Brazilian Journal of Forensic Sciences, Medical Law and Bioethics

Journal homepage: www.ipebj.com.br/forensicjournal

A Diferenciação da Pérola de Fusão Primária e Secundária por Meio da Metalografia

The Differentiation of Primary and Secondary Fusion Bead by Metalography

André Carrara Cotomácio, Gui Schröer

Instituto de Criminalística de São Paulo, Superintendência da Polícia Técnico-Científica, São Paulo, SP, Brasil

Received 7 July 2020

Resumo. As perícias de incêndio de natureza elétrica carecem de técnicas consistentes e reprodutíveis para a análise de perolamentos de fusão formados nos fios condutores. Embora a ciência dos materiais e a metalurgia possuam elementos disponíveis para análise de pérolas no cobre, parece não haver um consenso sobre qual método de análise seria apropriado. Assim, o presente estudo tem por objetivo discutir características que possibilitem a distinção entre pérolas de fusão primárias e secundárias nos fios de cobre, por meio do exame metalográfico, em condutores obtidos de cenas reais de incêndio. Por conseguinte, foi possível estabelecer quais os perolamentos possuíam "características" de traço de fusão primário, ou "características" de traço de fusão secundário utilizando-se a metalografia e que, quando analisados em conjunto com os demais elementos da cena, permitem ao perito criminal concluir acerca das circunstâncias do sinistro. Apesar de não se tratar de uma técnica inovadora, o desenvolvimento do presente estudo faz-se oportuno considerando a ausência de trabalhos científicos tratando desse tema em nosso país.

Palavras-chave: Pérola de fusão; Glóbulo; Metalografia; Investigação de incêndios; Ciências forenses.

Abstract. There is a lack in literature about forensic fire investigations due to electrical causes, such as consistent and reproducible techniques for globules and beads presents in wires. Although materials science and metallurgy have available techniques for copper melting analysis, there is not a consensus about which of those methods would be appropriate. Thus, this study aims to discuss characteristics that would make it possible to distinguish between globules and beads through metallographic examination in traces

http://dx.doi.org/10.17063/bjfs10(1)y202014-35

obtained from real fire scenes. Therefore, it was possible to establish which of them had primary or secondary characteristics of fusion trace using metallography. Thus, when corroborated with other elements of the scene this conclusion allows criminal expert to conclude about the circumstances of the fire. Although it is not an innovative technique, the development of the present study is relevant regarding the absence of scientific studies dealing with this topic mainly in Brazil.
Keywords: Bead; Globule; Metallography; Fire investigation; Forensic science.

1. Introdução

As perícias em locais de incêndio são de grande complexidade, uma vez que as chamas consomem a maior parte dos elementos materiais que evidenciariam o sítio de início do fogo e o elemento ígneo que lhe deu origem; além dos danos ocasionados pelas operações de combate ao incêndio, ambos fazendo restar poucos vestígios para serem analisados[1].

Quando ocorre um sinistro dessa natureza, a suspeita de sua causa geralmente recai sobre algum equipamento elétrico presente, devido ao fato básico de que a eletricidade pode se transformar em calor (efeito Joule), e esse calor pode originar um incêndio[2].

Dentre as principais causas atribuídas à eletricidade, destacam-se os curtos-circuitos e arcos elétricos em contatos defeituosos, conexões soltas, condutores danificados e em falhas de isolamento; bem como a sobrecarga como fonte de ignição. Quando da ocorrência desses fenômenos, o calor gerado internamente nos condutores pode se propagar para outros materiais combustíveis posicionados no seu entorno; bem como degradar termicamente ou comburir o revestimento plástico dos fios, oportunizando a eclosão do incêndio[3].

Especificamente em se tratando do curto-circuito, verifica-se que o termo é normalmente associado, de forma simplista, à origem de incêndios de natureza elétrica. Contudo, cabe salientar que não concorre como causa na intensidade com que é apregoado, devendo o perito ter em mente a complexidade da análise pela necessidade de se determinar se o referido fenômeno foi causa ou consequência do fogo[1].

Um exemplo de curto-circuito, de natureza acidental, ocorre quando dois fios se tocam ou quando qualquer objeto condutor os toca ao mesmo tempo, provocando

efeitos violentos devido à dissipação instantânea de energia tais como arcos, faíscas ou elevadas temperaturas capazes de fundir o metal por efeito joule[1].

Quando da realização de uma perícia em um local de incêndio, deve-se buscar elucidar se havia, no sítio estudado como sendo de início do fogo, a presença de corrente elétrica a priori, indicando se a instalação estava em carga por ocasião do sinistro e assim permaneceu por algum tempo devido à inexistência ou atuação tardia de proteção (a exemplo do disjuntor, que deve possuir capacidade compatível com a carga instalada e com o diâmetro dos condutores de entrada[1]). A seguir, busca-se a presença de condutores curto-circuitados com marcas de fusão no ponto de contato, acarretando uma pequena tumefação ou pérola de fusão onde o curto foi fechado[3].

Os fenômenos de ordem elétrica, do tipo curto-circuito, provocam marcas na fiação por derretimento do metal, formando pérolas (pequenas esferas). Isso porque, normalmente, a temperatura atingida em um incêndio não é suficiente para fundir o metal dos condutores[1].

A existência de pérolas ou traços de fusão denuncia o fenômeno elétrico de curto-circuito não só em edificações, mas também em veículos[4], podendo constituir-se em causa (também conhecido como perolamento primário); ou ser formado em consequência do incêndio em veículo (o chamado perolamento secundário).

