

REVISTA

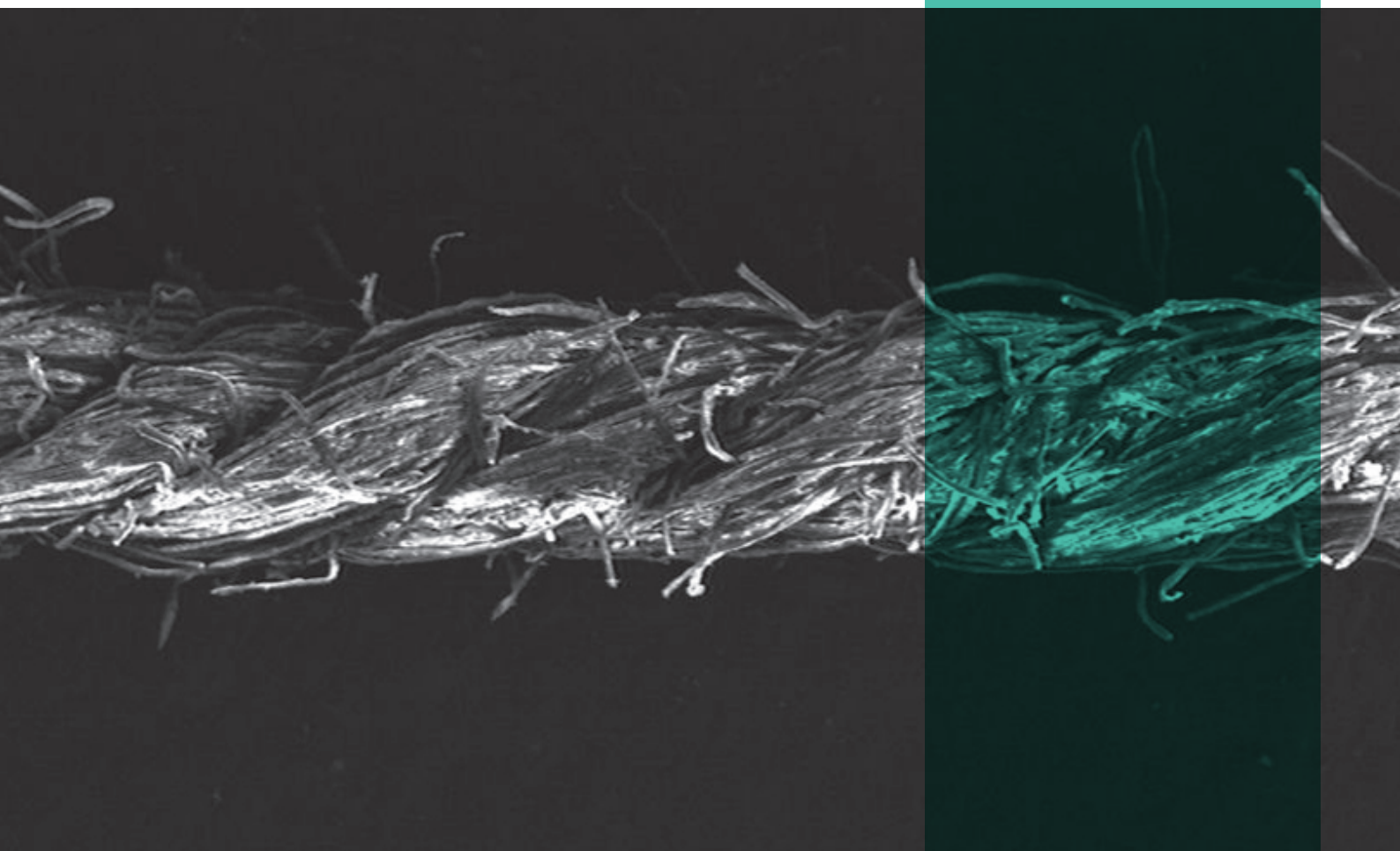
03

IPT

Tecnologia
e inovação

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Dezembro/2016



EMISSÕES

Experiência acumulada ajuda a indústria a reduzir as emissões de NOx

SUPERPLASTICIDADE

Estudo de processo de conformação superplástica em componentes de alumínio e titânio

ARMADURAS

Método de preparação de corpos de prova de corrosão da armadura em concreto armado

REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.1, n.3, dezembro, 2016

Quadrimestral

Conselho Editorial

Adriana Camargo de Brito
Adriana Garcia
Alex Fedozzi Vallone
Ana Carolina Carneiro
Claudia Echevengua Teixeira
Daniela Colevati Ferreira
Denis Bruno Virissimo
Eduardo Albertin
Gilder Nader
Kleber Lanigra Guimaraes
Mario Leite Pereira Filho
Marsis Cabral Junior

Conselho técnico administrativo

Edna Baptista dos S. Gubitoso
Maria Solange de Oliveira P. Fierro
Zehbour Panossian

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

ARTE E DIAGRAMAÇÃO:

Mariana Marchesi, Augusto Colin, Selma Yuriko Takesako

REVISÃO:

Edna Baptista dos S. Gubitoso

Maria Solange de Oliveira P. Fierro

Zehbour Panossian

A equipe da Revista IPT agradece aos avaliadores dos artigos publicados em 2016:

Ademar Hakuo Ushima, Alex Fedozzi Vallone, Carla Gioseffi, Caroline Almeida Souza, Claudia Echevengua Teixeira, Claudio Vicente Mitidieri Filho, Eduardo Albertin, Eduardo Brandau Quitete, Helena Cristina Manosso, Helena Lima de Araujo Gloria, Heloisa Burkhardt Antonoff, Marsis Cabral Junior, Ramon Valls Martin, Rayana Santiago de Queiroz, Shoko Ota, Takashi Yojo e Zehbour Panossian

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

#03

Revista IPT:
Tecnologia
e inovação

Artigos técnicos

p. 6

Emissão de óxidos de nitrogênio (NOX) na combustão industrial

p. 20

Ruptura de cabo condutor de alumínio devido ao atrito de linha de pipa com cerol

p. 31

Efeito do tempo de envelhecimento na resistência à corrosão de aço inoxidável duplex UNS S32205

p. 41

Definição e preparação de corpos de prova de concreto armado destinados a ensaios acelerados de corrosão de armaduras

p. 63

An analysis of superplastic forming to manufacture aluminum and titanium alloy components

p. 74

Estratégias para inovação em ensaios, medições e calibrações no IPT

Opinião

p. 81

Mas afinal, o que é inovação para o IPT?

SUMÁRIO

EDITORIAL



Fernando José Gomes Landgraf
Diretor presidente do IPT

É uma satisfação escrever o editorial da terceira edição de nossa revista. A prova de que a revista veio para ficar. Acompanho, aqui na sala em que trabalham os diretores do IPT, no Edifício Adriano Marchini, o esforço que a Dra. Zehbour faz para soltar a revista nos prazos.

Este é um dos motivos de orgulho pelas conquistas que os ipe-
teanos fizeram em 2016, ano que será de triste memória para a
economia brasileira. Nossa receita caiu quase 20%, tivemos que
entrar em redução de jornada com redução de salário, mas em
compensação inauguramos a maior máquina de tração do Brasil,
o Sistema de Ensaios para Elementos de Ancoragem, fomos agra-
ciados pelo CNPq com um INCT – Instituto Nacional de Ciência
e Tecnologia – focado em terras raras, firmamos um projeto de

Manufatura Aditiva de prótese ortopédica de liga de nióbio com a AACD e a CBMM, estamos condu-
zindo um projeto voltado a buscar soluções para a disposição e aproveitamento dos Resíduos Sólidos
Urbanos, o Laboratório de Estruturas Leves está conduzindo com sucesso um projeto de avaliação de
danos em estruturas de fibra de carbono, participamos da produção do primeiro ímã de terras raras
feito com neodímio brasileiro, começamos a apoiar a Raízen no aperfeiçoamento do sistema de pro-
dução de etanol de segunda geração, organizamos evento para discutir a globalização da construção
civil, discutimos os desafios tecnológicos do transporte público na Câmara Técnica, dentre outros.

Seguimos avançando no aumento do percentual de faturamento com inovação, apesar da queda do
valor total, e já publicamos 200 artigos neste ano. É pouco, para quem tem quase 400 pesquisado-
res. Temos que publicar mais, ninguém tem dúvida disso, mas este ano não foi fácil. Publicar exige
uma certa paz de espírito, e isso faltou, neste ano. Aproveitem o que apresentamos nesta edição da
revista, pois em abril tem mais.

Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) na combustão industrial

Nitrogen oxides emission (NO_x) in industrial combustion

Renato Vergnhanini Filho^{a*}

^a Laboratório de Engenharia Térmica, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: vergnhan@ipt.br

Resumo

Os óxidos de nitrogênio (NO e NO_2 - NO_x) são conhecidos poluentes atmosféricos (poluente primário e um dos responsáveis pela acidez das chuvas, redução da camada de ozônio e formação de oxidantes fotoquímicos - *smog*), sendo suas emissões por processos industriais de combustão (caldeiras, fornos, incineradores) regulamentadas no Brasil por legislações nacionais e estaduais. A formação do NO_x na combustão é devida a reações envolvendo, basicamente, oxigênio e nitrogênio do ar (formação do " NO_x térmico") ou oxigênio e nitrogênio do combustível (formação do " NO_x combustível") e pode ser reduzida atuando-se diretamente no processo, desde alterações operacionais (excesso de ar, potência dissipada, recirculação de gases de combustão) até modificações substanciais, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível. Essa última é muito efetiva e amplamente utilizada no exterior, porém a eficácia de sua aplicação para óleos combustíveis da natureza dos utilizados no Brasil (elevadas viscosidade e teor de nitrogênio) não era conhecida. Por essa razão, essa técnica foi objeto no passado de uma extensa investigação experimental conduzida pelo Laboratório de Engenharia Térmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Foram estudados sistemas de requeima (*reburning*) e queimadores de baixa emissão de NO_x (*Low NOX burner*). O conhecimento adquirido nesse trabalho e o que vem sendo acumulado ao longo do tempo têm sido utilizados no apoio ao setor industrial na redução de suas emissões de NO_x . A equipe do Laboratório de Engenharia Térmica tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel para levantamento das emissões de NO_x e demais variáveis do processo de combustão para, em seguida, recomendar e eventualmente implantar medidas que levem à redução das emissões.

Palavras-chave:

óxido de nitrogênio (NO_x), combustão industrial, poluição atmosférica.

Keywords:

nitrogen oxides (NO_x), industrial combustion, air pollution.

Abstract

Nitrogen oxides (NO and NO₂ - NO_x) are known air pollutants (pollutant primary and one responsible for the acidity of rain, depletion of the ozone layer and formation of photochemical oxidants - smog) and emissions from industrial combustion processes (boilers, furnaces, incinerators) regulated in Brazil by national and state laws. The formation of NO_x in combustion is due to reactions involving primarily oxygen and nitrogen from air (formation of "thermal NO_x") or oxygen and fuel nitrogen (formation of "fuel NO_x") and can be reduced by acting directly on the process from operating changes (excess air, power input, flue gas recirculation) until substantial modifications, such as staging in supplying air or fuel. The latter, being very effective and uncertain application for fuel oils used in Brazil (high viscosity and nitrogen content), were the subject in the past of an extensive experimental research conducted by the Thermal Engineering Laboratory of Institute for Technological Research of the State of São Paulo. Reburning systems and low NO_x burners were studied. The knowledge gained in this work and that has been accumulated over time has been used to aid the industry in reducing their NO_x emissions. The Thermal Engineering Laboratory team has gone regularly to industries with its mobile unit for survey of NO_x emissions and other variables of the combustion process to then recommend and eventually implement measures to take to reduce emissions.

1 Introdução

A poluição atmosférica é a principal preocupação ambiental relacionada à queima de combustíveis, devido à emissão de efluentes gasosos, embora outras formas de poluição possam também estar presentes. Nos gases efluentes de processos industriais de combustão, encontram-se vários constituintes poluentes, sendo os óxidos de nitrogênio (NO e NO₂ - NO_x), o material particulado (MP) e os compostos de enxofre (SO_x), os mais preocupantes. Outros como o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (VOC) são constituintes que, em equipamentos operando em condições normais, são emitidos a taxas muito pequenas, não causando qualquer dano ambiental. Outros, ainda, como alcatrões, acroleína, dioxinas e furanos, compostos reduzidos de enxofre (*TRS - total reduced sulphur*), metais pesados etc. são menos comuns, sendo específicos de determinados processos ou combustíveis (CARVALHO JUNIOR; LACAVA, 2003).

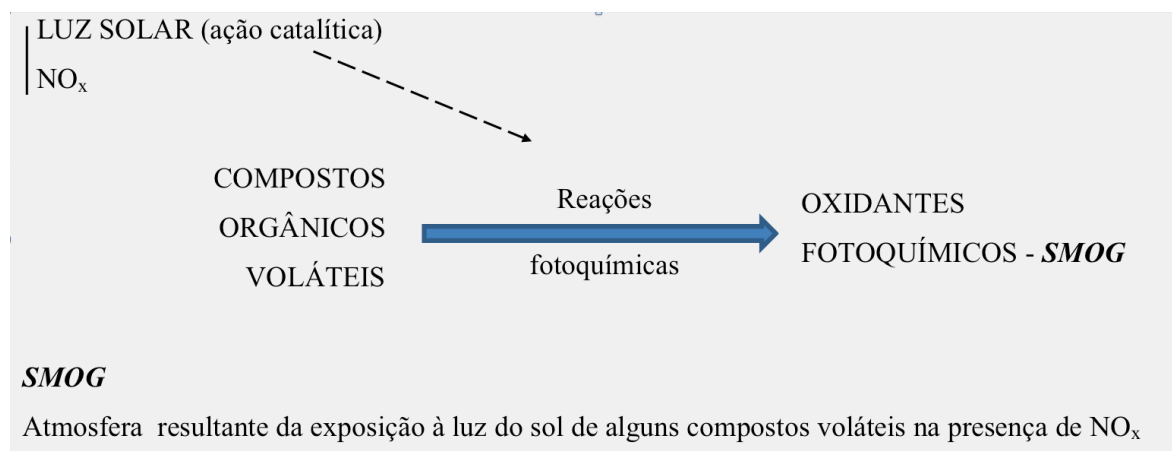
A emissão de NO_x em processos de combustão tem sido, nos últimos anos, objeto de pesquisas científicas em todo o mundo. Os estudos visavam inicialmente a identificação dos processos de formação e as relações com parâmetros termodinâmicos da chama. Posteriormente, as pesquisas se voltaram para o desenvolvimento de técnicas de abatimento e controle. O mote dessas pesquisas tem sido a fixação pelos órgãos ambientais de padrões de emissão de NO_x cada vez mais restritivos.

Dentro desse contexto, o Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) tem realizado trabalhos envolvendo o NO_x, que vão desde medições em unidades industriais acompanhadas de implantações e recomendações de medidas mitigadoras até projetos de P&D.

2 Óxidos de nitrogênio na atmosfera

Os óxidos de nitrogênio são poluentes primários - no homem, por exemplo, ataca as vias respiratórias. O NO_x participa na atmosfera de complexas reações fotoquímicas, alternando-se nos diferentes estágios de oxidação, contribuindo para o acréscimo na atmosfera de poluentes secundários, como os oxidantes fotoquímicos - ozônio, peróxidos, formaldeído etc. (SCHNEIDER; GRANT, 1982) (**Quadro 1**). O NO_x também está associado à chuva ácida (formação do ácido nítrico) e, na estratosfera, ao ataque à camada de ozônio.

Quadro 1 – Formação dos oxidantes fotoquímicos



Nos principais centros urbanos do país, vêm sendo registradas concentrações elevadas de NO_x e ozônio (O_3), às vezes superiores aos padrões de qualidade do ar. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), por exemplo, no ano de 2015 o padrão estadual de 8 h para o O_3 ($140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi ultrapassado em 36 dias e o padrão nacional de 1 h ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi excedido em 80 dias, considerando todas as estações que medem esse poluente. Já para o NO_x , não houve ultrapassagem do padrão horário ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e nem do anual ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) em nenhuma das estações da RMSP. A estimativa é que o NO_x emitido na RMSP provenha 32 % de fontes fixas (indústrias) e o restante de fontes móveis (veiculares), principalmente de veículos a diesel (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016).

3 Legislação ambiental

O NO_x tem sua emissão pela indústria regulamentada na grande maioria dos países. Os Estados Unidos, por exemplo, têm uma legislação bastante completa e abrangente (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999).

A legislação brasileira é mais recente e não engloba a totalidade dos combustíveis e processos. As

fontes fixas de combustão que entraram em operação a partir de 02.01.2007 devem obedecer a resolução CONAMA no 382 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006) enquanto que para as "antigas" (anteriores a 02.01.2007) vale a CONAMA no 436 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011). Por exemplo, para um equipamento industrial novo e no qual não há contato direto dos produtos da combustão com o material ou produto processado (caldeiras e fornos petroquímicos, por exemplo) são fixados limites máximos de emissão (padrões de emissão) em função do seu porte e do combustível utilizado (Tabela 1).

Tabela 1 – Padrões de emissão de NO_x.

Potência térmica nominal (MW)*	NO _x , como NO ₂ (mg/Nm ³ , base seca)**
Óleo combustível	
Menor que 10	1600
Entre 10 e 70	1000
Maior que 70	1000
Gás natural	
Menor que 70	320
Maior ou igual a 70	200
Bagaço de cana-de-açúcar	
Menor que 10	Não aplicável
Entre 10 e 75	350
Maior que 75	350
Derivados da madeira	
Menor que 10	Não aplicável
Entre 10 e 30	650
Entre 30 e 70	650
Maior que 70	650

* Obtida pela multiplicação da quantidade de combustível queimado por unidade de tempo (vazão) pelo poder calorífico inferior (PCI) do combustível.

** Óleo e gás natural, referido a 3,0 % de O₂; bagaço de cana e derivados de madeira, referido a 8,0 % de O₂.

No Brasil, há estados que impõem padrões de emissão mais restritivos, considerando a localização da fonte ou a qualidade do ar no seu entorno. Outros preferem não estabelecer padrões estaduais, mais exigem que seja implantada a "melhor tecnologia de controle disponível" (BACT - *Best Available Control Technology*).

4 Formação de NO_x em equipamentos de combustão industrial

Os óxidos de nitrogênio formados em equipamentos estacionários de combustão são, basicamente, o NO (óxido nítrico) e, em escala bem menor, o NO₂ (dióxido de nitrogênio); a Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) considera que, em processos convencionais de combustão, o NO₂ responde por menos de 5 % do total do NO_x formado (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997). Em equipamentos muito particulares, outros óxidos podem estar presentes como, por exemplo, o N₂O (óxido nitroso), formado na combustão em leito fluidizado.

O NO_x pode se formar na combustão via três mecanismos: térmico (*thermal*), combustível (*fuel*) e imediato (*prompt*), recebendo a denominação "NO_x térmico", "NO_x combustível" e "NO_x imediato", respectivamente (MOLERO, 1998).

4.1 NO_x térmico

O NO_x se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do ar com oxigênio. Entre os parâmetros operacionais do processo, a temperatura é a que tem maior influência na sua formação. O NO_x é formado principalmente em regiões da câmara de combustão onde as temperaturas são superiores a aproximadamente 1370 °C (Figura 1).

4.2 NO_x combustível

O NO_x se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do combustível com oxigênio. As maiores taxas de formação de NO_x são encontradas em regiões da câmara de combustão onde o teor de oxigênio é elevado. A queima de combustíveis com maior teor de nitrogênio tende a formar mais NO_x (Figura 1).

4.3 NO_x imediato

O NO_x se forma pela reação do nitrogênio do ar com radicais hidrocarbônicos (CH₂, CH) formados no processo de combustão. Em processos convencionais que operam com quantidade de ar acima da estequiométrica, a formação de NO_x imediato não é significativa.

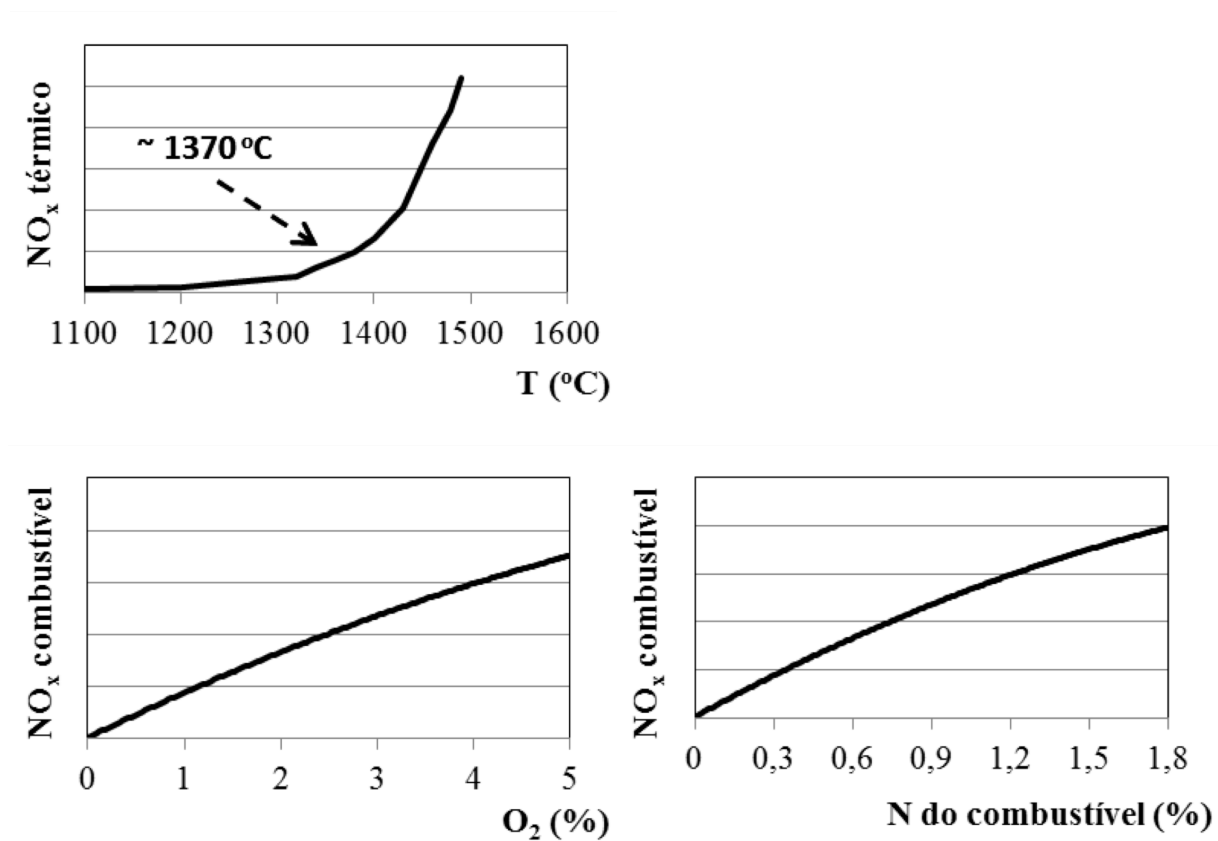


Figura 1 - Influência de parâmetros na formação de NO_x

5 Técnicas de controle das emissões de NO_x

As técnicas de controle das emissões de NO_x em processos de combustão industrial se dividem em dois grupos: as aplicadas ao processo e as aplicadas aos gases de combustão. As primeiras costumam ser economicamente mais atraentes (BOZZUTO; MORIARTY, 1994).

A formação de NO_x no processo pode ser reduzida, basicamente, por: (i) redução dos teores de oxigênio ou nitrogênio nas regiões da câmara de combustão de alta temperatura, ou redução do tempo de residência desses elementos nessas regiões e (ii) redução das temperaturas na câmara de combustão. Isso pode ser feito de várias formas, que vão desde alterações nas variáveis operacionais do processo de combustão, como redução do excesso de ar, redução da potência de operação, recirculação externa dos gases de combustão etc. até modificações substanciais no processo, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível. Essa última é muito efetiva, podendo reduzir as emissões de NO_x em até 70 % e são largamente empregadas em equipamentos de combustão instalados na Europa e Estados Unidos. A tecnologia de estagiamento é ilustrada nos desenhos da

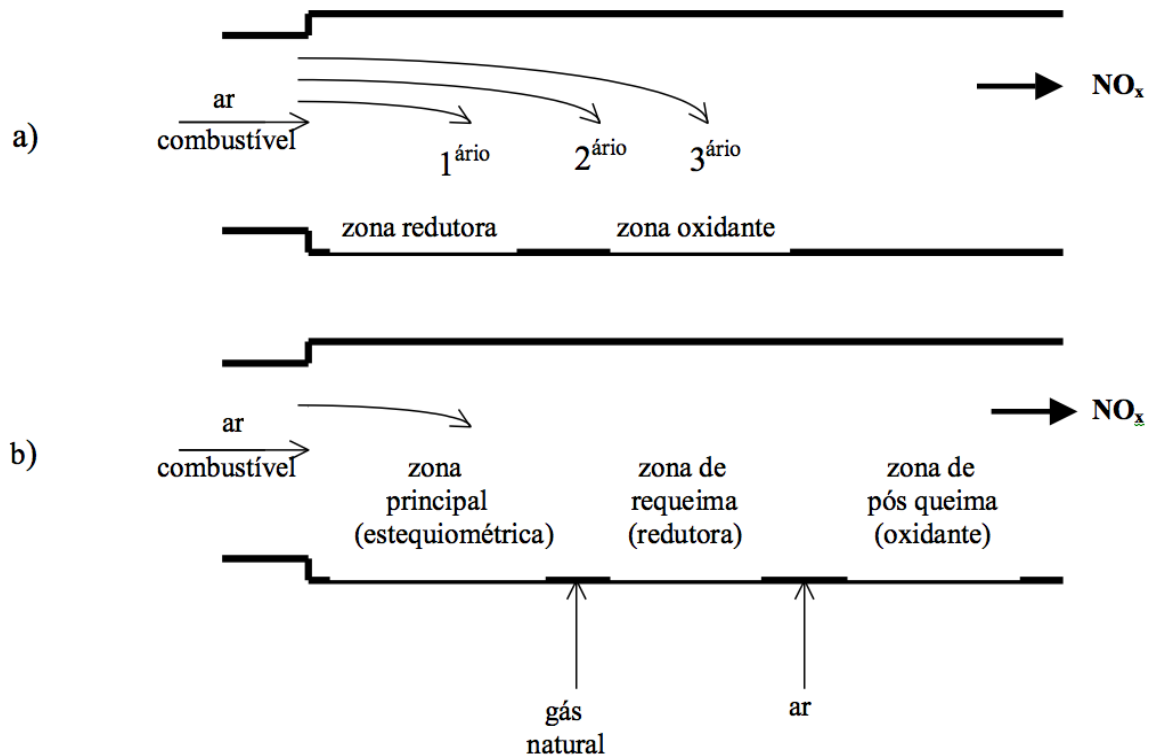


Figura 2 - Estagiamento no fornecimento de ar (a) e de combustível (b).

5.1 Estagiamento do ar de combustão

O estagiamento do ar de combustão é feito, em geral, por meio da substituição, ou modificação, do queimador convencional por outro especialmente projetado para o fornecimento de ar primário, secundário e, às vezes, terciário ao processo, de forma a se obter chamas constituídas de regiões com diferentes estequiometrias. Numa primeira região, próxima ao bocal do queimador, uma condição redutora permitirá que boa parte do nitrogênio presente no combustível seja convertida preferencialmente a nitrogênio molecular, e não a NO_x . Nas demais regiões, o aporte controlado de ar permitirá a oxidação completa dos demais elementos do combustível. Essa técnica visa, além da redução do NO_x formado devido à presença de nitrogênio no combustível (NO_x combustível), a diminuição da fração do nitrogênio do ar que se converte a NO_x (NO_x térmico), pois leva a temperaturas menores e mais uniformes ao longo da chama. Tais queimadores são os chamados *Low NO_x burners*.

5.2 Estagiamento do combustível

O estagiamento do combustível é feito, em geral, por meio do fornecimento de pequena parte do combustível numa região à frente da zona principal de combustão. Tal artifício visa basicamente

reduzir a emissão de NO_x pela sua conversão a nitrogênio molecular quando da sua passagem pela região onde a parcela minoritária de combustível é injetada. A imposição a essa região de uma condição redutora favorecerá as reações do NO_x presente com radicais hidrocarbônicos do combustível, resultando em sua conversão a nitrogênio molecular. A aplicação dessa técnica, conhecida como requeima (*reburning*), exige ainda o fornecimento de ar suplementar ao processo, ao final da câmara de combustão, objetivando a oxidação completa do combustível. Independente do combustível utilizado na zona principal, gás natural é o combustível comumente injetado à frente da zona principal.

6 Atuação do IPT

6.1 Investigação da emissão de NO_x em chamas oxicomustíveis

Um dos primeiros trabalhos realizados pelo IPT envolvendo a emissão de NO_x foi financiado pela empresa White Martins e constou de um conjunto de experimentos na fornalha de testes do LET operando com óleo combustível e oxigênio puro como comburente. Foram estudadas as influências de parâmetros construtivos e operacionais de queimadores oxicomustíveis nas taxas de formação de NO_x , que tendem a ser elevadas em razão das elevadas temperaturas e teores de oxigênio reinantes na câmara de combustão.

O trabalho, apresentado num encontro nacional de ciências térmicas, mostrou que a posição relativa dos jatos de oxigênio e do *spray* central de combustível, a natureza do fluido de nebulização, a relação mássica fluido de nebulização/combustível, a estequiometria global do processo e a taxa volumétrica de combustão influem fortemente nas taxas de emissão de NO_x (SOUSA; MESSIAS; VERGNHANINI FILHO; KOBAYASHI, 1994).

