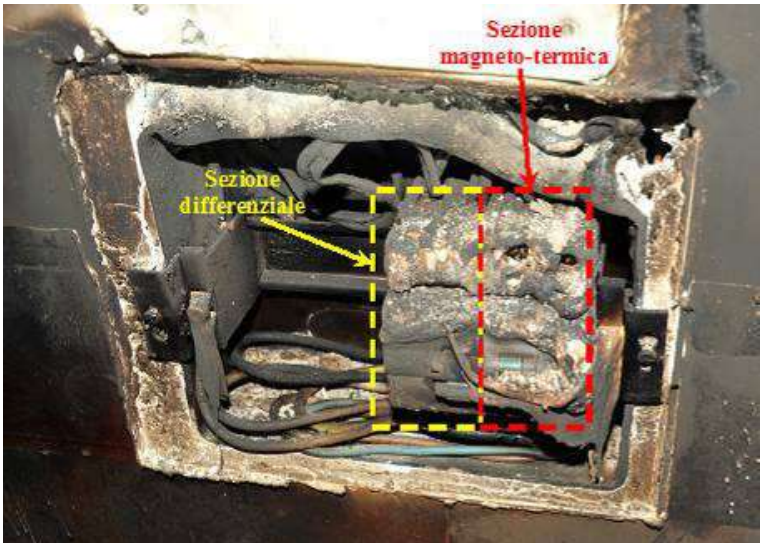


Foto n° 16

All'interno del locale cameretta si costatava la presenza dei resti totalmente combusti di apparecchi utilizzatori, quali ad esempio televisione, impianto hi-fi, decoder TV, ecc. e molti residui di materiali combustibili.

Al termine dell'indagine si è rilevato quanto segue:

- l'impianto elettrico risultava non essere di recente realizzazione;
- l'impianto elettrico dell'appartamento risultava comunque munito di conduttore di protezione (terra);
- il quadro elettrico di protezione dell'impianto risultava equipaggiato con blocco magneto-termico e differenziale (quest'ultimo detto anche "salvavita");
- le indagini espletate sui conduttori all'interno della cameretta, individuata come area di origine dell'incendio, non hanno evidenziato tracce di fenomeni conseguenti a sovracorrenti derivanti da guasti su impianti elettrici quali: arco elettrico, microfusione dei conduttori e/o perlinature che, ad esempio, un corto circuito può generare solo in caso di mancato intervento delle protezioni.

La particolare tipologia costruttiva del blocco di protezione permette l'intervento autonomo della sezione magnetica nel caso di sovraccarico e/o corto circuito, mentre in caso di intervento della sezione differenziale, per dispersione di corrente, comporta il contemporaneo sgancio anche della sezione magnetica.

Data la posizione delle leve dell'interruttore, si è ritenuto che la sezione differenziale dell'interruttore abbia sicuramente funzionato e probabilmente generato anche lo sgancio della sezione magneto-termica.

La posizione di aperto delle due sezioni dell'interruttore e la parziale fusione del materiale plastico dello stesso, che blocca il riarmo dell'interruttore, cristallizzano la sequenza temporale degli eventi. Pertanto questi elementi hanno fatto ritenere che sia stato il preesistente incendio, inizialmente lontano dal quadro elettrico, a provocare l'intervento delle protezioni a causa del deterioramento delle condutture nel locale cameretta. Resta inteso che l'acquisizione di documentazione specifica, quale la dichiarazione di conformità alla regola dell'arte dell'impianto, dovrebbe essere comunque indice di un'esecuzione in sicurezza dello stesso.

5.2 Incendio di un appartamento provocato da un frigorifero

Il caso che segue fa riferimento ad un'indagine svolta dal Nucleo Investigativo Antincendi nel corso della quale è emerso che la causa più probabile dell'incendio in questione è riconducibile alla presenza di un frigorifero, del tipo non da incasso, costipato in uno spazio ristretto e senza la possibilità di dissipare il calore in maniera ottimale. Inoltre la corda di alimentazione del frigorifero era costretta ad assumere una posizione (strizione) da cui scaturiva una "curva" avente un angolo di circa 90 gradi, che di fatto ha provocato il degrado della guaina isolante e il surriscaldamento della corda stessa al passaggio della corrente. Sono stati rinvenuti segni di perlinatura a carico del cavo di alimentazione e precisamente nelle sezioni della corda di alimentazione dove era evidente la presenza della sopra menzionata piegatura.

Porzione di corda di alimentazione del frigorifero, repertata da personale del NIA

Nel corso delle indagini, raccolti e valutati tutti gli elementi, è emerso che il principio d'incendio dal quale è poi scaturito l'evento in questione è dipeso dalla concatenazione di più fattori, qui elencati in maniera sintetica:

- non corretta installazione dell'elettrodomestico (frigorifero), prodotto per installazione libera e non per esser posto in spazi angusti o comunque non tali da garantire la circolazione d'aria necessaria al corretto funzionamento;
- strizione della corda di alimentazione del frigorifero che ha comportato un eccessivo degrado della guaina di isolamento;
- presenza di materiale combustibile posto al di sopra del frigorifero;
- mancato coordinamento della protezione differenziale con l'impianto di terra che non ha consentito di rilevare l'avvenuto guasto.

Nello specifico la zona di probabile innesco e sviluppo dell'incendio si può ricondurre alla zona ove era installato il frigorifero a servizio del locale cucina. Le indagini condotte hanno rilevato che il frigorifero tipo combinato no frost LG modello GN-B392YUCA, risultava essere un elettrodomestico non destinato alla installazione da incasso, per contro dall'esame delle fotografie della cucina è possibile rilevare che il frigorifero era stato posto in opera realizzando una installazione da incasso. Le istruzioni di installazione prevedono, altresì, che l'elettrodomestico non dovrebbe essere posto in prossimità di fonti di calore: dalla foto che segue è possibile rilevare che nella nicchia di installazione è ancora visibile il pettine di distribuzione dell'impianto di riscaldamento dell'abitazione.

Frigo in nicchia

"Pettine" nella nicchia

Inoltre, dall'esame della corda di alimentazione del frigorifero alla presa a spina dell'impianto, appare evidente che la stessa fosse stata posizionata sullo spigolo superiore del frigorifero, provocando una strizione del cavo in corrispondenza di un raggio di curvatura prossimo ai 90°.

Cavo elettrico di alimentazione del frigorifero

L'installazione in nicchia incassata, sommata al posizionamento di materiale casalingo sul tratto della corda di alimentazione dell'elettrodomestico in questione ha comportato una pressione sullo stesso e, conseguentemente, un degrado dell'isolante dei fili. L'analisi del tratto di cavo elettrico costituente la corda evidenzia il fenomeno di "perlinatura", ovvero la formazione di grumi sferici di rame sul conduttore, che indicano la presenza di tensione quando il cavo è stato investito dall'incendio.