A NFPA (*National Fire Protection Association*) estabelece, em sua publicação NFPA 921:2017, revisada por pares, um guia contendo as diretrizes e recomendações para a investigação ou análise segura e sistemática de incidentes de incêndio e explosão[5]. O referido padrão define o perolamento primário (tratado somente como “pérola”) como sendo um glóbulo arredondado de metal re-solidificado ao final de um condutor elétrico remanescente, causado por um curto-circuito, sendo caracterizado por uma linha acentuada de demarcação entre as superfícies do condutor derretido e não derretido” [5].

Já o perolamento secundário (tratado na NFPA 921 como “glóbulo”) é descrito como sendo criados por aquecimento não localizado, em decorrência do derretimento pelo fogo externo ou por sobrecarga elétrica[5]. No presente estudo, devido à infinidade de formas de referência existentes na literatura como perolamentos, traços de fusão, glóbulos ou esferas, principalmente em decorrência da tradução, para a melhor compreensão os traços de fusão encontrados nos fios de cobre como causa do incêndio serão tratados como “perolamentos primários”

(produzidos antes do incêndio se iniciar, originando-o)[6]; da mesma forma, aqueles que são produzidos em decorrência de fogo externo como consequência do incêndio serão doravante tratados como “perolamentos secundários” (produzidos após o incêndio se iniciar).

Ao encontrar um perolamento em um local de incêndio, o perito à primeira vista ainda não é capaz de diferenciá-lo como sendo primário ou secundário. Contudo, essa tarefa é de suma importância para que aquele vestígio seja considerado (ou não) como possível indicativo da causa e do sítio de início do incêndio. O estudo dos elementos que possibilitem essa distinção tem sido bastante controverso na literatura disponível ao longo dos anos.

A NFPA 921 diferencia pérolas e glóbulos na seção 9.10.3.2 ao afirmar que os perolamentos primários podem ser diferenciados dos secundários por possuírem uma linha de demarcação distinta e identificável entre a esfera derretido e a porção não derretida adjacente do condutor[5]. Isso porque quando fios sofrem curto-circuito, o condutor está à temperatura ambiente enquanto o ponto do curto está em uma temperatura muito maior, resultando uma fusão mais concentrada[6].

Essa justificativa é encontrada no item 9.11.1.1 da NFPA 921, o qual indica que o curto-circuito produz temperaturas muito altas e aquecimento localizado, que normalmente derrete condutores elétricos no ponto de contato, sendo pequeno em área e de curta duração[5]. Assim, o perolamento ocasionado no fio de cobre é localizado, com uma linha acentuada de demarcação entre as porções fundidas e não fundidas do condutor, dando origem, geralmente, a uma superfície polida, esférica e concentrada, não sendo localizados remanescentes do isolamento plástico do fio aderido a ele[6].

Já o perolamento secundário caracteriza-se por apresentar menor grau de polidez e, por conseguinte, maior rugosidade em sua superfície, além de um formato mais irregular. Ademais, é comum que sejam encontrados restos de material isolante fundidos junto ao traço[6]. Ainda como características desse perolamento, a Polícia Federal considera que os referidos traços de fusão são caracterizados por possuírem resíduos de carbonetos e superfícies ásperas[7].

Apesar de existirem indicações de características passíveis de serem utilizadas para a diferenciação, existe uma vertente na literatura que defende não haver meios totalmente confiáveis para estabelecer se a fusão dos condutores de cobre foi resultado de exposição ao fogo ou causa de fenômeno elétrico[8]. Essa linha

de pesquisa sempre utiliza como justificativa o trabalho de Babrauskas[9], o qual afirma que a maioria dos métodos propostos para diferenciação envolve apenas critérios subjetivos e qualitativos para distinguir pérolas que iniciaram ou não um incêndio.

O autor justifica que todos os métodos até então empregados foram baseados em estudos em que apenas um pequeno número de amostras foi testado; que nenhum dos métodos foi reproduzido com sucesso em laboratórios que não fossem os dos proponentes; e que vários deles demonstraram explicitamente que não são reprodutíveis[9].

Contudo, o artigo assegura também que as pérolas não podem ser diferenciadas com base em seu formato, brilho, cor, suavidade, rugosidade da superfície ou tamanho (embora o autor afirme que pérolas menores, com menos de 1 mm, tendam a ser primárias; enquanto as maiores, com mais de 3 mm, tendam a ser secundárias); além de discutir como ineficaz o uso da espectrometria de raios X com dispersão de energia (EDS) para análise da composição estrutural dos depósitos formados, concluindo que nenhum dos métodos propostos (microscopia e espectroscopia) seriam promissores[9].

Quatro anos depois, Babrauskas[10] reiterou que nenhuma das propostas apresentadas até então produziram uma técnica confiável para a diferenciação. Lado outro, o autor parece indicar que há espaço para novas descobertas, ao afirmar que o estado da arte se apresentava tão pobre nessa matéria, que quase não existia, estando a literatura quase que inteiramente desprovida de trabalhos de pesquisa que tratassem do exame metalúrgico em dispositivos elétricos.