6.2 Desenvolvimento de técnicas de redução de NO_x aplicadas à queima de óleo combustível

O trabalho de P&D mais relevante realizado pelo IPT no tema foi financiado pela Petrobras e envolveu a redução na emissão de NO_x na queima de óleo combustível. O objetivo do trabalho foi verificar se as técnicas de estagiamento que vinham sendo empregadas em equipamentos de combustão instalados em países industrializados poderiam ser aplicadas aos óleos combustíveis nacionais, que têm tipicamente viscosidade e teor de nitrogênio muito elevados (GARCIA, 2013; LAGEMANN, 2016).

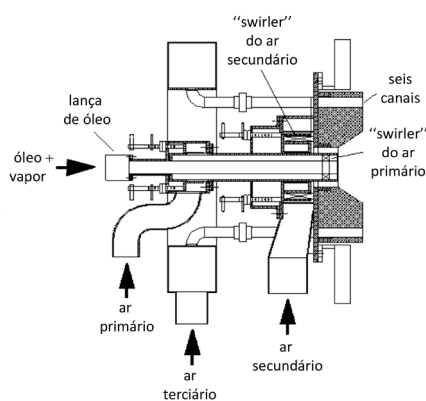
O trabalho envolveu o projeto, construção e ensaio na fornalha de testes do IPT de sistemas de injeção de gás natural e ar suplementar - requeima (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1996) (**Figura 3**) e de queimador de baixa emissão de NO_x (BEÉR, 1995) (**Figura 4**). Envolveu, também, a construção de um modelo cinético de predição da eficiência da requeima quanto à redução das emissões de NO_x (KILPINEN; GLARBORG; HUPA, 1992).

óleo combustível
ar principal
vapor de nebulização



gás natural
ar suplementar

Figura 3 - Fornalha de testes do IPT com sistema de requeima instalado.



ar terciário
ar secundário
ar primário
óleo combustível
vapor de nebulização

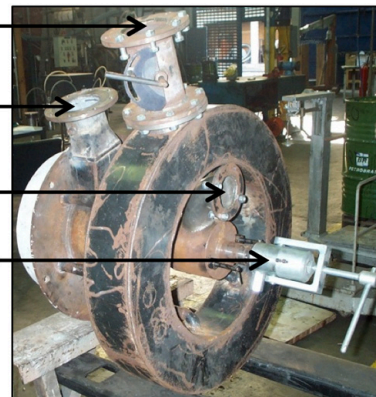


Figura 4 - Queimador de baixa emissão de NO_x desenvolvido pelo IPT.

Os ensaios realizados com a fornalha operando com óleo combustível tipo 4A mostraram que tanto a aplicação da tecnologia de requeima como o uso do queimador *Low NO_x* são eficientes na redução das emissões de NO_x .

O emprego da técnica de requeima apresentou eficiência crescente na redução das emissões de NO_x (63 % a 71 %) com a quantidade empregada de gás natural (13 % a 17 % da potência fornecida) e não levou ao aumento na emissão de produtos incompletos da combustão - hidrocarbonetos voláteis, CO e material particulado. Quando se aplicou a requeima, foi verificado aumento no tamanho médio do MP presente nos gases de combustão (de 0,6 μm a 1,5 μm para 20 μm a 50 μm). O modelo cinético construído, constituído de 347 reações e 358 espécies químicas, foi validado com dados da literatura. Sua aplicação aos dados reais mostrou que ele não consegue simular adequadamente o processo, sendo necessário acoplar um modelo de mistura.

O emprego do queimador *Low NO_x*, fornecendo ar primário, secundário e terciário ao processo nas proporções de 19 %, 19 % e 62 %, respectivamente, reduziu as emissões de NO_x de 47 % em

relação à combustão convencional (ar primário e secundário nas proporções de 25 % e 75 %, respectivamente), porém levou ao aumento da concentração de MP dos gases de combustão de 64 mg/Nm³ 0 % O₂ para 166 mg/Nm³ 0 % O₂.

O emprego simultâneo das técnicas de requeima (16 % da potência liberada via gás natural) e do queimador *Low NO_x* (vazões de ar primário, secundário e terciário de 19 %, 19 % e 62 % do ar total, respectivamente) reduziu as emissões de NO_x de 80 % em relação à combustão convencional, porém levou ao aumento na concentração de MP de 64 mg/Nm³ 0 % O₂ para 224 mg/Nm³ 0 % O₂.

Os resultados satisfatórios obtidos permitiram sua divulgação nos meios nacional e internacional de maior relevância da área de engenharia térmica/combustão (VERGNHANINI FILHO; SOUSA; MARQUES; BERTRAN; SERFATY, 2003a; VERGNHANINI FILHO; SOUSA; MARQUES; BERTRAN; SERFATY, 2003b; BERTRAN; MARQUES; VERGNHANINI FILHO, 2004).

6.3 Prestação de serviços à indústria

A equipe do LET tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel (VERGNHANINI FILHO; ANDRADE; BRITO, 2013) equipada com instrumentação adequada para a medição de variáveis do processo de combustão (**Figura 5**), em particular com analisador contínuo de óxidos de nitrogênio que opera pelo princípio da quimiluminescência. Feito o monitoramento, são elaboradas recomendações de medidas que levem à redução das emissões de NO_x. Quando implantadas as medidas, é usual a realização de um novo monitoramento para a verificação de sua eficácia e a implementação de ajustes e correções.



Figura 5 – Unidade móvel do IPT.

Exemplo desse tipo de trabalho ocorreu numa empresa baiana da área de mineração (VERGNHANINI FILHO, 2010). A coloração castanha avermelhada dos gases lançados na atmosfera pelos fornos de sinterização da empresa (os denominados *Shaft Kiln*) foi atribuída pelo IPT, após intenso conjunto de medições, à elevada concentração de NO_x dos gases. A região de combustão dos fornos *Shaft* reúne condições favoráveis à formação de NO_x, seja pelas elevadas temperaturas, que são necessárias

para a sinterização do minério, seja pelas elevadas vazões de ar introduzidas, que são necessárias para a adequada combustão do óleo e para o resfriamento do minério após a sua sinterização. Para a resolução do problema, entre as várias medidas discutidas com o IPT, a empresa optou pela instalação de sistema de injeção de água nas regiões do forno de maior temperatura. Seguiu-se à instalação a realização pelo IPT de novo monitoramento. Foram praticadas diferentes condições operacionais do sistema, constatando-se uma redução de 45 % na quantidade de NO_x formada na condição mais favorável.

Outro exemplo recente foi a realização de um levantamento dos teores de NO_x dos gases nas chaminés e no interior dos fornos de pelotização de uma siderúrgica situada no litoral do Espírito Santo (VERGNHANINI FILHO, 2012). As elevadas concentrações de NO_x dos gases levou a empresa a substituir um dos queimadores de gás natural (GN) de um de seus fornos por um queimador *Low NO_x*. O queimador, tendo várias entradas de combustível (GN radial, GN primário e GN secundário) e de ar de combustão (ar radial e ar primário ou ar principal), foi ajustado de forma a proporcionar zonas de queima com temperaturas e concentrações de oxigênio menores e mais uniformes do que as obtidas pelo queimador original, levando à menor formação de NO_x. Para verificar a eficácia da medida, o IPT foi novamente chamado. Constatou-se que a medida levou à redução significativa do teor de NO_x dos gases na região do forno de influência desse queimador. O percentual exato de redução não foi possível determinar, seja devido à configuração do forno, em que as zonas de combustão geradas por cada queimador recebem gases de zonas vizinhas, seja pelo fato das temperaturas internas do forno nos pontos de medição não terem sido constantes.

Uma empresa distribuidora de gás combustível foi, também, atendida pelo IPT num extenso trabalho que envolveu, entre outras atividades, o levantamento das emissões de NO_x por empresas situadas nas regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas (VERGNHANINI FILHO, 2014). As medições em cada empresa foram seguidas de um seminário no qual eram apresentados e debatidos os resultados obtidos e as estratégias de redução das emissões, desde as de custo zero e aplicação imediata, como modificações nos procedimentos operacionais do equipamento até medidas de médio prazo, envolvendo troca e aquisição de equipamentos e instrumentos.

6.4 Disseminação de conhecimento

A difusão do conhecimento que vem sendo adquirido pela equipe do LET tem sido feita por meio da publicação de artigos, da participação em eventos e, principalmente, da apresentação do tema no curso "Combustão Industrial", que vem sendo ministrado regularmente pelo IPT desde 1986 nas modalidades aberta e *in-company* (VERGNHANINI FILHO, 1986).

7 Referências

BEÉR, J. M. Low NO_x burners for boilers, furnaces and gas turbines; drive towards the lower bounds of NO_x emissions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMBUSTION TECHNOLOGIES FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 3., Lisbon, 1995. Proceedings... Boca Raton: CRC Press, 1995.

BERTRAN, C. A.; MARQUES, C. S. T.; VERGNHANINI FILHO, R. Reburning and burnout simulations of natural gas for heavy oil combustion. **Fuel**, v. 83, n. 1, p. 109-121, Jan. 2004.

BOZZUTO, C. R.; MORIARTY, R. J. Overview of current NO_x control technologies. *Energy Engineering*, v. 91, n. 4, p. 6-46, 1994.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; LACAVALA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: UNESP, 2003. 135 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. (Série Relatórios).

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 340 p.

KILPINEN, P.; GLARBORG, P.; HUPA, M. Reburning chemistry: a kinetic modeling study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 31, n. 6, p. 1477-1490, 1992.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 281 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. *Diário Oficial da União, Brasília*, 2 jan. 2007. p. 131.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. *Diário Oficial da União, Brasília*, 26 dez. 2011.

MOLERO, L. J. Pollutant formation and interactions in the combustion of heavy liquid fuels. 1998. 258 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Chemical Engineering, University of London, London, 1998.

SCHNEIDER, T.; GRANT, L. Air pollution by nitrogen oxides. Amsterdam: Elsevier, 1982. 1093 p. (Studies in Environmental Science 21).

SOUSA, F. D. A.; MESSIAS, L. S.; VERGNHANINI FILHO, R.; KOBAYASHI, W. T. Emissão de óxidos de nitrogênio em chamas oxi-combustíveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 5., / SIMPÓSIO DE ENGENHARIA TÉRMICA, 2., 1994, São Paulo. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Control of NO_x emissions by reburning. Washington: EPA, 1996. (EPA/625/R-96/001).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. External combustion sources. volume 1: stationary point and area sources. In: AP-42, Compilation of air pollutant emission factors. 5th ed. Washington: EPA, 1997. v. 1, cap. 1.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Part 60 - Standards of performance for new stationary sources. The Code of Federal Regulations (CFR), Title 40 - Protection of Environmental, Chapter I - Environmental Protection Agency, Subchapter C - Air Programs. Washington: EPA, 1999. Disponível em: <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr60_main_02.tpl>. Acesso em: 13 maio 2016.

VERGNHANINI FILHO, R. Formação de poluentes em processos industriais de combustão: óxidos de nitrogênio. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R., Conservação de energia: IPT avalia rendimento térmico e emissões atmosféricas de caldeiras e aquecedores de fluido térmico. **IPT Notícias**, São Paulo, 08 maio 2014. Disponível em: <www.ipt.br/noticia/814.htm>. Acesso em: 5 jun. 2016.

VERGNHANINI FILHO, R., Emissão atmosférica: equipe do IPT investiga emissão de poluentes em fornos de pelletização de minério de ferro no Espírito Santo. **IPT Notícias**, São Paulo, 05 jun. 2012. Disponível em: <www.ipt.br/noticia/519.htm>. Acesso em: 5 jun. 2016.

VERGNHANINI FILHO, R., Emissões industriais: grupo do IPT realiza medição de poluentes para subsidiar projetos de redução de impacto ambiental. **IPT Notícias**, São Paulo, 30 ago. 2010. Disponível em: <www.ipt.br/noticia/210.htm>. Acesso em: 10 maio 2016.

VERGNHANINI FILHO, R.; SOUSA, F. D. A.; MARQUES, C. S. T.; BERTRAN, C. A.; SERFATY, R. NO_x abatement from oil combustion - reburning and Low NO_x burner. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 7., 2003, Lisbon. **Proceedings...** Lisboa: Instituto Superior Tecnico, 2003a.

VERGNHANINI FILHO, R., SOUSA, F. D. A.; MARQUES, C. S. T.; BERTRAN, C.A.; SERFATY, R. NO_x abatement from oil combustion - reburning and Low NO_x burner. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., 2003, São Paulo. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2003b.

VERGNHANINI FILHO, R.; ANDRADE, L. A.; BRITO, H. B. Unidade móvel para avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes atmosféricos de equipamentos industriais de combustão. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 34., / ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 28., 2013, Vitória. Anais... São Paulo: ABM, 2013.

Ruptura de cabo condutor de alumínio devido ao atrito de linha de pipa com cerol

Aluminum conductor cable rupture due to friction of kite line with cerol

Hamilton Lelis Ito^a, José Belotti Neto^b, Jonas de Carvalho Gomes^b
Ricardo Tufaniuk^c

^a Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil

^b Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil

^c AES-Eletropaulo São Caetano do Sul-SP, Brasil

*E-mail: hlito@ipt.br

Palavras-chave:

alumínio, cabo condutor de eletricidade, pipa, cerol, corte de cabo, choque elétrico.

Keywords:

aluminum, electrical conductive cable, electric power distribution line, kite, cerol, cable cutting, electric shock.

Resumo

Entre os problemas enfrentados pelas companhias de distribuição de energia elétrica em áreas urbanas servidas por linha aéreas, está a ruptura de cabos causada por acidentes automobilísticos ou danos causados por impacto de galhos de árvores provocado pelo vento, principalmente durante tempestades. Nos últimos anos, um problema adicional tem aumentado nas áreas urbanas devido a uma tradicional brincadeira de criança. O uso do cerol (abrasivo aplicado em linha de empinar pipa para derrubar pipas adversárias) tornou-se um problema, não apenas para motociclistas e pedestres, mas também para a distribuição de energia elétrica em São Paulo. Os fios dos cabos energizados de alta tensão colocados no topo dos postes, usados para distribuição de energia elétrica têm sido cortados por linhas de pipa abrasivas, reduzindo a seção resistente do cabo. Múltiplas consequências podem ocorrer devido ao enfraquecimento ou à ruptura do cabo, desde a interrupção de fornecimento de energia até acidentes fatais causando choque elétrico em pedestres.

Abstract

Among the problems faced by the electric power distribution companies in urban areas served by aerial lines, there is the rupture of cables caused by car accidents or by the impact of tree branches due to wind during storms. Lately, an additional problem has risen in urban areas due to a traditional kid's playing. The use of manja or cerol (abrasive applied to kite lines to cut down other kites in kite fighting) became a problem not only to motorcycle riders and pedestrians but also to the electric power distribution in Sao Paulo, Brazil. Wires of the high voltage energized cables laid on the top of the posts used

in distribution systems have been cut by abrasive kite lines reducing the cable resistant section. Multiple consequences can occur due to the weakening or rupture of a cable, from power distribution interruption to fatal accidents causing electrical shock in pedestrians.

1 Introdução

No passado, em muitos lugares, empinar papagaios ou pipas não costumava ser um tipo de brincadeira perigosa nem para os participantes da brincadeira e nem para qualquer pessoa que estivesse em torno da área em que a brincadeira acontecia. Antes de empinar a pipa, era necessário fazê-la, primeiro criando um *design*, procurando a madeira apropriada (geralmente bambu) para construir a armação, comprando papel impermeável e cola, e finalmente produzindo manualmente a pipa. Costumava haver muito mais áreas não urbanizadas apropriadas para a brincadeira do que há atualmente. O foco das crianças era principalmente competir buscando levar a pipa à altura máxima que pudesse atingir, ou a disputa se focava na capacidade de construir a pipa com *design* mais criativo. Hoje a ideia de competição na brincadeira de empinar pipas mudou radicalmente. O vencedor deixou de ser aquele capaz de fazer a pipa voar mais alto, ou de construir uma pipa mais bonita, mais colorida ou exótica, mas aquele com maior competência de cortar a linha dos adversários, eliminando-os da disputa. O cerol, pó abrasivo feito de vidro moído colado à linha transformou uma inofensiva brincadeira de criança em um jogo perigoso. Acidentes causados por cortes provocados por linha impregnada com cerol são frequentemente mostrados nos noticiários de TV, na imprensa e outros meios de comunicação.

Os cabos condutores de eletricidade são projetados para durar dezenas de anos, mas as linhas de distribuição aéreas podem ser danificadas por descargas atmosféricas, por pássaros, por galhos de árvores, por carros trombados contra postes, ou por outras ações externas como atrito destes contra linha impregnada com cerol. Os cabos de distribuição são normalmente construídos como uma cordoalha com sete fios de alumínio, sendo seis fios enrolados sobre um fio central.

O nível máximo de impurezas do alumínio, especificado para condutores de eletricidade, é geralmente muito baixo, por causa dos efeitos nocivos das impurezas na condutividade elétrica. Portanto o alumínio de alta pureza é o que produz melhor rendimento na condução de eletricidade. Essa alta pureza, no entanto, faz com que as propriedades mecânicas do alumínio para condutores de eletricidade, inclusive a resistência ao desgaste, sejam baixas (ASM INTERNATIONAL, 1990). A resistência ao desgaste não é o objetivo principal de cabos nus de alumínio para condutores de eletricidade, que obviamente não são projetados para resistir ao desgaste abrasivo, pois este não está previsto para condições normais de uso. É irônico dizer, mas na atualidade algo anormal como fricção de linhas de pipa com cerol sobre os cabos se tornou usual. As recomendações das companhias de distribuição sobre os perigos de empinar pipas perto da rede elétrica são ignoradas, pois se percebeu que muitas vezes a linha pode tocar no cabo sem causar choque em quem esta empinando a pipa. Isso pode gerar mais um desafio, além daquele de cortar as linhas das pipas adversárias: desafiar a recomendação de segurança e ficar roçando a linha contra os cabos suspensos nos postes, enquanto

se empina a pipa.

Para reduzir o risco de acidentes, os cabos alumínio nu de distribuição aérea podem ser substituídos por cabos encapados com aço, ou as linhas aéreas podem ser substituídas por linhas subterrâneas, o que resulta num trabalho moroso em áreas totalmente construídas da cidade, pois, requer interrupções de tráfego de veículos e interrupções no fornecimento de energia.

A **Figura 1** mostra a localização de um acidente em que houve a ruptura de um cabo na Rua José Martins Lisboa no Bairro Jardim Helena no município de São Paulo, SP, no dia 01 de setembro de 2009. Na **Figura 2**, é mostrado o cabo caído sobre a calçada que rompeu em consequência de cortes produzidos pelo atrito de linha de pipa com cerol. A **Figura 3** mostra o aspecto do pedaço de cabo enviado ao IPT para que se realizasse uma análise para determinação das causas da falha. Nessa Figura, podem ser observados cortes nos arames que constituem o cabo e restos de rabiolas de pipa presos ao cabo. A queda deste cabo resultou na morte de um transeunte que ao esbarrar no mesmo foi eletrocutado.

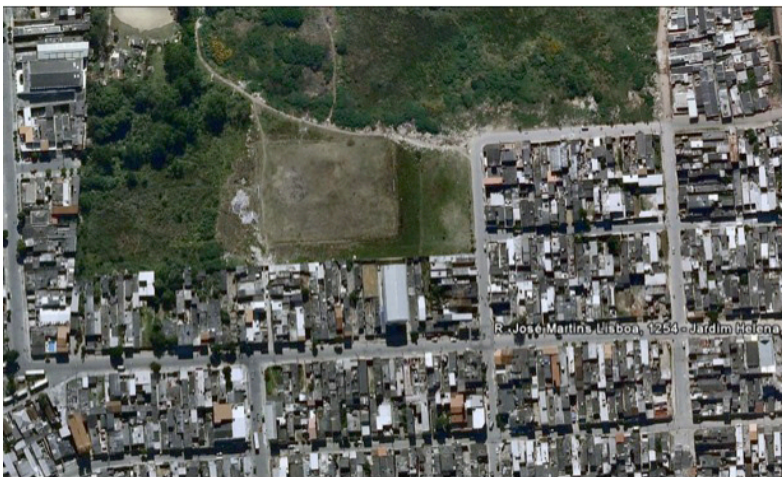


Figura 1 – Vista aérea do local do acidente.



Figura 2 – (a) Local do acidente. A seta aponta para o cabo caído. (b) A seta preta aponta para o cabo rompido. Observe restos de rabiolas de pipas presas aos cabos (setas vermelhas). (c) Observe como o cabo rompido toca o chão na altura do meio fio (seta).

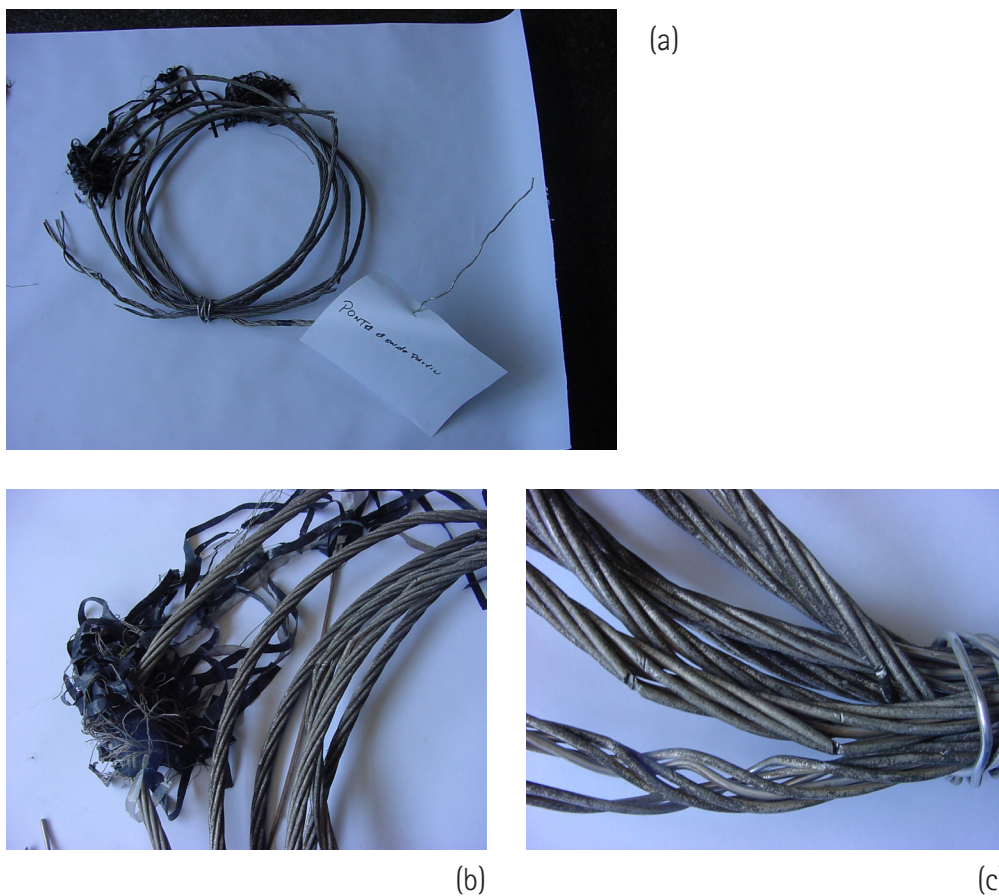


Figura 3 – (a) Aspecto geral da amostra removida do cabo, abrangendo a extremidade rompida, trazida para análise no IPT. (b) Detalhe de (a) mostrando restos de linha e de rabiolas de pipa presos no cabo. (c) Detalhe de (a) mostrando diversos fios cortados, sendo alguns totalmente seccionados.

2 procedimento experimental

O cabo removido do poste foi examinado visualmente e fotografado com câmara digital SONY DSC S30. As extremidades rompidas dos fios do cabo foram numeradas de 1 a 7, cortadas e montadas em resina epóxi para exame de suas superfícies em microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL 6200. Pedacos da linha de pipa presa ao cabo também foram observados e submetidos à análise por dispersão de energia (EDS) no mesmo microscópio. Seções longitudinais de fios que apresentaram cortes transversais foram montadas em baquelite para observação em microscópio óptico Olympus BX 50M. A análise química do material foi realizada em espectrômetro de emissão óptica ARL – 3460.

3 Resultados

A análise química (**Tabela 1**) mostrou que o teor de alumínio do material do cabo é de 99,8 % em massa, que é apropriado para condução de eletricidade, pois atende à especificação ASTM B236 (American Society For Testing And Materials, 2015) para liga de alumínio para aplicações elétricas, conforme mostra a **Tabela 1**.

Tabela 1 – Composição Química.

Elemento	Massa obtida na análise (%)	Massa especificada pela ASTM B236 (%)
Boro (B)	0,0130 ± 0,0010	≤ 0,05
Cobre (Cu)	0,00090 ± 0,00010	≤ 0,05
Ferro (Fe)	0,100 ± 0,010	≤ 0,40
Gálio (Ga)	0,0096 ± 0,0006	≤ 0,03
Magnésio (Mg)	0,0020 ± 0,0010	≤ 0,03
Manganês (Mn)	0,00100 ± 0,00020	≤ 0,01
Silício (Si)	0,064 ± 0,004	≤ 0,10
Vanádio (V) + Titânio (Ti)	< 0,002	≤ 0,02
Zinco (Zn)	0,0033 ± 0,0003	≤ 0,05
Alumínio (Al)	99,8*	≤ 99,50

* Balanço

A microestrutura do material é constituída de matriz de solução sólida rica em alumínio e precipitados insolúveis ricos em ferro, conforme pode ser visto na **Figura 4**. Esta microestrutura é apropriada para condutores de eletricidade.

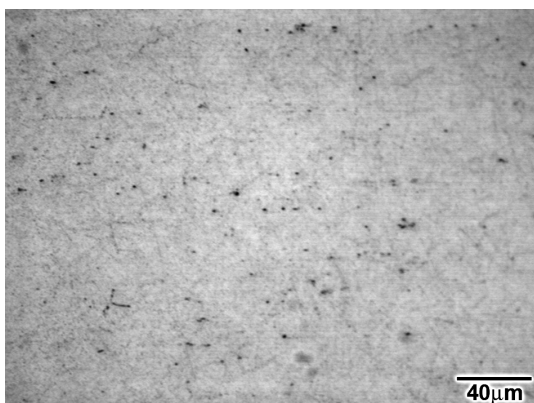


Figura 4 – Microestrutura: partículas insolúveis de FeAl₃ em uma matriz de solução sólida rica em alumínio. Ataque: HF 0,5 % em H₂O.

O exame visual do cabo (**Figura 5a**) mostrou um emaranhado misto de linha de pipa e rabiola preso

ao cabo retirado da rede após ruptura e queda. Essa observação constitui uma evidência de que é usual se empinar pipas na área em que ocorreu o acidente. Diversos cortes podem ser observados na superfície do cabo. Uma observação mais detalhada ao longo de todo o segmento de cabo trazido para análise revelou trechos em que diversos fios se apresentaram seccionamento e/ou com ruptura em 100 % da seção, conforme se pode observar nas Figuras 5b e 5c.

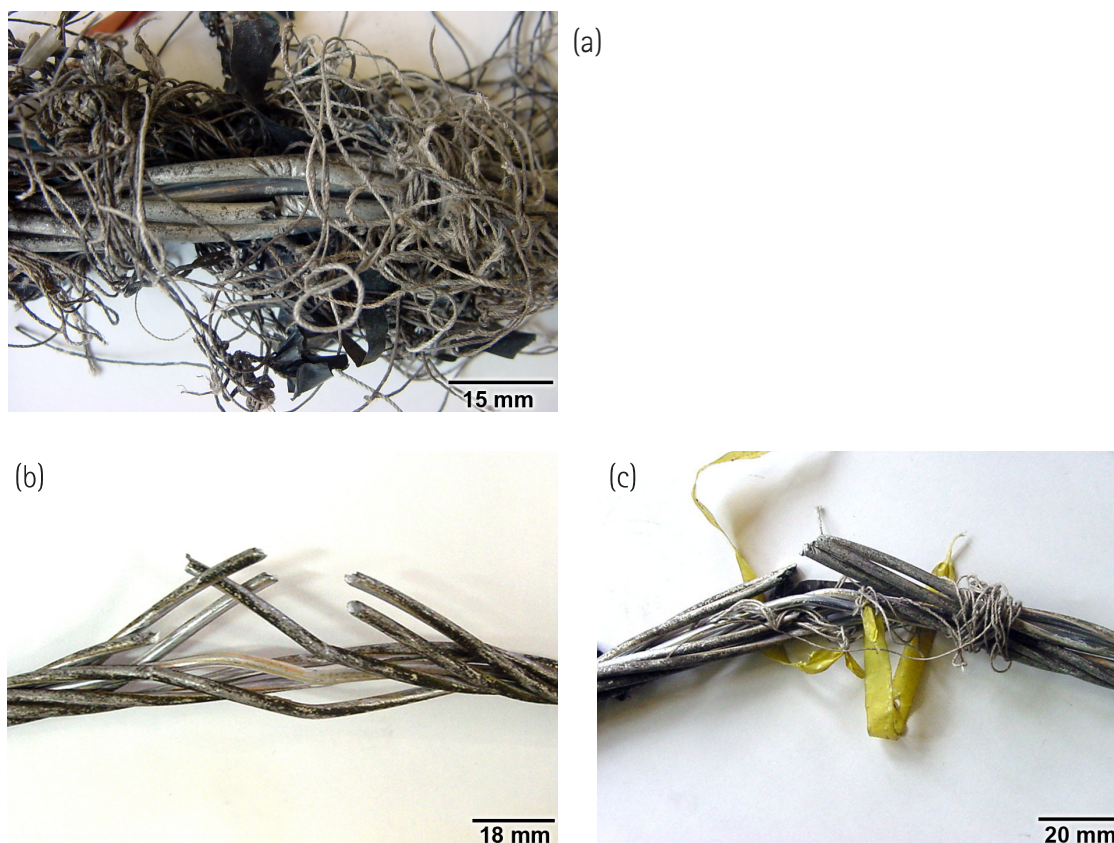


Figura 5 – (a) Observa-se um emaranhado misto de linha de pipa e rabiola preso ao cabo. Nessa mesma região, são observadas marcas de corte nos fios do cabo. (b) e (c) As fotografias apresentadas representam trechos do cabo em que há fios com 100 % de seccionamento por corte ou corte seguido de fratura.

