

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estudo dos efeitos de descargas atmosféricas em estruturas de aço-carbono com e sem revestimento

Sidney Oswaldo Pagotto Júnior^a, Zehbour Panossian^b, Fabiano Raymundo dos Santos^c, Gutemberg de S. Pimenta^d, Eduardo W. Laurino^e, João Hipólito L. Oliver^f, João Paulo Klausing Gervásio^g, Marcelo Araújo^h, Maria Helena dos Santos Taquedaⁱ

Abstract

Structures, equipment and products used in oil and gas industry pipelines are usually exposed to the atmosphere or are buried in natural soil and thus they are subject to corrosion damages. Traditionally, the control of corrosion in this type of product is done by means of organic coatings associated with cathodic protection. Although this combination proves to be effective, in recent years failures in service have been observed, even on coated and cathodically protected pipelines. Some of these failures have been attributed to the interference of stray DC or AC electric current, but there are other sources of damage, such as lightning. It is known that lightning cause damages on metallic roofs. However, specific studies on the effect of lightning on other metallic structures and equipment are rare. The objective of this study is to evaluate the effects of lightning on metallic materials. For that, coated and uncoated carbon steel panels were submitted to 400-A electric discharges in order to simulate the current continuing stage of natural lightning. After that, the tested panels were characterized by means of visual examination, metallographic examination and microprobe analysis with the aid of a scanning electron microscope by field emission (FEG-SEM). This paper discusses the influence of lightning time, the presence of the organic coating and the type of medium (air or soil) on the tested metals.

Keywords: electrical discharges, steel, coating, tests.

Resumo

Estruturas, equipamentos e dutos usados em sistemas de transferência da indústria de óleo e gás trabalham usualmente expostos à atmosfera natural ou enterrados em solos, estando assim sujeitos a danos. Tradicionalmente, o controle da corrosão neste tipo de duto é feito por meio de revestimentos orgânicos associados à proteção catódica. Embora esta combinação se mostre eficiente, nos últimos anos foram observadas falhas em serviço, mesmo em dutos revestidos e catodicamente protegidos. Parte destas falhas tem sido atribuída às interferências de corrente contínua ou alternada dispersas no solo, porém,

^a Mestre, Engenheiro de Materiais – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT

^b Doutora em Ciências, Responsável pelo Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT e Professora convidada da EPUSP – Departamento de Materiais e Metalurgia.

^c Técnico em Metalurgia – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT

^d Mestre, Engenheiro Mecânico – CENPES/PETROBRAS

^e Consultor Técnico- TRANSPETRO/PRES/SE/ENG/STSPCO/INSPEÇÃO

^f Engenheiro de Equipamentos – Petrobras Transporte S.A.

^g Engenheiro de Dutos - ENGENHARIA/IETEG/ETEG/EDUT

^h Engenheiro Mecânico – CENPES/PETROBRAS

ⁱ Dra., Bacharel em Química Industrial - Dep. Eng. Química/Esc. Politécnica/ USP

existem outras fontes de dano, tal como as descargas atmosféricas. Sabe-se que descargas atmosféricas causam danificação em telhados metálicos. No entanto, trabalhos relacionados com os efeitos de descargas atmosféricas em outras estruturas e equipamentos são raros. O objetivo deste trabalho é justamente verificar os efeitos destas descargas em materiais metálicos. Para isto, chapas de aço-carbono, com e sem revestimento, foram submetidas à aplicação de descargas elétricas com uma corrente de 400 A, por diferentes períodos de tempo, de forma a simular a corrente de continuidade observada nas descargas atmosféricas. Depois de ensaiadas, as chapas foram caracterizadas por meio de exames visuais, exames metalográficos e análises de microsonda com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG). Este trabalho discute a influência do tempo, da presença (ou não) de revestimento e do tipo de meio de ensaio (ar ou solo), sobre os materiais metálicos ensaiados.

Palavras-chave: descargas elétricas, aço-carbono, revestimento, ensaios.

Introdução

Descargas atmosféricas, mais precisamente relâmpagos, são descargas elétricas de grandes proporções que ocorrem na troposfera da Terra, decorrentes da eletrificação (separação de cargas elétricas) das nuvens de tempestade (1). Sabe-se que no interior destas nuvens há uma grande quantidade de água na forma de cristais de gelo de diversos tamanhos, que com o contato físico entre eles, tornam-se eletricamente carregadas. Acredita-se que os cristais de menor tamanho adquirem carga positiva, enquanto as de maior tamanho, carga oposta (negativa). Com esse fato, as partículas tendem a se separar no interior da nuvem devido à força da gravidade, de modo que as partículas de carga positiva ficam na parte superior e, as de carga negativa, na parte inferior.

Em consequência desta separação de cargas, há a produção de um enorme campo elétrico tanto dentro das nuvens quanto entre a nuvem e o solo, gerando uma diferença de potencial elétrico da grandeza de centenas de megavolts. No instante em que se atinge uma quantidade limite de cargas opostas entre as nuvens e o solo, há ruptura da rigidez dielétrica do ar, estabelecendo uma descarga elétrica.

Existem dois tipos fundamentais de descargas atmosféricas: as que ocorrem no céu e as que atingem o solo. Dentre elas, as que atingem o solo são as mais estudadas, pois são estas que causam os maiores danos aos materiais metálicos e, portanto, somente estas serão tratadas aqui.

As descargas que atingem o solo são classificadas em dois tipos básicos: descargas nuvem-solo (NS) e as descargas solo-nuvem (SN). Como a própria denominação sugere, as descargas NS partem de uma nuvem e atingem o solo e as SN partem do solo em direção a uma nuvem. As descargas NS e SN também são classificadas pela polaridade das descargas efetivamente transferidas ao solo, dando origem às descargas positivas (transferências de cargas positivas) e negativas (transferência de cargas negativas), conforme ilustrado na Figura 1.