É, outrossim, imperiosa a constatação de que os referidos trabalhos datam de mais de uma década, porém atualmente ainda são utilizados de forma descuidada no meio pericial para a cômoda justificativa da impossibilidade total de diferenciação, em uma espécie de *cherry picking* ou “evidência suprimida”[11] (quando se apresenta uma evidência ou argumento para uma posição, deixando de fora evidências relevantes que enfraqueceriam ou mostrariam que a conclusão é falsa). Entretanto, para não incorrer nessa falácia, há que se considerar a existência de estudos mais recentes que vêm apresentando conclusões mais promissoras com o uso da metalografia, demonstrando que o desenvolvimento de técnicas periciais – como não poderia ser diferente na ciência - se trata de algo em constante construção.

Apesar dos estudos na literatura relatarem a análise de pérolas de fusão criadas em laboratório, poucos trabalhos abordaram a realização de um exame metalográfico da região do condutor danificada pelo fogo, de forma a identificar os indicadores físicos internos existentes para distinguir o perolamento primário do secundário, por meio do estudo da seção transversal do metal. Os principais indicadores internos físicos seriam: (a) porosidade em todo o fio ou somente no perolamento; (b) existência de microestruturas cristalinas de mesmo padrão em todo o fio ou somente no perolamento; (c) e a existência de uma área ou linha de demarcação entre um local no perolamento e o condutor adjacente[4,5,8,12].

Portanto, como os indicadores visuais externos são insuficientes ou contestados quanto a diferenciação dos perolamentos, a literatura aponta como oportuno o desenvolvimento um protocolo sistemático para a análise dos traços de fusão nos condutores para que os peritos possam diferenciá-los[12].

Sendo pesquisa científica relacionada ao incêndio de grande valia na realização de perícias, sobretudo para a determinação da causa e da origem do incêndio, o presente trabalho busca estudar características que possibilitem a referida distinção nos fios de cobre, por meio do exame metalográfico, em condutores obtidos em cenas reais de incêndio. Para tanto, os resultados encontrados serão discutidos e comparados com os achados da literatura mais recente sobre o tema[13-15].

2. Materiais e métodos

Considerando a literatura acerca do tema do presente estudo, não há unanimidade quanto à melhor técnica para a análise e diferenciação de perolamentos de fusão em fios de cobre[13]. Outro aspecto a ser considerado é que os estudos até então desenvolvidos analisaram vestígios produzidos em laboratório[12]. De forma diversa, os materiais examinados no presente trabalho foram retirados de cenas reais de incêndio, em que foi possível identificar, dada a existência de outros elementos materiais corroborantes, se consistiam em perolamentos primários ou secundários.

As três questões principais na análise de pérolas a serem exploradas estão relacionadas: (i) ao estabelecimento das técnicas apropriadas de acondicionamento e preparação; (ii) a técnica de análise apropriada; e (iii) o local apropriado para a análise na pérola[13].

2.1 Materiais Coletados

Foram coletados de locais de incêndio distintos três pérolas de fusão, sendo uma de cada local, doravante identificadas por:

- Perolamento 1: Trata-se de vestígio oriundo de um incêndio veicular onde, no interior do habitáculo, foram encontradas diversas esferas fundidas nos condutores de cobre remanescentes. A análise dos elementos coligidos no local levaram a perícia a inferir que o veículo foi objeto de incendiarismo, devido à existência de marcas características de chapa viva (espelho metálico) na lataria externa; além daquelas decorrentes de diferentes profundidades de ação do calor sobre as películas de tinta constituintes do processo de pintura, resultando na diversidade de colorações, característica de rápida combustão e espargimento de substância líquida, denotando a utilização de acelerante da combustão[4]. Ademais, o incêndio propagou-se para o habitáculo, dada a passagem facilitada pelo painel corta-fogo, o efeito forno e a presença de materiais combustíveis[4]. Assim, os perolamentos formados nos condutores internamente ao veículo se deram em decorrência do incêndio, e não como causa, sendo dessa forma classificados como secundários;

- Perolamento 2: Trata-se de vestígio oriundo de um incêndio em um estabelecimento comercial que abrigava uma assistência técnica especializada no conserto de aparelhos televisores, que se encontrava fechada quando do sinistro. O incêndio teria se originado na região anterior da edificação onde, na fiação elétrica remanescente, que segundo informes estaria energizada, foram encontrados condutores fundidos e rompidos, com gotículas de cobre fundido. Ademais foram pesquisados, dentro das circunstâncias encontradas, todas as possibilidades de ignição naturais, artificiais, pessoais e impessoais, não sendo encontrado qualquer dispositivo ou artifício que pudesse ter patrocinado incendiarismo[2,3]. Assim, infere a perícia que os referidos perolamentos estariam classificados como primários, indicando a ocorrência de fenômeno termoelétrico e de curto-circuito.

- Perolamento 3: Trata-se de pérola de fusão encontrada em residência que sofreu incêndio, possivelmente criminoso e com uso de acelerantes capazes de atingir altas temperaturas. As disposições gerais do local sugeriam incêndio não advindo de curto-circuito, mas submetendo a fiação de cobre a intenso calor. Estas condições, de incêndio criminoso e incendiarismo, seriam suficientes para gerar pérola de fusão sem atuação de corrente elétrica. As cercanias do local mostravam calcinação na alvenaria.

2.2 O exame metalográfico

O exame metalográfico consiste nas etapas de embutimento, lixamento, polimento (opcional para este caso), ataque químico e análise microscópica. Assim, visando ao atendimento das três questões principais definidas pela literatura[13] para serem exploradas na análise de pérolas, foram feitas as seguintes definições:

i Estabelecimento das técnicas para acondicionamento e preparação: lixamento a frio, sendo utilizadas lixas de granulação 150, 400 e 2000 e posteriormente pano de polimento 3 µm. Por se tratar de cobre para fiação elétrica, não se faz necessária politriz mecanizada comum em laboratório metalográfico. Basta a lixa sobre superfície inclinada exposta a água corrente ou molhada periodicamente (vide Figura 1).