Os sete fios de uma das extremidades rompidas do cabo, montados em resina epóxi, foram submetidos a exame por MEV, conforme se pode observar na Figura 6. Dos sete fios, quatro apresentaram 100 % da seção cortada, um apresentou 80 % da área da seção cortada e 20 % da área fraturada, um apresentou aproximadamente 20 % da área da seção transversal cortada e 80 % da área fraturada e apenas um dos fios (o fio central) apresentou 100 % da seção fraturada. Isso significa que, antes da ocorrência da ruptura, mais de 70 % da seção transversal já havia sido cortada. A Figura 7a mostra o aspecto típico das superfícies cortadas e a Figura 7b mostra alvéolos nas superfícies de fratura dos fios 4 e 5. Foi realizada uma observação detalhada de todas as áreas fraturadas e em nenhuma delas foram observadas estrias de fadiga.

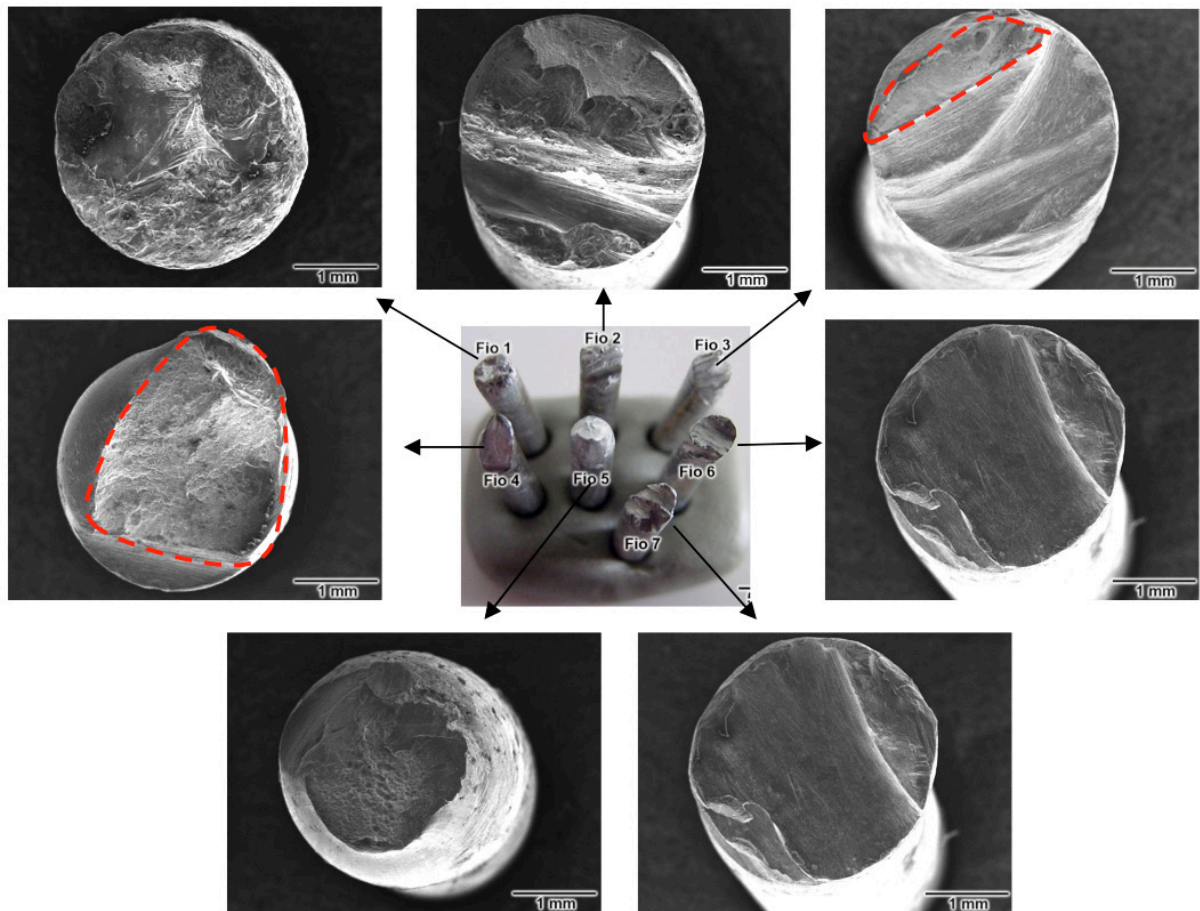


Figura 6 – Aspecto das superfícies dos sete fios de uma das extremidades rompidas do cabo. Os fios 1, 2, 6 e 7 apresentaram 100 % da seção cortada. No fio 3, a região delimitada em vermelho mostra cerca de 20 % da seção transversal fraturada e o restante da seção foi cortado. No fio 4, a região delimitada em vermelho mostra cerca de 80 % da seção transversal rompida e o restante da seção foi cortado. Apenas o fio 5 (fio central) apresentou 100 % da seção fraturada. Nesse fio, observa-se acentuada redução de área da seção rompida.

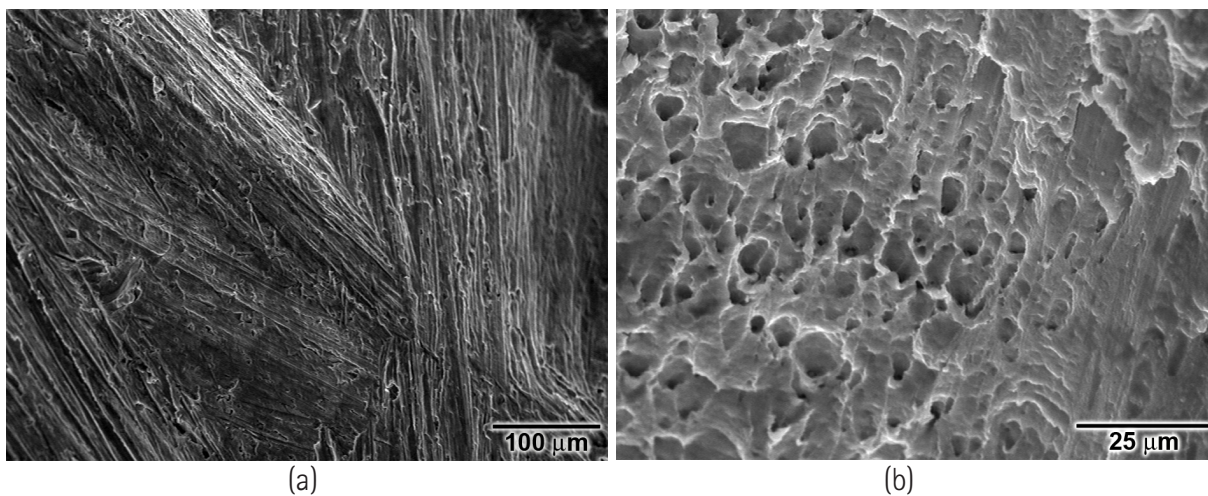


Figura 7 – (a) Aspecto típico das superfícies cortadas mostrando riscos causados pelo atrito entre os fios do cabo e a linha com cerol. (b) Os alvéolos mostrados na figura foram observados em todas as superfícies das áreas fraturadas. Esse aspecto microfractográfico é característico de ruptura dúctil.

Para observar as regiões em torno dos cortes, seções longitudinais de fios com cortes, mas não totalmente seccionados, foram embutidas em baquelite. A Figura 8 mostra duas regiões selecionadas apresentando duas situações. Na primeira observada na Figura 8a, é mostrado um corte abrangendo quase metade da seção resistente do fio, mas sem indicações de que esteja ocorrendo deformação plástica do material. Na segunda, observada na Figura 8b, é mostrada uma situação em que o corte abrange mais da metade da seção resistente. Nessa região, é possível observar uma estrição, indicando processo de ruptura dúctil em andamento.

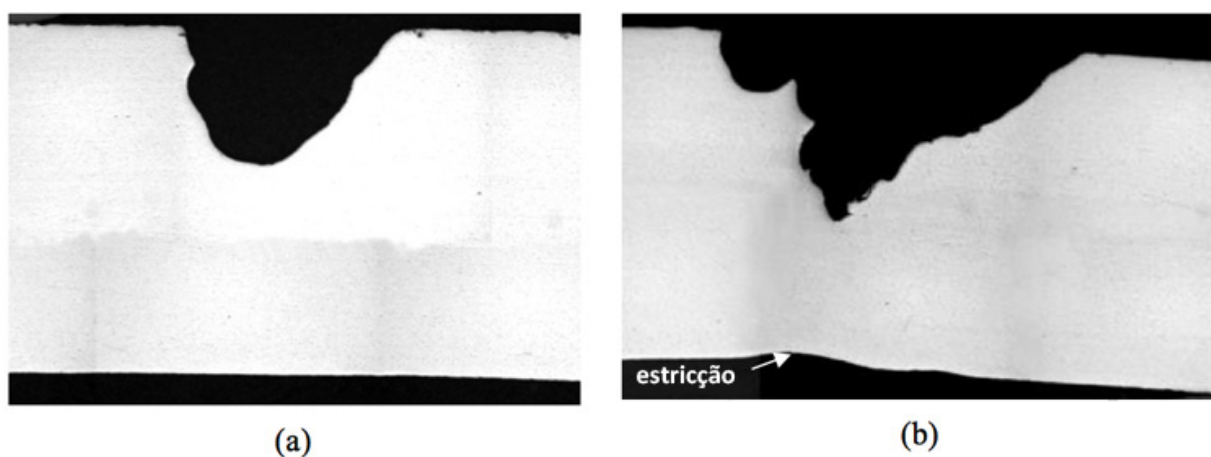


Figura 8 – (a) Aspecto de uma seção longitudinal de um fio mostrando um corte. (b) Aspecto de uma seção longitudinal de um fio mostrando uma região com corte em vias de sofrer ruptura. A seta aponta para a região em que o processo de estrição já estava iniciado.

A análise por EDS realizada em um pedaço da linha removido do emaranhado que veio preso à amostra do cabo, apresentada na **Figura 9**, revelou a presença dos elementos silício (Si), oxigênio (O), alumínio (Al), carbono (C) e ferro (Fe). O silício e o oxigênio são provavelmente resultantes da composição do vidro, o carbono da composição da fibra, o alumínio de resíduos removidos do cabo e o ferro provavelmente devido a alguma contaminação.

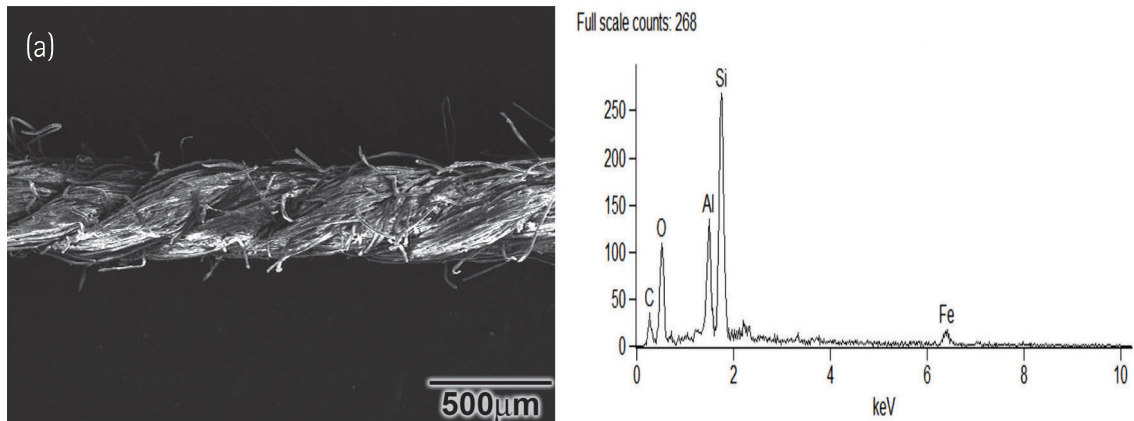


Figura 9 – (a) A região da linha de pipa demarcada pelo retângulo foi submetida à análise por dispersão de energia (EDS) em MEV. (b) Espectro obtido na análise por EDS. Os picos de oxigênio e silício indicam a presença de vidro, o pico de carbono é provavelmente decorrente da composição química da fibra, o pico de alumínio de resíduos removidos do cabo durante o corte e o ferro provavelmente de alguma contaminação.

4 Discussão

A análise sobre como a ruptura ocorreu é direta, ou seja, o cabo foi submetido à ação de um dispositivo de corte, neste caso à linha de pipa impregnada com cerol, que provocou a diminuição da sua seção resistente até o ponto em que este não suportou a carga e rompeu. A estrição observada na **Figura 8b** retrata o processo da falha, ou seja, a ocorrência de deformação plástica imposta pela redução da seção resistente do cabo, proveniente dos cortes. A **Figura 7b** mostra o resultado final desse processo, ou seja, a ruptura de caráter dúctil decorrente da sobrecarga mencionada. O evento da ruptura não deve ter ocorrido durante a ação da linha de pipa sobre o cabo. O mais provável é que sofreu uma carga adicional ao seu peso próprio, provavelmente uma rajada de vento suficiente para fraturar os fios que ainda estavam resistindo à carga de trabalho. Outra possibilidade, não observada neste caso, é que cortes com linha de pipa impregnada com cerol causam concentração de tensões favorecendo a ocorrência de fadiga que se propaga em consequência de esforços provenientes de vibração eólica.

Outra questão importante é que mesmo antes da etapa crítica de ruptura e queda dos cabos com

comprometimento da seção resistente, havendo algum carregamento excepcional como uma colisão de veículo contra postes, tais cabos se rompem e caem com muito mais facilidade do que cabos com seção resistente íntegra. A queda nessas circunstâncias coloca em risco de choque elétrico, não apenas transeuntes e vítimas do acidente, mas também os socorristas que chegam para atender a ocorrência.

No caso em questão, a causa da falha do cabo está diretamente relacionada com a ação humana de empinar pipas utilizando linhas impregnadas com abrasivo. O corte do cabo pode ter sido apenas o resultado de uma atitude de desafio e desobediência à recomendação de não empinar pipas perto da rede elétrica, mas também pode ter sido intencional. No caso da segunda hipótese se confirmar, o que deveria ser apenas uma brincadeira de criança se transforma num crime que deve ser combatido.

As consequências deste caso de falha merecem uma atenção especial nesta discussão porque falhas deste tipo ocorrem com mais frequência em regiões de periferia onde vivem pessoas com menor nível de informação. As vítimas potenciais de cabos energizados rompidos são normalmente das mesmas áreas em que vivem os agentes causadores das falhas. O cabo que sofreu falha e permitiu a produção deste artigo provocou uma morte devido a um choque elétrico e a interrupção do fornecimento de energia elétrica por várias horas em torno da área do acidente. Alguns anos atrás, analisamos um cabo de cobre instalado perto de uma favela em São Paulo que foi cortado do mesmo modo, provocando um *blackout* de muitas horas em uma área apreciável da cidade (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2011). De acordo com a imprensa (EM DEZ ..., 2011), no Brasil, o cerol causou 372 acidentes em linhas de distribuição de energia entre 2001 e 2010.

Do ponto de vista técnico, algumas soluções podem ser aplicadas, umas mais caras do que outras. A melhor é substituir as linhas aéreas por linhas subterrâneas, ou, adotar como solução paliativa a substituição de cabos nus por cabos encapados com aço.

Em 2005, a Câmara Municipal de São Paulo aprovou a lei 14.023, que obriga concessionárias, empresas estatais e operadoras de serviço a enterrarem todo o cabeamento (de rede elétrica, telefonia, televisão e afins) instalado no município. A regulamentação da lei, em vigor desde 2006, prevê o enterramento de 250 km de fios e cabos por ano. Porém, a Grande São Paulo tem enterrados hoje apenas 5 % de seus 30 mil km de fios e cabos, o equivalente a 3 mil km, segundo informações da própria concessionária. (BURGARDT, 2011).

Tomando como referência que num prazo de cinco anos, apenas 5 % das obras foram realizadas, se for mantido o mesmo ritmo sem considerar o crescimento da cidade, o trabalho será concluído em 100 anos.

Diante desse cenário, fica claro que para melhorar a situação é necessária, além das medidas de caráter estritamente técnico, realizar ações sócio-político-educacionais, uma vez que o agente causador das falhas é o próprio ser humano. Em caso de constatação de que o corte dos cabos com linhas de pipa é resultado de ações criminosas, além das ações sócio-político-educacionais também terá que se acrescentar a ação policial.

5 Conclusões

- A composição química e a microestrutura do material são apropriadas para alumínio usado para condução de eletricidade.
- O atrito de linha impregnada com cerol contra a superfície do cabo provocou cortes que reduziram a seção resistente causando a ruptura.
- Do ponto de vista estritamente técnico, a solução para evitar acidentes similares ao ocorrido é substituir as linhas aéreas de distribuição de energia elétrica por linhas subterrâneas.
- Para se obter uma solução mais efetiva do problema, ações sócio-político-educacionais precisam ser realizadas.

6 Agradecimentos

À AES-Eletropaulo pela permissão para usar os resultados do relatório técnico sobre a análise de falha do cabo e ao Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo S.A. pelo incentivo para produzir este artigo.

7 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B236-07**: Standard specification for aluminium bars for electrical purposes (Bus Bars). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook volume 2**: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials., Material Park, OH: ASM International, 1990. p. 62-123.

BURGARDT, L. **Redes subterrâneas: Saiba como cidades viabilizaram a conversão da fiação aérea por cabeamento enterrado. Infraestrutura: projetos, custos e construção**, edição 7, out. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/7/redes-subterraneas-235532-1.aspx>>. Acesso em: 27 set. 2016.

EM DEZ anos, **cerol causou 372 acidentes na rede elétrica. Portal R7 Notícias**, São Paulo, 1 ago. 2011. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/sao-paulo/noticias/cerol-causou-372-acidentes-na-rede-eletrica-em-10-anos-20110801.html>>. Acesso em: 21 dez. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Análise de falha em cabo para-raios**. São Paulo: IPT,

Efeito do tempo de envelhecimento na resistência à corrosão de aço inoxidável duplex UNS S32205

Effect of aging time on the corrosion resistance of duplex stainless steel UNS S32205

Henrique Boschetti Pereira^a, Fabiana Yamasaki Martins Vieira^b, Celia A. L. dos Santos^{b*}, Zehbour Panossian^b

Resumo

Aços inoxidáveis duplex são comumente utilizados nas indústrias petroquímicas e de papel e celulose devido à sua alta resistência à corrosão em meios contendo haletos em conjunto com ótimas propriedades mecânicas. No entanto, possui uma fase deletéria denominada sigma, originada pela difusão do cromo, que fragiliza localmente a camada passiva gerando corrosão localizada. A fase sigma é formada pela decomposição da ferrita em temperaturas entre 800 °C e 1000 °C, dependendo do tempo de permanência para que ocorra a difusão. Uma das formas de avaliar a influência da fase sigma é por meio da curva de polarização que mede a densidade de corrente em diferentes potenciais, revelando a faixa em que o material está ativo ou passivo. Este artigo tem como objetivo a determinação da mudança de comportamento da curva de polarização anódica do aço inoxidável UNS S32205 em relação ao tempo de tratamento térmico de envelhecimento a temperaturas de 850 °C.

Abstract

Duplex stainless steels are commonly used in petrochemical industries due to their good mechanical properties and high corrosion resistance in environments containing halides. However, it may present a deleterious phase called sigma, caused by chromium diffusion which weakens locally the passive layer generating localized corrosion. The sigma phase is formed by the decomposition of ferrite at temperatures between 800 °C and 1000 °C, depending on the diffusion-process time. A way to evaluate the influence of the sigma phase is through a polarization curve which measures the current density at different voltages, showing the range that the material is active or passive. This article aims at determining changes of anodic polarization curves of this steel as a function of time of aging at 850 °C.

^a Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil

^b Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil

*E-mail: clsantos@ipt.br

Palavras-chave:

aço inoxidável duplex; aço inoxidável dúplex; UNS S32205; fase sigma; curva de polarização; corrosão.

Keywords:

duplex stainless steel; UNS S32205; sigma phase; polarization curve; corrosion.

1 Introdução

Os aços inoxidáveis duplex, característicos por possuir fases austenita e ferrita, são amplamente utilizados nas indústrias petroquímicas e de papel e celulose devido à alta resistência à corrosão em ambientes agressivos contendo íons haleto em solução aquosa (GUNN, 1997).

O aquecimento desses aços inoxidáveis, durante o processo de soldagem, pode gerar fases deletérias como carbonetos, chi e sigma, devido à grande quantidade de elementos de liga como cromo, níquel e molibdênio. Ao redor das fases precipitadas, ocorre empobrecimento desses elementos (sensitização) formando áreas susceptíveis ao ataque corrosivo (ALVAREZ-ARMAS; DEGALLAIX-MOREUIL, 2009).

O empobrecimento das regiões adjacentes das fases precipitadas é decorrente da baixa difusividade dos elementos de liga (principalmente do cromo), pois esses são substitucionais, e, portanto, há dependência de componentes difusionais para ocorrer a transformação de fase. Com a sensitização, o potencial de eletrodo nas regiões adjacentes às fases precipitadas cai, causando corrosão galvânica localizada no seu entorno (ALVAREZ-ARMAS; DEGALLAIX-MOREUIL, 2009).

A fase que apresenta maior problema é a fase sigma, fato reportado pela primeira vez por Bain e Griffiths (1927) que citam a descoberta de uma fase frágil no sistema Fe-Cr, sendo considerada uma das fases mais estudadas devido à degeneração das propriedades mecânicas mesmo com pouca porcentagem precipitada (ALVAREZ-ARMAS; DEGALLAIX-MOREUIL, 2009). A determinação da cristalografia dessa fase foi realizada por Bergman e Shoemaker (1951) que concluiu que se tratava de um intermetálico com 30 átomos por célula unitária com composição aproximada de 52 % Cr e 48 % Fe. Sua precipitação ocorre principalmente no contorno de grão e o crescimento ocorre consumindo a ferrita em regime competitivo segundo $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma$ (JOUBERT, 2008).

Os processos de soldagem são rigidamente controlados e determinados em normas AWS e ASME para que essa fase apareça o mínimo possível, tentando evitar a deterioração estrutural dos equipamentos construídos.

Para maior compreensão da cinética de transformação da fase sigma, Sieurin e Sandström (2007) determinaram sua curva de precipitação TTT^a nos aços inoxidáveis duplex UNS S32205, conforme ilustrado na **Figura 1**.

^a Transformação Tempo Temperatura

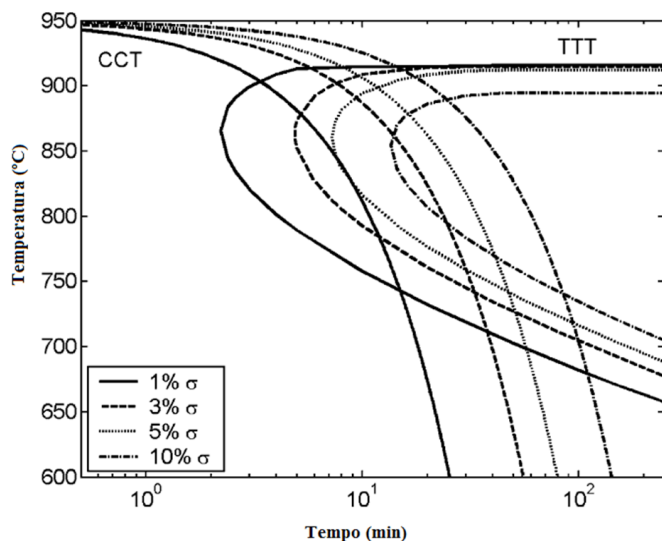


Figura 1 - Curva TTT da precipitação da fase sigma do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Fonte: Adaptado de Sieurin e Sandström (2007).

A resistência à corrosão pode ser avaliada a partir das curvas de polarização características de cada material em um determinado meio. Para tanto um potenciostato aplica diferentes potenciais e tem como resposta valores de corrente. A curva de polarização anódica é a que revela a susceptibilidade de oxidação do material, que varia conforme a temperatura, composição química e agitação da solução (FRANKEL, 2003).

A curva de polarização para materiais que possuem tendência à formação de camada passiva, formação de óxidos superficiais estáveis e aderentes, possui comportamento distinto, semelhante ao ilustrado na **Figura 2** (BARDAL, 2004). A reação anódica confere a materiais, como aços inoxidáveis, uma faixa de passivação na qual a corrente diminui (WOLYNEC, 2003).

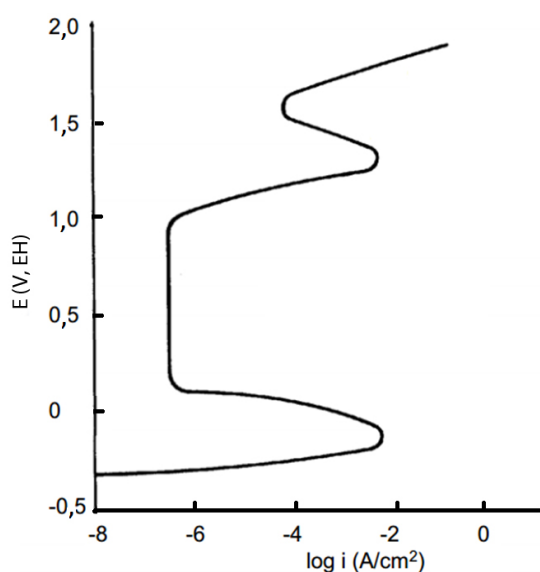


Figura 2 - Representação esquemática de curva de polarização anódica de materiais com capacidade de passivação em condições aeradas. Fonte: Adaptado de Bardal (2004).

Essas características dependem principalmente do meio, da aeração da solução e da temperatura de ensaio. Bhattacharya e Singh (2011) determinaram que, nas mesmas condições, o patamar de passivação pode variar conforme a temperatura para aços inoxidáveis duplex UNS S32205.

Elevadas concentrações de íons cloreto presentes em solução salina desestabilizam a camada passiva de aços inoxidáveis aumentando a densidade de corrente (WAGNER, 1965). Estudos das alterações na curva de polarização reveladas com a variação de concentração de NaCl no eletrólito para aços inoxidáveis duplex UNS S32205 mostram que quanto maior a concentração salina, maior a semelhança com a curva determinada pela equação de Butler-Volmer (KOCIJAN; DONIK; JENKO, 2009).

Apesar de ter sido estabelecido que a precipitação de fase sigma deteriora o desempenho quanto à corrosão dos aços inoxidáveis duplex UNS S32205, não há relatos de comportamento da curva de polarização anódica em função do tempo de envelhecimento. Assim sendo, este artigo tem como objetivo principal estudar a relação do tempo de envelhecimento do aço inoxidável duplex UNS S32205 na sua resistência à corrosão por meio das curvas de polarização.

2 Procedimento metodológico

Foi utilizado aço inoxidável duplex UNS S32205 laminado com espessura de 12,7 mm e composição química descrita na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Elementos	Massa (%)
Carbono	0,0170 ± 0,0020
Silício	0,380 ± 0,010
Manganês	1,440 ± 0,020
Fósforo	0,0260 ± 0,0020
Enxofre	< 0,002
Cromo	22,3 ± 0,3
Níquel	5,79 ± 0,07
Molibdênio	3,08 ± 0,03

A microestrutura do aço inoxidável duplex está descrita na **Figura 3**. Nota-se o bandejamento da ferrita e da austenita na direção de laminação. O ataque eletrolítico em solução de KOH foi utilizado para a diferenciação das fases α/γ . Esse ataque escurece a ferrita.

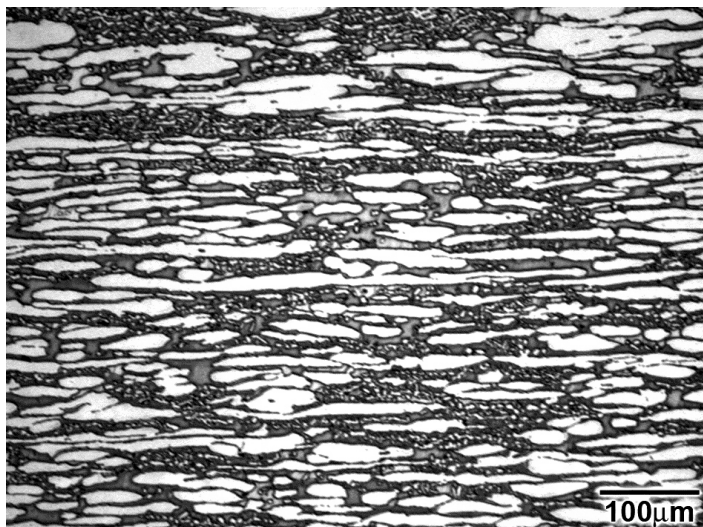


Figura 3 - Micrografia da seção transversal à laminação do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizado no experimento. Ataque eletrolítico em solução de KOH.

O tratamento térmico de envelhecimento dos corpos de prova foi realizado em um forno de indução a 850 °C, mantidos por 10 min e 20 min e resfriados em água com agitação. Os tempos de exposição à energia térmica foram estabelecidos para que fosse possível ocorrer as transformações isotérmicas descritas na **Figura 1**.