Considerando quindi il mancato coordinamento della protezione differenziale con l'impianto di terra, la non corretta installazione dell'elettrodomestico in nicchia incassata e poco areata, quando lo stesso veniva prodotto per installazione libera, aggiunta al posizionamento della corda di alimentazione, porta a formulare la più probabile causa di innesco nel surriscaldamento della corda di alimentazione in corrispondenza della piega a 90° della corda stessa, occorsa nel retro dell'elettrodomestico. Il deterioramento dell'isolante rappresenta un guasto "ad alta impedenza" quindi la protezione dal corto circuito dell'interruttore posto a monte di tutto l'impianto, che si attiva invece per guasti di bassa impedenza, non sarebbe mai potuta intervenire. La protezione di sovraccarico,

essendo sovradimensionata, non avrebbe mai potuto leggere questo tipo di guasto; in ultimo, la protezione differenziale, essendo il conduttore di terra non connesso ad un impianto di dispersione, non interviene con certezza. Il sovraccarico localizzato sulla piega della corda di alimentazione ha comportato il degrado dell'isolante e lo sviluppo di calore per effetto joule nelle zone retrostanti il frigorifero. Il calore sviluppato dal guasto, per effetto dell'installazione ad incasso, si è sommato al calore sviluppato dal funzionamento del frigorifero, comportando il raggiungimento di temperature compatibili con l'innesco di materiale cartaceo, giornali posti fra il frigorifero e il mobiletto superiore e quindi lo sviluppo dell'incendio che ha investito i cavi della corda con l'impianto ancora in tensione, così come testimoniano gli effetti della perlinatura sulla corda stessa.

5.3 Incendio in un istituto scolastico

L'incendio oggetto di questa indagine del NIA, ha interessato un edificio prefabbricato che ospita 10 aule di un plesso scolastico, realizzato con strutture a monoblocchi e copertura in lamiera coibentata. L'incendio ha interessato una porzione di cavi elettrici, nel tratto di collegamento tra il quadro generale di distribuzione della bassa tensione dell'intero plesso scolastico verso il quadro elettrico di sezionamento posto all'interno della struttura presso la quale si è verificato l'incendio.

Tratto verticale del passaggio dei cavi elettrici

In particolare, l'incendio si è sviluppato in un tratto verticale del percorso dei cavi, protetti da un cavedio in lamiera metallica ad "U", posto al di fuori del fabbricato, nella parte destra in prossimità dell'ingresso, dove i suddetti cavi, dalla pavimentazione, proseguivano verso la copertura dell'edificio. Nelle fasi del primo intervento della squadra VV.F., al fine di consentire lo spegnimento dell'incendio, il cavedio veniva rimosso e successivamente depositato all'interno dell'edificio posto sotto sequestro.

Lamiera metallica posta verticalmente a protezione dei cavi elettrici

I cavi proseguivano poi il loro tragitto lungo la copertura del fabbricato, per collegarsi al quadro di distribuzione situato alla sinistra del corridoio all'interno dell'edificio. L'incendio ha interessato anche parte della copertura.

Danneggiamento di parte della copertura

Nel corso di un primo sopralluogo si è provveduto, inizialmente, a ristabilire lo stato dei luoghi, riposizionando la lamiera metallica posta a protezione dai cavi elettrici nel tratto verticale situato in prossimità dell'ingresso principale.

Riposizionamento della lamiera metallica

Dall'osservazione delle immagini di un video amatoriale, nel quale le riprese registrano i primi momenti dell'evento, si riscontrava un'apertura (un foro) lungo la lamiera.

Fermo immagine che individua il foro presente nel cavedio

Si provvedeva ad individuare tale apertura sul cavedio e a misurare la distanza che intercorreva dal foro alla pavimentazione. Tale distanza misurava cm. 119.

A questo punto si provvedeva a valutare la corrispondenza del tratto misurato sulla parete dove era collocata la lamiera, osservando che la misura del foro coincideva sulla parete.

Si provvedeva, inoltre, ad analizzare la parte interna della lamiera che componeva il cavedio tecnico, osservando segni di un marcato danneggiamento termico nella parte bassa, corrispondente alla quota pavimento.

Al fine di rilevare eventuali tracce di acceleranti, potenzialmente utilizzati per l'innesco dell'incendio, si decideva di effettuare un monitoraggio alla base del tratto verticale di passaggio dei cavi elettrici, utilizzando strumentazione campale. A seguito di tale monitoraggio lo strumento non ha segnalato la presenza di significative concentrazioni di V.O.C. (Volatile Organic Compounds).

Tuttavia, si è provveduto a prelevare del terriccio sottostante la pavimentazione, nell'area di origine dell'incendio, al fine di sottoporle ad analisi chimico/fisiche presso il laboratorio NBCR del Comando VV.F. di Firenze, tese alla ricerca di liquidi acceleranti di fiamma eventualmente utilizzati. Dalle analisi non si rilevava la presenza di tracce di acceleranti.

Nel corso del sopralluogo veniva eseguita una verifica dell'intero impianto elettrico, ed in particolare:

- si ispezionava la porzione di copertura interessata dall'incendio e i residui di cavi elettrici combusti, ivi presenti;
- si verificavano i componenti presenti all'interno dell'edificio oggetto dell'incendio quali il quadro elettrico e l'armadio rack, osservando che gli stessi non presentavano alcun segno riconducibile ad un loro coinvolgimento nell'incendio;
- un'ulteriore ispezione veniva effettuata anche all'interno della cabina elettrica sita in un locale posto al di sotto della struttura muraria della scuola, dove era presente il quadro elettrico generale.

Al termine del sopralluogo si provvedeva, infine, a repertare una porzione della copertura ed una porzione dei cavi elettrici combusti.

Successivamente veniva eseguito un altro sopralluogo allo scopo di prelevare porzioni di cavi elettrici nel tratto che dai pozzetti, presenti nella pavimentazione in prossimità dell'ingresso principale, proseguivano verso il quadro elettrico generale situato nella cabina elettrica.

Il giorno successivo i suddetti cavi venivano inviati presso i laboratori IMQ di Milano, al fine di effettuare prove volte alla caratterizzazione del loro comportamento all'incendio.

Durante un terzo sopralluogo si provvedeva, infine, ad eseguire uno scavo nell'area alla base del cavedio, al fine di eseguire un rilievo della curvatura della posa in opera dei cavi, a livello dei pozzetti e all'ingresso dei cavi nell'intercapedine del tetto.

Come è stato detto più volte, l'analisi relativa alla dinamica di un incendio si basa sulla ricerca di indizi provenienti da luoghi e/o reperti che hanno subito, proprio a causa degli elevati stress termici ed a volte, anche a causa dei diversi interventi effettuati nell'immediatezza dell'evento, profonde alterazioni; pertanto, come indicato nella norma NFPA 921 (National Fire Prevention Association), la causa non è sempre di possibile determinazione.

Nel caso in specie, l'esistenza di un filmato amatoriale, nel quale le riprese registrano i primi momenti dell'evento, ci permette di osservare che l'incendio si è originato all'interno del cavedio metallico, posizionato a destra dell'ingresso principale dell'edificio scolastico.

La conoscenza del punto di origine dell'incendio semplifica, nel caso in questione, il problema dell'investigazione per l'individuazione della causa dell'evento, partendo dalla ricerca della zona dalla quale l'incendio si è originato. Nel caso in esame, inoltre, sono stati eseguiti specifici approfondimenti sulla causa di natura elettrica, poiché nella zona individuata come origine dell'evento l'unico impianto presente era l'impianto elettrico.

L'analisi della dinamica dell'incendio e le ipotesi di guasto elettrico formulato, non consentono di affermare che la causa più probabile di innesco dell'incendio possa essere attribuita ad un guasto di natura elettrica. Nella suddetta zona non sono stati rinvenute altre evidenti sorgenti d'ignizione, quali a titolo di esempio: impianti di riscaldamento, macchinari elettrici o alimentati a gas, ecc..