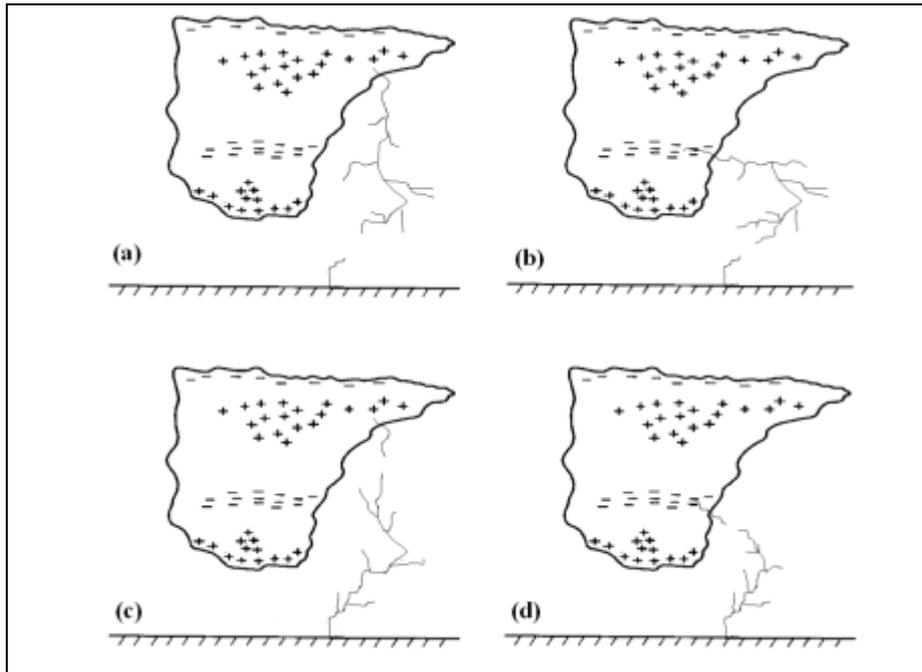


Figura 1 – Desenho esquemático simplificado dos dois tipos de descargas que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo e (d) SN negativo (1,2)

O mecanismo de evolução de uma descarga elétrica pode ser entendido tomando-se como exemplo uma descarga atmosférica NS negativa. Após o carregamento da nuvem a níveis capazes de romper a rigidez dielétrica do ar, dá-se início a descarga elétrica, que constitui um canal ionizado de plasma chamado de líder escalonado, o qual se propaga da nuvem para o solo em uma série de passos discretos. Análises fotográficas revelam que os passos do líder apresentam uma duração típica de $1 \mu\text{s}$ e estendem-se por algumas dezenas de metros, com uma pausa aproximada de $50 \mu\text{s}$ entre os passos. O líder escalonado, durante a sua trajetória para o solo, ramifica-se na direção descendente durante a sua busca por regiões de melhor condutividade elétrica na atmosfera, produzindo assim a estrutura ramificada característica.

O potencial elétrico em relação ao solo da base do canal do líder carregado negativamente é da ordem de 10^7 V . Desta forma, à medida que a extremidade do líder aproxima-se do solo, o campo elétrico sobre irregularidades da superfície do solo (objetos pontiagudos, antenas, para-raios, edificações, montanhas, etc.) intensifica-se a ponto de romper novamente a rigidez dielétrica do ar, fazendo com que uma ou mais descargas ascendentes (descargas de retorno) surjam a partir destas irregularidades, dando origem ao processo de conexão (*attachement*). Quando uma das descargas ascendentes encontra o líder escalonado descendente a algumas dezenas de metros acima do solo, a extremidade do líder conecta-se com o potencial da Terra. Neste instante, uma frente de onda (representando o potencial da Terra) propaga-se continuamente para cima através do canal, previamente ionizado e carregado eletricamente, descarregando-o. Tem-se então a primeira descarga de retorno, cuja velocidade ascendente é tipicamente da ordem de um terço da velocidade da luz ou mais. O tempo de trânsito total desde o solo até o topo do canal é de cerca de $100 \mu\text{s}$. A primeira descarga de retorno tipicamente produz um pico de corrente

próximo ao solo de 20 kA a 30 kA, com um tempo de subida em geral de 1 μ s a 10 μ s. A descarga de retorno efetivamente transporta para o solo toda a carga depositada no canal principal e em suas ramificações, bem como cargas que possam estar disponíveis no topo do canal naquele instante, gerando um pico de corrente. Além disso, cargas das regiões vizinhas ao canal (resultantes da ionização da atmosfera) podem também ser coletadas durante a descarga, dando origem a um segundo pico de corrente de menor intensidade alguns microssegundos depois.

Após a extinção da corrente de descarga de retorno, a descarga atmosférica pode encerrar-se. Tem-se então uma descarga simples, composto por uma única descarga de retorno. No entanto, podem ocorrer outras descargas de retorno dando origem às descargas atmosféricas múltiplas.

As descargas atmosféricas positivas, por sua vez, costumam ser, em sua maioria, simples e sua única descarga de retorno transfere ao solo uma quantidade de carga maior quando comparado a uma descarga negativa. Desta forma, a intensidade da corrente das descargas positivas tende a ser maior do que a das negativas.

Em 70 % das descargas atmosféricas, pelo menos uma descarga de retorno é seguida por uma corrente de longa duração, que pode ser entendida como sendo um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo e que é chamada de corrente contínua ou corrente de continuidade. São estas as correntes que causam os maiores danos aos materiais atingidos pelas descargas atmosféricas, sendo decorrente da aplicação da corrente por maior tempo (décimos de segundos e não milésimos de segundos). Esta longa duração resulta em maior transferência de carga que pode vir a ser dezenas de vezes maior do que nos raios sem a corrente de continuidade. Os primeiros resultados de estudos com corrente de continuidade mostraram a existência de uma corrente intermediária, durante o final do estágio decrescente da ordem de milissegundos e seu valor variava de poucos kA até zero.

Com base no conhecimento da evolução das descargas atmosféricas, foi proposto um modelo de quatro componentes para representar uma descarga atmosférica (3,4,5), conforme mostra a Figura 2. Com base neste modelo, pode-se delinear uma descarga elétrica para os ensaios de simulação em laboratório.

A geração em laboratório de uma descarga completa, com os diversos componentes mostrados na Figura 2, é muito difícil, requerendo fontes e equipamentos de alto custo. Normalmente, em estudos objetivando a verificação dos efeitos das descargas atmosféricas sobre diferentes materiais e equipamentos, simulam-se as correntes de continuidade das descargas atmosféricas, uma vez que são estas as responsáveis pelos danos causados sobre os materiais. A questão é a escolha do valor e do tempo de aplicação desta corrente.