As curvas de polarização anódica foram obtidas com o uso do equipamento Solartron com eletrodo de calomelano saturado (ECS) como referência e eletrodo auxiliar de tela de platina com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm. Os eletrodos de trabalho foram obtidos com amostras de aço inoxidável UNS S32205 embutidos em baquelite, lixados e polidos com acabamento de 1 µm. A faixa de potencial foi de 0,25 V, ECS a 1,6 V, ECS com velocidade de varredura de 1 mV/s. O eletrólito utilizado foi água do mar sintética tipo II com pH de 8,2, cuja composição atendeu as normas ASTM D1141 e ASTM D1193 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2001; 2003).

Após cada ensaio de polarização, os eletrodos de trabalho foram limpos no ultrassom por 10 min, secados com ar quente e analisados no microscópio óptico modelo Olympus BX51M sem ataque metalográfico para avaliação do tipo de corrosão. No caso de não se observar nenhum tipo de ataque, o mesmo exame foi feito em microscópio eletrônico de varredura (MEV/FIB) modelo Quanta 3D FEG da FEI Company, para confirmação da ausência de ataque.

Para a identificação de alguma possível fase no interior do material, as seções transversais dos eletrodos de trabalho foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura, utilizando detector de elétrons retroespalhados que diferencia a composição química pelo contraste de tons de cinza da imagem obtida. Essa característica revela a maior concentração de elementos pesados nas regiões mais claras da imagem.

3 Resultados e discussão

As curvas de polarização anódica do aço inoxidável duplex UNS S32205 com diferentes tempos de envelhecimento estão apresentadas na **Figura 4**. Nota-se que há diferenças entre as curvas do material sem envelhecimento e do material com envelhecimento a tempos diferentes.

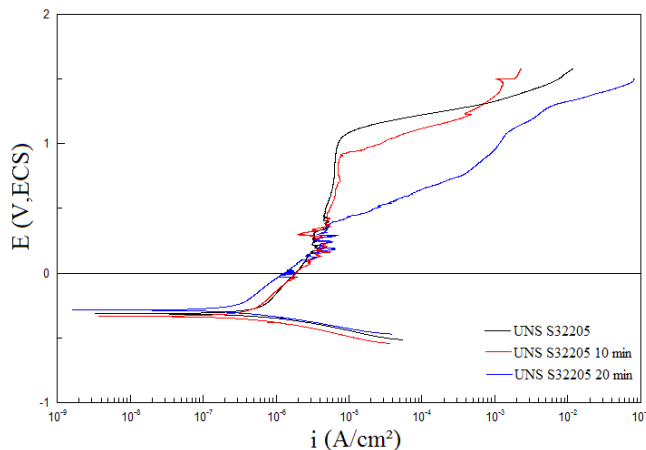


Figura 4 - Curvas de polarização anódica do aço inoxidável duplex UNS S32205 sem envelhecimento (curva preta), envelhecido por 10 min (curva vermelha) e por 20 min (curva azul) a 850 °C em solução de água do mar sintética a temperatura ambiente.

Pela **Figura 4**, pode-se observar que a curva de polarização do UNS S32205 sem envelhecimento, indicado em coloração preta, apresenta tendência de passivação em uma ampla faixa de potencial. O potencial de quebra, caracterizado pelo aumento da densidade de corrente, ocorre num valor da ordem de 1,05 V (ECS). Esse potencial é superior ao potencial de equilíbrio a partir do qual ocorre a decomposição da água ($2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$). De fato, para as condições do ensaio (água do mar sintética com pH 8,2, naturalmente aerado (pressão parcial de oxigênio igual a 0,2 atm)), o potencial de equilíbrio EO_2/H_2O pode ser calculada pela equação de Nernst, a saber:

$$E_{O_2/H_2O} = 1,228 + 0,0147 p_{O_2} - 0,0591 pH \tag{1}$$

$$E_{O_2/H_2O} = 1,228 + 0,0147 \cdot 0,2 - 0,0591 \times 8,2 \tag{2}$$

$$E_{O_2/H_2O} = 0,747 V (EH) = 0,506 V (ECS) \tag{3}$$

Confirma-se assim, que de fato o potencial de quebra é de 0,54 V acima do potencial esperado para a ocorrência da decomposição da água.

Observando-se a superfície do eletrodo de trabalho sem envelhecimento após a polarização anódica no microscópio ótico, não se observou ataque. Por essa razão, foi feita exame em MEV/FIB que confirmou a ausência de ataque conforme mostra a **Figura 5**. Com esse resultado, pode-se afirmar que o aumento de corrente foi decorrente da reação de decomposição de água. Muito provavelmente, ao se atingir o potencial de equilíbrio EO_2/H_2O , a decomposição da água começou

a ocorrer, porém com velocidade muito baixa e aumentou com o aumento da polarização anódica até ser detectada pela curva. Essa baixa corrente deve ser decorrente da alta resistência à corrosão do aço duplex: a camada passiva formada sobre a liga deve ter polarizado a reação da decomposição da água.

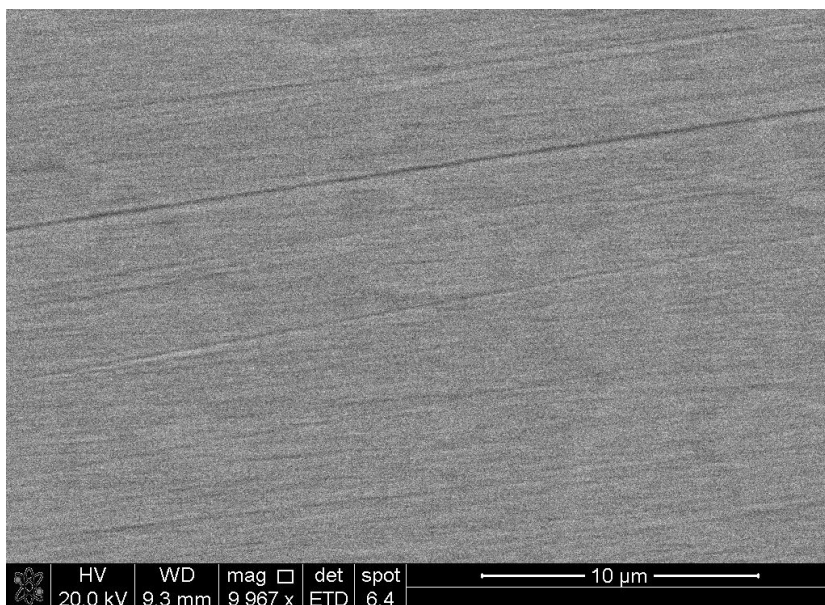


Figura 5 – Imagem de MEV/FIB do eletrodo de trabalho sem envelhecimento após a polarização anódica. Não se verifica ataque.

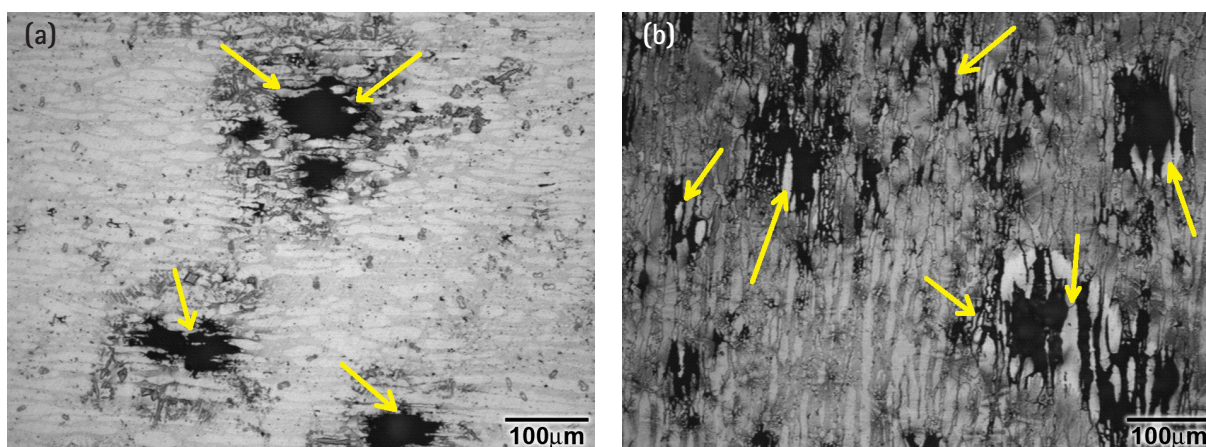


Figura 6 – Imagens de microscopia óptica do material envelhecido por 10 min (a) e por 20 min (b) logo após a polarização anódica. Sem ataque metalográfico.

A curva do eletrodo de trabalho envelhecido por 10 min, representado pela curva vermelha da **Figura 4**, também apresenta passivação, porém com uma faixa um pouco inferior ao do material sem envelhecimento. Nesse caso, o potencial de quebra ocorreu em 0,94 V (ECS), valor esse um pouco menor do que o potencial de quebra da liga sem envelhecimento, porém ainda superior ao potencial de equilíbrio EO_2/H_2O . A observação da superfície desse eletrodo de trabalho após a polarização mostrou ataque localizado (ver **Figura 6a**). No entanto, nada se pode afirmar sobre

qual foi a razão do aumento de corrente em 0,94 V (ECS): se foi a reação de decomposição da água ou se foi a quebra localizada da camada passiva. Para isso, dever-se-ia parar a polarização imediatamente após o potencial de quebra e manter esse potencial por um tempo e, depois, observar a superfície do eletrodo de trabalho. Como nesse estudo, o objetivo era somente verificar a influência do envelhecimento na curva de polarização, esse procedimento não foi adotado.

Para a curva do eletrodo envelhecido por 20 min (curva azul da **Figura 4**), o potencial de quebra ocorreu em 0,42 V (ECS). Esse potencial é um pouco inferior ao potencial EO_2/H_2O . Isso sugere que a quebra da camada passiva ocorreu já nas proximidades do potencial de quebra. O exame da superfície desse eletrodo de trabalho por microscopia óptica (**Figura 6b**) mostrou também ataque localizado com maior intensidade do que aquela observada no material envelhecido por 10 min.

Observando a **Figura 6**, verifica-se que o ataque localizado ocorreu na ferrita, podendo ser observado, nas bordas do local de ataque, ainda grãos de austenita (destacadas com setas que indicam os grãos de coloração branca, com a mesma morfologia dos grãos de austenita das regiões não atacadas). Isso mostra que os grãos de austenita resistem mais à corrosão. Além disso, é possível observar nas regiões sem ataque localizado que os contornos da ferrita/austenita ficaram evidenciados, sugerindo que pode ter ocorrido corrosão preferencial nessa região.

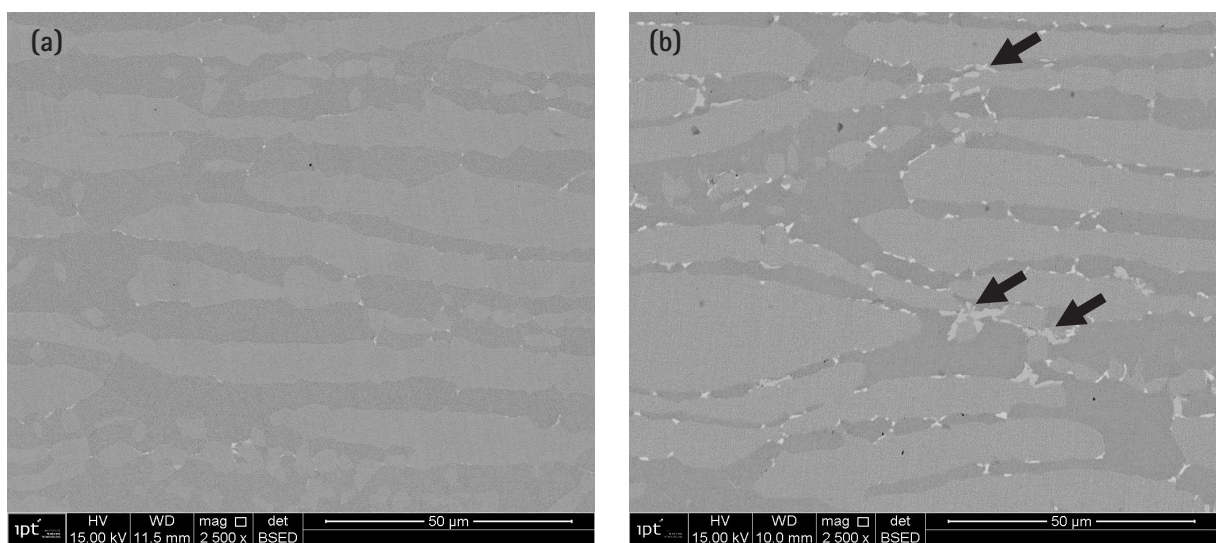


Figura 7 – Imagens de MEV/FIB utilizando feixe de elétrons retroespalhados nas seções transversais dos aços inoxidáveis duplex UNS S32205 com 10 min (a) e 20 min (b) de envelhecimento, antes da polarização.

Esses resultados mostram claramente que a liga tornou-se mais susceptível à corrosão após o envelhecimento, sendo essa susceptibilidade tanto maior quanto maior o tempo de envelhecimento. Para verificar a ocorrência de alterações microestruturais do material e a possível correlação delas com o ataque observado após a polarização, foram obtidas imagens de MEV/FIB das amostras

envelhecidas antes da polarização. A **Figura 7** mostra os resultados obtidos. Pode-se verificar a presença de uma fase mais clara nucleada nos contornos de grão ferrita/austenita (**Figuras 7a e 7b**), mais evidenciada na **Figura 7b**, que representa o material com maior tempo de envelhecimento. A coloração mais clara revela a presença de maiores concentrações de elementos pesados como o cromo e molibdênio, típicas de fase sigma. Chama-se a atenção da presença de algumas regiões com concentração maior de fase sigma. Esses resultados mostram que o envelhecimento causou a precipitação da fase sigma sendo a quantidade precipitada tanto maior quanto maior o tempo de envelhecimento.

Com as evidências coletadas a partir das imagens de MEV/FIB e das micrografias da **Figura 6**, pode-se concluir que a polarização causou o ataque preferencial da fase sigma, tanto nos contornos de grão ferrita/austenita como de forma localizada que ocorreu em regiões de concentração de formação dessa fase.

Finalmente, cabe mencionar que a nucleação da fase sigma ocorreu de maneira relatada na literatura, porém, com menor cinética do que a observada no diagrama TTT, apresentado na **Figura 1**, pois segundo a isoterma de 850 °C, em 20 min seriam formados 10 % de fase sigma a partir da ferrita. Os resultados mostraram que a quantidade da fase sigma não passou dos 5 %, portanto possui menor taxa de transformação do que a indicada na literatura.

4 Conclusão

Esse trabalho mostrou que as curvas de polarização potenciodinâmicas associadas à observação da superfície do material após polarização é uma ferramenta adequada para avaliar a intensidade da conhecida ação deletéria da fase sigma no desempenho dos aços inoxidáveis duplex UNS S32205, podendo ser uma ferramenta útil para verificar a susceptibilidade à corrosão desse tipo de material submetido a tratamentos térmicos capazes de provocar a formação da fase sigma.

5 Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Corrosão e Proteção por proporcionar a realização dos ensaios de metalografia e polarização. Agradecemos também ao Laboratório de Processos Metalúrgicos, principalmente à Alzira Vicente de O. Correa, por auxiliar na operação do forno de tratamento térmico.

6 Referências

- ALVAREZ-ARMAS, I.; DEGALLAIX-MOREUIL, S. **Duplex Stainless Steels**. London: John Wiley & Sons, Inc., 2009. p. 115–135.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1193**: standard specification for reagent water. West Conshohocken: ASTM International, 2001. p. 1-6.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1141**: standard practice for the preparation of substitute ocean water. West Conshohocken: ASTM International, 2003. p. 1-3.
- BAIN, E. C.; GRIFFITHS, E. Introduction to the iron-chromium-nickel alloys. **Trans. AIME**, v. 75, p. 166–213, 1927.
- BARDAL, E. **Corrosion and Protection**. Manchester: Springer, 2004. p. 53–65.
- BERGMAN, B. G.; SHOEMAKER, D. P. The Space Group of the σ -FeCr Crystal Structure. **The Journal of Chemical Physics**, v. 19, n. 4, p. 515, 1951.
- BHATTACHARYA, A.; SINGH, P. M. Electrochemical behaviour of duplex stainless steels in caustic environment. **Corrosion Science**, v. 53, n. 1, p. 71–81, 2011.
- FRANKEL, G. S. **Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection**. Material Park: ASM International, 2003. v. 13A, p. 42–60.
- GUNN, R. N. **Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1997. p. 1–49.
- JOUBERT, J. M. Crystal chemistry and Calphad modeling of the σ phase. **Progress in Materials Science**, v. 53, n. 3, p. 528–583, 2008.
- KOCIJAN, A.; DONIK, C.; JENKO, M. The Corrosion Behaviour of Duplex Stainless Steel in Chloride Solutions Studied by Xps. **Materiali in Tehnologije**, v. 43, n. 4, p. 195–199, 2009.
- SIEURIN, H.; SANDSTRÖM, R. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. **Materials Science and Engineering A**, v. 444, n. 1–2, p. 271–276, 2007.
- WAGNER, C. Passivity and inhibition during the oxidation of metals at elevated temperatures. **Corrosion Science**, v. 5, n. 11, p. 751–764, 1965.
- WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2003. p. 38–94.

Definição e preparação de corpos de prova de concreto armado destinados a ensaios acelerados de corrosão de armaduras

Definiton and preparation of test specimens intended for accelerated corrosion tests of bars for concrete reinforcement

Adriana Araujo^{a*}, José Luis Serra Ribeiro^b, Juliana Lopes Cardoso^c, Mayara Stecanella Pacheco^c, Carlos Alberto da Silva^c, Cesar Henrique Rufino^c, Marcos Vinicius da Silva Braga^c, Renata Angelon Brunelli^c, Thales Gomes Rosa^c, Zehbour Panossian^a

^a Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Programa Novos Talentos, IPT, São Paulo-SP, Brasil.

^c Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: aaraujo@ipt.br

Palavras-chave:

corrosão; armadura; concreto armado; corpo de prova; revestimento; aço inoxidável lean duplex; aço inoxidável lean duplex, aço inoxidável UNS 32604; aço inoxidável AISI 304, proteção catódica.

Keywords:

corrosion; reinforcement; reinforcement concrete; specimen; coating; lean duplex stainless steel, UNS 32604; AISI 304, cathodic protection.

Resumo

A corrosão das barras de aço-carbono do concreto armado é considerada um dos maiores problemas na durabilidade das construções civis em ambientes marinhos. Por essa razão, muitos estudos são desenvolvidos objetivando o entendimento dos mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras e a procura de métodos de mitigação desta corrosão nos referidos ambientes. Para o sucesso desses estudos, é de suma importância a definição e a preparação de corpos de prova, a serem utilizados em ensaios acelerados de corrosão, que representem as condições de instalação das estruturas armadas e da corrosividade do ambiente que se deseja explorar. Este trabalho teve como objetivo a definição e a preparação de corpos de prova de concreto armado para serem utilizados em um estudo que busca alternativas às barras de aço-carbono comum e aplicação de técnicas de proteção contra corrosão para estruturas de concreto instaladas em ambiente marinho tropical, típica da costa brasileira. Isso foi feito utilizando como referência as normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007. Ensaios preliminares foram realizados para avaliar alguns dos parâmetros propostos pelas referidas normas. Considerou-se que a realização desses ensaios foi importante para adequar as metodologias recomendadas pelas normas para os objetivos pretendidos. Os ensaios preliminares permitiram ainda planejar a logística e prever o tempo para a preparação dos 300 corpos de prova considerados necessários para o desenvolvimento do estudo pretendido. Esse elevado número foi necessário, pois foram incluídas no estudo as seguintes barras alternativas: aço-carbono revestido (zincado e zincado com revestimento epóxi), aço inoxidável AISI 304 e aço inoxidável UNS 32604 (lean duplex). Os aços revestidos

foram incluídos por serem amplamente utilizados em estruturas instaladas em ambientes sujeitos à contaminação com íons cloreto, como os ambientes marinhos, e os aços inoxidáveis por serem utilizados em obras, também nesses ambientes, mas que requerem vida útil muito longa ou há restrições de manutenção. Também para extensão da vida útil das barras de aço-carbono comuns, foram incluídos corpos de prova para a avaliação da eficiência de proteção catódica. Finalmente, corpos de prova com barras de aço-carbono comuns sem nenhuma proteção foram incluídos como referência.

Abstract

Carbon-steel-bar corrosion of reinforced concrete is considered one of the biggest problems in civil construction durability in marine environments. Thus, many studies are developed aiming at understanding bar corrosion mechanisms and at finding corrosion mitigation methods for concrete structures installed in the mentioned environments. To achieve the success in these studies, the definition and preparation of test specimens for the accelerated corrosion tests, which should represent the installed conditions and the environment corrosivity of the studied reinforced concrete, are very important. This work aimed at the definition and the preparation of reinforced concrete specimens which will be used to help find alternatives for carbon steel bars and also to use for protection-technique-efficiency evaluations of concrete structures installed in tropical marine environments, typical of Brazilian coasts. The specimens were defined based on the ASTM A955: 2015 and ASTM G109: 2007. Preliminary tests were taken to assess some of the parameters proposed by these standards. These tests were important for adapting the recommended methodologies to the proposed goals. The preliminary tests also allowed for planning the logistic and predicting the necessary time for preparing the 300 specimens necessary for the intended studies. This large number was necessary because the study included the following alternative bars: coated carbon steel (zinc coated and zinc plus epoxy dual-coated) and AISI 304 and UNS 32604 (lean duplex) stainless steels. The coated steel bars were considered in the studies because they are widely used in reinforced structures installed in chloride-contaminated environments, as marine environments. The stainless steels were also considered since they are typically used when a very long useful life is required or when there are restrictions for the structure maintenance. Test specimens were included to evaluate the efficiency of cathodic protection of carbon steel bars. Finally, protection-system-free carbon steel bars were included as a reference.

1 Introdução

O aço-carbono, quando embutido no concreto íntegro, fica protegido contra corrosão, física e eletroquimicamente. A proteção física é conferida pelo concreto de cobrimento e a proteção eletroquímica pela formação de uma camada protetora de óxidos/hidróxidos (passivação) formados na superfície do aço em contato com o concreto alcalino. Porém, a contaminação do concreto pode provocar a quebra da camada passiva, que ocorre tanto pela diminuição do pH causada pela carbonatação do concreto, quanto por sua contaminação com íons cloreto. Em ambiente marinho, o principal agente da quebra da camada passiva é a contaminação por cloretos que, quando atinge uma concentração superior a um nível crítico no concreto, desestabiliza localmente a camada passiva das armaduras e desencadeia um processo de corrosão (WANG et al., 2010; NEVILLE, 2008).

A corrosão das armaduras por contaminação com cloretos é considerada um dos maiores problemas na durabilidade das construções civis em ambientes agressivos, como os marinhos. No exterior, a mitigação dessa corrosão ou a garantia de uma vida útil elevada das estruturas de concreto instaladas nesses ambientes é feita, além da adequada especificação do concreto e da espessura de cobertura, pela adoção de materiais alternativos às barras de aço-carbono e/ou pelo emprego de técnicas de proteção das armaduras. Dentre os materiais alternativos, é comum o revestimento das barras de aço-carbono, como o de zinco e o duplex (zinco + epóxi), ou o emprego de armaduras de aços inoxidáveis.

O revestimento de zinco e o duplex atuam como barreira física e oferecem proteção por sacrifício ao aço exposto em falhas e apresentam a vantagem de custo/benefício. As armaduras de aços inoxidáveis são as preferidas quando a vida útil requerida é alta (superior a 100 anos) ou há restrições de manutenção tais como, inaccessibilidade da estrutura, custos elevados e transtornos à população (ANACO STAINLESS, 2016; ARAUJO; MOREIRA; PANOSSIAN, 2014; MAGEE; SCHNELL, 2002; MCGURN, 2016). Já a técnica de proteção catódica das barras por corrente impressa é adotada no exterior, em obras novas, como uma medida preventiva contra a corrosão e, também, em estruturas que já apresentam processo de corrosão como medida mitigadora (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2012; WANG et al., 2010; PEDEFERRI, 1996).

No Brasil, o controle da corrosão é feito essencialmente pela adequada especificação do concreto e da espessura de cobertura. Recentemente, o revestimento de zinco começou a ser utilizado no país, sendo isto possível por haver infraestrutura instalada para a produção de armaduras zincadas. Já o revestimento duplex e as armaduras de aço inoxidável não são encontrados no mercado brasileiro (ARAUJO; SILVA SOBRINHO; PANOSSIAN, 2015).

Diante desse cenário, a Petrobras solicitou um estudo para verificar a viabilidade técnica e econômica da adoção de alternativas para estender a vida útil de suas estruturas instaladas na orla brasileira. Antes de iniciar esse estudo, foi feita uma ampla pesquisa bibliográfica para verificar o estado da arte dessas alternativas (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2016). Nessa revisão, atenção especial foi dada para os tipos de corpos de prova utilizados na avaliação do desempenho de armaduras metálicas e da qualidade de concreto. Verificou-se que os trabalhos de maior relevância utilizavam corpos de prova confeccionados tendo como base as normas da ASTM, especificamente, a ASTM A955 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015) e ASTM G109 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007 - reaprovada em 2013). Esses corpos de prova são destinados a ensaios acelerados de corrosão em concreto (ensaios de desempenho acelerado). A primeira avalia o desempenho de aços inoxidáveis em concreto e a segunda avalia a influência de aditivos na corrosividade do concreto ao aço-carbono. Essas normas foram utilizadas para definição da metodologia de avaliação para alcançar os objetivos do referido estudo.

O presente artigo apresenta a definição e a preparação de corpos de prova utilizando como base as normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007, juntamente com a realização de ensaios preliminares para avaliar os parâmetros propostos pelas normas e adequar as metodologias propostas para o

estudo pretendido. Inicialmente, é apresentada uma análise dessas duas normas, visando destacar as indicações de cada uma a respeito da preparação dos corpos de prova. Em seguida, são apresentadas as especificações dos materiais utilizados e os ensaios preliminares que auxiliaram na definição dos detalhes da execução dos corpos de prova e montagem de ensaios.

2 Análise das normas ASTM quanto aos ensaios de desempenho relacionados à corrosão da armadura no concreto armado

As normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 adotam uma metodologia que tem por princípio simular uma macrocélula de corrosão em barras embutidas em concreto recém-executado e expostas aos íons cloreto.

As normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 adotam uma metodologia que tem por princípio simular uma macrocélula de corrosão em barras embutidas em concreto recém-executado e expostas aos íons cloreto.

O conceito de macrocélula fundamenta-se no mecanismo eletroquímico da corrosão de um metal que envolve a formação de células de corrosão constituídas por um anodo, onde ocorre preferencialmente a reação de oxidação ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$), e por um catodo, onde ocorre preferencialmente a reação de redução do oxigênio dissolvido na água de poro ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$), conforme ilustrado na **Figura 1a**. Uma corrente elétrica circula entre o anodo e o catodo, sendo esta composta por uma corrente eletrônica no metal, por uma corrente de transferência de cargas no anodo, por uma corrente iônica na água de poro e por uma corrente de transferência de cargas no catodo. Quando o anodo está fisicamente separado do catodo em distância macroscópica visível à vista desarmada, com dimensões em milímetros ou centímetros, como no caso dos corpos de prova a serem descritos, as células de corrosão são chamadas de macrocélulas de corrosão (ANDRADE; GARCÉS; MARTÍNEZ, 2008).

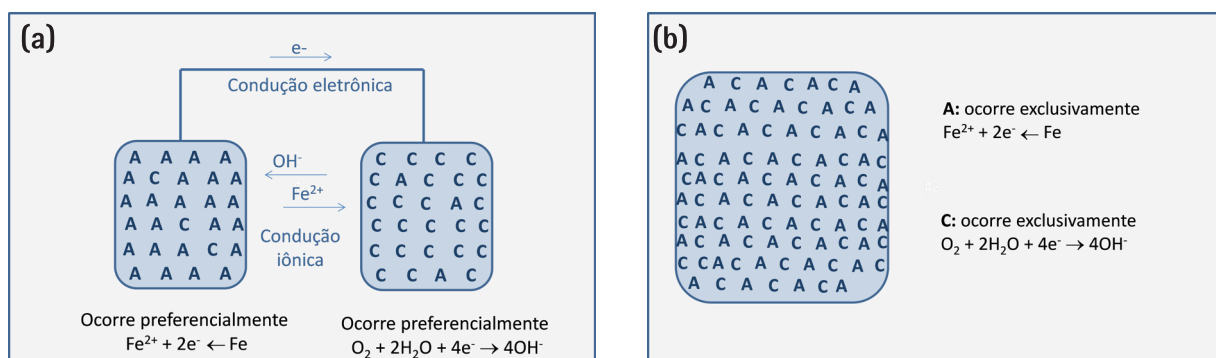


Figura 1 – Representação de uma macrocélula (a) e microcélula de corrosão (b).

É importante mencionar ainda que, quando as áreas catódicas e anódicas são imediatamente adjacentes, em distâncias microscópicas (da ordem de micrometros), essas são denominadas de microcélulas de corrosão (ANDRADE; GARCÉS; MARTÍNEZ, 2008). No anodo, ocorre puramente a reação anódica e, no catodo, puramente a reação catódica, podendo essas se alternar com o avanço da corrosão. A corrosão ocorre de maneira generalizada, estando os anodos e os catodos distribuídos aleatoriamente de maneira dinâmica.