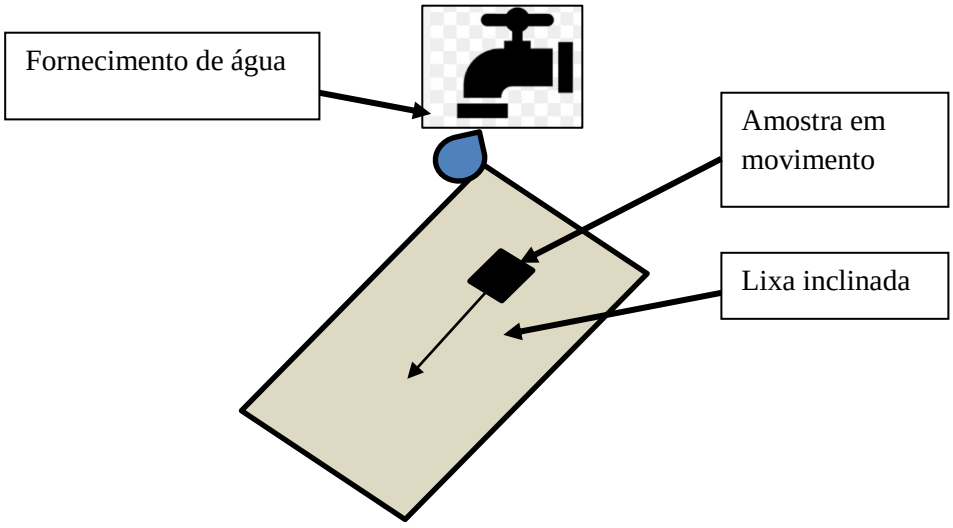

Figura 1. Diagrama esquemático da etapa de lixamento a frio.

ii Técnica de análise: embutimento a frio, sendo ressaltado que não são necessários equipamentos específicos, utilizando-se material polimerizante comum para uso odontológico.

iii Ataque metalográfico. O ataque metalográfico utilizado foi uma mistura de três partes iguais de água, hidróxido de amônio (amoníaco) e peróxido de hidrogênio 3% (água oxigenada). Neste sentido vale ressaltar que a água é indicada como opcional e o ataque pode ser realizado “em fases”, ou seja, é possível realizar ataque metalográfico durante um período, interrompê-lo, analisar o resultado e retomar o ataque em caso inconclusivo.

iv Local apropriado para a análise: foram analisadas não só as seções transversais do perolamento, mas também do condutor imediatamente adjacente, a fim de se determinar se há ou não diferenças no cobre nessas duas regiões.

Essa comparação entre regiões se faz necessária pois a presença de uma linha interna de demarcação se dá pela mudança abrupta do tamanho do grão (cristal) entre a pérola e o fio adjacente, sendo que há uma diferença entre tamanhos dos cristais re-solidificados devido às diferenças de temperatura a que são submetidos, revelando uma tendência a ser estudada para a diferenciação[13].

3. Resultados

Os resultados obtidos indicam que há pérolas de fusão que se apresentam com clara demarcação entre regiões que sofreram influências térmicas distintas. No caso daquelas advindas de curto-circuito, eram esperadas justamente essas diferenças nos comportamentos de solidificação.

- Perolamento 1: não foi encontrada uma clara linha de demarcação entre pérola de fusão e regiões adjacentes. Isso sugere que a fiação e a pérola não foram submetidas a condições que provocassem uma forte distinção ou essa distinção passou despercebida, conforme mostrado pelas Figuras 2-5. O observado está compatível com ambas as regiões recebendo calor a partir de fonte externa. Não foram encontrados subsídios que apontassem para curto-

circuito como causa do incêndio, corroborando com as demais constatações oriundas do exame de local.