L'accertamento tecnico relativo alla ricerca di liquidi infiammabili, eseguito presso il laboratorio NBCR del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Firenze, non ha fornito alcun riscontro circa la presenza di acceleranti. Resta inteso che ciò non costituisce una prova dell'assenza sui luoghi dell'evento di composti facilmente infiammabili anche perché l'esposizione delle aree investite dall'incendio agli agenti atmosferici (si rammenta che la zona incendiata è esterna all'edificio scolastico) può essere stata causa di dispersione in ambiente dei medesimi acceleranti.

La presenza di un foro sulla lamiera del cavedio ad un'altezza di circa 119 cm, ovvero di un'apertura a portata di mano di qualsiasi persona (anche in considerazione del fatto che il cavedio stesso era collocato in prossimità dell'ingresso principale) potrebbe anche far ipotizzare, quale causa d'incendio, la presenza di fiamme libere, quali ad esempio l'accensione di una carta o di altro materiale combustibile quale la plastica. Alla luce di tutti gli elementi raccolti, delle considerazioni fin qui espresse, della documentazione tecnica analizzata e dell'esito delle prove tecniche sui cavi repertati, si ritiene che l'evento in questione sia da attribuirsi a cause di probabile natura dolosa e non a malfunzionamento dell'impianto elettrico.

6. PROVE SPERIMENTALI ESEGUITE DAL PERSONALE DEL NIA

6.1 Il surriscaldamento di una spina a causa di un cattivo contatto

La sperimentazione che segue ha inteso simulare una delle modalità attraverso cui è possibile innescare un incendio per cause di natura elettrica. Nella fattispecie è stata utilizzata una stufa elettrica tenuta in funzione per circa 4 ore, collegata alla rete elettrica per il tramite di una vecchia spina, già avente evidenti segni di usura, assemblata appositamente in maniera precaria, nastrata con nastro isolante. Scopo della sperimentazione è quello di dimostrare che l'utilizzo di apparecchiature elettriche obsolete e non in buone condizioni può essere facilmente causa di innesco di incendi, come effettivamente spesso accade nelle situazioni reali.

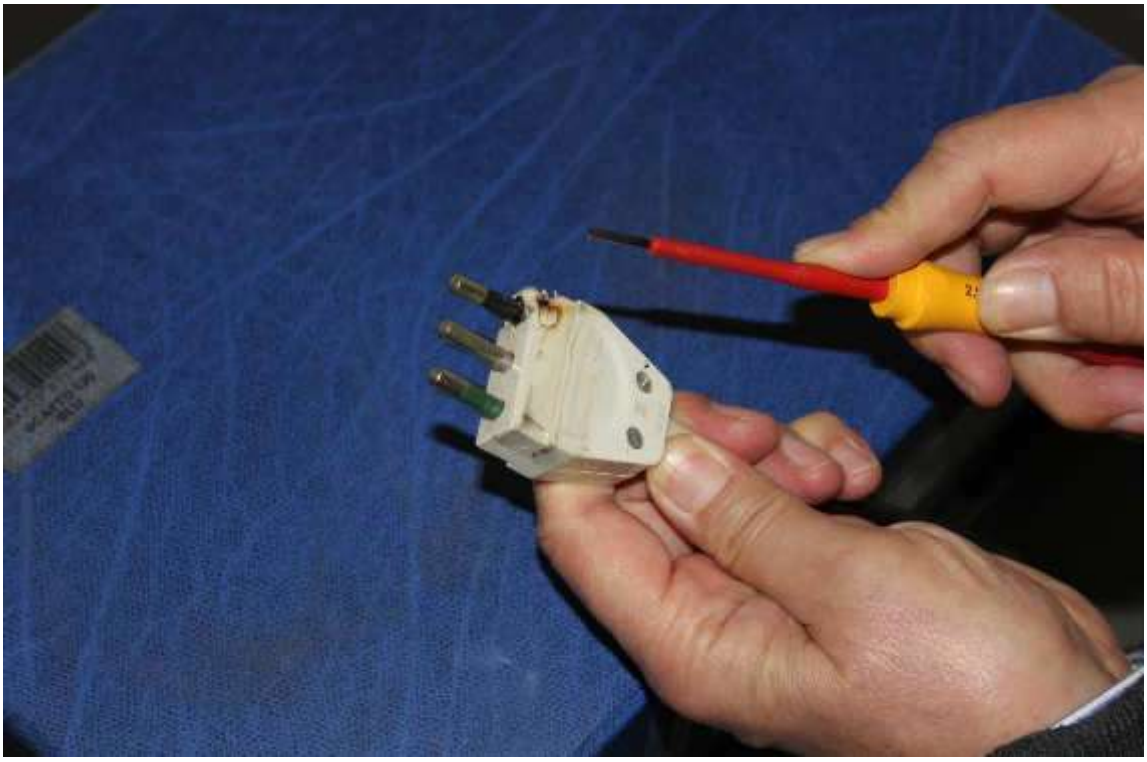
Il principio d'incendio è scaturito a causa di un cattivo contatto tra spina e presa, determinato anche dal fatto che la chiusura con il nastro isolante della spina difettosa ha determinato il movimento, al suo interno, del puntale non serrato a dovere.

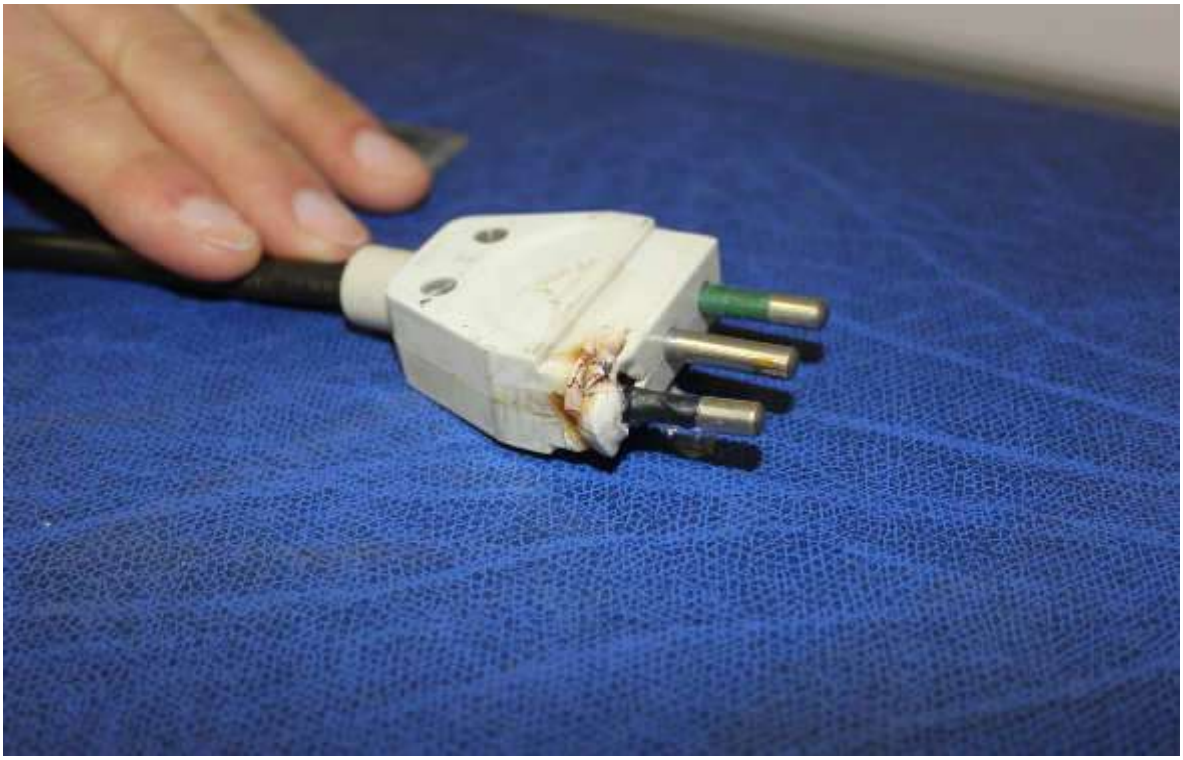
Le foto che seguono mostrano gli effetti prodotti su presa e spina dal surriscaldamento dovuto al cattivo contatto tra le stesse. In particolare si nota il danneggiamento del puntale della spina