Os corpos de provas indicados pelas normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 são blocos prismáticos de dimensões 300 mm x 180 mm x 150 mm e 280 mm x 150 mm x 115 mm, respectivamente, com uma barra inserida na parte superior do bloco e duas barras curto-circuitadas e inseridas na parte inferior, ambas paralelas à primeira (ver **Figura 2**). A barra superior é conectada às duas inferiores por meio de um resistor ($10\ \Omega$ na norma ASTM A955: 2015 e $100\ \Omega$ na ASTM G109: 2007). A macrocélula é formada entre a barra superior, que funciona como anodo, e as duas barras inferiores, que funcionam como catodo.

Conforme mostra a **Figura 2**, a concepção dos corpos de prova permite o armazenamento de uma solução de NaCl na face superior cujo objetivo é desencadear a corrosão na barra superior (anodo da macrocélula). Na ASTM A955: 2015, esse armazenamento é feito em um rebaixo, produzido durante a moldagem. Já na norma ASTM G109: 2007, isso é feito em um recipiente retangular fixado na face superior do corpo de prova. Em ambas as normas, a exposição do concreto à solução salina é feita de maneira intermitente com o objetivo de simular, de forma acelerada, a condição à qual as estruturas aéreas estão expostas em ambiente marinho (zona de respingos, zona de variação de maré e outras zonas aéreas expostas à névoa salina).

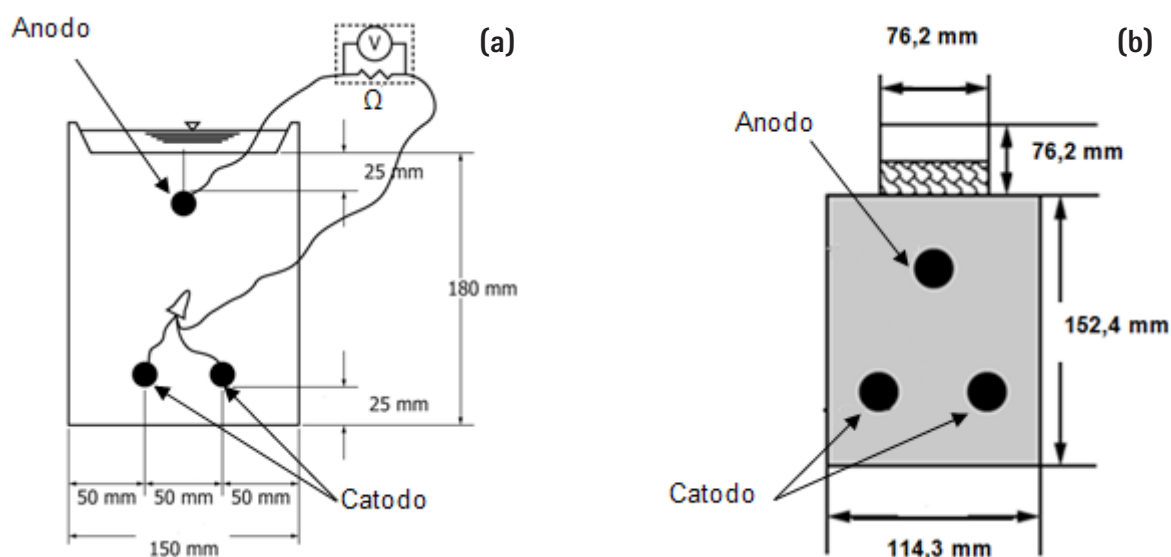


Figura 2 - Corpo de prova sugerido pelas normas ASTM A955: 2015 (a) ASTM G109: 2007 (b).

A superfície do concreto exposto e a concentração da solução salina são diferentes em cada norma. Por tratar de aços inoxidáveis que são matérias de alta resistência à corrosão, a ASTM A955: 2015 adota condições mais agressivas: solução a 15 % de cloreto de sódio e uma fissura no concreto de cobrimento, alinhada com a barra superior para diminuir o tempo para início da corrosão. Essa fissura é obtida pela inserção, na fôrma dos corpos de provas, de uma lâmina de aço inoxidável. Após o período inicial de pega do concreto, essa lâmina é removida, gerando uma fissura artificial com 0,3 mm de abertura, 150 mm de comprimento e 25 mm de profundidade. Essa norma recomenda que a lâmina seja retirada entre 8 h e 24 h após a concretagem. Na norma ASTM G109: 2007, a solução recomendada é de 3 % de NaCl e o concreto de cobrimento permanece íntegro (sem fissura) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007; 2015).

Essas normas recomendam ainda que, durante todo o ensaio, o corpo de prova fique apoiado em suportes de modo que a superfície inferior não pintada fique em contato direto com o ar atmosférico. A configuração descrita tem por objetivo o acesso facilitado de oxigênio apenas nas armaduras inferiores, permitindo a ocorrência preferencial da reação catódica da macrocélula.

A cura do concreto e o preparo dos corpos de prova são feitas também de forma distinta. A ASTM A 955: 2015 recomenda o acondicionamento dos corpos de prova por 48 h em sacos de material polimérico contendo água destilada, seguida de cura ao ar por 25 dias. Alguns dias antes do início dos ensaios de desempenho, a norma recomenda o lixamento da superfície superior dos corpos de prova e a pintura das superfícies laterais do bloco de concreto. Já a ASTM G109: 2007 recomenda 28 dias de cura em câmara úmida seguida de 14 dias em atmosfera com umidade relativa de 50 % para secagem concreto seguida da pintura das superfícies laterais do bloco. Finalmente, é feita a fixação do recipiente com silicone e pintura da superfície restante da face superior.

Em relação as barras metálicas, a norma ASTM G109: 2007 indica, ainda, a proteção das extremidades com fita isolante, similar à utilizada em processos de eletrodeposição, seguida de inserção de um tubo de neoprene e finalmente aplicação, sobre o tubo, de tinta epóxi. A norma ASTM A955: 2015, por outro lado, não cita a necessidade de revestimento das extremidades das barras.

Em ambas as normas, é recomendada a medição da intensidade da corrente da macrocélula de corrosão formada entre a barra superior e as duas barras inferiores determinada por meio da diferença de potencial medida entre as extremidades do resistor, conforme ilustrado na **Figura 2a**.

A norma ASTM G109: 2007 recomenda a medição mensal do potencial de circuito aberto em cada uma das barras dos corpos de prova, com o auxílio de um eletrodo de referência, após a desconexão do resistor.

3 Definição das características dos corpos de prova para as barras alternativas às de aço-carbono

Devido às particularidades do estudo a ser desenvolvido, optou-se por adotar o mesmo princípio de macrocélula das normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007, porém definir características do corpo de prova adequadas para contemplar toda a variedade de barras usadas, as quais estão descritas a seguir.

3.1 Configuração do corpo de prova

Para a avaliação do desempenho das diferentes barras e da técnica de proteção catódica por corrente impressa, definiu-se como corpo de prova padrão, um bloco prismático de concreto com dimensões de 400 mm x 150 mm x 150 mm. Três barras, com comprimento de 500 mm cada, foram embutidas no bloco, uma na parte superior e duas na parte inferior, com disposição triangular, descrita em ambas as normas discutidas (**Figura 3**). A espessura de cobrimento da barra superior foi fixada em 20 mm. Uma fissura artificial 0,3 mm de abertura, 260 mm de comprimento e 15 mm de profundidade foi feita na parte central da superfície superior do bloco de concreto, alinhada com a barra superior (**Figura 3b** e **Figura 3c**). Com essas dimensões, a fissura ficou posicionada a uma distância de 5 mm da barra superior.

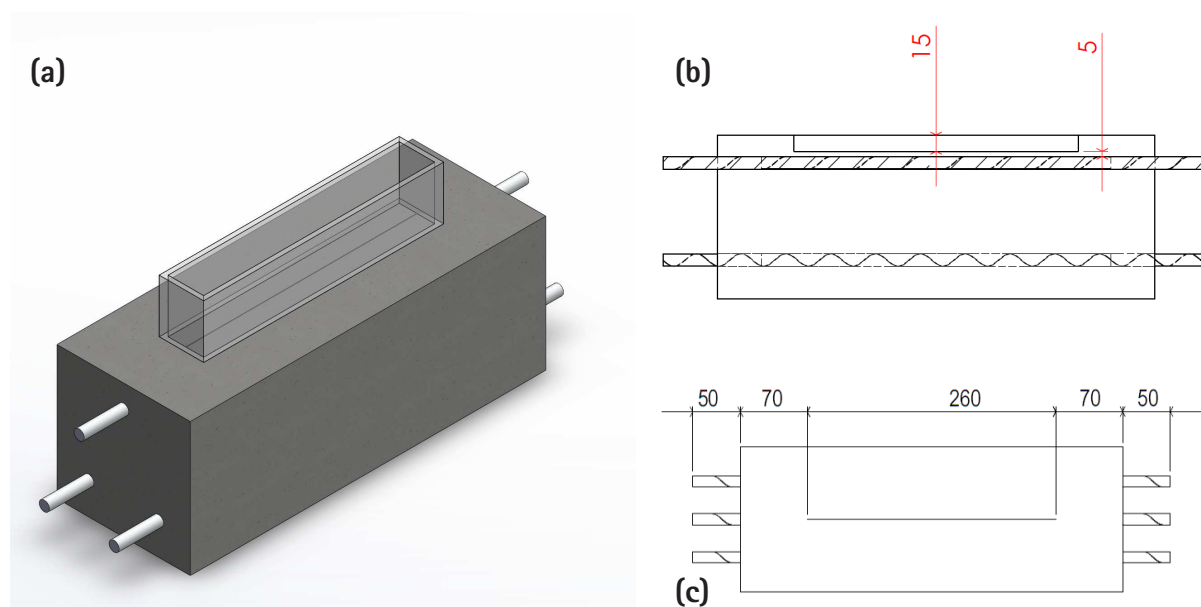


Figura 3 – Configuração do corpo de prova. As medidas apresentadas estão em milímetros.

3.2 Preparação das barras

Antes de serem embutidas no concreto, as barras passaram por um processo de preparação de superfície e fixação de contato elétrico. Esse processo foi diferente para cada tipo de barra.

Para o aço-carbono, as barras foram rebarbadas. Em uma das extremidades, foi usinado um furo centralizado para posterior conexão elétrica. Após a usinagem, as barras foram desengorduradas por imersão em desengraxante alcalino comercial (*Hepta Clean da marca Chemicals Universal*) mantido a aproximadamente 70 °C por 10 min. Após o desengraxe e lavagem em água corrente, as barras foram decapadas em ácido clorídrico concentrado até a remoção total dos produtos de corrosão. Após a limpeza, as barras foram lavadas com água e sabão, até a completa remoção do ácido. Em seguida, foram aspergidas com acetona (para acelerar a secagem) e finalmente secas com ar quente. Um fio de cobre com 1,5 mm de diâmetro foi soldado no furo usinado, usando solda de Sn/Pb e ar quente e o restante do cabo exposto foi protegido com tubo termo retrátil (**Figura 4**).



Figura 4 – Fio de cobre soldado para a conexão elétrica da barra de aço-carbono.

No caso do aço zincado, a rebarbagem e a furação foram realizadas antes da zincagem. As barras zincadas foram lavadas com água e sabão, foram aspergidas com acetona e, por fim, secas com ar quente. O fio de cobre foi fixado às barras da mesma maneira à das armaduras de aço-carbono.

Para os aços inoxidáveis AISI 304 e UNS 32604, as barras foram rebarbadas, quando necessário. Devido à maior dificuldade em soldar o aço inoxidável, nessas barras foi feito um pequeno rasgo com serra em uma das extremidades, para a conexão elétrica. Um fio com terminal olhal, para contato elétrico, foi colocado no rasgo e prensado (**Figura 5**). Por fim, as barras foram lavadas com água e sabão, aspergidas com acetona e secas com ar quente.

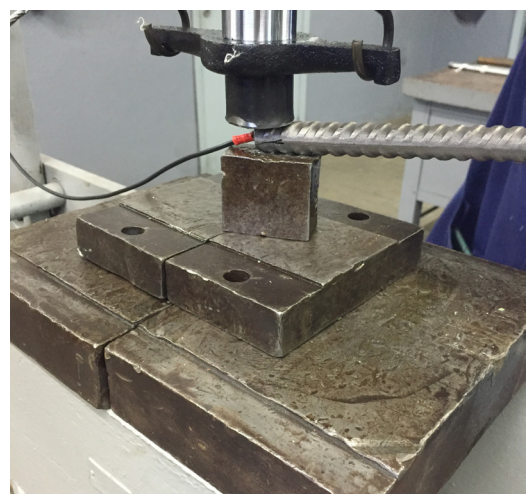


Figura 5 – Instalação do fio de cobre para conexão elétrica da barra de aço inoxidável.

Com exceção do revestimento dúplex, antes do embutimento, as extremidades das barras foram protegidas com tintas de alto desempenho (veja mais adiante), de modo a expor no concreto apenas um comprimento de 320 mm (**Figura 6**).

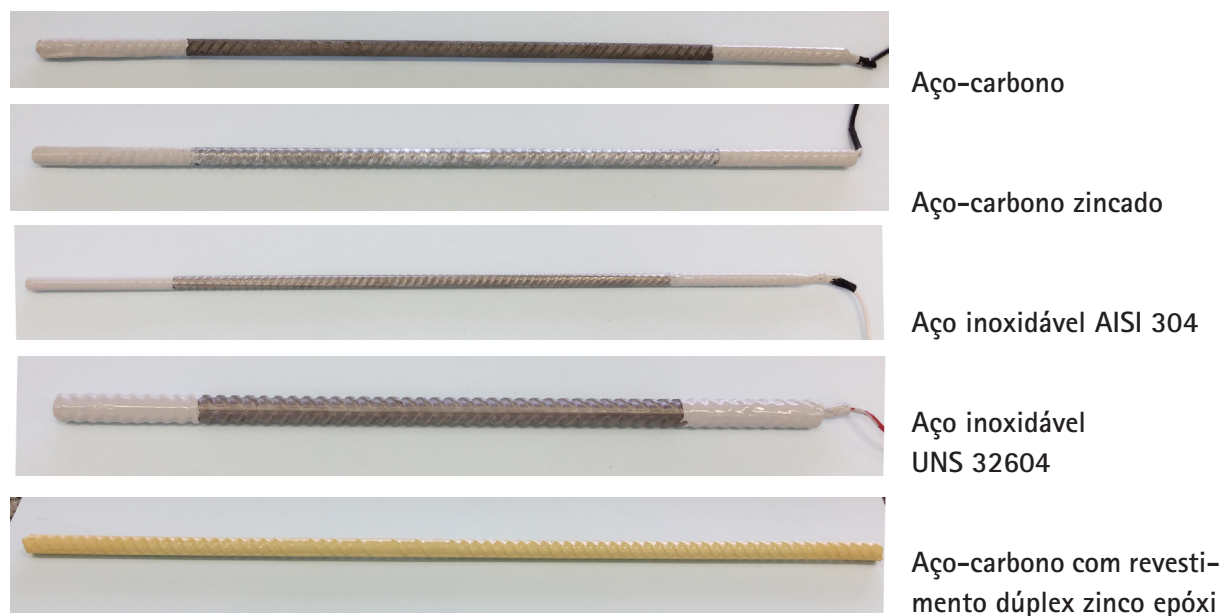


Figura 6 – Aspecto das barras estudadas prontas para serem embutidas em concreto.

Para a preservação física, as barras preparadas foram colocadas em sacos de filme polimérico com vincos feitos a quente para possibilitar a separação entre as mesmas e, posteriormente, embaladas em tubos de PVC tampados até o momento da concretagem (**Figura 7a e 7b**). Para evitar a oxidação das barras de aço-carbono, foi colocado sílica gel dentro de tubos de PVC tampados, conforme mostra a **Figura 7c**.

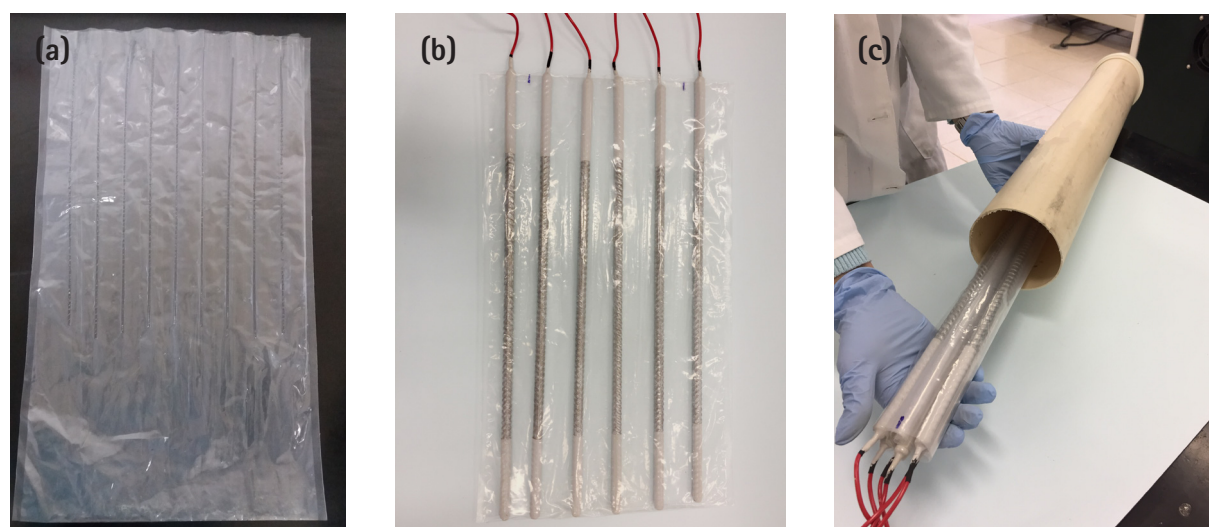


Figura 7 – Filme polimérico com vincos para separação das barras (a), barras posicionadas dentro do filme polimérico (b) barras posicionadas dentro de tubo de PVC (c).

3.3 Formação da fissura nos corpos de prova

A fissura dos corpos de prova foi feita utilizando uma lâmina de aço-carbono com alto teor de carbono (SAE 1070) temperado, com 0,3 mm de espessura, (260 ± 4) mm de comprimento e (32 ± 1) mm de altura. Optou-se por utilizar uma lâmina de aço-carbono ao invés da lâmina de aço inoxidável indicada pela ASTM A955: 2015 devido à maior facilidade de aquisição no mercado.

Conforme mencionado anteriormente, a norma ASTM A955: 2015 recomenda que as lâminas usadas para fazer as fissuras nos corpos de prova sejam retiradas do concreto entre 8 h e 24 h após a concretagem. No primeiro ensaio exploratório realizado em laboratório, as lâminas foram retiradas após 20 h. Apesar de se adotar um período 4 h inferior ao limite máximo fixado pela norma, houve grande dificuldade na remoção das lâminas, pois essas já estavam quase completamente aderidas ao concreto. Foi feito um novo ensaio com 10 lâminas parcialmente imersas (**Figura 8a**) num concreto com a mesma dosagem prevista para os corpos de prova (ver **item 3.6**). As lâminas foram retiradas periodicamente, a partir de 4 h até 24 h após a concretagem (**Figura 8b**). As lâminas retiradas nos tempos de 4 h e 6 h foram as que melhor se comportaram: saíram com facilidade, sem danificar as bordas da fissura. A partir de 7 h, teve-se dificuldade de retirar as lâminas e as bordas das fissuras começaram a quebrar e, depois de 11 h, as lâminas só saíram com auxílio de ferramentas apropriadas. Com base nesses resultados, foi decidido retirar as lâminas a partir de 4 h porque o número de corpos de prova era grande (aproximadamente 100 unidades em cada concretagem). Assim, houve tempo suficiente para retirar as lâminas de todos os corpos de prova no máximo até 6 h após concretagem.

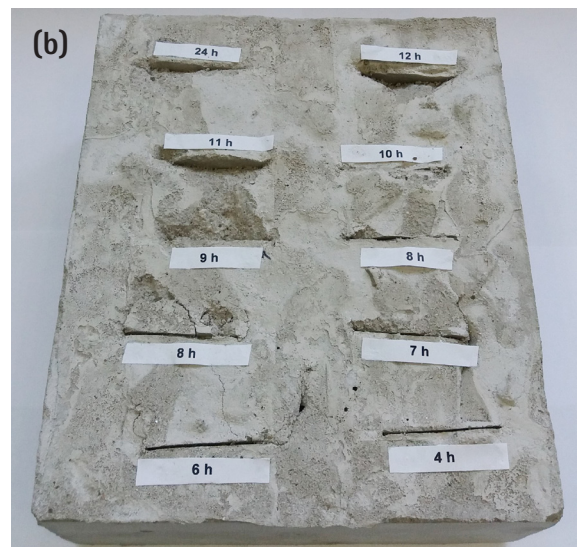
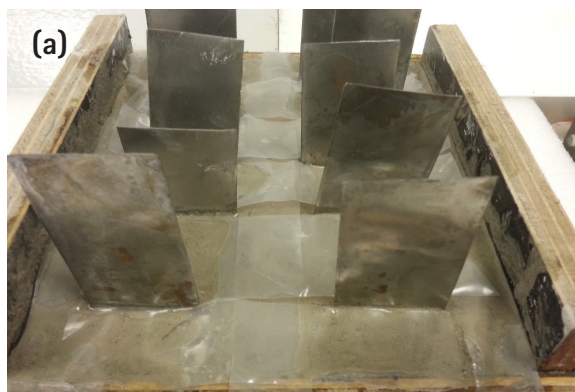


Figura 8 – Ensaio exploratório para verificação do momento adequado de retirada das lâminas, durante a cura do concreto com as lâminas (a) e após a retirada das mesmas (b).

3.4 Instalação do recipiente acrílico nos corpos de prova

Na parte superior do corpo de prova e centralizada na fissura, foi instalado o recipiente de acrílico sem fechamento no fundo, com dimensões 270 mm x 60 mm x 56 mm. Esse recipiente foi utilizado para a solução salina usada para a contaminação do concreto com íons cloreto. Optou-se pelo

emprego do recipiente retangular apresentado na norma ASTM G109: 2007, ao invés do rebaixo apresentado na ASTM A955: 2015, uma vez que, na concepção apresentada nessa norma, o corpo de prova não apresenta bordas frágeis, que poderiam ser danificadas durante sua desforma.

A fixação do recipiente de acrílico no concreto foi feito com cola de silicone diretamente sobre o concreto conforme recomenda a ASTM G109: 2007. Em ensaios preliminares realizados em laboratório, verificou-se que, quando o recipiente de acrílico era fixado diretamente na superfície do concreto, ocorria vazamento da solução salina através dos poros do concreto que funcionavam como vasos comunicantes. Isso foi percebido pela formação de poças de água ao redor do recipiente, conforme mostra na **Figura 9a**. Após várias tentativas, esse problema foi resolvido com a pintura da superfície superior dos corpos de prova antes da fixação do recipiente de acrílico. Assim, a pintura (ver **item 3.5**) foi feita nas laterais dos blocos de concreto (conforme recomendam ambas as normas) e na superfície superior dos corpos de prova, deixando sem pintura apenas um retângulo ao redor da trinca com as dimensões internas do recipiente de acrílico, conforme ilustrado na **Figura 9b**. Após a cura da tinta, o recipiente de acrílico foi fixado sobre a camada de tinta, usando cola de silicone, conforme ilustrado na **Figura 9c**.

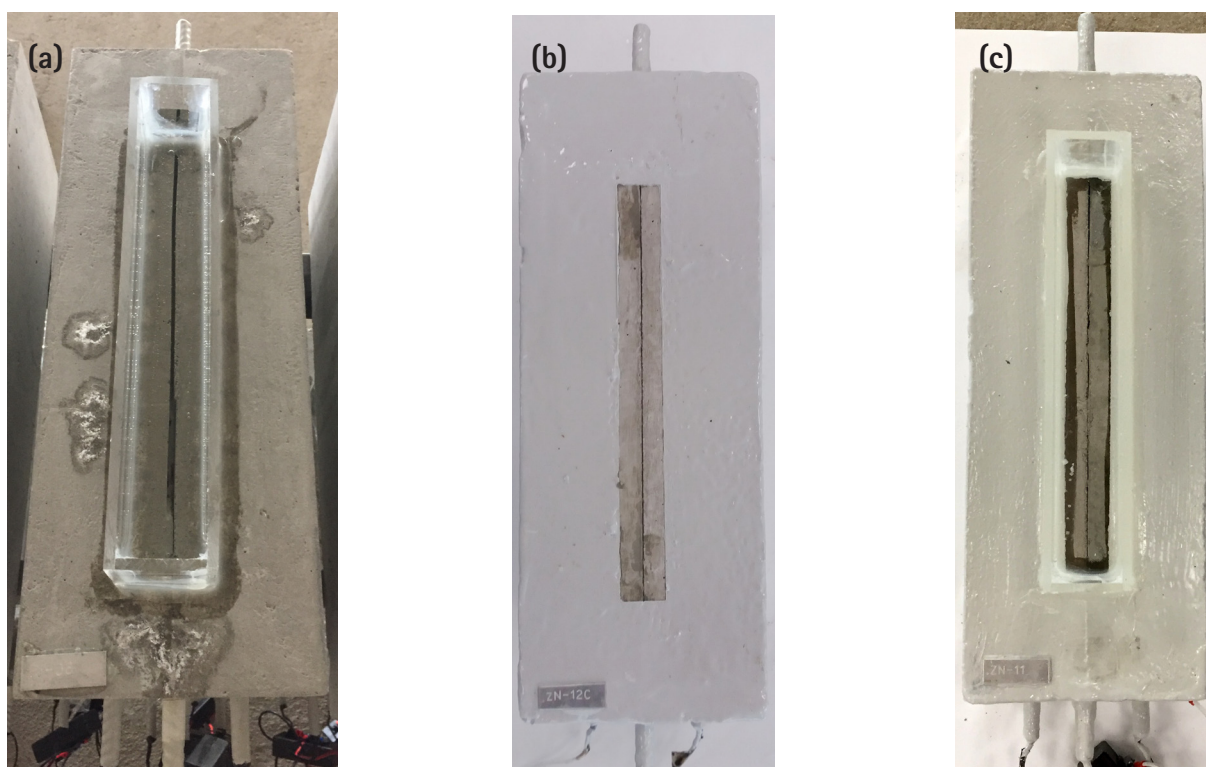


Figura 9 – Corpo de prova usado no ensaio preliminar em que houve vazamento da solução salina (a) pintura da superfície superior do corpo de prova (b) e corpo de prova pintado e com o recipiente acrílico instalado (c).

3.5 Pintura dos corpos de prova

A tinta utilizada para revestir os corpos de prova foi selecionada criteriosamente. Isso porque, em trabalho anterior (ARAUJO, 2004) foi verificado que qualquer elemento parcialmente embutido no concreto, como as barras dos corpos de prova em desenvolvimento, constituía uma fonte potencial de ingresso de agentes no concreto, pois as interfaces aço revestido/concreto funcionavam como caminhos preferenciais. Verificou-se que a penetração de água contaminada com íons cloreto na interface concreto/barras de aço-carbono revestido era consequência do baixo desempenho do revestimento aplicado nas barras e falha de aderência da tinta ao concreto. Nesse mesmo trabalho, foi verificada também a necessidade de ter-se um número grande de corpos de prova de concreto armado para ensaios de desempenho, pois a reprodutibilidade era baixa em razão da heterogeneidade intrínseca do concreto.

Sendo assim, foram realizados ensaios preliminares para avaliar vários revestimentos de alto desempenho capazes de impedir a entrada de contaminação pela interface barra/concreto e pela superfície do concreto pintado. Para isso, foram preparados corpos de prova com uma única barra de aço-carbono. As extremidades das barras e as faces laterais menores dos blocos de concreto foram protegidas com os revestimentos em avaliação. Optou-se por não utilizar as três camadas de revestimentos das barras indicadas na norma ASTM G109: 2007, pois a diferença entre o diâmetro da barra revestida e não revestida seria minimizado. Uma maior diferença entre os diâmetros poderia dificultar a aderência do concreto em toda a barra.

Os blocos de concreto foram expostos em uma câmara de névoa salina (**Figura 10**), de maneira alternada com períodos fora da câmara para secagem. Após um mês de exposição na câmara, o concreto foi fraturado e a superfície fraturada foi aspergida com uma solução de nitrato de prata para revelar a presença de cloretos (ARAUJO, 2004).

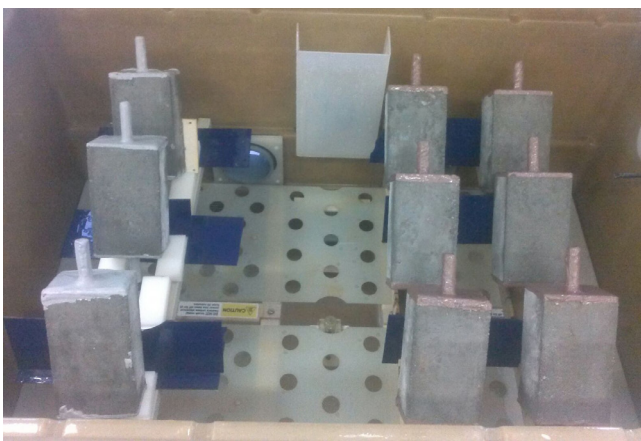


Figura 10 – Ensaio preliminar para a seleção da tinta de proteção das extremidades das barras e da superfície do concreto. Blocos posicionados na câmara de névoa salina, com indicação da extremidade da barra e da face do bloco pintadas.

Para todos os revestimentos estudados, o exame visual da superfície aspergida mostrou que o concreto das vizinhanças da interface barra/concreto e a camada de concreto abaixo da superfície pintada ficaram escuras, o que indicava que a solução salina não atingiu essas áreas. As regiões abaixo do concreto não pintado ficaram brancas, quando em contato com a solução de nitrato de prata, indicando contaminação com cloretos.