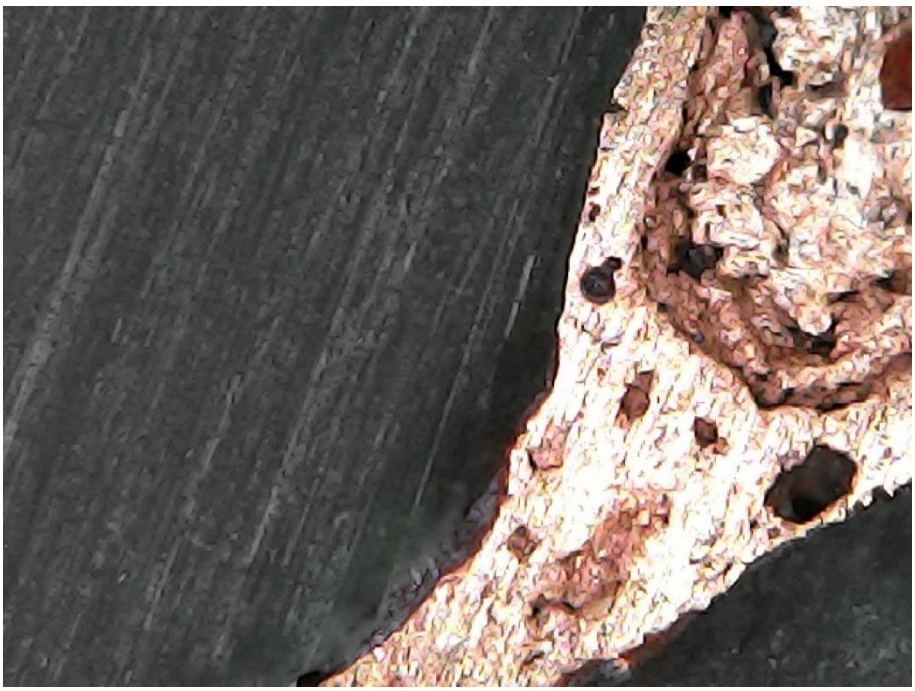

Figura 2. Ampliação de 300x do Perolamento 1 em corte, após ataque com água, hidróxido de amônio e peróxido de hidrogênio 3%. Observa-se a ausência de uma linha de demarcação clara entre a pérola e o condutor adjacente.

Figura 3. Complementar à Figura 2, mostrando com detalhe (ampliação de 300x) o aspecto do condutor adjacente a pérola, também atingido pelas chamas e com aspecto de re-solidificação do cobre. Nota-se a existência de vazios no material.

Figura 4. Complementar à Figura 2, mostrando com detalhe (ampliação de 300x) o aspecto da pérola em corte, mostrando-se atingido pelas chamas e com aspecto de re-solidificação do cobre. Nota-se a existência também de vazios no material.

Figura 5. Complementar à Figura 4, mostrando em detalhe (ampliação de 300x) o vazio encontrado no material.

- Perolamento 2: observou-se uma clara distinção entre pérola de fusão e fiação adjacente, em especial no que se refere a tamanho de grão. Referidas distinções se mostram no microscópio óptico de forma a não exigir,

necessariamente, por parte do observador compreensão sobre os processos metalúrgicos em questão (vide Figuras 6-9). Portanto, o material do conjunto 2 confirma pérola de fusão advinda de curto-circuito, em consonância com os elementos materiais coligidos no sítio dos fatos.

Figura 6. Aspecto do Perolamento 2 em corte (ampliação de 4x). Nota-se no detalhe a existência de uma clara distinção entre pérola de fusão e fiação adjacente, como uma linha de separação, indicando o metal ter atingido diferentes temperaturas nessas regiões.

Figura 7. Complementar à Figura 6, com ampliação de 300x, após ataque com água, hidróxido de amônio e peróxido de hidrogênio 3%. Observa-se diferença nos padrões de solidificação nas regiões indicadas.

Figura 8. Complementar à Figura 6 (ampliação de 300x) mostrando a diferença nos padrões de solidificação das regiões indicadas (perolamento à esquerda da imagem; e condutor à direita da imagem).

Figura 9. Aspecto do Perolamento 2 em corte, com auxílio do microscópio de bancada (aumento 500x), evidenciando a diferença entre os grãos (cristais) do cobre pertencentes ao perolamento (detalhe acima) e ao fio adjacente (detalhe abaixo), indicando que o metal atingiu diferentes temperaturas nessas regiões.

- Perolamento 3: não foi encontrada clara distinção entre a pérola de fusão e fiação adjacente, indicando se pérola secundária (consequência do incêndio ao ser o cobre atingido pelas chamas), apesar de se tratar de pérola de fusão com diâmetro acentuadamente superior à da fiação adjacente (vide Figuras

10-12). Assim, não foram encontrados elementos que denotassem a formação de perolamento em decorrência de curto-circuito (primária). Tal constatação apresenta-se em linha com os elementos observados na cena de incêndio quando do exame do local.

Figura 10. Ampliação de 300x do Perolamento 3 em corte, após ataque com água, hidróxido de amônio e peróxido de hidrogênio 3%. Assim como no Perolamento 1, observa-se também a ausência de uma linha de demarcação clara entre a pérola e o condutor adjacente.

Figura 11. Complementar à Figura 10, mostrando com detalhe (ampliação de 150x) o aspecto da pérola e do condutor adjacente, ambos demonstrando-se atingidos pelas chamas. Nota-se a existência de vazios no material.

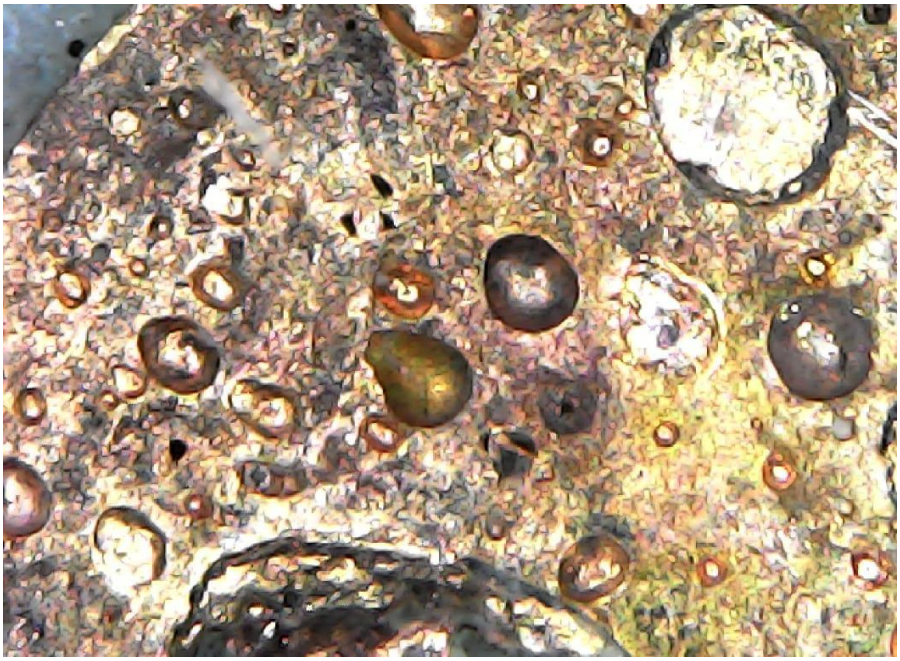

Figura 12. Complementar à Figura 11, com detalhe (ampliação de 300x) para o aspecto da pérola em corte e a existência de vazios.