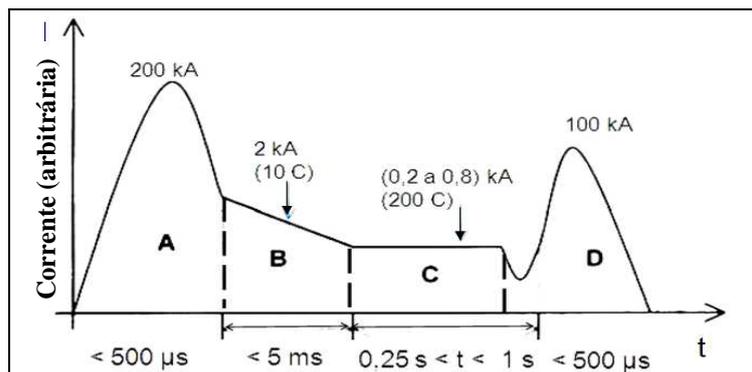


Figura 2 – Representação esquemática da corrente x tempo para uma descarga atmosférica, onde A = corrente inicial; B = corrente intermediária; C = corrente de continuidade e D = corrente de retorno (3,4,5).

O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de descargas atmosféricas em materiais metálicos. Este objetivo foi estabelecido tendo em vista a ocorrência de danos em dutos enterrados cujas causas não puderam ser apontadas dentre as mais comuns, quais sejam: ineficiência do sistema de proteção catódica, interferência de correntes dispersas no solo, presença de bactérias entre outras. Sabe-se que outras fontes podem causar danos a materiais metálicos como as descargas atmosféricas. Acreditou-se que seria importante verificar com mais detalhe que tipo de danos ocorre quando descargas atmosféricas atingem superfícies metálicas pintadas.

Para alcançar o objetivo proposto, buscou-se consultar os valores de corrente e tempo usados para o tipo de estudo que se pretendia desenvolver, tendo sido consultado a norma IEC 62305-1 “*Protection against lightning - Part 1: General principles*” (6). Esta norma estabelece os parâmetros de ensaios de simulação da corrente de continuidade de descargas atmosféricas para verificar o efeito sobre telhados metálicos de diferentes tipos de construção. Além das informações contidas nesta norma, foram consultados dados provenientes de um levantamento sobre os parâmetros típicos de descargas atmosféricas de uma região do nosso país de interesse para os autores, região esta de alta incidência de descargas atmosféricas (1).

Com base nas informações obtidas da referida norma e do levantamento citado, foi elaborado um planejamento de experimentos com diferentes valores de corrente, a saber:

- 70 A (valor da corrente da descarga atmosférica de máxima duração indicado no levantamento);
- 400 A (valor especificado na Norma IEC 62305);
- 3,2 kA (maior valor de corrente observado em uma descarga positiva indicado no levantamento)
- 6,0 kA (capacidade máxima do laboratório IEE/USP, onde os ensaios de simulação foram realizados).

Os ensaios consistiram em aplicar uma descarga elétrica sobre materiais metálicos (chapas e tubos) com e sem pintura e verificar o efeito causado no metal. Os efeitos considerados foram: a área fundida, a altura máxima da região fundida, a dureza da região fundida e o teor de carbono da região fundida.

Neste trabalho, serão apresentados apenas os resultados obtidos na aplicação da descarga elétrica com corrente de 400 A (valor especificado na norma IEC 62305) sobre chapas com e sem pintura, tendo como variantes a espessura da chapa, o meio em que foi realizado o ensaio (solo ou ar) e o tempo de aplicação da corrente.

Metodologia

Para a realização dos ensaios de descarga elétrica, foram definidos os seguintes parâmetros:

Corrente

Foram aplicadas descargas elétricas de 400 A, valor este indicado pela norma IEC 62305-1 “*Protection against lightning - Part 1: General principles*” (6). Para tal, foi utilizado retificador em ponte trifásico Semikron, de 4.000 A e 1.000 V.

Tempo de ensaio

Os tempos de ensaio foram 0,1 s; 0,55 s e 1,0 s. Para a corrente de 400 A, tais tempos geram a aplicação de cargas de 40 C; 220 C e 400 C, das quais as duas últimas representam valores próximos da máxima carga obtida nas descargas negativas.

Chapas utilizadas

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados chapa de aço-carbono, com duas espessuras distintas: 0,8 mm de espessura e 4,76 mm. A composição química destas chapas também foi determinada, estando apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado da análise de composição química para as chapas de aço-carbono utilizadas.

Elemento	Teor (%)	
	Chapa 0,8 mm	Chapa 4,76 mm
Carbono (C)	0,04 ± 0,01	0,09 ± 0,01
Silício (Si)	< 0,01	< 0,01
Manganês (Mn)	0,29 ± 0,01	0,46 ± 0,01
Fósforo (P)	0,022 ± 0,001	0,018 ± 0,001
Enxofre (S)	0,012 ± 0,002	0,008 ± 0,001

Revestimento

As chapas de 0,8 mm e 4,76 mm de espessura foram ensaiadas com e sem revestimento. As chapas sem revestimento tiveram a superfície de ensaio jateada segundo padrão SA 2½, sendo o lado oposto da chapa protegido por uma demão de tinta de fundo epóxi poliamida. Nas chapas ensaiadas com revestimento, foi aplicado um esquema de pintura composto por uma tinta de fundo epóxi poliamida e uma tinta de acabamento epóxi alcatrão de hulha, com cerca de 600 µm de espessura total, nos dois lados da chapa. A decisão de utilizar um esquema de pintura à base de epóxi alcatrão de hulha foi baseada no fato de que, no caso

das tubulações mais antigas de condução de óleo, gás e seus derivados, este era o revestimento utilizado, antes de ser substituído pelo revestimento polietileno tripla camada. Além disto, revestimentos a base de alcatrão de hulha também foram avaliados no trabalho *Powerline ground fault effects on pipelines*, realizado pelo Powertech Labs Inc. Canadian Association (7).

Meio de ensaio

Foram realizados ensaios com chapas expostas ao ar e ensaios onde uma pequena quantidade de solo foi colocada entre o eletrodo e a chapa. Após a realização dos ensaios, ao se analisar os resultados obtidos, verificou-se que a colocação do solo deveria ser feita de forma mais aprimorada, o que foi feito nos ensaios seguintes do projeto.

Procedimento de ensaio

Para a realização dos ensaios, foi confeccionada uma plataforma, onde as chapas, de dimensões de 500 mm x 500 mm, eram fixadas em um suporte metálico através de parafusos. Nos pontos de fixação o revestimento interno foi removido, de forma a garantir o bom contato elétrico entre a chapa e o suporte metálico.