Como todos os revestimentos ensaiados apresentaram desempenho satisfatório como barreira à entrada de solução salina no concreto, optou-se pela tinta de menor viscosidade e, portanto, de mais fácil aplicação, que foi a Resicor E tipo II, da marca Resinar.

3.6 Definição do traço de concreto e das fôrmas dos corpos de prova

A especificação do traço de concreto utilizado na confecção dos blocos levou em consideração a disponibilidade no mercado do tipo de cimento com características mais próximas àquelas indicadas pelas normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007. Segundo a ASTM G109: 2007, a dimensão dos agregados deve estar entre 9,5 mm e 19 mm. Optou-se pelo uso de agregados de até 9,5 mm para ser compatível com cobrimento de 20 mm adotado para a armadura superior. O traço utilizado incluiu 420 kg/m³ de cimento CP V ARI, 30 kg/m³ de metacaulim, 225 kg/m³ de areia de quartzo, 439 kg/m³ de areia artificial, 924 kg/m³ de brita 0 (4,8 mm a 9,5 mm), 0,65 L/m³ de glemium e 225 kg/m³ de água. A relação água/cimento foi de 0,535 e o abatimento foi de (100 ± 20) mm. Adotou-se cura por quatro semanas em câmara úmida e exposição à atmosfera natural interna por quatro semanas para a secagem dos corpos de prova.

As fôrmas dos corpos de prova foram confeccionadas usando folhas de compensado naval de 17 mm de espessura, impermeabilizado, para permitir boa aparência aos corpos de prova e o máximo de reaproveitamento, pois foram feitas três concretagens de 100 corpos de provas cada, num total de 300 corpos de prova.

Primeiramente, as folhas foram cortadas usando um único molde, para uniformizar as dimensões das fôrmas. Após o corte, furos foram feitos nas peças destinadas às laterais das fôrmas para posicionar as três barras de maneira padronizada dentro de cada prova de prova. Comenta-se que o fundo da fôrma foi projetado bipartido, de modo que se pudesse inserir a lâmina de aço-carbono, usada para a formação da fissura no corpo de prova (**Figura 11a**). Essa prática garantiu o alinhamento da fissura sobre a barra superior. Em seguida, as fôrmas foram montadas já com as lâminas posicionadas, usando parafusos adequados (**Figura 11b**).

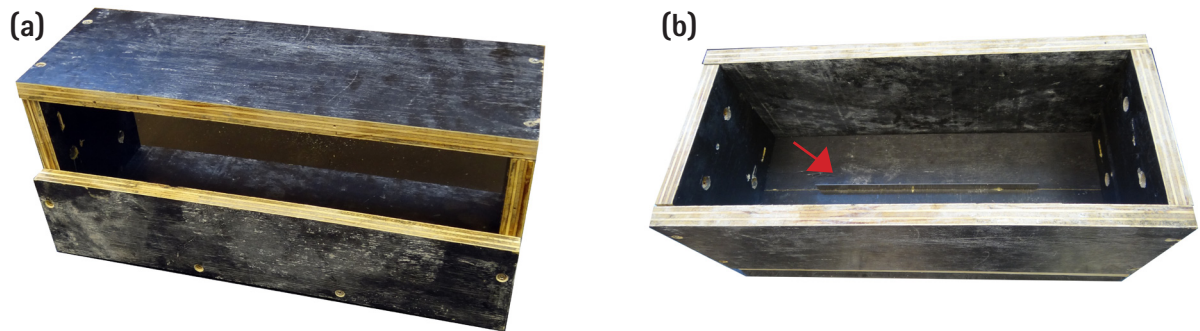


Figura 11 – Fôrmas dos corpos de prova, mostrando o fundo bipartido parcialmente montado (a) e lâmina posicionada do fundo montado (b).

3.7 Instalações elétricas

Antes do uso dos corpos de prova, um resistor foi inserido entre a barra superior e as barras inferiores curto-circuitadas, de modo a ser possível medir a corrente de macrocélula que circula entre a armadura superior e as duas armaduras inferiores. A ligação elétrica entre as barras foi feita de modo a ser possível, quando necessário, desconectar uma das outras para que se pudesse medir o potencial de circuito aberto individual. Para isso, foi utilizado um borne de pressão com cinco entradas, conforme mostrado na **Figura 12a**.

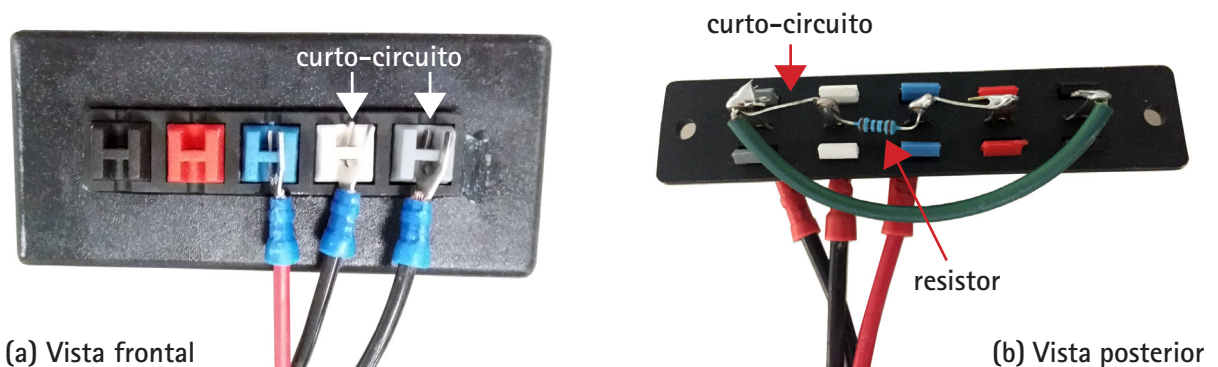


Figura 12 – Borne de pressão utilizado para curto-circuitar as barras inferiores e ligá-las à barra superior por meio de um resistor.

O resistor foi posicionado na parte posterior do borne (**Figura 12b**) entre o terminal azul (destinado à barra superior) e os terminais cinza e branco (destinados às barras inferiores). Os terminais vermelho e preto serão utilizados como contatos do multímetro para a medida da diferença de potencial no resistor. O resistor utilizado foi de filme metálico com resistência de $100 \Omega \pm 1 \%$, conforme recomendado pela ASTM G109: 2007.

4 Definição das características dos corpos de prova para sistemas de proteção catódica por corrente impressa

A proteção catódica por corrente impressa é um método de controle da corrosão que consiste em polarizar a estrutura a se proteger, tornando-a o catodo de uma célula eletroquímica. Para isso, um anodo inerte é instalado na superfície do concreto e uma fonte de corrente é utilizada para injetar uma corrente entre a armadura e o anodo de forma a polarizar catodicamente a armadura. A polarização catódica diminui consideravelmente a corrosão em curso das armaduras de obras existentes e de evitar início da corrosão das armaduras de obras novas (BEAMISH; EL-BELBOL, 1998).

Para os ensaios acelerados destinados ao estudo da eficiência de proteção catódica, foi adotada a mesma concepção de corpos de prova descrito no **item 3.1**, com algumas modificações. Para permitir a instalação do sistema de proteção catódica, duas fitas Ti/MMO^a foram embutidas na superfície superior dos blocos de concreto para serem usadas como anodos inertes para o sistema de proteção catódica, conforme mostra a **Figura 13a**. Cita-se que esse tipo anodo é o mais utilizado em sistemas de proteção catódica por corrente impressa de estruturas de concreto (DAVIES, 1998; DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG, 2012).

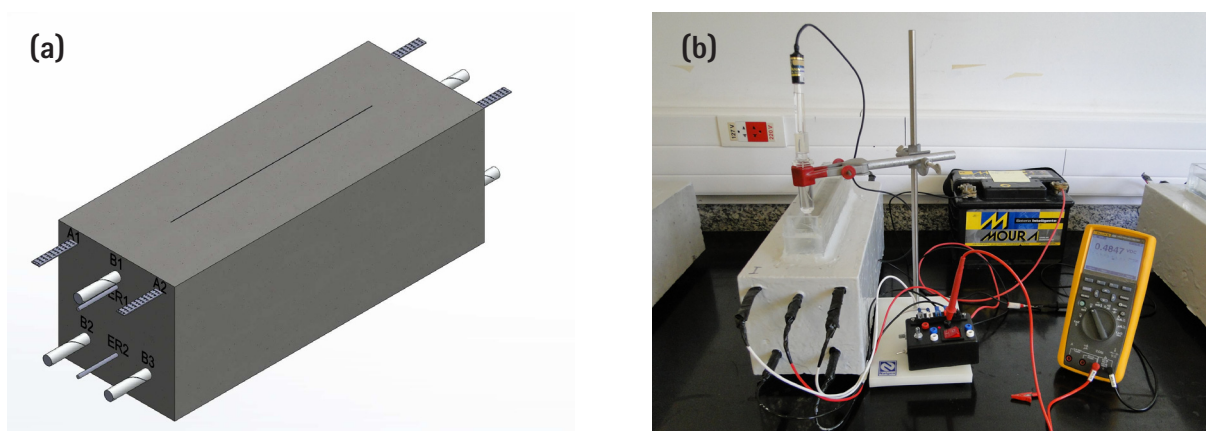


Figura 13 - Corpo de prova com anodos inertes e eletrodos de pseudorreferência, ambos de Ti/MMO, para os ensaios de proteção catódica por corrente impressa (a) e sistema de proteção catódica montado em ensaio preliminar (b).

^a Ti/MMO - titânio coberto com uma mistura de óxidos de metais nobres (irídio, rutênio e cobalto), do inglês *mixed metals oxides* (V&C Cathodic Protection, 2010).

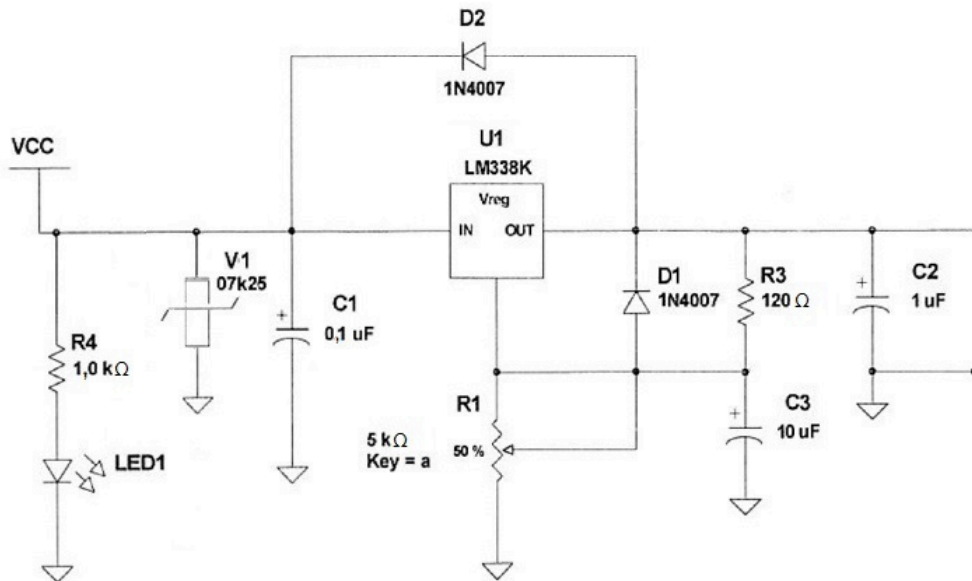
Adicionalmente, foram embutidos dois fios de Ti/MMO no corpo de prova para serem usados como eletrodo de pseudorreferência (BERTOLINI et al., 2009; DUFFÓ; FARINA; GIORDANO, 2009). Um dos fios foi instalado sob a barra superior e, outro, entre as duas barras inferiores (**Figura 13a**). O objetivo do uso desses fios é para o ajuste e o monitoramento do potencial de proteção catódica aplicado na barra superior de aço-carbono do corpo de prova.

Ensaio preliminares foram realizados para o estabelecimento das condições dos ensaios de proteção catódica (**Figura 13b**), incluindo o sistema elétrico de alimentação, o sistema elétrico de medição de potencial e o estabelecimento do potencial inicial. Para isso, foi montado um sistema de proteção catódica com uma única fonte de tensão (bateria) para atender a demanda de corrente de proteção em dois corpos de prova, sendo que o potencial aplicado em cada corpo de prova era controlado individualmente com o uso de um potenciômetro linear (resistor ajustável linearmente posicionado em série com o ensaio, com função de divisor de tensão).

Durante o ensaio, verificou-se a impossibilidade de controle individualizado dos ensaios, pois houve aumento do potencial aplicado em um dos corpos de prova quando era feito o desligamento do outro. Com isso, somente com o desligamento geral do sistema era possível fazer leituras adequadas do potencial de proteção assumido pelas barras de cada corpo de prova. Além disso, observou-se que o potencial necessário para atendimento aos critérios de proteção catódica era muito baixo, requerendo um ajuste fino que era impossível fazer por meio do sistema inicialmente proposto.

Face ao exposto, foi proposto um novo sistema de controle do potencial dos corpos de prova com uso de um regulador ajustável (LM338T), que permite o ajuste do potencial de saída entre 1,2 V até aproximadamente o potencial da bateria, com corrente de até 5 A, em cada corpo de prova. O circuito elétrico do sistema montado está apresentado na **Figura 14a**. O projeto desse circuito foi baseado em modelos de fontes retificadoras ajustáveis para bancada, em que o regulador (LM338T) é responsável pelo controle da tensão de saída da fonte. Capacitores de acoplamento (C1, C2 e C3) e diodos (D1 e D2) foram incluídos conforme recomendação do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 1998).

(a)



(b)

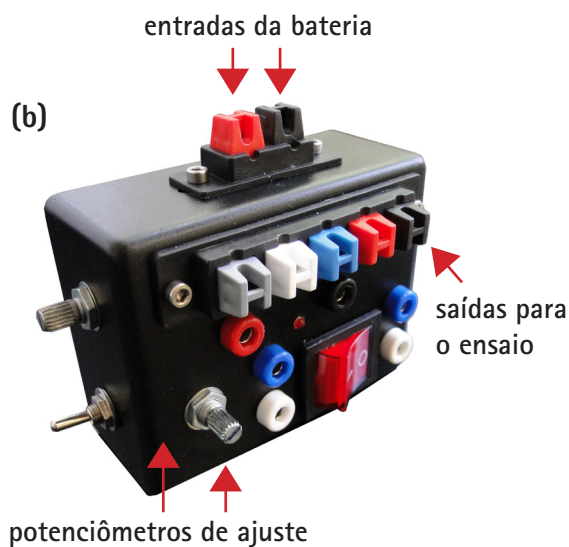


Figura 14 – Circuito elétrico (a) e dispositivo de controle individual (b) do potencial aplicado nos corpos de prova de proteção catódica.

Para que fosse possível o controle de potenciais abaixo de 1,2 V, manteve-se o potenciômetro anteriormente utilizado, agora na saída do circuito regulador (Figura 14b). Com o uso do circuito regulador individualizado, tornou-se possível fazer o desligamento individual para monitoramento de potencial, sem interferências mútuas.

5 Execução dos corpos de prova

5.1 Concretagem dos corpos de prova

Devido à grande heterogeneidade do concreto, deve-se produzir corpos de prova em quantidade suficiente para se verificar uma tendência do processo corrosivo. No estudo de desempenho conduzido, estabeleceram-se doze corpos de prova de cada material da armadura ou condição de ensaio, de modo a obter maior confiabilidade nos resultados. Foram realizadas três concretagem de 100 corpos de prova, totalizando 300 corpos de prova.

Antes da concretagem, as fôrmas, com a lâmina de formação de fissuras já instalada, foram untadas com desmoldante para facilitar a desforma e evitar a aderência do concreto (**Figura 15a**). Em seguida, as barras foram desembaladas e posicionadas nos furos das formas (**Figura 15b**).

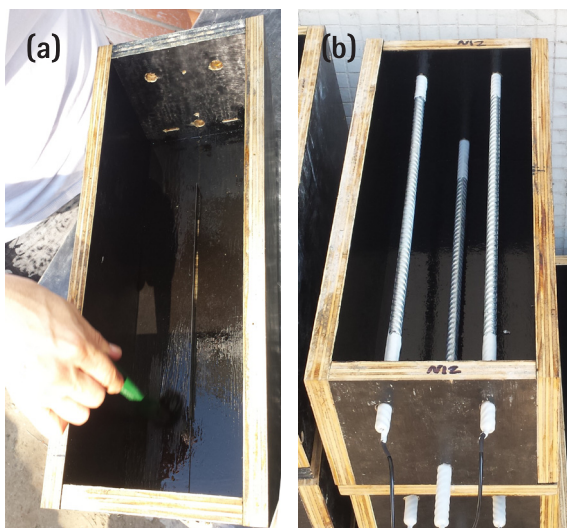


Figura 15 – Preparação das formas antes da concretagem, com a aplicação de desmoldante (a) e o posicionamento das barras (b).

Foi utilizado concreto usinado com o traço definido em 3.6. As fôrmas foram preenchidas com concreto usinado até a metade da sua altura e colocadas em mesa vibratória por 30 s com uma amplitude de 0,15 mm e frequência de 60 Hz (**Figura 16a**). Após essa etapa, as formas foram preenchidas com o restante do concreto até a borda superior, tendo sido submetidas à vibração novamente e, em seguida, a superfície do concreto foi uniformizada com uma colher de pedreiro (**Figura 16b**).

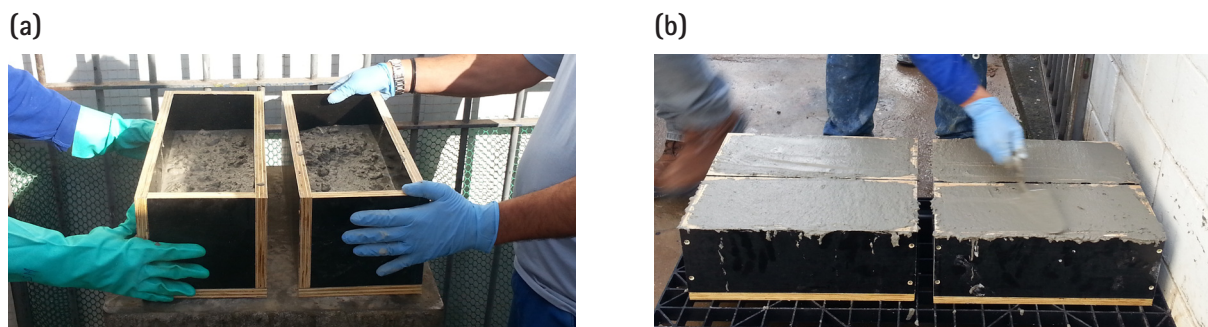


Figura 16 – Vibração da fôrma após o preenchimento parcial do corpo de prova (a) e acabamento da superfície do concreto (b).

As lâminas de fissura foram retiradas a partir de 4 h após a concretagem, por meio da retirada da metade do fundo da forma para sua parcial exposição. Para essa remoção, utilizou-se alicate torquês. Decorridas 24 h da concretagem, os corpos de prova foram desformados e levados para cura em uma câmara úmida com umidade relativa de 100 % por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram expostos ao ar atmosférico em ambiente fechado por quatro semanas.

5.2 Preparação dos corpos de prova para início dos ensaios de desempenho

Na segunda semana de secagem, as superfícies laterais e superior do concreto foram lixadas com lixa ferro de granulometria P36 (**Figura 17a**). Na terceira semana, as superfícies laterais e superior dos corpos de prova foram pintadas com a tinta epóxi de alto desempenho (**Figura 17b**), com exceção das vizinhanças da fissura conforme mencionado no **item 3.3**. Somente a face superior dos corpos de prova usados para a avaliação de proteção catódica foram pintados. Após a cura da tinta, os recipientes de acrílico foram fixados com silicone neutro. Após a cura do silicone, os circuitos elétricos foram instalados e os corpos de prova foram transportados ao local onde iriam ser realizados os ensaios de desempenho (**Figura 17c**).

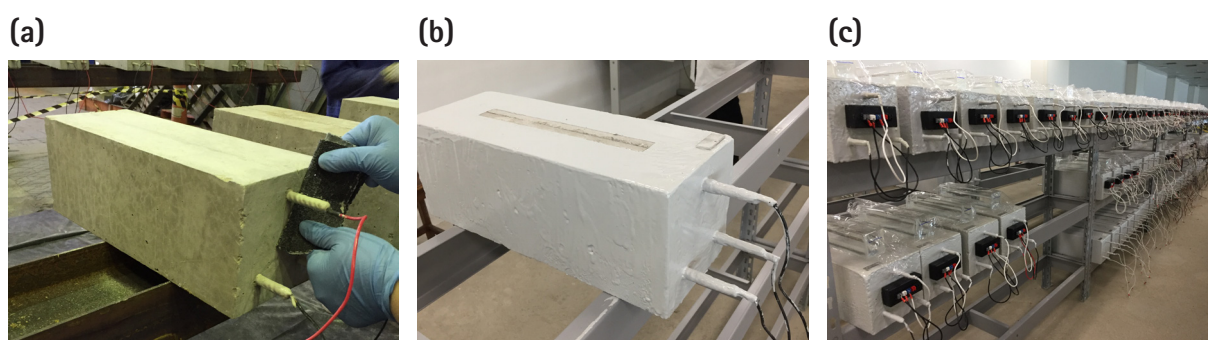


Figura 17 – Preparação dos corpos de prova para os ensaios de desempenho: lixamento dos corpos de prova (a), corpos de prova após a pintura (b) e corpos de prova prontos para o início dos ensaios de desempenho (c).

6 Conclusões

A consulta às ASTM A955: 2015 3e ASTM G109: 2007 foi essencial para a definição dos corpos de prova destinados a ensaios acelerados de desempenho de barras de concreto armado. A realização dos ensaios preliminares auxiliou na identificação de possíveis problemas que poderiam ocorrer tanto na preparação dos corpos de prova como durante a realização dos próprios ensaios de desempenho. Destaca-se como principais problemas, o tempo de retirada das lâminas usadas na formação de fissuras artificiais, que poderia gerar a perda total dos corpos de prova, e o vazamento da solução salina pelo concreto, que poderia contaminar o concreto de maneira não prevista, introduzido mais um parâmetro para a baixa reprodutibilidade dos ensaios em concreto. Como exemplo de problema do sistema de proteção catódica, destaca-se o circuito elétrico proposto inicialmente que, se não corrigida, que poderia comprometer também a reprodutibilidade.

7 Agradecimentos

Agradecemos à Arminox pelas amostras de barras AISI 304, ao ICZ e à Zink Power pela zincagem por imersão a quente das barras de aço-carbono e à Gerdau pelas amostras da barra com revestimento duplex.

8 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G109: standard test method for determining effects of chemical admixtures on corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments. West Conshohocken: ASTM, 2007. 6 p. (Reapproved 2013).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A955: deformed and plain stainless-steel bars for concrete reinforcement. West Conshohocken: ASTM, 2015. 14 p.

ANACO STAINLESS. Experts in Stainless Steel for Engineering and Construction. Stainless steel reinforcing and related accessories. Disponível em: <<http://www.anacotrading.com/rebar.htm>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

ANDRADE, C.; GARCÉS, P.; MARTÍNEZ, I. Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide. Corrosion Science, v. 50, n. 10, p. 2959-2964, 2008.

ARAUJO, A. Estudo para o estabelecimento de metodologia de seleção de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos. 2004. 391 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia e Construção de Edifícios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARAUJO, A.; MOREIRA, A. R.; PANOSSIAN, Z. Extensão da vida útil das estruturas de concreto com uso de armaduras de aço-carbono revestidas ou de aço inoxidável. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CORROSÃO, INTERCORR, 2014, Fortaleza. Proceedings... Rio de Janeiro: ABRACO, 2014. 15 p.

ARAUJO, A.; SILVA SOBRINHO, P.; PANOSSIAN, Z. Estruturas zincadas por imersão a quente em concreto armado. *Corrosão e Proteção*, v. 55, n. 12, p. 18-254, fev./mar. 2015. 7 p.

BEAMISH, S.; EL-BELBOL, S. Appraisal of corrosion-damaged structures. In: CHESS, P. M. (Ed.). *Cathodic protection of steel in concrete*. London: E & FN Spon, 1998. p. 30-31

BERTOLINI, L.; BOLZONI, F.; GASTALDI, M.; PASTORE, T.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E. Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete. *Electrochimica Acta*, v. 54, p. 1452-1463, 2009.

DAVIES, K. Impressed current cathodic protection systems for reinforced concrete. In: CHESS, P. (Ed.). *Cathodic protection of steel in concrete*. London: E & FN SPON, 1998.

DUFFÓ, G. S.; FARINA, S. B.; GIORDANO, C. M. Characterization of solid embeddable reference electrodes for corrosion monitoring in reinforced concrete structures. *Electrochimica Acta*, v. 54, p. 1010-1020, 2009.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 12696: cathodic protection of steel in concrete. Brussels: DIN, 2012. 38 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Tecnologias para novos projetos e prolongamento de vida útil de armaduras de concreto armado. São Paulo: IPT, 2016. 136 p.

MAGEE; J. H.; SCHNELL, R. E. Stainless steel rebar for concrete reinforcement: an update and selection guide. *Advanced Materials and Process*, p. 1-3, Oct. 2002.

MCGURN, F. Stainless steel reinforcing bars in concrete. Disponível em: <www.americanarminox.com/NiDi_Rpt.-_Schaffhausen_Bridge_LCC.pdf>. Acesso em: Abril de 2016.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 4th ed. Harlow: Pearson Education, 2008.

PEDEFERRI, P. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 5, p. 391-402, 1996.

TEXAS INSTRUMENTS. LM138/LC338 – 5-Amp adjustable regulators. maio de 1998. Revisado em abril de 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2016.

V&C CATHODIC PROTECTION. Cathodic protection of reinforcement structures. Pressbaum: V&C, 2010. 12 p. Disponível em: <http://www.vc-austria.com/fileadmin/media/downloads/broschueren/englisch/vc_reinforced_concrete_protection.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2016.

WANG, X. et al. Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure – part 1: mechanisms, practices, modeling and simulations – a review. Canberra: CSIRO, 2010. 84 p.

An analysis of superplastic forming to manufacture aluminum and titanium alloy components

Uma análise da conformação superplástica na fabricação de componentes de ligas de alumínio e de titânio

Daniel Almeida Pereira^{a*}, Mario H. F. Batalha^a, André F. Carunchio^a, Hugo Borelli Resende^b

Abstract

Some alloys with fine grain size can present, under certain conditions, a very high ductility and large deformations before rupturing occurs - a condition known as superplasticity. Superplastic forming is a technique that takes advantage of this material's behavior and consists of heating a metallic blank up to a suitable temperature and blow forming it under gas pressure into a die. There is a growing interest in this manufacturing process in many different areas, such as aeronautical, automotive and medical, due to the possibility of manufacturing complex, lightweight geometries and strong thin shell parts. In this study, analytical approach is used to predict the optimum gas pressure for forming the blank, in order to maintain a controlled strain rate, ensuring superplastic behavior. Two domes are manufactured using aluminum and titanium to test the pressure curves and to understand the phenomena related to superplastic forming.

Resumo

Algumas ligas com tamanho de grão pequeno podem apresentar, sob certas condições, uma alta ductilidade e grandes deformações antes da ruptura, uma condição conhecida como superplasticidade. A conformação superplástica é uma técnica que tira vantagem desse comportamento do material, e consiste em aquecer um *blank* metálico até uma temperatura adequada e conformá-lo em uma matriz através do esforço gerado por um gás sob pressão. Existe um crescente interesse nesse processo de manufatura em diferentes setores da indústria, como a aeronáutica, automotiva e médica, devido à possibilidade de fabricação de cascas metálicas finas de geometria complexa, leves e resistentes. Nesse trabalho,

^a Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil.

^b Laboratório de Estruturas Leves, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil

*E-mail: danielpe@ipt.br

Keywords:

superplasticity, superplastic forming, lightweight structures.

Palavras-chave:

superplasticidade, conformação superplástica, estruturas leves.

uma abordagem analítica é utilizada para obter o ciclo de pressão que conformará o *blank*, com o intuito de manter uma taxa de deformação controlada, assegurando assim um comportamento superplástico. Dois domos são fabricados em alumínio e titânio, para testar as curvas de pressão e entender os fenômenos relacionados com a conformação superplástica.

1 Introduction

The superplastic process (SPF) is a forming technique useful for manufacturing structural components with a complex shape, especially for metal alloys such as titanium, magnesium and aluminum. It is useful because the materials, when subjected to the superplastic process, present the ability to undergo exceptionally large tensile strain prior to failure when they are deformed under a limited range of conditions. Under uniaxial tension, elongation in excess of 200% is usually indicative of superplasticity (cf. **Figure 1**). Nevertheless, numerous metallic materials can show elongations of 100% - 500% or more (GIULIANO, 2011). **Figure 1** shows the difference between plastic and superplastic deformation; the first presents the initiation and propagation of necking, resulting in failure in opposition to the superplastic deformation, and such behavior is responsible for ensuring high-value elongations.