4. Discussão

Uma suposição vinda de longa data no campo da investigação de incêndio é que as pérolas somente seriam formadas em fios energizados. Contudo, a literatura já comprovou que essa suposição é falsa, podendo serem formadas também em fios não energizados[13].

Isso ocorre porque a formação de uma pérola em um fio não se dá uma função do seu "estado energizado", mas em função do seu "estado térmico" seguindo as leis da física, que afirmam que os líquidos tendem a formar estruturas esféricas devido a forças superficiais coesivas[13].

Apesar de não haver uma característica definitiva para a diferenciação, verifica-se que há uma tendência na literatura em reconhecer características distintivas entre fios energizados e não energizados, representadas por uma linha de demarcação devido às diferenças entre os cristais de cobre fundidos e aqueles mantidos a temperatura ambiente[2,5,6,9,13,14]. Para se chegar a uma conclusão pericial, essas características devem ser corroboradas com os demais elementos materiais do local dos fatos, exigindo o conhecimento da cena do incêndio e a aplicação do método científico. Apenas a presença ou o uso exclusivo de características visuais para realizar essa diferenciação, à vista desarmada, pode levar o perito a conclusões equivocadas[13].

A metalografia mostra-se útil na avaliação das diferenças entre esferas não energizadas e energizadas porque o cobre sofre alterações na estrutura de seus cristais quando aquecido. A estrutura do cristal começa a aumentar quando as temperaturas atingem ou excedem 260°C. Portanto, com base no tamanho das estruturas, é possível distinguir entre os fios que apresentavam pérolas primárias versus os que não eram energizados e apenas foram expostos à chama externa[13].

Alguns dos artigos[14] confirmaram a existência de um gradiente acentuado de temperatura nas pérolas criadas por falhas elétricas após o corte da seção transversal, indicando que o exame das microestruturas pode fornecer um método para identificar a causa, confirmando a aplicabilidade da metalografia.

As abordagens investigadas pela literatura[14] geralmente incluem: (1) comparação da aparência externa dos condutores após serem expostos a chamas e curtos-circuitos, (2) comparação do cobre para sinais de recristalização em grãos equiaxiais e (3) comparação do teor de carbono entre as esferas e glóbulos. Nessa referência[14], os autores descobriram que, em casos específicos, as duas primeiras técnicas fornecerão evidências suficientes para apoiar uma conclusão.

Os autores[14] concluíram que as aparências externas do cobre re-solidificado, a técnica de análise do teor de carbono e a análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) não são eficazes para distinguir os diferentes perolamentos. Isso porque um aspecto que pode dificultar essa diferenciação é o tempo de exposição ao incêndio do condutor estudado. Cabe salientar que, em alguns casos, as características do perolamento primário são mascaradas pelo aquecimento contínuo fio de cobre e, nesses casos, a aparência pode se assemelhar às pérolas secundárias[13]. Assim, apresenta-se a seguinte limitação: se um fio de cobre sofrer um curto-circuito, formando pérola de fusão, e for subsequentemente aquecido, pode ocorrer um aumento do tamanho dos cristais, o que impediria qualquer determinação conclusiva da natureza do evento[13].

Mediante a análise de trabalhos anteriores, Wright, Loud e Blanchard[14] propuseram em 2015 um estudo concluindo que o gradiente térmico gerado por falha elétrica (perolamento primário) cria características identificáveis nos fios em relação àquelas expostas apenas ao ataque externo do fogo.

A explicação é que as microestruturas nas pérolas se assemelham às zonas criadas pelo derretimento do cobre na sua temperatura de fusão, enquanto os fios não fundidos adjacentes não atingem a temperatura de recozimento do cobre. Essa

condição cria uma linha acentuada de demarcação entre as superfícies do condutor derretido e não derretido, como resultado do calor localizado devido a falhas elétricas[14]. Essa linha acentuada de demarcação pode ser usada para identificar perolamentos primários dos secundários[5,14].

A determinação do gradiente de temperatura experimentado entre as pérolas, entre o fio imediatamente próximo (adjacente) e entre regiões do fio mais distantes envolve, além do exame das microestruturas internas para verificação dos cristais, também a verificação dos vazios, danos e sinais de re-fusão por meio do exame metalográfico[14].

Para as pérolas de fusão secundárias, grandes vazios internos e uma rede de vazios menores também estão presentes na região de transição com o condutor. Além dos vazios, grãos recristalizados equiaxiais mostram sinais de recozimento. Esses vazios, grãos recristalizados e o menor grau de microestruturas re-derretidas indicam que essa região foi aquecida entre a temperatura de recozimento (370ºC a 650ºC) e a temperatura de fusão do cobre (1.082ºC)[14].