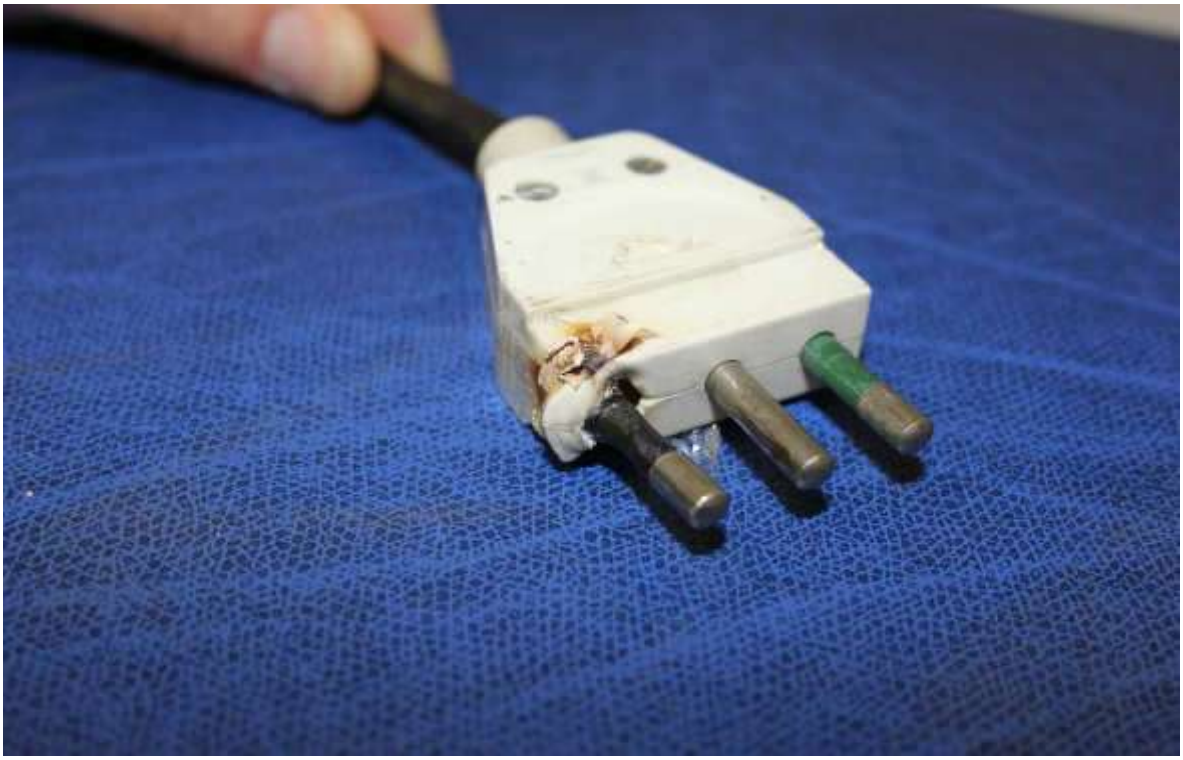
e la fusione parziale dell'alveolo della presa corrispondente (spesso il puntale, in questi casi, rimane fuso sull'alveolo della presa):

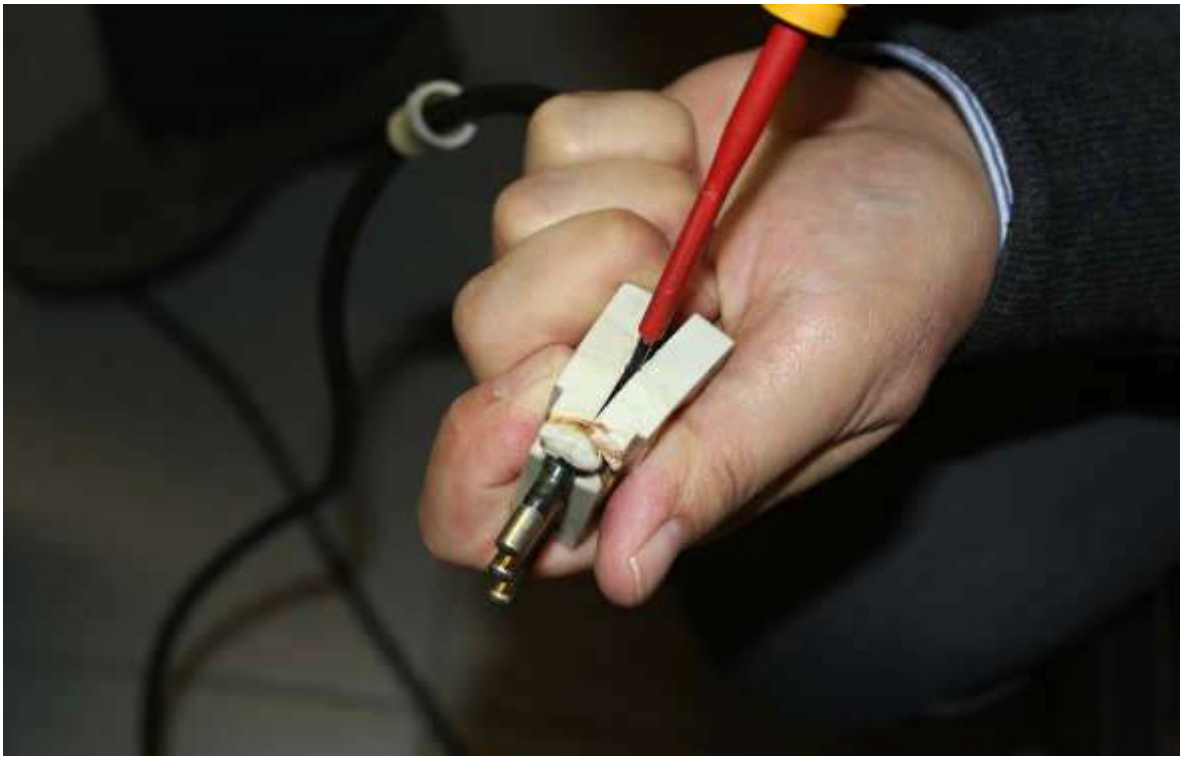
Di seguito il particolare sul puntale e l'involucro di plastica della spina con i segni del principio di incendio:

Abbiamo poi proceduto con lo smontaggio della spina, per analizzare più nel dettaglio i segni prodotti dal surriscaldamento e dal principio di incendio:

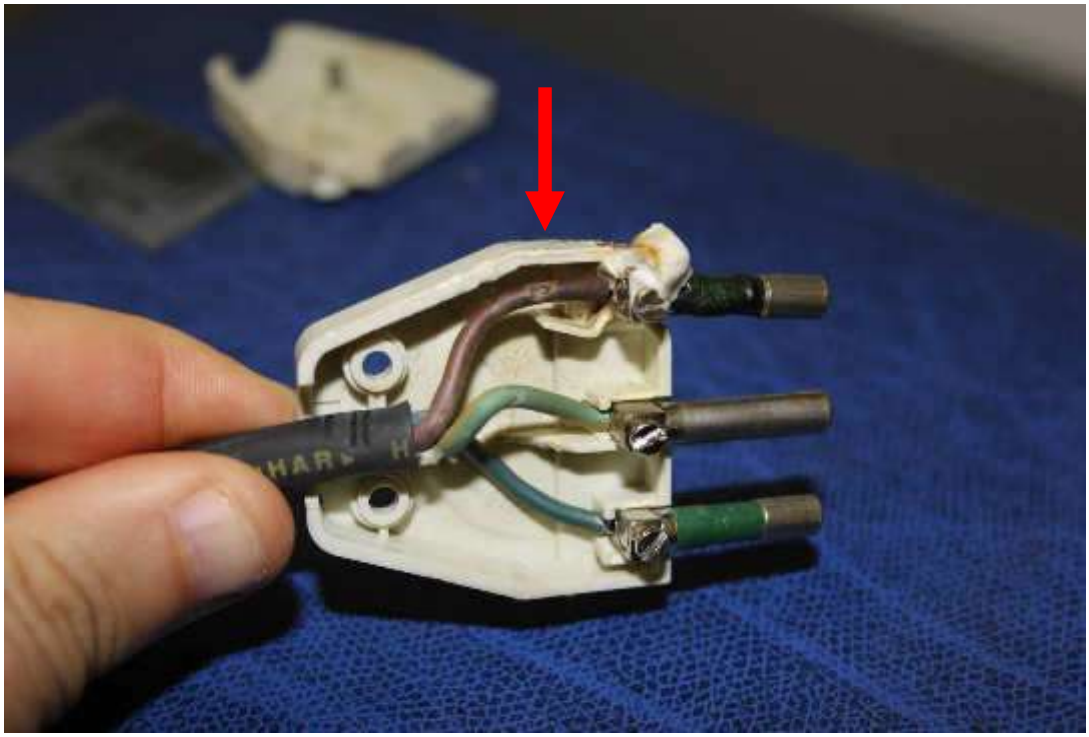




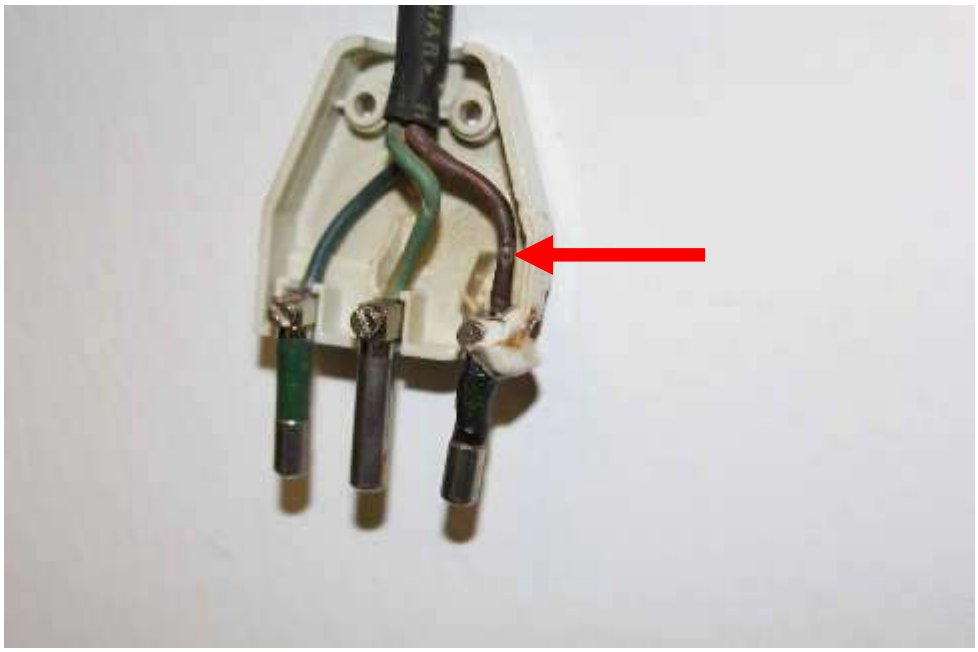




La vetustà della spina è ulteriormente dimostrata dal cattivo stato della guaina isolante che ricopriva il cavo conduttore di rame, anch'esso possibile causa di innesco di incendi:



La frecce rosse mostrano lo stato di usura della guaina isolante, parzialmente mancante in quel punto, e anch'essa possibile causa di innesco di incendi. In questo caso specifico sembra però si possa escludere una partecipazione di quest'ulteriore criticità (lesione parziale della guaina isolante sul cavo conduttore) al principio d'incendio scaturito dal cattivo contatto tra spina e presa.



Vediamo infine due foto che mostrano il danneggiamento provocato dal calore sull'alveolo della presa cui era collegato il puntale della spina che abbiamo visto poc'anzi:

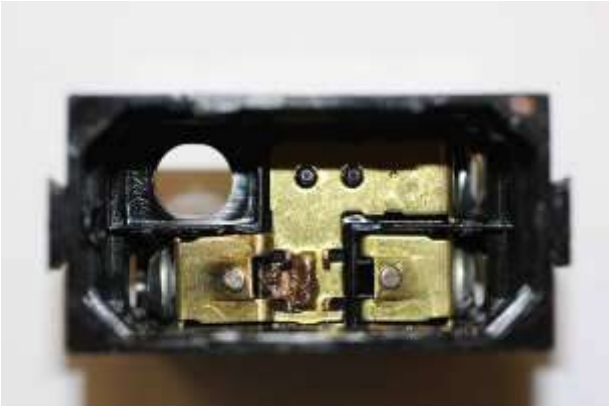
6.2 Individuazione di un'anomalia su un interruttore di comando luce

Oggetto di una delle nostre ricerche è stato osservare la causa di guasto e gli effetti derivati di uno dei meccanismi più comunemente usati e presenti nelle nostre abitazioni, ovvero un interruttore adibito generalmente ad accendere e spegnere la luce.

Si definisce genericamente "interruttore" un dispositivo elettrico costituito essenzialmente da parti fisse, cui fanno capo i conduttori del circuito sul quale devono essere eseguite le manovre, e da parti mobili il cui spostamento realizza o interrompe la continuità metallica del circuito. Quando l'interruttore è configurato in modo da consentire il passaggio di corrente si definisce chiuso, quando invece il passaggio è interdetto si definisce aperto.

Gli interruttori possono essere di tipo e dimensioni molto differenti in relazione all'uso cui sono destinati, dai microinterruttori usati in circuiti percorsi da correnti di debole intensità, agli interruttori da parete impiegati negli edifici civili, a quelli di notevole potenza usati in grossi impianti, ecc..

Quando un circuito elettrico viene aperto si forma, tra contatto mobile e contatto fisso dell'interruttore un arco elettrico. La formazione dell'arco è facilitata dal fatto che, quando si allontanano i contatti, si riduce progressivamente la sezione di passaggio della corrente e si ha quindi un aumento di resistenza elettrica e un forte riscaldamento per effetto **Joule**, localizzato nella zona di contatto. Dell'effetto Joule ne parleremo più avanti.