Um ponto importante observado durante a realização destes ensaios é que, apesar do ensaio aplicar um valor de corrente alto, a tensão nestes ensaios era baixa, não sendo capaz de abrir o arco e romper o revestimento por si só. Desta forma, foi necessário gerar um pequeno defeito no revestimento e, ainda, conectar a ponta do eletrodo de ensaio no metal base da chapa com um fio metálico, para garantir a passagem de corrente. Este defeito foi feito com uma broca de diâmetro de 3 mm, sendo idêntico em todas as chapas revestidas ensaiadas. Na Figura 3 observa-se um momento em que o defeito estava sendo feito na chapa.



Figura 3 – Execução de um defeito no revestimento sendo realizado com auxílio de broca e furadeira.

Uma vez fixada no suporte a chapa a ser ensaiada, o eletrodo utilizado, de aço-carbono, foi posicionado a uma distância fixa de 10 mm da região de ensaio, sendo então utilizado um fio de cobre para garantir o contato elétrico entre o eletrodo e a chapa, garantindo assim a passagem da corrente aplicada. Cabe, neste momento, uma explicação: decidiu-se pela utilização de um fio de cobre (e não de um fio de aço), pois ao aplicar a descarga elétrica,

este fio condutor é fundido, sendo impossível dissociá-lo do metal da chapa fundido. Em uma etapa posterior, de caracterização dos elementos químicos presentes na região fundida, o cobre, se presente, estaria associado ao fio utilizado no ensaio.

Em relação ao meio de ensaio, para ensaios realizados tendo como meio solo, uma quantidade de solo era colocada entre o eletrodo e a chapa, de forma a cobrir totalmente o espaço entre os dois. Uma vez aplicada a corrente, o ensaio era repetido, para que houvesse uma duplicata de cada ensaio realizado.

A sequência para realização dos ensaios foi definida com auxílio de um planejamento experimental. A Tabela 2 apresenta a sequência de ensaios realizados.

Tabela 2 – Planejamento experimental dos ensaios com corrente de 400 A.

Tempo de aplicação da corrente (s)	Espessura da chapa (mm)	Revestimento	Meio de ensaio
1	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
0,1	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
1	0,8	Sem revestimento	Solo
0,5	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
1	4,76	Sem revestimento	Solo
0,1	0,8	Sem revestimento	Ar
0,5	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
0,1	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
0,5	4,76	Sem revestimento	Solo
1	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
1	4,76	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
0,1	4,76	Sem revestimento	Ar
1	0,8	Sem revestimento	Ar
0,1	4,76	Sem revestimento	Solo
1	4,76	Sem revestimento	Ar
0,5	0,8	Sem revestimento	Solo
0,5	0,8	Sem revestimento	Ar
1	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
0,1	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
0,1	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
0,5	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Solo
0,1	0,8	Sem revestimento	Solo
0,1	0,8	Epóxi alcatrão de hulha	Ar
0,1	4,76	Sem revestimento	Ar

Ao final dos ensaios, as amostras foram caracterizadas quanto à área fundida superficial, a profundidade da região fundida, a dureza e o teor de carbono da região fundida.

Área superficial fundida

A área fundida foi obtida através da aquisição de imagens da superfície do corpo de prova em que foi aplicada a descarga, com auxílio de um Microscópio tipo Confocal marca Carl Zeiss modelo Axio CSM 700. Foi considerada área fundida a área superficial atingida pela descarga elétrica que apresentava fusão do metal.

Profundidade da região fundida

Para obter a profundidade da região fundida, foi retirado um corpo de prova da chapa ensaiada, o qual foi seccionado em sua seção transversal a partir de um ponto anterior ao centro da área fundida. A seguir, foi realizada uma sequência de desbastes finíssimos, até que fosse detectada uma diminuição no valor da profundidade da região fundida. Neste ponto, a preparação metalográfica era finalizada e a profundidade da região fundida era medida, com auxílio de um Microscópio tipo Confocal marca Carl Zeiss modelo Axio CSM 700.

Dureza da região fundida

A medida de dureza da região fundida foi realizada na seção transversal do corpo de prova previamente embutido. Foram realizadas medidas a partir da matriz metálica não afetada pela descarga elétrica até o final da região fundida, sendo obtido, desta forma, um perfil de dureza do material em sua seção transversal. Posteriormente, na análise de resultados, considerou-se o maior valor de dureza obtido para cada ensaio realizado. Para a realização das medidas de dureza, utilizou-se um Microdurômetro digital Buehler modelo Micromet 6030, com aplicação de carga de 100 g durante 10 s.

Teor de carbono da região fundida

As análises para determinação do teor de carbono foram feitas ao lado dos pontos onde foram realizadas, previamente, as medidas de dureza. Assim, de forma similar, foi obtido um perfil de teor de carbono desde a matriz metálica não afetada pela descarga elétrica até o final da região fundida e, tal como na avaliação da dureza máxima, a análise dos resultados considerou o teor máximo de carbono encontrado em cada ensaio realizado. Vale lembrar que os teores de carbono obtidos foram normalizados, de forma que o teor de carbono na matriz fosse o mesmo encontrado na análise química realizada na chapa (0,09 %). Para a determinação do teor de carbono, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/FEG) marca FEI modelo QUANTA 400.

A Figura 4 apresenta o aspecto visual de uma das regiões ensaiadas, sendo possível observar como foi determinada a altura da região fundida e os perfis de dureza e teor de carbono, a partir do substrato.

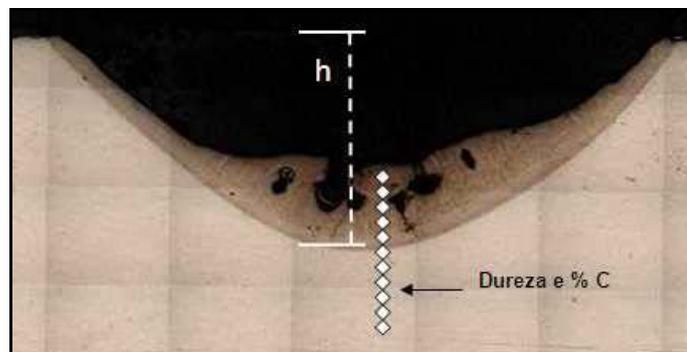


Figura 4 – Aspecto da seção transversal de uma região de ensaio realizado. Observa-se a profundidade da região fundida (h) e os pontos, da matriz ao final da região fundida, onde foi determinada a dureza e o teor de carbono.

