

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL – GESTÃO,
TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE**

MÁRCIO HARTEMINK DA SILVA

**Análise comparativa do comportamento da corrosão em conectores de
estacas-prancha metálicas laminadas a quente e conformadas a frio**

São Leopoldo

2016

Márcio Hartemink da Silva

**ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO EM
CONECTORES DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS LAMINADAS A QUENTE
E CONFORMADAS A FRIO**

Artigo apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Especialista em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Especialização em Construção Civil –
Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientadores: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Prof. Dra. Ângela Gaio Graeff

Colaboração: Prof. Dra. Jane Zoppas Ferreira

São Leopoldo

2016

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DA DE CORROSÃO EM CONECTORES DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS LAMINADAS A QUENTE E CONFORMADAS A FRIO

Márcio Hartemink da Silva*

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**

Ângela Gaio Graeff***

Jane Zoppas Ferreira****

Resumo: Existem fundamentalmente dois modelos de estacas-prancha metálicas, que se distinguem pelo seu processo de fabricação, uma laminada a quente e outra conformada a frio, que diferem também em termos da morfologia do conector. As estacas-prancha laminadas a quente apresentam conectores do tipo intertravado (“*interlock*”), enquanto as estacas-prancha conformadas a frio apresentam conectores do tipo gancho (“*hook*”). Dado que esses elementos são usados em contato com solo e água, há preocupações em relação à sua resistência à corrosão. O presente trabalho reporta os resultados de uma análise do comportamento da corrosão nos dois tipos de conectores, visto que essas são as partes mais vulneráveis das estacas à corrosão. Foi efetuada uma análise comparativa da aparência microscópica de amostras retiradas de estacas-pranchas metálicas de ambos os modelos de estaca, antes e depois da exposição a uma combinação de Névoa Salina (*Salt Spray Test*) e imersão em solução de cloretos. Além disso, foram realizados ensaios de tração nas amostras, para averiguar o impacto na resistência da conexão.

Palavras-chave: Durabilidade de estacas-prancha. Resistência à Corrosão. Estacas-prancha laminadas a quente. Estacas-prancha conformadas a frio.

1 INTRODUÇÃO

Estacas-prancha é o termo usado na engenharia para designar perfis, geralmente metálicos, especialmente conformados e projetados para serem usados na geração de cortinas de contenção. As mesmas são aplicadas justapostas por meio de cravação no solo e, para assegurar bom desempenho da cortina, é

* Autor, Engenheiro (PUCRS, 2006), Especialista em Gerenciamento de Projetos (UVV, 2009), Engenheiro comercial AM Projects. marcio.hartemink@hotmail.com.

** Autor, Pesquisador e Docente, Escola de Engenharia, UFRGS. Eng. Civil (UFRGS, 1989), PhD em Engenharia Civil (University of Leeds, 1999). 00073853@ufrgs.br.

*** Co-autora, Engenheira Civil (UFRGS, 2005), Mestre em Engenharia Civil (UFRGS, 2007), PhD em Engenharia Civil (The University of Sheffield, 2011), Pós-Doutorado em Engenharia Civil (UFRGS, 2013). angel.graeff@gmail.com.

**** Co-autora, Doutora em Eletroquímica (Université Paris 6, 1991), Professor Titular (UFRGS). jane.zoppas@ufrgs.br.

essencial que estejam adequadamente conectados uns aos outros. Para tanto, os perfis são criados com conectores nas suas extremidades laterais.

Em obras de infraestrutura, as estacas-prancha são aplicadas frequentemente em obras de terminais portuários, trincheiras em vias e rodovias, subsolos, valas de rede de água e esgoto, proteção de acessos a túneis, entre outros exemplos.

Existem dois processos fundamentais e distintos de fabricação de estacas-prancha metálicas: a) laminação a quente e b) conformação a frio. O primeiro é teoricamente mais adequado para a moldagem e durabilidade do elemento, pois permite a conformação com geração de menor nível de tensões residuais, mas normalmente tem um custo mais elevado do que a simples conformação a frio.

Para justificar qualquer análise comparativa dos métodos é fundamental obter dados sobre seu desempenho comparativo e esta é uma área na qual se tem poucos dados disponíveis a respeito da durabilidade.

Essa é uma questão importante, pois as estacas-pranchas, embora possam ser temporárias ou permanentes, muitas vezes são empregadas em grande escala em obras nas quais ficam incorporadas ao projeto, com relevante responsabilidade estrutural e pouca possibilidade de acesso ou conservação. Assegurar um bom desempenho à corrosão ao longo da vida útil de projeto (período de tempo durante a qual a obra ou seus sistemas mantém o desempenho esperado, quando submetidos apenas às atividades de manutenção pré-definidas em projeto) é, frequentemente, um fator crítico para o sucesso desse tipo de projeto.

De forma genérica pode-se definir corrosão como um fenômeno de deterioração de um material, que causa a perda de sua integridade. É geralmente associado a materiais metálicos, que por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos (Gentil, 2011, p. 1), sofrem um processo de transformação que altera sua composição, com formação de óxidos e perda da resistência. O processo de corrosão pode se desenvolver de variadas formas, com diferentes graus de agressividade, incluindo corrosões uniformes, galvânicas, em frestas, sob tensão, por pites e intergranulares. Sua classificação pode ser feita pela aparência do metal corroído.

Um desses processos, a corrosão em frestas, tem particular importância no caso das conexões de estacas-prancha. Esse mecanismo é semelhante à corrosão por pites, em termos de dinâmica e agressividade. A diferença consiste em que a

fresta é um ambiente ocluso pré-existente, enquanto que o pite se forma sobre uma superfície livre, por efeito de agentes tais como cloretos.