Ciò causa la volatilizzazione di parte del metallo e la ionizzazione del mezzo interposto che diventa conduttore. È evidente che, finché l'arco persiste, l'interruzione non avviene dato che la continuità del circuito si realizza attraverso l'arco stesso. Si ha quindi la necessità di estinguere l'arco in un tempo abbastanza breve: ciò può essere ottenuto raffreddandolo e provocando la deionizzazione del mezzo entro cui esso si sviluppa. Se il circuito è percorso da corrente alternata l'estinzione è facilitata dal fatto che, a ogni semiperiodo, la corrente si annulla naturalmente e viene quindi meno la principale causa di ionizzazione del mezzo interposto; ciò non accade in corrente continua, dove si ha spesso l'estinzione per "strappamento" dell'arco mediante un'azione deionizzante e raffreddante molto energica. Un interruttore è caratterizzato principalmente, oltre che dal tipo di corrente che è destinato a interrompere, dai valori della tensione e della corrente nelle normali condizioni di esercizio e dal potere di interruzione o capacità di rottura, che è il valore efficace della massima intensità di corrente che l'interruttore può interrompere.

Hanno inoltre importanza i tempi di apertura e di chiusura, ossia rispettivamente gli intervalli di tempo che intercorrono tra l'istante in cui si invia il comando di apertura o di chiusura e quello in cui si ha l'estinzione completa dell'arco o in cui si stabilisce la continuità del circuito. Una classificazione degli interruttori può essere fatta in base al sistema usato per provocare la deionizzazione e il raffreddamento dell'arco. Per valori relativamente bassi di tensione e di corrente (tipicamente negli impianti domestici) possono essere usati interruttori in

aria nei quali l'estinzione dell'arco non richiede particolari accorgimenti, dato il basso valore dell'energia in gioco.

6.3 L'utilizzo della termocamera per rilevare anomalie e surriscaldamenti dovuti ad Effetto Joule

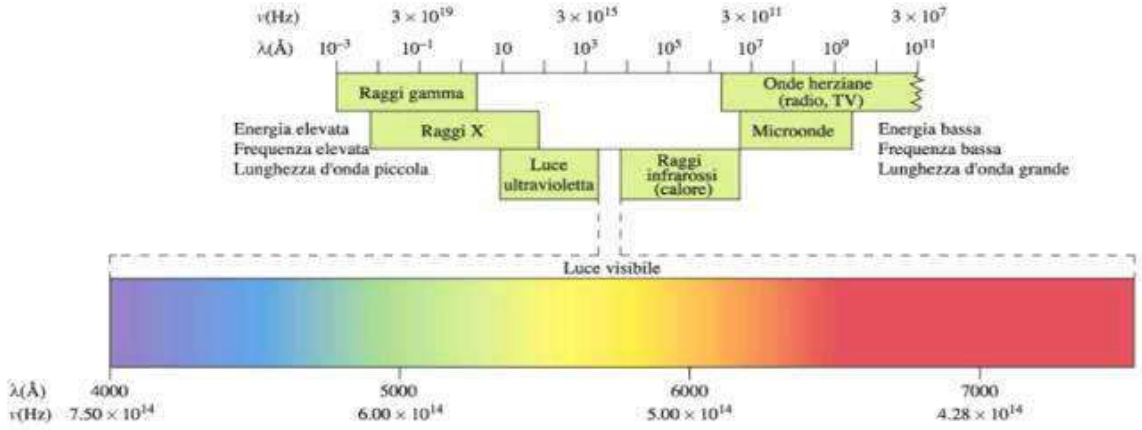
Uno strumento tecnico denominato "termocamera" permette di identificare precocemente le anomalie e i surriscaldamenti sugli interruttori, infatti può aiutare ad individuare con precisione il problema, valutarne la gravità ed aiutare a stabilire le tempistiche di intervento.

La termografia ad infrarossi è divenuta uno dei più validi strumenti diagnostici per la manutenzione predittiva. Rilevando anomalie solitamente invisibili ad occhio nudo, la termografia ad infrarossi permette di intraprendere azioni correttive prima che si verifichino guasti e, successivamente, delle conseguenze ai sistemi.

Diviene quindi possibile determinare dove e quando è necessaria la manutenzione o un rapido intervento, poiché le installazioni elettriche e meccaniche esibiscono un innalzamento della temperatura (**Effetto Joule**) prima di subire un guasto. Scoprire questi punti caldi con una termocamera rende possibile intraprendere azioni preventive. Questo può evitare costosi fermi o, ancora peggio, incendi.

Sullo spettro elettromagnetico, la radiazione infrarossa è posta tra la parte visibile e quella delle microonde. La fonte principale della radiazione infrarossa è il calore o la radiazione termica. Qualsiasi oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto (-273,15°C o 0 Kelvin), emette radiazioni.

Lo spettro elettromagnetico: insieme di tutte le onde elettromagnetiche



6.4 Individuazione di un'anomalia sull'interruttore di un quadro elettrico

Altro oggetto della nostra ricerca è stata l'individuazione di un'anomalia da sovracorrente, tramite una verifica termografica su un quadro elettrico comprensivo di morsettiera.

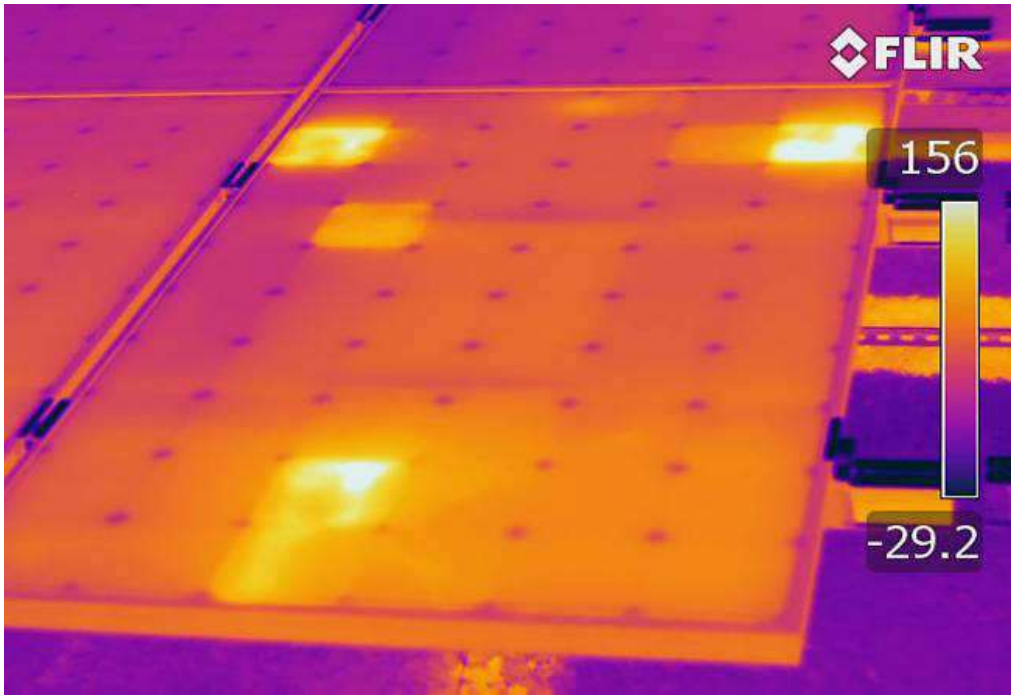
Termografia applicata ad un interruttore magnetotermico differenziale

Nell'immagine termografica sopra indicata si nota un interruttore magnetotermico differenziale percorso da corrente elettrica. Leggendo la scala dei colori e delle temperature si evidenzia, a colpo d'occhio, che una fase (indicata col colore rosso) riporta uno squilibrio nei valori di corrente rispetto alle altre. Tecnicamente si evince il grado termico a cui è sottoposto, in primis, il conduttore e poi l'interruttore ad esso collegato, con il rischio conseguente di una veloce degenerazione dell'isolamento e lo sviluppo di una resistenza localizzata sulla morsettiera.