Resultados

Os ensaios realizados nas chapas com descargas com corrente de 400 A permitiram constatar, antes mesmo que qualquer tipo de caracterização fosse realizado, que este valor de corrente aplicado determinou a perfuração de todas as chapas finas (0,8 mm), o mesmo não ocorrendo com as chapas grossas (4,76 mm), que não apresentaram perfuração. Tal fato pode ser observado na Figura 5, onde está apresentado o aspecto visual de chapas finas (0,8 mm) e grossas (4,76 mm), com e sem revestimento, ensaiadas ao ar, para um tempo de aplicação de corrente de 0,9 s. Nestas chapas, é possível observar a perfuração das chapas finas e as regiões fundidas das chapas grossas.

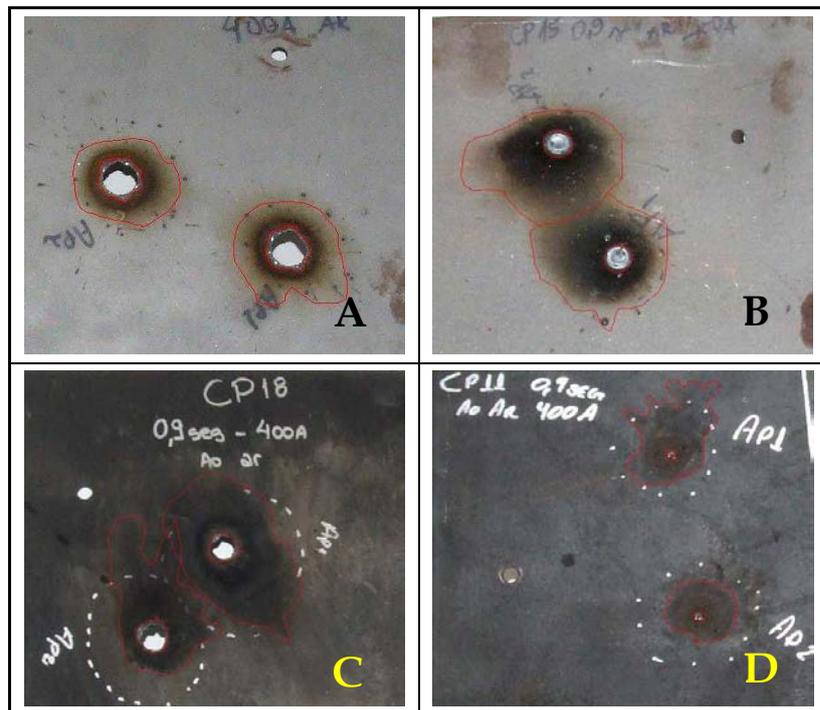


Figura 5 – Aspecto visual de chapas finas e grossas, revestidas e não revestidas, após aplicação de corrente de 400 A por 0,9 s, tendo como meio o ar. A = chapa fina sem revestimento; B = chapa grossa sem revestimento; C = chapa fina com revestimento e D = chapa grossa com revestimento.

Como as chapas finas furaram, não foi possível determinar a profundidade da região fundida, traçar o perfil de dureza ou o perfil de teor de carbono, sendo determinadas apenas as áreas fundidas superficiais. Desta forma, neste trabalho serão apresentados os resultados de área fundida para todos os corpos de prova ensaiados, mas os resultados de profundidade da região fundida, do perfil de dureza e do teor de carbono são apresentados apenas para as chapas grossas (4,76 mm), que não furaram.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para a determinação das áreas superficiais em chapas finas e em chapas grossas, respectivamente.

Tabela 3 – Áreas fundidas para ensaios com corrente de 400 A em chapas finas.

Tempo de aplicação de corrente (s)	Presença de revestimento	Meio	Perfuração da chapa	Área Fundida (mm ²)
0,1	Não	Ar	Sim	91
0,5	Não	Ar	Sim	345
0,9	Não	Ar	Sim	466
0,1	Não	Solo	Sim	75
0,5	Não	Solo	Sim	161
0,9	Não	Solo	Sim	447
0,1	Sim	Ar	Sim	24
0,5	Sim	Ar	Sim	224
0,9	Sim	Ar	Sim	307
0,1	Sim	Solo	Sim	22
0,5	Sim	Solo	Sim	122
0,9	Sim	Solo	Sim	259

Tabela 4 – Áreas fundidas para ensaios com corrente de 400 A em chapas grossas.

Tempo de aplicação de corrente (s)	Presença de revestimento	Meio	Perfuração da chapa	Área Fundida Média (mm ²)
0,1	Não	Ar	Não	68
0,5	Não	Ar	Não	88
0,9	Não	Ar	Não	246
0,1	Não	Solo	Não	53
0,5	Não	Solo	Não	131
0,9	Não	Solo	Não	158
0,1	Sim	Ar	Não	6
0,5	Sim	Ar	Não	25
0,9	Sim	Ar	Não	35
0,1	Sim	Solo	Não	26
0,5	Sim	Solo	Não	43
0,9	Sim	Solo	Não	126

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, foi possível verificar que:

- as chapas sem revestimento apresentaram as maiores áreas fundidas (seja em ensaios com solo, seja em ensaios ao ar);
- a área fundida aumentou com o aumento do tempo, em todas as situações;
- as chapas finas apresentaram maiores áreas fundidas que as chapas grossas;
- as chapas finas furaram (todas, para todos os tempos);
- as chapas grossas não furaram (nenhuma).

Analisando os resultados em relação aos ensaios realizados ao ar e no solo, foi possível verificar que:

- as chapas finas, tanto as revestidas quanto as não revestidas, apresentam maior área fundida quando ensaiadas ao ar do que quando ensaiadas no solo;
- as chapas grossas não revestidas apresentam maior área fundida quando ensaiadas ao ar do que quando ensaiadas no solo (com uma exceção). Já as chapas grossas revestidas apresentam menor área fundida quando ensaiadas ao ar do que quando ensaiadas ao solo, ocorrendo assim uma inversão no comportamento.

A Tabela 5 apresenta os resultados da profundidade máxima obtida, entre medidas realizadas da matriz até o final da região fundida. É importante lembrar que estão sendo apresentados apenas os resultados para as chapas grossas (4,76 mm), pois, como as chapas finas (0,8 mm) furaram, não é possível estabelecer qual foi a profundidade atingida pela fusão do material, uma vez que é maior que a espessura total da chapa.