Já nas pérolas de fusão primárias, as seções transversais de fios de cobre energizados, que sofreram falhas elétricas, revelam microestruturas diferentes na esfera e no fio adjacente. As microestruturas criadas nesse tipo de perolamento se assemelham mais às zonas afetadas pelo calor de uma solda de fusão, indicando que atingiram a temperatura de fusão do cobre (1.082ºC). Já as superfícies não fundidas do fio adjacente não atingem a temperatura de recozimento do cobre (370ºC a 650ºC)[14].

Os achados baseados em seções transversais de condutores de pequeno diâmetro[14] podem ser comparados com achados baseados em análises semelhantes de condutores maiores[12], em que também estão presentes as linhas de demarcação nos perolamentos primários pelos mesmos motivos discutidos acima. No entanto, verifica-se que as esferas formadas em fios de diâmetro maiores apresentam vazios internos significativamente maiores, provavelmente resultantes das correntes de falha mais altas e das temperaturas resultantes experimentadas[12]. Ambas as análises demonstram que, embora possa ser difícil ou impossível distinguir perolamentos primários e secundários com base somente em uma análise externa, a linha de demarcação distinta e identificável entre a esfera fundida fundido e a porção não fundida adjacente do condutor pode ser identificada quando a

microestrutura é examinada[12,14], a exemplo do que foi observado nos resultados das análises para os Perolamentos 1, 2 e 3 no presente trabalho.

5. Conclusão

Fenômenos termoelétricos são comumente interpretados como causa de incêndios, especialmente o curto-circuito. No entanto essa premissa nem sempre é verdadeira, pois os perolamentos podem aparecer antes, durante e depois do evento, não necessariamente sendo sua causa. Para a definição de um curto-circuito como causa de um incêndio, faz-se necessária a análise de toda complexidade de informações disponíveis no local de incêndio, de modo que o perito consiga provar a correlação de cada elemento de queima e propagação das chamas, com a ignição primária do material pela centelha ou arco do curto-circuito. Apesar de existirem tendências, relacionando a forma e aparência do traço de fusão primário e secundário com a causa efetiva do incêndio, tal conceito não pode ser usado como regra, mas simplesmente para auxiliar o perito na correlação de todos os elementos obtidos durante o levantamento do local[2,6].

Algumas evidências auxiliam na tipificação do curto-circuito. No caso de um fio condutor que se sobreaquece, deve-se distinguir se o fogo foi gerado no condutor ou se esse foi atingido por fogo externo. As duas situações geram casos opostos, cabendo ao perito identificá-las. Quando um cabo é atingido pelo fogo, o isolamento se funde e se queima. Ao esfriar, o isolamento endurece e adere firmemente, soldando-se ao fio. Já quando a origem do fogo se dá internamente ao cabo, o fio de cobre se adelga por flexionamento, ocasionado pelo seu próprio peso, destruindo o isolamento desde o interior, ficando solto[1].

Os resultados obtidos por meio de um exame metalográfico podem indicar que perolamentos possuam “características” de traço de fusão primário, ou “características” de traço de fusão secundário, conforme o caso, devendo ser corroborados com os demais elementos da cena. Ademais, a existência de características microestruturais que denotam pérola de fusão primária pode indicar se a fiação, onde o vestígio se localizava, estava energizada na ocasião do sinistro[16].

Até o momento, vários métodos foram explorados na literatura para diferenciar os perolamentos. No entanto, apenas um pequeno número de amostras foi testado por métodos relacionados e nenhum desses métodos foi reprodutível[15].

Assim, o presente trabalho possibilitou a aplicação de um método simples e barato, havendo somente a necessidade do emprego de lixas com uso manual e pano metalográfico com pasta de 3µm. O ataque metalográfico utilizado foi uma mistura de três partes iguais de água, hidróxido de amônio (amoníaco) e peróxido de hidrogênio 3% (água oxigenada%), conforme orientação[17].

Deve ser ressaltada a necessidade de lavagem com água ao se trocar de lixa grossas para finas ou para a massa de polimento. Embora esta recomendação seja válida para amostras em geral, os autores apontam para a baixa dureza e maior susceptibilidade a riscos do cobre utilizado para fins de condução elétrica, quando comparado à maioria dos outros metais utilizados para os mais diversos fins. Quanto ao nível de ampliação usual para este tipo de procedimento, os autores do presente estudo recomendam que seja de 300x a 500x para evidenciar regiões onde podem ocorrer diferenças em padrões metalográficos, podendo ser utilizadas lentes para microscopia óptica dispostas em microscópios de reflexão convencionais ou mesmo atrelados a dispositivos USB (Universal Serial Bus).

A diferenciação de pérolas de fusão depende da análise metalográfica e dos padrões estabelecidos na literatura. Entretanto, uma limitação está vinculada ao fato de que a análise metalográfica depende principalmente da experiência humana, pois as imagens são analisadas através do julgamento visual do perito, não sendo um método quantitativo e objetivo de julgamento[15].

Assim, como tendências futuras, a fim de construir um método objetivo e de desenvolvimento para analisar pérolas de fusão, Wang, Liang e Mo[15] construíram, em 2016, modelos de julgamento otimizados por diferentes métodos no Software Matlab para o processamento digital de imagens metalográficas os quais, quando testados em casos de incêndio real para aplicação forense, encontraram precisão de 100% de acerto. Cabe ressaltar que as imagens utilizadas para diferenciar perolamentos primários também mostravam limites visíveis entre esfera fundida e o condutor[15].