Questi parametri consentono di rilevare la presenza localizzata di un surriscaldamento per effetto Joule, segno di un anormale funzionamento dell'impianto (in questo caso causato da un serraggio lento del cavo conduttore sul morsetto dell'interruttore) in grado di creare le condizioni per lo sviluppo di un incendio di natura elettrica.

6.5 Individuazione di un'anomalia su un pannello fotovoltaico

Altro oggetto della nostra ricerca è stata la verifica termografica su un pannello fotovoltaico.



Termografia applicata ad un pannello fotovoltaico

Esaminando attentamente la foto, si nota che alcune parti del pannello solare sono più calde di altre. Le aree calde risulteranno chiaramente visibili nell'immagine ad infrarossi.

A seconda della forma e della posizione, questi punti caldi possono indicare problemi di diversa natura. Se un intero modulo è più caldo del solito, ciò potrebbe segnalare la presenza di problemi d'interconnessione. Se singole celle o file di celle risultano essere punti caldi, la causa potrebbe essere riconducibile alla presenza di diodi di bypass difettosi, a cortocircuiti interni o ad un abbinamento sbagliato di celle.

Ombre e incrinature nelle celle si presentano come punti caldi o come macchie poligonali nell'immagine ad infrarossi. L'aumento della temperatura di una cella o di parte di essa indica che la cella è difettosa o che vi sono delle ombre. Occorre confrontare le diverse immagini ad infrarossi ottenute in assenza di carico e in condizioni di cortocircuito. Informazioni preziose si ricavano anche da un confronto delle immagini ad infrarossi relative al lato anteriore e posteriore del pannello fotovoltaico. La termocamera è utilizzata principalmente per individuarne i difetti. La classificazione e la valutazione delle anomalie rilevate richiedono una solida comprensione della tecnologia solare, la conoscenza dell'impianto da ispezionare e ulteriori misurazioni elettriche. E' importante quindi disporre di una documentazione

appropriata, contenente tutte le informazioni sulle condizioni di ispezione, misurazioni aggiuntive e altri dati importanti.

Le ispezioni con una termocamera, a partire dal controllo di qualità nella fase di installazione, seguito da regolari controlli facilitano un monitoraggio semplice ma completo delle condizioni dell'impianto. Ciò contribuirà a conservare la funzionalità dei pannelli e a prolungarne la durata, riducendo le possibilità di guasti e incendi di natura elettrica.

6.6 Lampade alogene e rischio incendi

Talvolta può accadere che alcuni incendi scaturiscano a causa dell'elevata quantità di calore prodotta da elementi elettrici in funzione, ed è una cosa di cui tener conto in fase investigativa. E' il caso, ad esempio, delle lampade alogene di cui si fa ancora largo uso negli ambienti domestici. Queste ultime producono infatti molto calore e l'eventuale vicinanza di tendaggi o altri tessuti, può rappresentare una situazione di pericolo. Oltretutto, una volta che si è innescato e sviluppato un incendio, soprattutto se questo evolve fino alla fase di flashover, diventa complicato risalire alla causa che ha dato avvio all'incendio stesso, in quanto in queste situazioni non essendo di fatto un malfunzionamento o un'errata progettazione dell'impianto a determinare l'incendio, non vengono prodotti quei "segni" specifici (perlinature, gocce, ecc.) che possono dare indicazioni sulla natura e causa dello stesso. Se tende o tessuti entrano a contatto oppure se si trovano nelle immediate vicinanze delle lampade accese, è piuttosto il calore irraggiato a provocare l'incendio. Il rischio può diventare significativamente elevato nel caso delle lampade alogene portatili che talvolta vengono spostate e poste nelle immediate vicinanze di tende e tendaggi, ad esempio nei soggiorni degli appartamenti.

Per comprendere meglio il fenomeno, e soprattutto i rischi legati alla produzione di una significativa quantità di calore da parte di questa tipologia di lampade, il personale del NIA ha svolto alcune prove in laboratorio per avere indicazione delle temperature che si raggiungono quando queste lampade alogene vengono tenute accese. Ovviamente i rischi sono legati alla gestione di queste lampade, ossia è necessario che l'utente (il comune cittadino, non addetto ai lavori) sia al corrente del fatto che le temperature prodotte da queste lampade possono innescare un incendio se tendaggi o altro materiale combustibile entrano a contatto con la superficie calda della lampada in funzione. Nella fattispecie delle prove svolte in laboratorio, è stata effettuata la misura della temperature delle lampade alogene dopo che queste sono state tenute accese per 15 minuti. Le prove sono state effettuate su una lampada alogena da 500W, alloggiata all'interno del proiettore di supporto. Una prima prova è stata effettuata con il

proiettore dotato di vetro di protezione, l'altra senza vetro. La temperatura ambiente del laboratorio era di 22°C, l'umidità del 48%.

Prova 1

Prova 1: la lampada alogena da 500W, inserita nell'apposito proiettore di supporto, con presenza di vetro di proiezione, dopo 15 minuti di accensione presenta una temperatura (sulla superficie del vetro) di 266°, rilevati dalla termocamera. Il pirometro segna, invece, circa 279°C, in dipendenza anche dal punto cui viene rilevata la temperatura sulla superficie del vetro.

Prova 2

Prova 2: la lampada alogena, sempre da 500W, viene nuovamente tenuta accesa per 15 minuti, ma questa volta viene tolto il vetro di protezione dal proiettore di supporto.

La termocamera rileva una temperatura di 357°C.

Per dare evidenza dei rischi collegati all'utilizzo di queste lampade che producono, come abbiamo visto, delle temperature di esercizio dal valore elevato, osserviamo le seguenti foto, scattate durante il prosieguo della prova, che mostrano un tessuto di stoffa che, a contatto con la superficie calda del proiettore della lampada alogena, viene innescato.

Vediamo più nel dettaglio gli effetti prodotti dal calore sul tessuto, dopo che questo è stato tenuto a contatto della superficie in vetro del proiettore della lampada alogena per 1 minuto.