Tabela 5 – Profundidade da região fundida para ensaios com corrente de 400 A em chapas grossas.

Tempo de aplicação de corrente (s)*	Presença de revestimento	Meio	Profundidade Fundida (mm)
0,1	Não	Ar	0,16
0,9	Não	Ar	1,62
0,1	Não	Solo	0,80
0,5	Não	Solo	2,86
0,9	Não	Solo	3,72
0,1	Sim	Ar	1,42
0,5	Sim	Ar	1,77
0,9	Sim	Ar	2,04
0,1	Sim	Solo	1,28
0,5	Sim	Solo	1,81
0,9	Sim	Solo	2,15

* o ensaio com aplicação de corrente por 0,5 s, sem revestimento, ao ar, não foi realizado.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5, foi possível observar que a profundidade da região fundida aumenta com o aumento do tempo. Avaliando os resultados em relação a chapas com e sem revestimento, foi possível observar que, nos ensaios ao ar, as maiores profundidades de região fundida foram obtidas para as chapas com revestimento. Já para os ensaios no solo, as maiores profundidades de região fundida foram observadas nas chapas sem revestimento, com exceção do ensaio realizado com baixo tempo de aplicação de corrente (0,1 s).

A Tabela 6 apresenta os resultados de dureza máxima e teor máximo de carbono para cada um dos corpos de prova ensaiados. Embora as medidas de dureza e de teor de carbono tenham sido realizadas da matriz até o final da região fundida para cada um dos corpos de prova, foi necessário adotar um critério para analisar a grande quantidade de dados obtidos. Desta forma, optou-se por utilizar, para cada corpo de prova ensaiado, os valores máximos de dureza e teor de carbono obtidos. A Figura 6 apresenta o aspecto de um dos corpos de prova ensaiados, com os valores de dureza e de teor de carbono obtidos da matriz ao substrato. A Figura 7 apresenta o aspecto visual das seções metalográficas dos corpos de prova ensaiados, com os respectivos valores de dureza máxima e teor máximo de carbono da região fundida.

Observando a Figura 6, verifica-se que nitidamente há um aumento da dureza do material e um aumento do teor de carbono na região fundida em relação à matriz. Este comportamento foi observado em todas as amostras, revestidas ou não, ensaiadas ao ar ou na presença de solo.

Tabela 6 – Valores de dureza máxima e de teor máximo de carbono obtidos nos ensaios realizados com corrente de 400 A em chapas grossas.

Tempo de aplicação de corrente (s)*	Presença de revestimento	Meio	Dureza (HV)	Teor máximo de carbono (%)
0,1	Não	Ar	488	0,31
0,9	Não	Ar	417	0,27
0,1	Não	Solo	427	0,67
0,5	Não	Solo	210	0,29
0,9	Não	Solo	215	0,22
0,1	Sim	Ar	471	0,48
0,5	Sim	Ar	478	0,21
0,9	Sim	Ar	323	0,36
0,1	Sim	Solo	486	0,42
0,5	Sim	Solo	448	0,28
0,9	Sim	Solo	286	0,25

* o ensaio com aplicação de corrente por 0,5 s, sem revestimento, ao ar, não foi realizado.

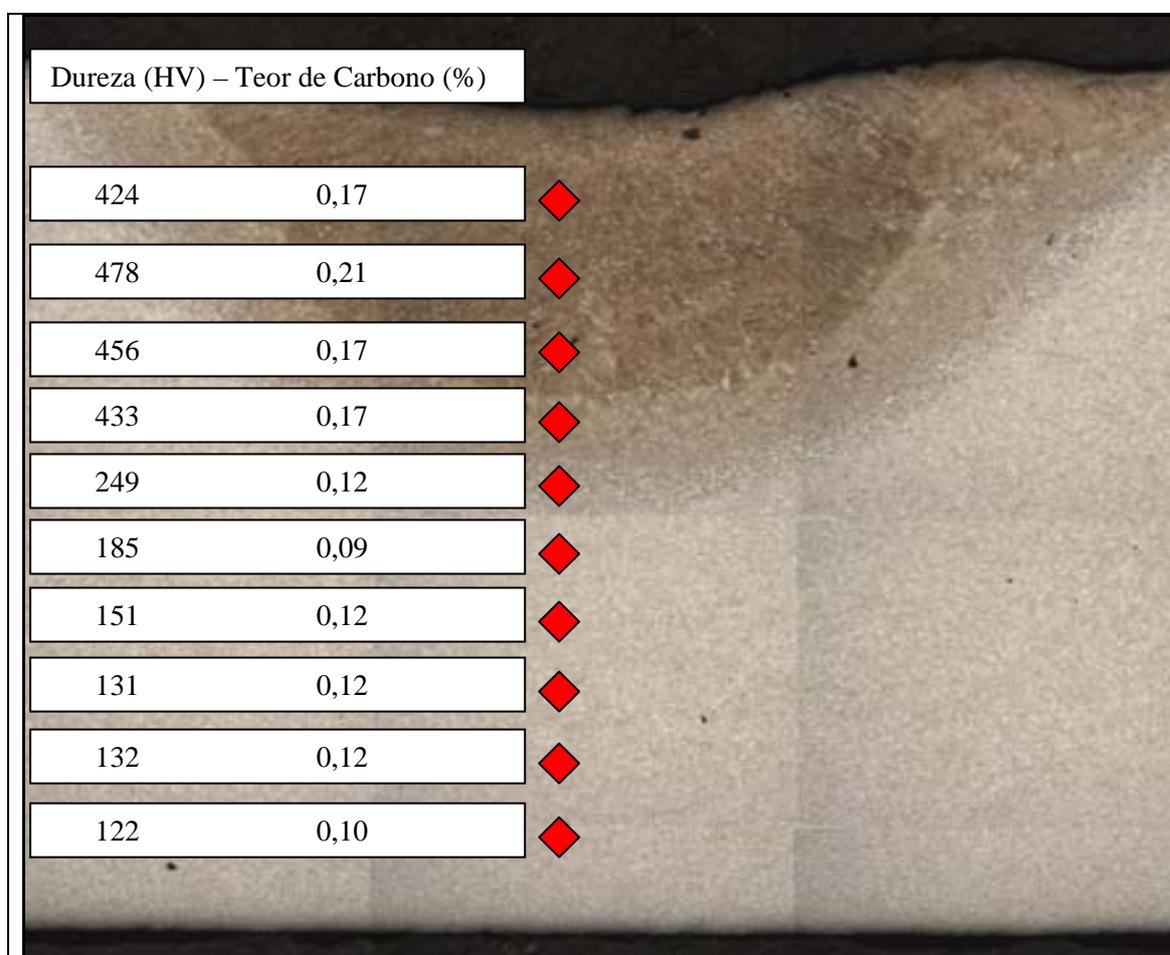


Figura 6 – Aspecto visual da seção metalográfica da região fundida de um dos corpos de prova ensaiados (corrente de 400 A, tempo de aplicação de corrente de 0,5 s, com revestimento, ao ar). Observa-se a variação dos valores de dureza e de teor de carbono na região fundida.