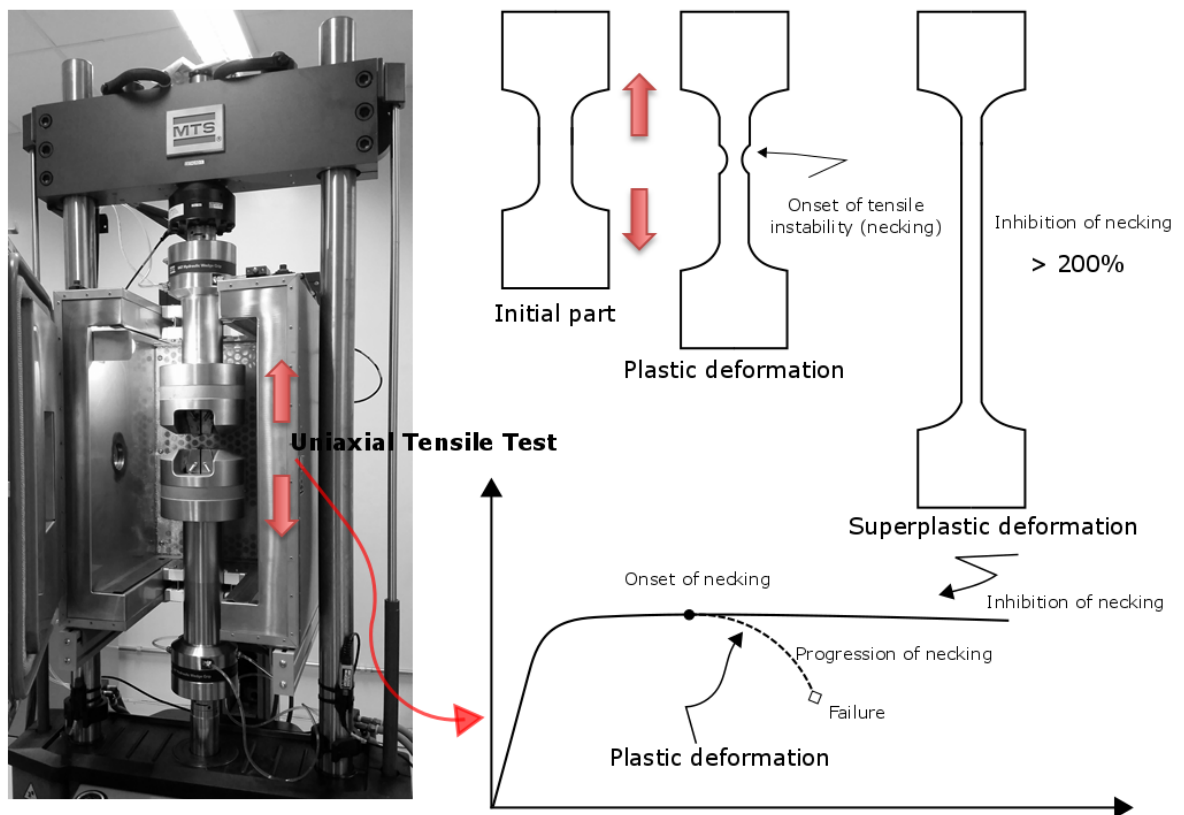


Figure 1 - Schematic representation of the difference between plastic and superplastic forming regarding uniaxial tensile analysis.

The blow forming process is an example of the technique to apply SPF, which consists of a single sheet laid on a female die which is then subjected to gas pressure, resulting in a formed part with the die configuration (cf. **Figure 2**). In **Figure 2**, one can see that there is one female die (lower die) and a counter matrix (upper die) responsible for creating a clamp to avoid the exit of gas. The stages of the process are as follows (a) firstly, the material sheet is inserted between both dies, (b) secondly, forming under gas pressure takes place, (c) then the final geometry of the sheet is completed, (d) finally the finished part is removed from the matrix and a new process cycle can start.

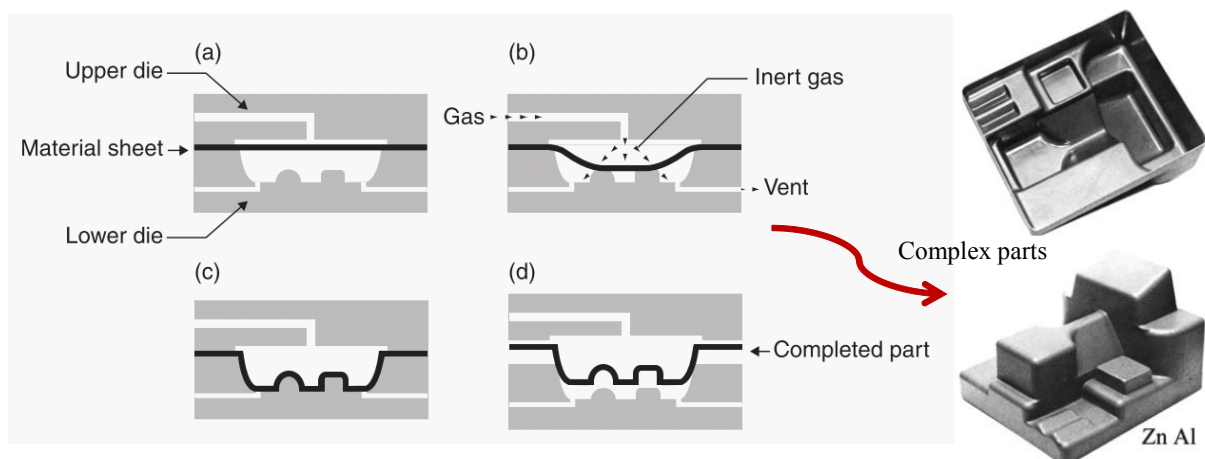


Figure 2 – The blow forming process: (a) initial flat sheet inserted between the upper and lower dies; (b) progression of forming under gas pressure; (c) final shaped part in contact with the lower die; and (d) removal of the part.

Adapted from Barnes (2007) and Giuliano (2011).

There are three primary conditions necessary for achieving the superplastic condition: (I) the temperature, (II) the strain rate and (III) the grain size of the alloy. The process temperature is in the order of $\sim 0.5T_m$, where T_m is the absolute melting temperature of the material. Furthermore, the superplastic behavior only occurs in a narrow range of strain rate, usually between $10^{-4} s^{-1}$ and $10^{-3} s^{-1}$. Finally, the microstructure should have a fine and a stable grain size. Thus, the grain sizes used for materials in the superplastic forming industry are generally in the range of $2 \mu m - 10 \mu m$. This requirement exists due to the physical behavior of the process, obtained owing to the occurrence of intensive grain boundary sliding (GBS) which is believed to be the principal deformation mechanism (ALABORT et al., 2016). GBS is well explained by KAIBYSHEV (2002), and it is associated with a series of accommodation mechanisms such as grain boundary migration, grain rotation, recrystallization, diffusional mass transport and slip in grains (SIENIAWSKI; MOTYKA, 2007) which may depend on important alloy characteristics such as phase architecture and grain morphology. Explained simply, the basic difference between plastic deformation and superplastic deformation is shown in **Figure 3**.

The main advantage of the SPF process is its capacity to produce complex and multiple parts in one operation with an excellent surface finish, i.e., it can dispense with welding and machining, and a series of products can be manufactured using only one tooling. Moreover, there is a slight or no residual stress and "spring back" effects, leading to a high-quality structural integrity. For those reasons, SPF can result in considerable savings in costs and weight in comparison with traditional processes, resulting in a feasible and an attractive method for industry.

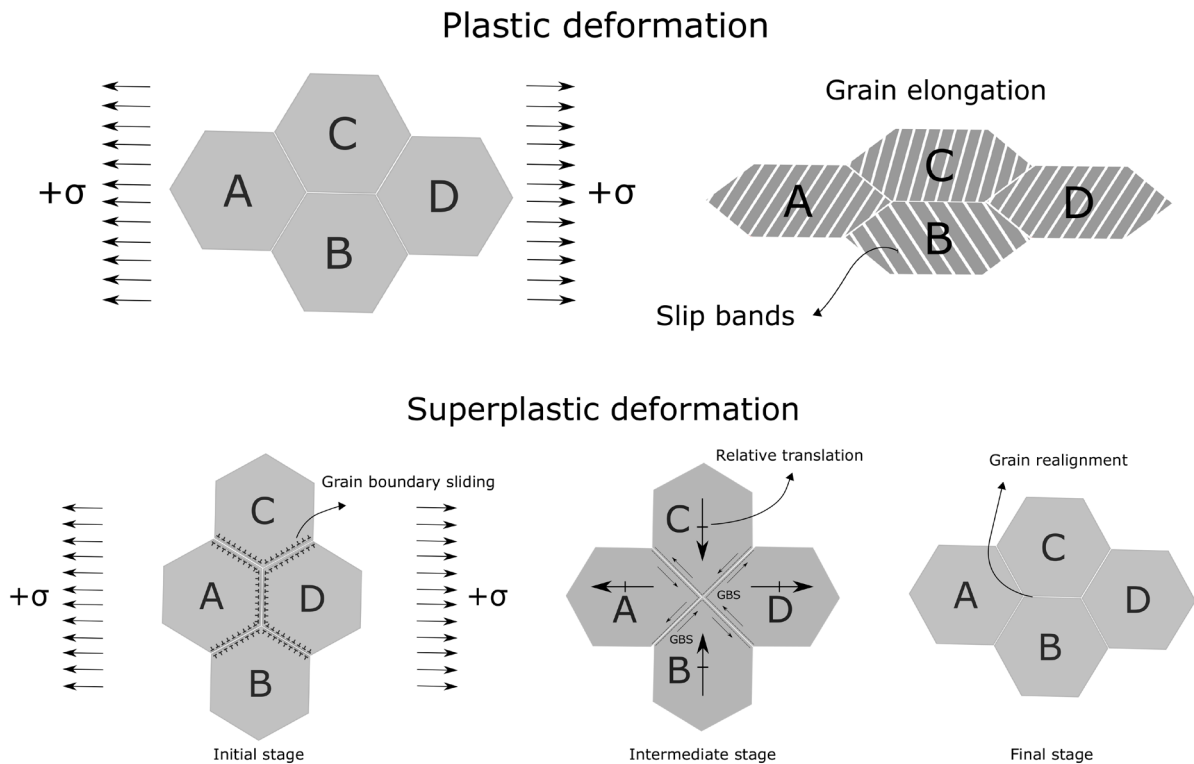


Figure 3 – Comparison between plastic and superplastic deformation regarding intragranular modification.

The most conventional superplastic materials with commercial applications are titanium and aluminum alloys. More than 40 “in-production” aircraft and twenty different automobiles models are already using superplastically formed aluminum components (BARNES, 2007). The most common applications for titanium alloys in the aeronautical industry are pylon panels, nacelle panels, engine parts, fan and OGV blades and auxiliary power exhaust (cf. Figure 4); and for the aluminum alloys, lightly loaded or non-structural components, such as inlets, wing tips, access doors and equipment covers (cf. Figure 5). Table 1 shows the most common alloys, their compositions, SPF temperatures, strain rates and maximum deformation values.

Table 1 – Some of the commercially available titanium and aluminum superplastic sheets with optimum SPF temperatures, strain rates and typical elongations.

	Alloy	Composition (%)	SPF temperature (°C)	Strain rate (s ⁻¹)	Elongation (%)
Titanium	Ti-6/4	Ti-6Al-4V	880-920	5x10 ⁻⁴	~ 1000
	SP700	Ti-4Al-3V-2Fe-2Mo	750-800	3x10 ⁻⁴	≥ 300
	Ti-6242	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	850-940	5x10 ⁻⁴	> 500
Aluminum	2004	Al-6Cu-0.4Zr	460	~ 10 ⁻²	800 – 1200
	5083	Al-4.5Mg-0.7Mn-0.1Zr	500-520	10 ⁻³	~ 300
	7475	Al-5.7Zn-2.3Mg-1.5Cu-2Cr	515	2x10 ⁻⁴	800

The efforts to increase alloy superplastic properties resulted in the creation of a new material called SP5083 which complies with aerospace standards. Hefti (2007b) discusses Boeing's implementation of SP 5083, which is a special SPF alloy, and the advances that have been made at Boeing Commercial Airplanes during the manufacture of SP 5083 components for aircraft applications (cf. **Figure 5**). Due to the needs of industries and

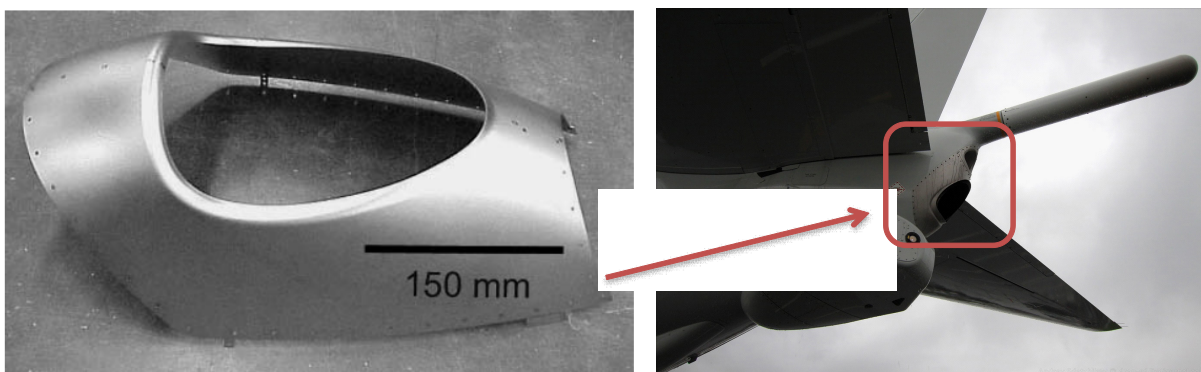


Figure 4 - Boeing auxiliary power unit exhaust faring, Ti-6Al-4V. Adapted from Comley (2004).

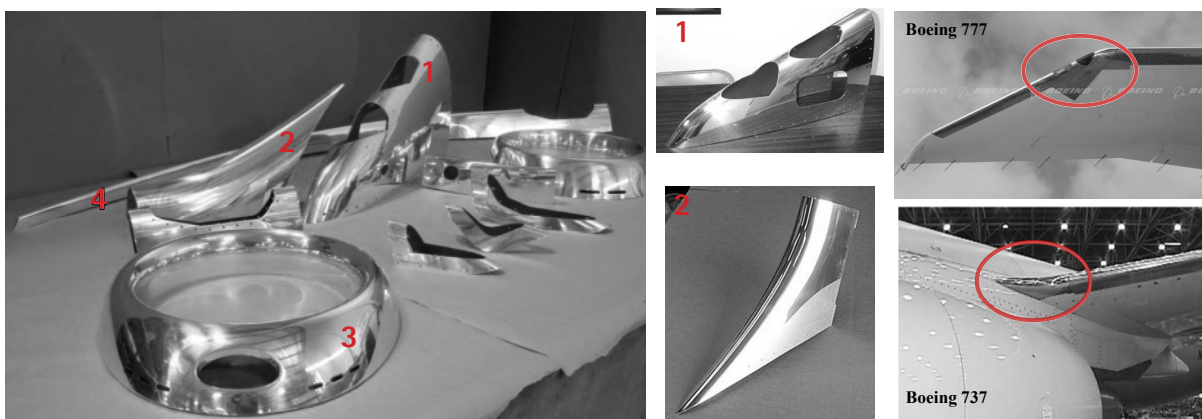


Figure 5 - Superplastic components designed for aerospace applications formed with SP 5083: 1- wing tip light housing, 2- strakelets, 3- engine intake lipskins and 4- winglets (SUPERFORM®). Adapted from Barnes et al. (2012) and Hefti (2007a).

the great capacity of the SPF process, more studies should be carried out to understand the phenomenon with the aim at reducing forming time and improving structural characteristics. Hence, the purpose of this work is to study the influence of the pressure curve, the temperature and the strain rate in AA5083 and Ti-6Al-4V alloy bubble shapes. The study presents an optimized pressure cycle of an Accudyne® SPF machine. The paper also evaluates the quality of the finished product by analyzing the smoothness and symmetrical characteristics of the parts using an ultrasound technique. The SPF machine is installed in the Lightweight Structures Laboratory (LEL) of the Institute for Technological Research (IPT) located in Sao José dos Campos, Brazil. The focus of the lab is to support industries with R&D, helping them to pass through the "Death Valley" to the Technology Readiness Level desired (KALAWSKY, 2010) and assisting them to become more competitive, achieving results close to real application.

2 Methodology

The gas pressure curve, which should be studied carefully to keep the strain rate close to the target value that ensures a superplastic behavior, was obtained following Dutta and Mukherjee (1992) and the equations and material properties of this study can be found in (PEREIRA et al., 2016).

The used machine in the experimental procedures, presented in **Figure 6**, works with a system range of 140 kN to 1400 kN of hydraulic clamp force and has a work area of approximately 760 mm × 860 mm. The gas pressure has a range of 1 bar to 40 bar and can work with gas injection on both sides of the blank (a necessary condition for any work using back pressure). The control system allows different values of the gas level step, the ramp gas rate, the dwell time and the clamp force during the forging process which should be specified according to final part geometry and material.



Figure 6 – Lightweight Structures Laboratory's superplastic forming Accudyne machine.

The forming process steps are presented below and are depicted in **Figure 7**:

- I. Initially, the press was heated until reaching the desired temperature and the blank was inserted;
- II. After the homogenization time, the up part of the press was moved down to clamp the blank's edge, in order to seal the blank against the die and avoid escaping of the gas;
- III. Finally, the gas flow followed the pressure × time curve, forming the part.

The samples were inspected with ultrasonic scanning to verify if the process resulted in a homogeneous thickness reduction. The equipment used was an Olympus Omniscan SX: type UT, mode pulse-echo, with a transducer that generates longitudinal waves at 5 MHz and sound velocity of 6172.8 m s^{-1} and 7000.8 m s^{-1} for the AA 5083 and Ti-6Al-4V alloys, respectively.

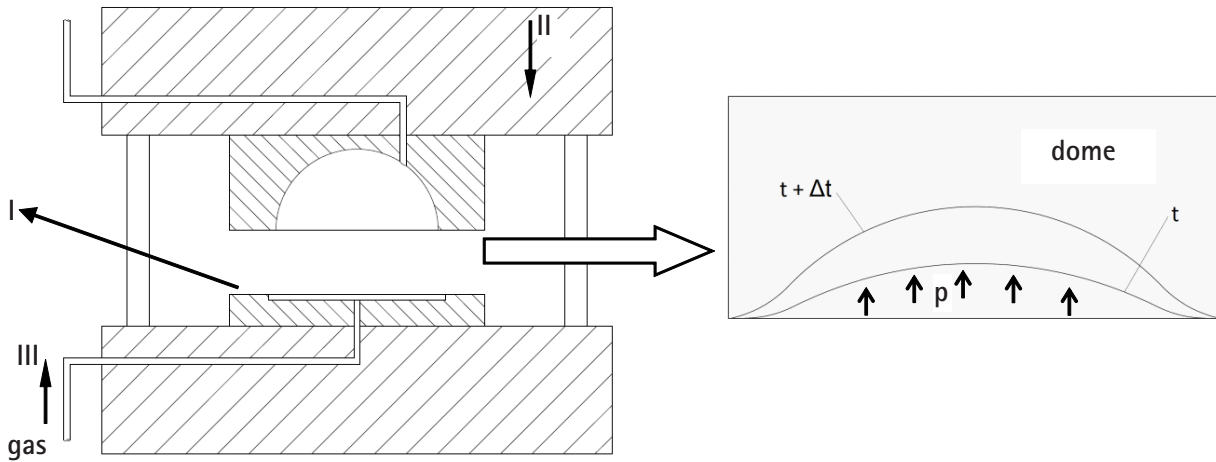


Figure 7 – Superplastic press and forming scheme, (I) the press was heated, (II) the up part of the press was moved down to clamp the blank’s edge and (III) the gas is released.

3 Results and discussion

3.1 Aluminum

Figure 8a shows the calculated and the experimental pressure x time curves. The formed sample is depicted in Figure 8b.

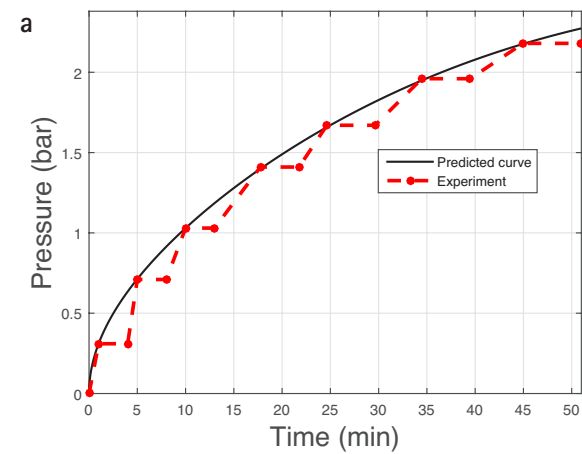


Figure 8 – (a) Numerical pressure curve (solid line) and the approximated curve (dashed line) for the equipment and (b) the dome formed by the SPF process.



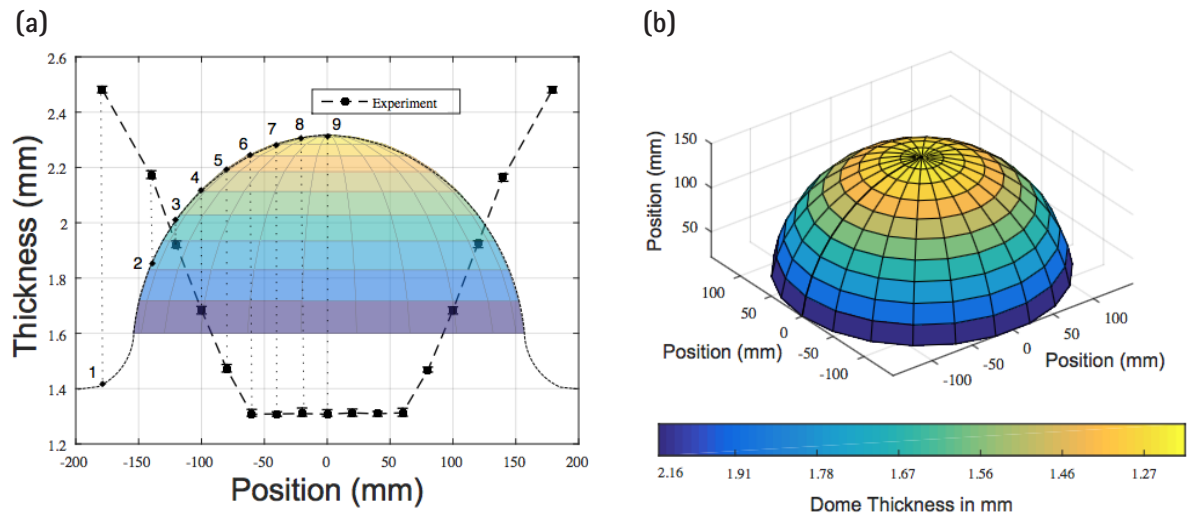


Figure 9 – Thickness distribution around the dome measured by the ultrasound technique.

In the end of the forming cycle, the gas pressure that forms the hot metal suddenly dropped to a very low level, indicating a rupture in the part. As expected, an inspection of the part showed a failure in the pole area that prevented it to reach the final height. A common phenomenon in superplastic forming of aluminum alloys is the so-called cavitation in which voids are created in the material due to the deformation mechanism (GBS). The stress concentration in these voids contributes to the rupture of the forming part.

An ultrasound inspection was used to evaluate the final thickness after the superplastic forming. This result was important to give the maximum real thickness reduction and a reference about how the strain field was distributed in the sample's surface. The experimental results are shown in **Figure 9**.

This analysis shows a maximum thickness reduction of 51 %, while the model prediction value was about 35 %. This difference results from a limitation in the analytical model in representing the true stress-strain state which the material is subjected to during the process. Additionally, the model does not consider other intrinsic process phenomena as friction and thermal effects. In this case, the use of more complex numerical methods such as finite elements would allow a better representation of the experimental case. It was possible to observe that the maximum reduction of thickness is homogenous in a considerable area near at the center of the dome. This information is relevant in this context because it represents a substantial capacity of the process in distributing forging efforts without inducing local necking.

To avoid the appearance of the cavitation phenomenon, the appropriate technique consists in the application of a backpressure in the opposite direction of the deformation. Therefore, the system should be adapted to have two gas exits. The literature is vast and many authors have noticed that after a backpressure equal to 10 bar the cavitation volume is extremely reduced (GERSHON et al., 2004).

3.2 Titanium

The pressure curve adjusted and the analytical functions are presented in **Figure 10**.

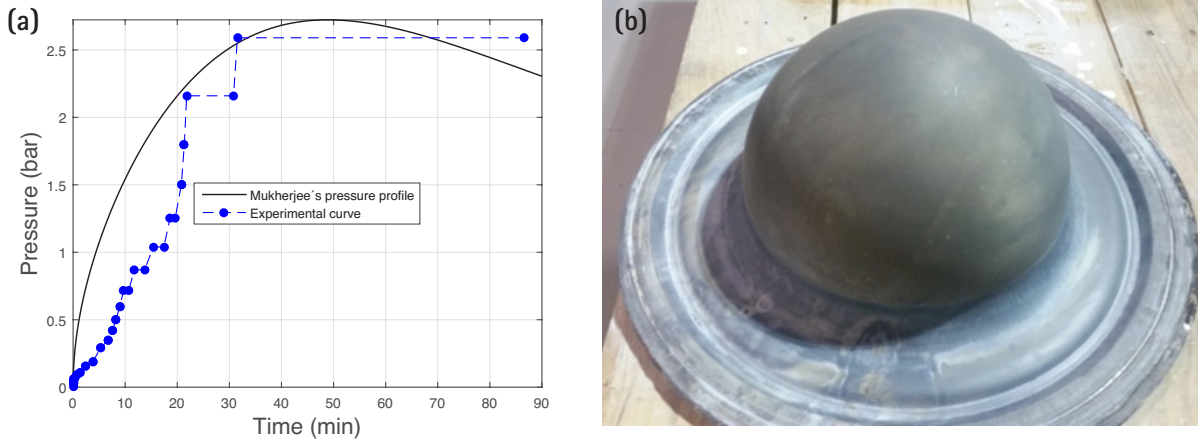


Figure 10 – Numerical (solid line) and experimental (dashed line) pressure curve.

The forming process resulted in a dome with the desired geometry, apparently free of oxidation, as presented in **Figure 11**. The process, in this case, was concluded after 88 min.

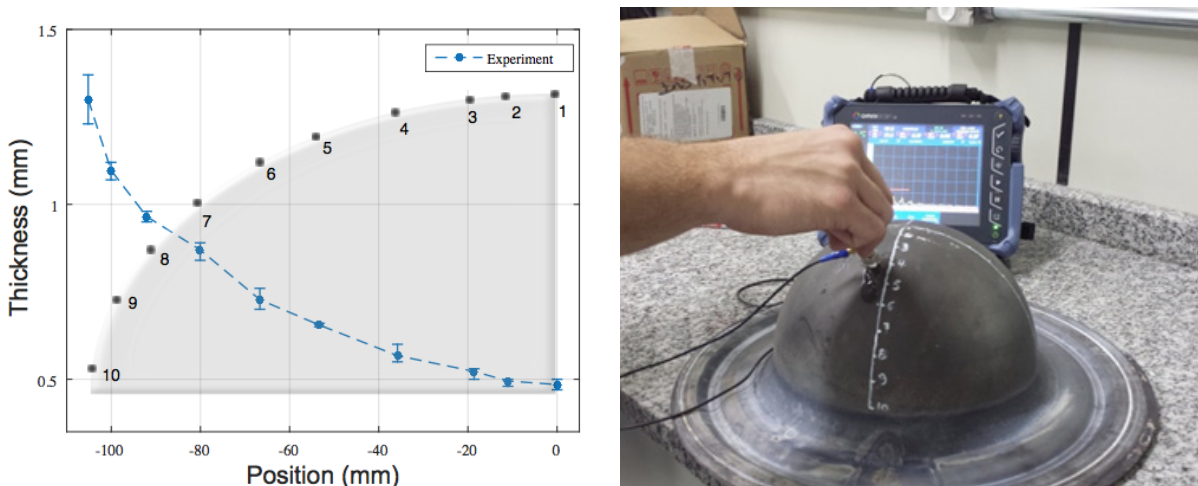


Figure 11 – Ultrasound inspection process and the ultrasonic results.

The analysis shows a maximum thickness reduction of 70 %, while the analytical prediction is about 56 %. Again, this difference is generated due to a limitation in the analytical model in representing the true stress-strain state which the material is subjected to during the process.

4 Conclusion

The main objective of this work was the manufacture of a titanium and an aluminum dome by superplastic forming. Analytical analysis of the process were carried out in order to obtain the ideal pressure curve and to predict the thickness of the formed part, and an ultrasound inspection was used to compare the formed part with the numerical data. The results for both materials show that the predicted pressure curve obtained following the analytical approach is adequate to reach a low strain rate during the experiments. In the experimental conditions, the domes reached the highest deformation after 51 min (aluminum) and 88 min (titanium), which is an expected time for the SPF process according to the literature. However, the percentage of thickness reduction in the experiments showed important deviations from the analytical model due to the limitation of the Mukherjee's analytical formulation, probably because it does not consider some intrinsic process phenomena such as friction and thermal effects. An important improvement for both materials in the next experiments would be the obtainment of real-superplastic-behavior material constants through uniaxial tensile analysis, instead of using data information found in literature which could have been a source of the thickness deviation.

5 Acknowledgments

The author would like to thank a number of individuals and institutions: FIPT for funding this research; all technicians and researchers from Lightweight Structures Laboratory, for the support during this work development and finally the Escola Politécnica from the University of São Paulo, mainly to Prof. Dr. Gilmar Batalha for the assistance during this research.