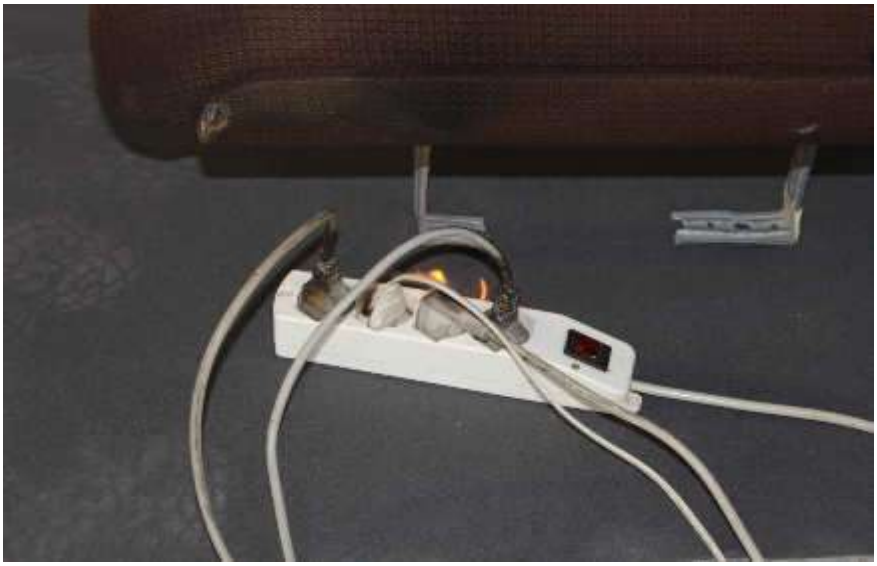
Ovviamente un contatto più prolungato avrebbe prodotto effetti ancora più significativi. Se immaginiamo che in molti appartamenti sono presenti tende e tendaggi vari, possiamo avere un'idea dei rischi d'incendio che possono scaturire da un utilizzo non attento di queste lampade alogene. Inoltre, le prove sopra riportate sono state effettuate posizionando il proiettore in posizione orizzontale, con la lampada rivolta verso l'alto ed il tessuto posato sulla stessa. Se il contatto tra un tendaggio e la lampada fosse avvenuto in posizione verticale, cioè nella maniera più rispondente alla situazione reale che si verifica nelle stanze degli appartamenti, probabilmente l'innesco e la progressione della combustione sarebbe stata ancora più rapida e in grado di innescare, in breve tempo, anche altri oggetti od elementi combustibili vicini.

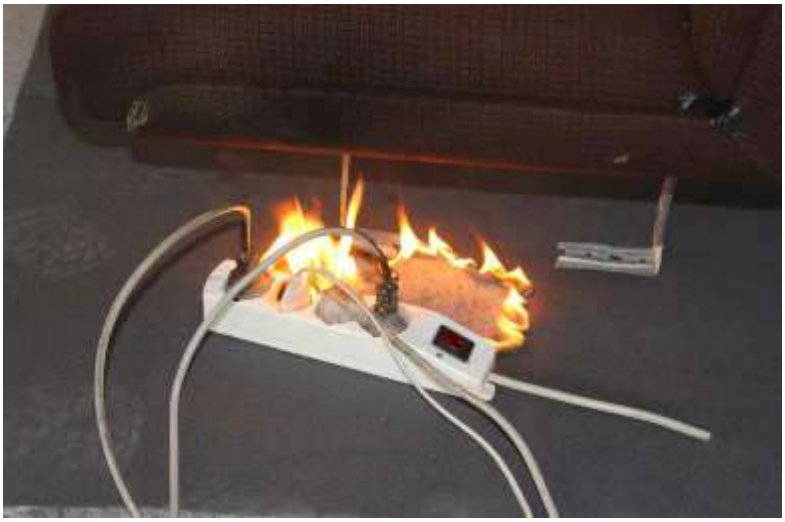
6.7 Incendio di una multipresa

Le foto che seguono si riferiscono ad una prova sperimentale, realizzata nell'aprile 2016 presso i laboratori della DCPST dal personale del NIA. Essa mostra quali rischi si corrono

quando, su una multi presa, vengono innestati troppi utilizzatori, cioè quando la potenza assorbita dagli stessi è superiore rispetto a quella consentita o prevista dalle norme.

Nella fattispecie, le foto mostrano la progressione dell'incendio dal momento dell'innesco sulla multipresa e quali danni questo ha prodotto.





ANTINCENDI
MELIOR DE CINERE SURGO

NIA

L'incendio è stato spento prima che potesse evolvere ulteriormente.

L'ultima foto mostra un tipico segno "a colonna" prodotto dalle fiamme sulla parete retrostante la poltrona.

Scopo della prova era quello di evidenziare i rischi riconducibili ad un uso scorretto di una multipresa e la facilità con la quale, da un surriscaldamento della stessa, possa scaturire un incendio che poi rapidamente si propaga sui materiali combustibili più comuni (un tappeto, una moquette, una sedia o la poltrona di un ufficio).

7. **BIBLIOGRAFIA** (non esaustiva)

- M. D'Addato, *Investigazione sulle cause d'incendio*, 1994.
- V. Carrescia, *Gli incendi elettrici* – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005
- *NFPA 921. Guide for Fire and Explosion Investigation*, 2004-2011-2014-2017.
- A.A. Hattangadi, *Electrical Fire and Failures: A prevention and troubleshooting guide*, 1999
- V. Brabrauskas, *Electrical Fires* - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016
- M. O. Durham, R.A. Durham, R. Durham,J. Coffin, *Electrical Failure Analysis for fire & incident investigations*, 2011
- R. Yareance, T. Kerkhoff, *Electrical fire analysis*, 3rd edition, 2010
- John D. DeHaan, David Icove, *Kirk's Fire Investigation*, 7th edition 2007-2012.
- J. Lentini, *Scientific Protocols for Fire Investigation*, 2008.
- N.N. Daeid, *Fire Investigation* - Forensic Science Series CRC 2004R.
- Maialetti, P. Panaro, *Gli incendi elettrici*, 2013.
- L. Podestà, *II° Corso su procedure e tecniche di investigazioni antincendi*, Roma 6-10 marzo 2006.
- L. Podestà, *L'elettricità come causa d'incendio*, IX Corso "Procedure e Tecniche di Investigazione Antincendi" – 16/11/2011.
- *Pocket Guide to Fire and Arson Investigation*, 2003.
- Giuseppe Biondo, Enrico Sacchi, *Manuale di elettronica e telecomunicazioni*, 1983.
- Del Sole [a cura di], *La corrente alternata – Appunti per il corso di Sistemi ed Automazione Industriale*, [s.d.].
- Federchimica, *Elettricità statica*, 2005.
- Jesse Aronstein, *Electro-Kindling*, 1996.
- http://it.wikipedia.org/ [23.01.2016]
- http://www.elemania.altervista.org/basi/corr_tens/corten2.html [23.01.2016]
- http://digilander.libero.it/nick47/icit02.htm [23.01.2016]
- http://www.elektro.it/ [26.01.2016]
- http://www.electroyou.it/ [27.01.2016]
- http://www.istelweb.it/la_sezione_dei_conduttori.htm [27.01.2016]
- http://www.lastampa.it/2017/01/16/italia/cronache/nei-condomini-un-morto-al-giorno-per-guasti-elettrici-W3OQ4o06sbqt2ZdTckALwO/pagina.html [26.01.2017]
- http://www.interfire.org/res_file/elecchk.asp - Fire Scene Electrical Checklist For the "Non-Electrical" Engineer by Kenneth M. Goodnight

Molte delle immagini inserite nel testo provengono dall'archivio fotografico del Nucleo Investigativo Antincendi.
La presente pubblicazione, redatta dal personale di seguito elencato:

- *D.V.D. Ing. Pierpaolo Gentile (DCRLeS-UCSS)*
- *V.C. Alessandro Fiorillo (DCPeST-NIA)*

è stata realizzata con l'auspicio che possa costituire un utile riferimento, nell'ambito dell'investigazione sulle cause d'incendio di natura elettrica, per il personale operativo dei vigili del fuoco ed in particolare per i componenti dei costituendi Nuclei Investigativi Antincendi Territoriali.
Un ringraziamento per la predisposizione del presente lavoro va, oltre che agli autori, al personale del Nucleo che ha collaborato nel corso dell'attività investigativa e delle prove sperimentali.
Un ringraziamento, inoltre, al D.V.D. Ing. Piergiacomo Cancelliere per la parte relativa alle prove effettuate nel corso dell'attività investigativa.

Ing. Michele Mazzaro
Dirigente del Nucleo Investigativo Antincendi