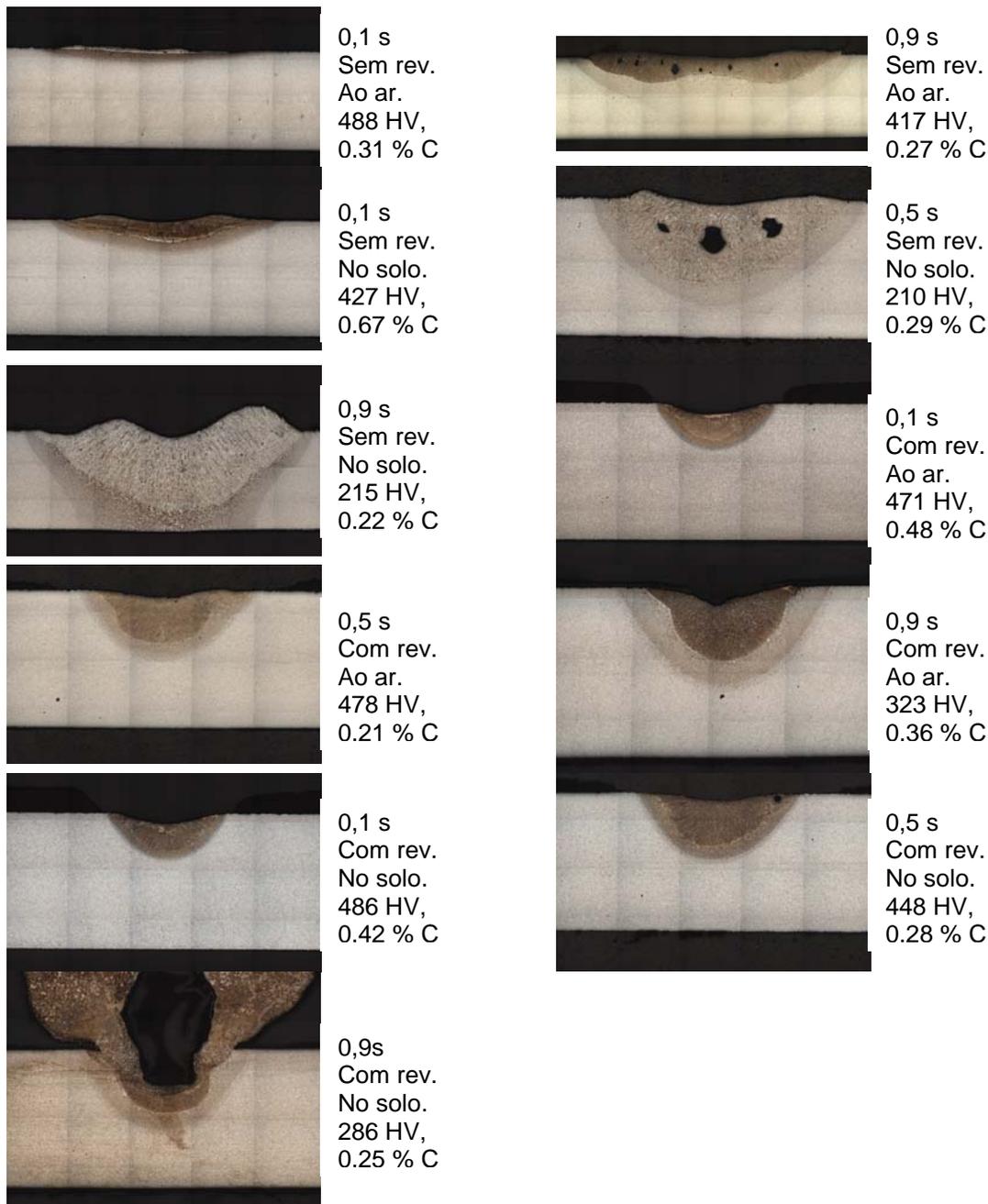


Figura 7 – aspecto visual das seções metalográficas dos corpos de prova ensaiados, com os respectivos valores dureza máxima e teor máximo de carbono da região fundida.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, foi possível observar que a dureza máxima diminui com o aumento do tempo de aplicação de corrente. Em relação a ensaios ao ar e no solo, os maiores valores de dureza obtidos para os ensaios realizados ao ar. Comparando, por fim, os resultados de amostras com e sem revestimento, no solo as chapas com revestimento apresentaram maior valor de dureza, já nos ensaios realizados ao ar não foi possível estabelecer uma tendência. Em relação aos resultados apresentados na Tabela 7, foi possível observar que o máximo teor de carbono parece diminuir com o aumento do tempo de aplicação de corrente (com uma exceção). Já ao comparar ensaios

realizados ao ar e no solo e nas amostras com e sem revestimento, não foi possível estabelecer uma tendência.

Discussão

Analisando os resultados referentes às áreas fundidas obtidas, nas diferentes condições de ensaio, ficou claro que a presença de revestimento determinou a diminuição da área superficial fundida, uma vez que as chapas sem revestimento apresentaram os maiores valores de área fundida, seja em ensaios no solo, seja em ensaios ao ar. Desta forma, é possível que parte da energia da descarga elétrica seja absorvida pelo revestimento, ou, ainda, que a presença de revestimento direcione a energia da descarga para o interior da chapa.

Em relação a tempo de aplicação da corrente, foi constatado que a área fundida aumentou com o aumento do tempo de aplicação de corrente. Isto foi observado para todas as chapas, independentemente do meio (ar ou solo), da espessura da chapa ou de haver ou não revestimento presente, e pode ser explicado pelo fato que, para uma mesma corrente, aumentando-se o tempo de aplicação aumenta-se o valor da carga aplicada, e conseqüentemente da energia térmica produzida.