No que se refere a uma demarcação na pérola de fusão esta foi encontrada na amostra onde era esperada (Perolamento 2) não foi encontrada onde certamente não se esperaria (Perolamento 1) e onde provavelmente não se esperaria (Perolamento 3). Neste sentido, embora se tratar de um número limitado de amostras, foram obtidas diferenças expressivas para casos de diferentes origens para as pérolas de fusão.

Por outro lado, não foi possível concluir ou corroborar observações a respeito de vazios internos nas pérolas de fusão. Esses estavam presentes não somente nos Perolamentos 1 e 3 (prováveis casos de perolamento não causados por curto-circuito), mas também no Perolamento 2 (provável caso de perolamento causado por curto-circuito), embora ausente nas metalografias presentes neste trabalho. Para um eventual levantamento quantitativo ou semiquantitativo que confronte perolamento originário de diferentes causas, seriam necessárias investigações adicionais. Um agravante para este levantamento, que apresentaria vantagens no sentido de dispensar ataque metalográfico e eventualmente polimento, uma vez que os vazios são observáveis após lixamento. Contudo, vazios internos dependem da geração de gases, contração do material, geometria, velocidade de resfriamento e de exposições ambientais diversas[18].

Para trabalhos futuros, vislumbra-se a possibilidade de se determinarem, igualmente por meio da metalografia, elementos que possam caracterizar e diferenciar pérolas de fusão provocadas por curto-circuito; das pérolas de fusão formadas por efeitos de sobrecarga de corrente, uma vez que essa última é apresentada pela literatura[19] como a segunda maior causa de incêndios devido a causas elétricas, após aquelas atribuídas a curtos-circuitos. A aplicação do exame metalográfico nessa diferenciação seria igualmente relevante pois a estrutura metalográfica das pérolas geradas por sobrecarga de corrente parecem ser, segundo Li e Liu (2016)[19], diferentes devido à existência de uma quantidade maior de segregações dendríticas que apareceram na microestrutura do metal. Portanto, diferenciar esses dois tipos de traços de fusão seria importante, do ponto de vista pericial, para que fosse possível identificar a ocorrência de sobrecarga de corrente na fiação do local antes do início do incêndio[19].

Referências

1. Cordioli C. Incêndios com origem em fenômeno elétrico. In: ARAGAO, R.F. Incêndios e explosivos: uma introdução à engenharia forense. 2 ed. Campinas: Millennium, 2020.
2. DeHaan JD, Icove DJ. Kirk's fire investigation. 7. ed. NY: Pearson, 2011.
3. Aragao R. Processos e fontes de ignição. In: Incêndios e explosivos: uma introdução à engenharia forense. 2 ed. Campinas: Millennium, 2020.

4. Kleinübing R. Diagnose de incêndios e explosões em veículos. In: ARAGAO, R. F. Incêndios e explosivos: uma introdução à engenharia forense. 2 ed. Campinas: Millennium, 2020.
5. NFPA. 2017. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
6. Motelievicz ME, Acordi CF. Curto-circuito como fenômeno termoelétrico relacionado a causas de incêndios em edificações: mitos e verdades. Ignis: revista técnico científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Florianópolis, v. 2, n. 1, 2017.
7. Medeiros VS. Incêndio no Flamengo: Relato do caso do Ninho do Urubu. Revista Perícia Federal, ano XV, n. 43, p. 36-41, 2019.
8. DeHaan JD, Icove DJ. Kirk's fire investigation. 8. ed. NY: Pearson, 2019.
9. Babrauskas V. Arc Beads from Fires: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? J. Fire Protection Engineering, 14, p. 125-147, 2004. https://doi.org/10.1177/1042391504036450
10. Babrauskas V. Research on electrical fires: The state of the art. Fire Safety Science, v. 9, p. 3-18, 2008. https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-3
11. Johnson DK. Suppressed Evidence. In: Arp, R.; Barbone, S.; Bruce, M. Bad Arguments: 100 of the Most Important Fallacies in Western Philosophy. 1. Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2019. https://doi.org/10.1002/9781119165811.ch98
12. Buc EC, Reiter D, Battley J, Sing TB, Sing TM. Method to characterize damage to conductors from fire scenes. Fire and Materials 2013, 13th International Conference and Exhibition, Conference Proceedings, p. 657-666, 2013.
13. Roby RJ, Mcallister J. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. Journal National Institute of Justice, Office of Justice Programs, US Department of Justice, 2012.
14. Wright SA, Loud JD, Blanchard RA. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? Fire Technology, v. 51, n. 5, p. 1051-1070, 2015. https://doi.org/10.1007/s10694-014-0455-9
15. Wang L, Liang D, Mo S. Judgment model for identifying the type of electric molten mark in fire. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, v. 16, n. 1, p. 125-133, 2016. https://doi.org/10.3233/JCM-160607
16. Meng QS. Analysis of Copper Wires Short Circuited Melted Mark. In: Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, p. 94-98, 2014. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.511-512.94
17. Voort GFV. Copper Color Metallography. Buehler Ltd. Disponível em: <https://www.buehler.com/assets/solutions/technotes/copper.pdf>. Acesso em 07 de julho de 2020.

18. Hasse S. Guβ- und Gefügefehler. Berlin: Schiele und Schön, 2002.
19. Li Y, Liu X. Study on metallographic structure of melted breakpoint mark for copper wire current overloading. Procedia Engineering, v. 135, p. 482-485, 2016. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.159