6 References

- ALABORT, E. et al. On the mechanism of superplasticity in Ti – 6Al – 4V. *Acta Materialia*, v. 105, p. 1–42, 2016.
- BARNES, A. J. et al. Recent application of superformed 5083 aluminum alloy in the aerospace industry. *Materials Science Forum*, v. 735, p. 361–371, Dec. 2012.
- BARNES, A. J. Superplastic forming 40 years and still growing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 16, n. 4, p. 440–454, 5 July 2007.
- COMLEY, P. N. Manufacturing advantages of superplastically formed fine-grain Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 13, n. 6, p. 660–664, 2004.
- DUTTA, A.; MUKHERJEE, A. K. Superplastic forming: an analytical approach. *Materials Science and*

Engineering A, v. 157, n. 1, p. 9–13, 1992.

GERSHON, B. et al. Problems encountered in superplastic forming of Al 5083 parts. Materials Science Forum, v. 447–448, p. 259–264, 2004.

GIULIANO, G. Superplastic forming of advanced metallic materials. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.

HEFTI, L. D. Advances in the superplastically formed and diffusion bonded process. Materials Science Forum, v. 551–552, p. 87–93, Dec. 2007a.

HEFTI, L. D. Commercial airplane applications of superplastically formed AA5083 aluminum sheet. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 16, n. 2, p. 136–141, 24 Apr. 2007b.

KAIBYSHEV, O. A. Fundamental aspects of superplastic deformation. Materials Science and Engineering: A, v. 324, n. 1–2, p. 96–102, Feb. 2002.

KALAWSKY, R. S. Grand Challenges for Systems-Engineering Research. INSIGHT, v. 13, n. 2, p. 39–45, July 2010.

PEREIRA, D. A. et al. Analysis of Superplastic forming process applied to aerospace industry: case study of Al 5083 Alloy. In: AEROSPACE TECHNOLOGY CONGRESS, 2016, Solna, Stockholm, Sweden. Proceedings... Stockholm: Meetagain, 2016.

SIENIAWSKI, J.; MOTYKA, M. Superplasticity in titanium alloys. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 24, n. 1, p. 123–130, 2007.

Estratégias para inovação em ensaios, medições e calibrações no IPT

Strategies for innovation in tests, measurements and calibrations at ipt

Marco Antonio Grecco D'Elia^{a*}, Aluisio Savio Nieto Losano^b, Cristiane Salustiano^c, Cristina Rodrigues de Borba Vieira^d, Edmar Rinaldo Tanaka^e, Luciana dos Santos Galvão^c, Luiz Eduardo Lopes^f, Rogerio Parra^g e Vagner Luiz Gava^h.

^a Gerência de Processos, Diretoria de Pessoas e Sistemas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Seção de Recursos Minerais e Tecnologia Cerâmica, Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^c Laboratório de Análises Químicas, Centro de Química e Manufaturados, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^d Assessoria, Diretoria de Operações e Negócios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

Resumo

No ciclo de 2015 do Planejamento Estratégico do IPT 2014-2018, o Grupo de Inovação em Ensaios buscou identificar fatores críticos que induzam a criação e a oferta de Ensaios, Medições e Calibrações que atendam novas demandas da sociedade ou que atendam demandas já existentes de modo mais eficiente, eficaz e econômico. Inicialmente, procedeu-se a uma análise conceitual e, posteriormente, por meio da metodologia de pesquisa / ação, realizaram-se diversas interações com pesquisadores e técnicos do Instituto, levantando-se experiências e percepções relativas às atividades nos laboratórios. Como resultado, foram identificados cinco fatores críticos e foram propostas estratégias para cada caso.

Abstract

In the 2015 cycle of IPT's 2014-2018 Strategic Planning, the Group for Test Innovations tried to identify critical factors which induce the creation and the supply of Tests, Measurements and Calibrations that meet society's new or existing demands in a more efficient, effective and economical way. Initially, a conceptual analysis was carried out and, subsequently, there were several interactions with researchers and technicians of the Institute by means of the research / action methodology, collecting experiences and perceptions relating to activities in the laboratories. As a result, five critical factors were identified and thus strategies were proposed for each case. Brazilian situation, making it clear that more studies be done in non-contaminated areas and using standardized methodologies.

1 Introdução

Por ocasião do ciclo de 2015 do Planejamento Estratégico do IPT 2014-2018, foi criado o Grupo de Inovação em Ensaio (GIE) com o objetivo de ***"induzir a criação e a oferta de Ensaio, Medições e Calibrações que atendam novas demandas da sociedade ou que atendam demandas já existentes de modo mais eficiente, eficaz e econômico"***. Com esse objetivo, pretendeu-se reforçar a vocação precípua do IPT de braço tecnológico do governo e da sociedade, acrescentando e potencializando a vertente da inovação no seu conceito atual.

2 Conceituação

Partiu-se do princípio que a atividade fundamental do IPT, desde sua gênese, é a realização de Ensaio, Medições e Calibrações – doravante denominados EMCs. Castro e Arantes (1991, p. 1), eminentes pesquisadores do IPT nas últimas quatro décadas do século XX afirmam que, "[...] a função de laboratórios de tecnologia é dar apoio às atividades industriais, com recursos humanos previamente especializados e recursos laboratoriais adequados (equipamentos e documentação técnica)". E reforçam:

- A atividade de resultado imediato mais importante para o meio é a dos laboratórios de ensaio e análises e das plantas piloto, para demonstração de novos processos. Para ser bem desempenhada necessita de laboratórios bem equipados e com pessoal técnico capacitado. É na operação desses laboratórios que tópicos básicos, para pesquisa tecnológica de interesse para a indústria, são identificados e abordados com orientação objetiva (CASTRO; ARANTES, 1991, p. 5).

O GIE definiu, de forma clara e objetiva, o conceito de "Inovação em EMCs" no IPT. Segundo o Manual de Oslo (ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO, 2005) para ser considerada inovação, é preciso que a atividade traga benefícios financeiros para a operação da empresa, seja por meio do aumento do faturamento, redução dos custos ou aumento de produtividade. No caso de organizações governamentais, os benefícios também se traduzem no melhor atendimento às necessidades da sociedade.

^e Departamento de Acervo e Informação Tecnológica, Diretoria de Operações e Negócios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^f Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^g Laboratório de Embalagem e Acondicionamento, Centro de Tecnologia de Recursos Florestais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^h Gerência de Sistemas Corporativos, Diretoria de Operações e Negócios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave:
laboratório; ensaio; calibração;
medição; inovação.

Keywords: *laboratory; test; calibration; measurement; innovation.*

Assim, "Inovação em EMCs" é o EMC que nunca foi feito no IPT ou que teve o método alterado por mudança no principal equipamento de ensaio, que passou por aprimoramento na forma de preparo e acondicionamento da amostra ou na forma de realização de operações, que teve o método alterado por mudança na norma técnica de referência, resultando em:

- maior confiabilidade metrológica / redução de incertezas; e/ou
- menor tempo de execução do EMC; e/ou
- maior rentabilidade para o Instituto; e/ou
- menor impacto ambiental; e/ou
- melhora nas condições de segurança do trabalho aos executores; e/ou
- novo modelo de negócio de EMC.

Também foram definidas por consenso as seguintes premissas:

- é fundamental que os laboratórios mantenham uma gama de EMCs básicos solidamente estabelecidos e que sedimentem o conhecimento em determinado campo. A oferta desses EMCs básicos ao mercado é uma decisão de conveniência técnica e comercial;
- é importante que as equipes técnicas conheçam profundamente os fenômenos físicos de suas áreas de atuação (competência), para poderem analisar e concluir sobre os resultados dos EMCs e avançar na proposição de soluções inovadoras que sequer possam ter sido percebidas pelo cliente;
- é preciso que o IPT esteja preparado, isto é, que tenha conhecimento, infraestrutura e criatividade para enfrentar e responder de modo satisfatório aos desafios demandados pela sociedade;
- é desejável que os EMCs, tradicionais ou inovadores, sejam subsídios para "Projetos de P&D&I" e para "Serviços Tecnológicos";
- é recomendável que os benefícios gerados pelos trabalhos do IPT, para o setor produtivo e para a sociedade, sejam considerados como indicadores de impacto e presença do IPT.

3 Procedimento metodológico

A metodologia utilizada, neste trabalho, corresponde à Pesquisa / Ação que, segundo Thiollent (2004), corresponde a um tipo de pesquisa social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo e no qual os pesquisadores estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

A equipe do GIE teve 16 participantes, incluindo os dois líderes. Desses membros, 11 atuavam em laboratórios (dez pesquisadores e um técnico) e cinco em áreas administrativas (dois pesquisadores e três administrativos). Durante a realização dos trabalhos teve a colaboração de 41 pessoas em reuniões, consultas, visitas e outras atividades.

O GIE realizou 23 reuniões de trabalho e participou de 12 eventos: reuniões, *workshops* e estágios (*gates*) do Planejamento Estratégico.

Nas reuniões regulares do Grupo, foram discutidos os tópicos de interesse, conforme agenda preparada pelos líderes, e planejadas as ações a serem executadas. As ações foram distribuídas e realizadas pelos participantes conforme as disponibilidades.

As participações nas reuniões e *workshops* do Planejamento Estratégico ocorreram por meio dos líderes, que reportavam nas reuniões subsequentes do GIE.

O GIE procurou identificar fatores críticos e propor soluções para induzir a criação e a oferta de EMCs que atendam novas demandas da sociedade ou que atendam demandas já existentes de modo mais eficiente, eficaz e econômico.

4 O sistema operacional dos EMCs

A relação dos EMCs com outras atividades técnicas do IPT e a forma de comunicação dos resultados está sintetizada na **Figura 1**. Os Relatórios Técnicos, Relatórios de Ensaio, Relatórios de Medição, Certificados de Calibração e Pareceres Técnicos são os produtos entregues pelo IPT aos seus clientes, resultados das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D&I), EMCs e Serviços Tecnológicos (STs).

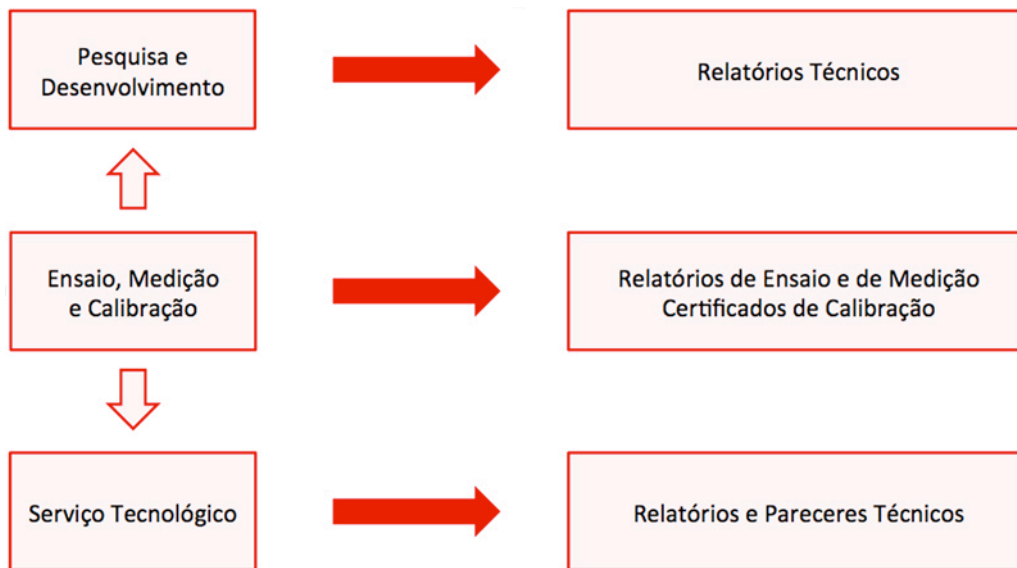


Figura 1 – Relação dos EMCs com outras atividades técnicas e o tipo de documento emitido

O universo abrangido pelos EMCs realizados pelos Laboratórios do IPT é amplo, conforme representado na **Figura 2**. Dentro desse universo, há um subgrupo que são os EMCs incluídos no Sistema da Qualidade com certificação conforme a norma ABNT NBR ISO 9001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). E dentro desse, outro subgrupo em que estão os acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro (CGCRE) / Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), integrando a Rede Brasileira de Calibração (RBC) e a Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios (RBLE). As inovações em EMCs ocorrem em todos os subgrupos, porém de modo proporcionalmente menor nos EMCs incluídos no Sistema da Qualidade e menor ainda no escopo acreditado. Isso porque o rigor normativo é inversamente crescente, sendo os laboratórios obrigados a seguirem estritamente as normas técnicas e submetendo-se a auditorias de acompanhamento e verificações.

Os procedimentos laboratoriais do IPT são registrados no Sistema de Monitoramento de Normas e Registro de Procedimentos (SAA), que é um banco de dados para o monitoramento e visualização de documentos normativos externos (normas técnicas, regulamentos técnicos e legislação) e registro e visualização de documentos normativos internos (procedimentos IPT). O SAA alimenta o *site* do IPT, para a busca, por parte do público interno e externo, dos serviços de EMCs prestados pelo Instituto.

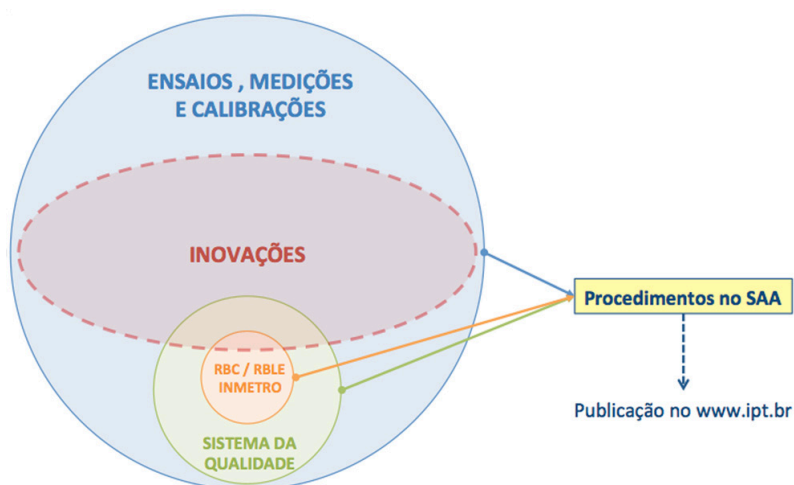


Figura 2 - Abrangência dos EMCs.

Os EMCs são oferecidos ao mercado por meio de orçamentos. Dependendo do escopo e do valor, eventualmente, os EMCs podem ser oferecidos por meio de propostas.

Nos EMCs, podem ocorrer inovações incrementais, que nem sempre são identificadas, decorrentes do atendimento das diferentes demandas que são levadas aos laboratórios.

5 Propostas de estratégias para inovação em EMCs

A partir dos levantamentos e constatações apresentados, foram identificados cinco fatores críticos e propostas estratégicas para potencializar as inovações em EMCs:

- a) as inovações incrementais que ocorrem no dia a dia dos laboratórios devem ser identificadas pelas equipes técnicas e reconhecidas pela hierarquia e administração. A proposta estratégica é nomear grupos ad hoc que visitem os laboratórios e se reúnam com as equipes técnicas de modo sistemático, para identificar e reconhecer as inovações e o potencial impacto das mesmas. Também, a criação de "projeto interno de inovação em EMCs" que capitalizasse as inovações, mesmo que não comercializadas, para alocação das horas dispendidas e registro das inovações geradas;
- b) o sistema operacional para EMCs pode dificultar o registro das inovações. A proposta estratégica é realizar uma análise crítica do sistema operacional dos EMCs, visando à simplificação e eficácia do mesmo, com ferramentas mais simples e objetivas;
- c) os custos de EMCs realizados pelo IPT, com o rigor técnico necessário, fazem com que os valores fiquem acima da capacidade aquisitiva de muitas Pequenas e Médias Empresas (PMEs), que deixam de contratar serviços ou contratam apenas parte deles. Muitos serviços são customizados, cada caso é um caso, e realizados por equipes técnicas qualificadas. A

proposta estratégica é negociar um programa de apoio financeiro da FAPESP via SDECTI/ GESP, executado pelo IPT, para as PMEs na contratação de EMCs inovadores. A FAPESP aportaria determinado valor e o GESP aportaria valor equivalente em contrapartida;

- d) laboratórios particulares, de Universidades e de Escolas Técnicas, veem prestando serviços em áreas de desenvolvimento tecnológico. A proposta estratégica é discutir com os laboratórios do IPT o relacionamento com outros laboratórios a fim de potencializar as vantagens competitivas do IPT e atuar essencialmente pela diferenciação;
- e) o IPT atua de modo reativo às demandas e oportunidades que surgem. A proposta estratégica é estabelecer nos Laboratórios um fórum permanente para definir as linhas de pesquisa e especialização em temas estratégicos nas quais os Laboratórios devem se capacitar, em competências essenciais, para atuar no desenvolvimento tecnológico de futuras demandas com visão de longo prazo.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem aos integrantes da equipe do GIE, a todos os colaboradores consultados, aos membros do Comitê Executivo do Planejamento Estratégico e à Diretoria Executiva, pelo apoio e confiança para a execução do projeto.

7 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 9001: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

CASTRO, A. P.; ARANTES, A. A. **Planejamento Estratégico IPT – 1991: Experiência passada e perspectivas para futuras atividades técnicas**. São Paulo: IPT, 31 jul. 1991. 17 p. (Documento interno da Gerência de Processos).

ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO. **Manual de Oslo – Diretrizes para Coleta e Interpretação de Dados sobre Inovação**. 3. ed. Paris: OCDE, 2005. Tradução de: Financiadora de Estudos e Projetos. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/manualoslo.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 13. ed. São Paulo: Cortez, 2004.

Mas afinal, o que é inovação para o IPT?

^a Diretoria de Inovação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: avallone@ipt.br

Alex Fedozzi Vallone^a

1 Introdução

Nos últimos anos, o termo "inovação" ganhou força não somente no IPT, mas em toda a sociedade. No setor privado a CNI, FIESP e entidades representantes setoriais passaram a se mobilizar em torno do tema, buscando acelerar a inovação nas empresas. No setor público, houve não somente o aumento das atividades de apoio e financiamento à inovação, como também o aumento da busca por soluções inovadoras para demandas sociais.

Estas mudanças de contexto também repercutiram no IPT, levando à criação da Diretoria de Inovação em 2009, com a missão de buscar novos caminhos para que o Instituto se tornasse mais inovador, bem como a definição da nova visão de futuro do Instituto em 2014: 40 % de nossas receitas devem ser oriundas de inovações em 2018. Mas afinal, o que é inovação para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas?

Neste artigo, apresentaremos uma síntese das diversas discussões realizadas no Instituto ao longo dos últimos anos sobre este assunto.

1.1 O que é inovação?

As definições apresentadas a seguir foram escolhidas dentre as inúmeras encontradas na literatura, e evidenciam a diversidade de pontos de vista a respeito do conceito:

- "Inovação é a exploração bem sucedida de novas ideias" (UK DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY, 2004 apud TIDD; BESSANT, 2009, p. 16, tradução nossa);
- "Inovação não significa só a comercialização de um avanço radical no estado da arte da tecnologia (inovação radical), mas

inclui até mesmo a utilização de mudanças em pequena escala no *know-how* tecnológico (uma melhoria ou inovação incremental)" (ROTHWELL; GARDINER, 1985 apud TIDD; BESSANT, 2009, p. 16, tradução nossa);

- "Empresas obtém vantagem competitiva por meio de atos de inovação. Elas abordam a inovação no seu sentido mais amplo, incluindo tanto novas tecnologias quanto novas formas de fazer as coisas" (PORTER, 1990 apud TIDD; BESSANT, 2009, p. 16, tradução nossa);
- "Uma inovação é a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um processo, ou um novo método de marketing, ou um novo método organizacional nas práticas de negócios, na organização do local de trabalho ou nas relações externas" (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2005, p. 55).

Os exemplos citados demonstram que há inúmeras definições de inovação, que variam em função do recorte teórico utilizado pelo autor. É possível destacar alguns elementos dessas definições:

- Inovação não é sinônimo de tecnologia: um avanço tecnológico pode ser a base de uma inovação, mas há diversas inovações que não dependem de tecnologias;
- Uma invenção, por sua vez, somente representa uma inovação se for utilizada e gerar valor para quem a criou e para quem a utiliza;
- Inovação não precisa ser uma mudança radical em relação ao que já se fazia anteriormente. O acúmulo de pequenas mudanças sucessivas também produz um bom resultado;
- Também se considera inovação a adoção de novos serviços / processos / metodologias que já estejam em uso em outros lugares, e que representem ganhos (tempo, produtividade, qualidade etc.) para quem a está adotando, e não somente as inovações em escala mundial ou nacional.

Ainda que a literatura tradicional de inovação tenha centrado a atenção em inovações de setores industriais, e principalmente com um viés tecnológico, o conceito se aplica também aos demais setores, tais como os serviços intensivos em conhecimento, entre os quais podemos enquadrar o IPT.

1.2 O que é inovação para o IPT?

A definição do conceito de inovação mais adequado ao IPT deve levar em conta tanto a sua missão quanto a natureza das atividades do Instituto.

A missão do Instituto, definida como "Criar e aplicar soluções tecnológicas para aumentar a competitividade das empresas e promover a qualidade de vida", já evidencia que o propósito do Instituto é apoiar a inovação, uma vez que este é um caminho fundamental para assegurar que

o setor privado seja competitivo, e que o setor público possa prover serviços de qualidade para melhorar a qualidade de vida da sociedade. Em outras palavras, **em uma perspectiva voltada para fora**, as atividades do IPT devem preferencialmente apoiar a inovação de seus clientes.

Em uma **perspectiva interna**, o IPT, enquanto provedor de serviços intensivos em conhecimento, também precisa inovar em seus produtos, processos e atividades para que seja capaz de oferecer ao mercado soluções tecnológicas adequadas às mudanças tecnológicas, mudanças no ambiente e novas necessidades dos clientes.

Inovação para o IPT significa a oferta de um serviço para o mercado (serviço aqui entendido de forma ampla) que seja novo para o IPT, ou que tenha sido significativamente aprimorado em relação às práticas usuais já adotadas no IPT.

Esta definição macro pode ser desdobrada às diversas atividades que o Instituto realiza, que incluem **Projetos de P&D; Ensaios, Medições e Calibrações; e Serviços Tecnológicos**.

Os **projetos de P&D** são projetos cujo propósito é a geração de novas tecnologias aplicáveis a produtos ou processos. Estes projetos são sempre considerados inovação para o IPT, uma vez que pressupõem a criação de novas abordagens, novos métodos e novos conhecimentos para o Instituto, que permitam a adoção de novas tecnologias, processos e produtos pelos clientes e parceiros. Estes projetos estão ligados, portanto, ao esforço de nossos clientes e parceiros em fazer inovação.

Ensaio, medições e calibrações (EMCs) podem ser definidos como procedimentos, técnicas e métodos para medição de propriedades, verificação de desempenho de materiais ou produtos, ajuste em equipamentos de medição, entre outros tipos de procedimentos relativamente padronizados, que podem ser realizados *in loco* ou em laboratório.

Os **EMCs** são considerados inovadores quando tiverem o método alterado por mudança(s) no(s) principal(is) equipamento(s); ou passarem por aprimoramento(s) na forma de preparo e acondicionamento da(s) amostra(s), ou na forma de realização de operações; outiverem o método alterado por mudança(s) na(s) norma(s) técnica(s) e que resultarem em:

- Maior confiabilidade metrológica / redução de incertezas; e/ou
- Menor tempo de execução do EMC; e/ou
- Maior rentabilidade para o Instituto; e/ou
- Menor impacto ambiental; e/ou
- Melhora nas condições de segurança do trabalho aos executores; e/ou
- Viabilização de atendimento a uma demanda que não era executável por métodos tradicionais.

A última categoria de atividade são os **serviços tecnológicos**, os quais consistem em assessorias e consultorias técnicas em que se realizam atividades de investigação, levantamento de dados e interpretação de resultados a fim de subsidiar ações ou tomada de decisões por parte dos clientes. Um serviço tecnológico pode utilizar procedimentos de **EMCs** durante a sua execução, mas os mesmos serão apenas um meio para viabilizar a interpretação de um fenômeno e chegar a uma conclusão a respeito do que se observa.

Em relação aos serviços tecnológicos, consideram-se inovadores aqueles em que houver melhorias significativas ou o desenvolvimento de novos procedimentos, métodos ou processos para a entrega dos resultados finais ao cliente, e que obtenham os mesmos benefícios acima relacionados.

2 Inovação na prática | casos de sucesso

Os casos apresentados abaixo ajudam a ilustrar o conceito de inovação aplicado às diversas atividades do Instituto.

2.1 Pesquisa e Desenvolvimento

Desenvolvimento de cilindros de laminação, Centro de Tecnologia de Metalurgia e Materiais – Laboratório de Processos Metalúrgicos



Laminador-piloto automatizado com capacidade de 50 tf

processo de laminação de aço em indústrias metalúrgicas é realizado em processo contínuo utilizando um trem de laminação. Nesse processo, há uma sequência de cilindros de laminação que comprimem as chapas do metal a ser laminado, com espessuras e temperaturas diferentes. Estas diferenças se refletem também no tempo para a troca dos cilindros de laminação, o que demandava paradas frequentes para manutenção e troca dos mesmos, reduzindo a produtividade.

O IPT desenvolveu ligas metálicas mais resistentes ao desgaste, que permitiram então que a manutenção de todos os cilindros ocorresse na mesma parada, reduzindo o número de interrupções e aumentando a produtividade. Com a execução do projeto, foram gerados novos conhecimentos, que passaram a fazer parte do capital intelectual do Instituto.

2.2 Serviços tecnológicos

Serviços Tecnológicos – Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores (SiNAT), Centro Tecnológico do Ambiente Construído



Habitacões construídas com o sistema light wood frame

Em 2007, o Ministério das Cidades criou o SiNAT, no âmbito do PBQP-H (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat), com o objetivo de avaliar **produtos de construção civil considerados inovadores**, ou seja, que não tenham normas técnicas específicas, antes que os mesmos

possam ser utilizados. Estes produtos devem ser avaliados em seu desempenho, visando garantir **condições adequadas de segurança, habitabilidade e durabilidade** em edificações produzidas com estes produtos. Estas avaliações são conduzidas por Instituições Técnicas Avaliadoras (ITAs) e registradas em um Documento de Avaliação Técnica (DATec). O DATec é exigido pela Caixa Econômica Federal, por exemplo, para financiamento de obras habitacionais feitas com produtos inovadores, o que gerou a demanda pela contratação destas avaliações técnicas. Além disso, construtoras e outras entidades utilizam o DATec como referência para tomada de decisão de uso/compra destes produtos.

O IPT participou da elaboração do regimento do SiNAT e está credenciado como ITA. Devido ao conhecimento acumulado em avaliações de desempenho de sistemas construtivos e à sua credibilidade, muitos fabricantes destes produtos inovadores optaram por contratar o IPT para realização destas avaliações – dos 26 DATecs elaborados, 12 foram feitos no IPT. Além disso, o IPT foi o responsável pela elaboração de 8 das 11 Diretrizes SiNAT, que são documentos que estabelecem quais requisitos e critérios de desempenho serão adotados para avaliação de uma categoria de produto, considerando-se as suas particularidades.

Para o IPT, a criação dos DATecs representa uma inovação em serviços tecnológicos, uma vez que viabilizou o atendimento a uma demanda que antes não seria executável por métodos convencionais.

2.3 Ensaios, Medições e Calibrações

Extração de plastificantes ftálicos em brinquedos e materiais escolares, Centro de Química e Manufaturados – Laboratório de Análises Químicas.



Extração de plastificantes ftálicos em brinquedos

Uma atividade frequente do Laboratório de Análises Químicas é a análise de brinquedos e materiais escolares a base de poli(cloreto de vinila) – PVC para a verificação da presença de plastificantes ftálicos. Estes plastificantes tornam os objetos mais flexíveis e maleáveis, mas algumas de suas variedades são banidas pela legislação brasileira devido à associação com problemas de saúde.

O método tradicional para analisar o material requer primeiro a extração do plastificante das amostras, processo que normalmente leva 16 h, seguida de sua identificação a quantificação. O Laboratório identificou a possibilidade de acelerar a extração do plastificante e, por meio de um projeto financiado pelo próprio IPT, desenvolveu uma metodologia acelerada, pela qual a extração é feita em apenas duas horas e a análise logo em seguida. Esta inovação em ensaio permitiu não somente ganho de tempo como também uma redução no consumo de energia elétrica, por conta da redução no tempo de operação das chapas aquecedoras.

3 Considerações finais

Os exemplos acima descritos são apenas alguns dentre os diversos casos em que o Instituto criou e utilizou com sucesso novas tecnologias, metodologias e processos, bem como apoiou a indústria e o governo a realizar inovações. Parte significativa destes casos ocorreu muito antes da definição do conceito de inovação, evidenciando que as atitudes e comportamentos que a favorecem já estavam presentes no IPT, instituição que soube se reinventar constantemente ao longo de seus mais de cem anos de história.

Ainda que estes elementos já estivessem implícitos na cultura do IPT, a definição de um conceito de inovação mais adequado às atividades do Instituto torna-se necessária a partir do momento em que o tema ganha força tanto dentro quanto fora da instituição. Uma visão compartilhada e compreendida por todos os pesquisadores, técnicos e gestores do que é inovação é um passo importante para que a cultura inovadora seja reforçada e o IPT de fato atinja os 40 % de inovação no futuro próximo.

4 Referências

Manual de Oslo: diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação. Rio de Janeiro: Finep, 2005. 184 p.

TIDD, J.; BESSANT, J. **Managing innovation: integrating technological, market and organizational change.** 4 ed. Chichester: Wiley, 2009.

IPT
Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo

Av. Prof Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP
CEP 05508-901

Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

ipt@ipt.br

www.ipt.br

Redes sociais

twitter.com/@iptsp

youtube.com/IPTbr

facebook.com/iptsp