Outro ponto importante observado foi que as chapas finas apresentaram maiores áreas fundidas do que as chapas grossas, indicando que a espessura da chapa influi na forma como a descarga afeta a região fundida. Isto pode ser observado também pela constatação de que nenhuma chapa grossa furou, enquanto que todas as chapas finas furaram.

Comparando, por fim, os ensaios realizados ao ar e no solo, verifica-se que todas as chapas finas apresentaram maiores áreas fundidas nos ensaios realizados ao ar do que nos ensaios realizados no solo, o mesmo ocorrendo com as chapas grossas sem revestimento. No entanto, as chapas grossas revestidas apresentaram maiores áreas fundidas no solo, o que é um ponto a ser investigado.

Analisando agora os resultados de profundidade da região fundida, constatou-se que esta aumenta com o aumento do tempo de aplicação da descarga elétrica, o que é coerente com o resultado obtido para a análise da área fundida e, tal como neste caso, o aumento da profundidade fundida pode ser associado com o aumento no valor da energia aplicada na chapa. Avaliando os resultados em relação a chapas com e sem revestimento, verificou-se que, nos ensaios ao ar, as maiores profundidades de região fundida foram obtidas para as chapas com revestimento, indicando que o revestimento pode, realmente, estar direcionando a energia da descarga elétrica. Já para os ensaios no solo, as maiores profundidades de região fundida foram observadas nas chapas sem revestimento (com exceção do ensaio realizado com baixo tempo de aplicação de corrente). Desta forma, a presença de solo como meio de ensaio parece estar modificando o comportamento da descarga aplicada. Como já citado anteriormente, a maneira como o solo foi colocado para a realização do ensaio, em um primeiro momento, não foi muito cuidadosa, o que pode ter influenciado no resultado obtido. Para os ensaios seguintes, foi estabelecido um procedimento mais rigoroso, de modo a minimizar a influencia de variações no procedimento de colocação do solo no resultado obtido.

A análise da dureza máxima da região fundida, nos ensaios realizados, permitiu constatar que seu valor diminui para com o aumento do tempo de aplicação de corrente. É possível que o aumento dos tempos de aplicação de corrente (e, conseqüentemente, aumento das cargas aplicadas) determine um aumento na massa de metal fundido, o que exigiria um maior tempo de resfriamento para que o metal volte a solidificar. Assim, o aumento no tempo de resfriamento permitiria a formação de regiões com menor dureza em relação àsquelas formadas com baixo tempo de aplicação de corrente. Desta forma, um resfriamento mais lento, no centro do metal fundido, poderia determinar uma diminuição na dureza alcançada.

De forma análoga ao observado nos ensaios para determinação da dureza, também os ensaios para determinação do teor de carbono, na região fundida, mostraram que o teor máximo de carbono na região fundida diminui com o aumento do tempo de aplicação de corrente.

Outro ponto chama a atenção nos resultados apresentados: os valores de dureza e de teor de carbono obtidos. Conforme pôde ser observado na Tabela 7, foram obtidos altos valores de dureza máxima e de teor de carbono máximo. Considerando que a chapa de aço-carbono ensaiada possui um teor de carbono de 0,09 %, que o eletrodo de aço-carbono possui um teor de carbono de 0,2 % C e que a dureza média da matriz varia de 150 HV a 200 HV, muitos dos valores de dureza e de teor de carbono apresentados na Tabela 7 estão muito acima do esperado para este tipo de material. Desta forma, a aplicação da descarga elétrica parece ter introduzido carbono no metal, aumentando conseqüentemente a dureza da região fundida para valores acima do que pode ser esperado para este tipo de aço, mesmo com tratamento térmico.

Conclusões

Os ensaios realizados permitiram constatar que as descargas elétricas aplicadas foram capazes de fundir a região ensaiada, em maior ou menor grau, dependendo principalmente do tempo de aplicação de corrente. Como resultado, foi observado, na região fundida, um aumento na dureza e no teor de carbono inesperado, sendo obtidos valores muito acima dos esperados para o tipo de aço-carbono ensaiado.

Analisando a influência de cada uma das variáveis nos resultados obtidos (área superficial fundida, profundidade da região fundida, dureza máxima e teor de carbono máximo), foi possível constatar que:

- as chapas sem revestimento apresentaram os maiores valores de área fundida, seja em ensaios no solo, seja em ensaios ao ar. Também foi constatado que a área fundida aumentou com o aumento do tempo de aplicação de corrente, para todas as condições de ensaio. Por fim, verificou-se que as chapas finas apresentaram maiores áreas fundidas que as chapas grossas, indicando que a espessura da chapa influi na forma como a descarga afeta a região fundida;
- a profundidade da região fundida aumenta com o aumento do tempo de aplicação da descarga elétrica e que, para ensaios realizados ao ar, as maiores profundidades de região fundida foram obtidas para as chapas com revestimento, ao passo que, nos

ensaios realizados no solo, as maiores profundidades de região fundida foram observadas nas chapas sem revestimento;

- em relação aos valores máximos de dureza e de teor de carbono na região fundida, foi verificado que ambos diminuem com o aumento do tempo de aplicação de corrente.

Referências bibliográficas

- (1) PINTO Jr., OSMAR; NACCARATO, Kleber Pinheiro. Relatório técnico sobre descargas atmosféricas elaborado para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). jan. 2011, 39p. (confidencial)
- (2) NACCARATO, K. P. Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades. São José dos Campos. 165p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto de Pesquisas Espaciais, 2001
- (3) BARANOV, M. I. et al. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. Instruments and Experimental Techniques, 2008, v. 51, n. 3, p. 401–405.
- (4) CLIFFORD, D.W.; CROUCH, K.E.; SCHULTE, E. H. Lightning Simulation and Testing. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. EMC-24, 1982. p. 209-224.
- (5) LIBRANTZ, H.; LIBRANTZ, A. F. H. **Descargas Eléctricas Atmosféricas e Suas Interações com Aeronaves**. Exacta, São Paulo, v. 4, n. 2, 2006. p. 247-258.
- (6) IEC 62305-1:2010(E) Protection against lightning - Part 1: General principles. Dec., 2010.
- (7) C. WEBSTER, J. A. ZAWADZKI, T. STEFANSKI. **Powerline ground fault effects on pipelines**. Volume 239. Volume 817 (Canadian Electrical Association) . Powertech Labs Inc.