A corrosão em frestas se caracteriza pela existência de uma diferença de areação (dentro da fresta há menos oxigênio), à uma diferença de concentração de íons agressivos (dentro da fresta há maior concentração) e à diferença de pH (dentro da fresta há maior acidez). Nessas condições, o interior da fresta funciona como um ânodo e as bordas exteriores como um cátodo.

Esse pode ser um ataque muito agressivo que causa a perda de capacidade resistente da conexão e pode colocar em risco a estabilidade e o bom funcionamento de cortinas de estaca-prancha. Portanto, é fundamental entender quais são seus fatores influentes e mitigadores. Nesse sentido é importante determinar se a escolha da forma de fabricação da estaca-prancha afeta o comportamento à corrosão de forma relevante, em especial na área dos conectores, dado que não se encontra disponível na literatura.

O objetivo deste trabalho é ajudar a superar essa lacuna de conhecimento através da coleta de dados comparativos sobre o comportamento em termos de resistência à corrosão de amostras das zonas de conectores de estacas-pranchas metálicas laminadas a quente e conformadas a frio.

Antes de descrever os ensaios serão apresentados alguns dados acerca do funcionamento e características das estacas-prancha.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

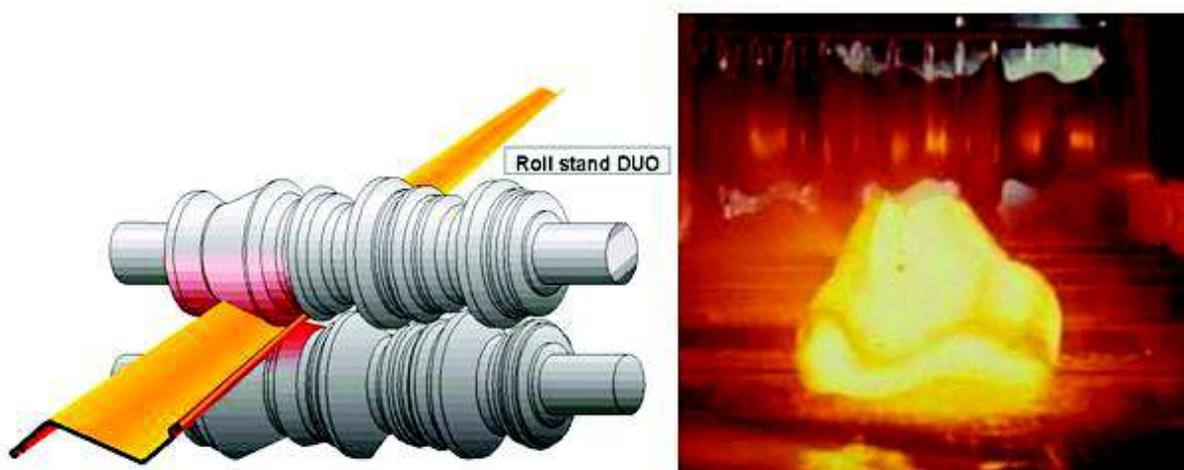
2.1. Fabricação e características de estacas-prancha laminadas a quente

O processo de produção de estacas-prancha laminadas a quente versus as conformadas a frio é bem distinto, sendo este o fator determinante para classificá-las.

A produção da estacas-prancha laminadas a quente, como o nome indica, é realizada por meio de prensas laminadoras onde o perfil metálico é gradualmente laminado, por meio de diversas passagens, sendo o material mantido em uma temperatura elevada, para facilitar o ajuste de formas e reduzir a geração de tensões residuais, até chegar à forma final desejada. A figura 1 mostra uma representação simplificada desse processo de fabricação.

Esse processo potencialmente traz vantagens ao produto final, tais como: precisão e qualidade estrutural sem gerar concentração de tensões devido a trabalhos mecânicos; obtenções de tensões de escoamento elevadas (no aço da ordem de 460 MPa), conectores são laminados junto com o restante das estacas, o que possibilita melhor controle dimensional.

Figura 1 - Estacas prancha laminadas a quente



Fonte: Da Silva (2016, p. 10).

A zona dos conectores é geralmente reforçada pela aplicação de uma maior quantidade de material nesses pontos, a fim de aumentar a sua rigidez e melhorar o comportamento durante a instalação das estacas-prancha. Os conectores dessas estacas são do tipo intertravado, conhecidos normalmente como do tipo *Larssen*. Os mesmos devem cumprir os requisitos de normas tais como a EN 10248 (British Standard, 1995), que é utilizada em vários países sendo separada em duas partes:

- Especificações técnicas (parte 1): especifica os requerimentos para a característica de composição química das estacas laminadas a quente com respeito ao aço, propriedades mecânicas e aspectos de entrega.
- Tolerâncias em forma e dimensão (parte 2): tolerâncias em dimensão, espessura, massa, bem como os critérios técnicos para os conectores estão na segunda parte da norma.

Dada a ampla utilização da norma EN 10248, as orientações para o ensaio à tração apresentadas na mesma foi tomado como referência para realização do presente trabalho.

Detalhes específicos sobre a utilização de estacas-prancha laminadas a quente também podem ser encontrados na norma europeia EN 12063 (1999), que trata da execução de trabalhos geotécnicos especiais com utilização de paredes de estacas metálicas laminadas. A finalidade deste documento é normatizar os procedimentos geotécnicos dos trabalhos, com recomendação dos equipamentos baseado nas propriedades do solo e condições do local de trabalho.

2.2. Fabricação e características de estacas-prancha conformadas a frio

A produção das estacas-prancha conformadas a frio é feita através da conformação de uma chapa de aço em temperatura ambiente, através da aplicação de esforços mecânicos.

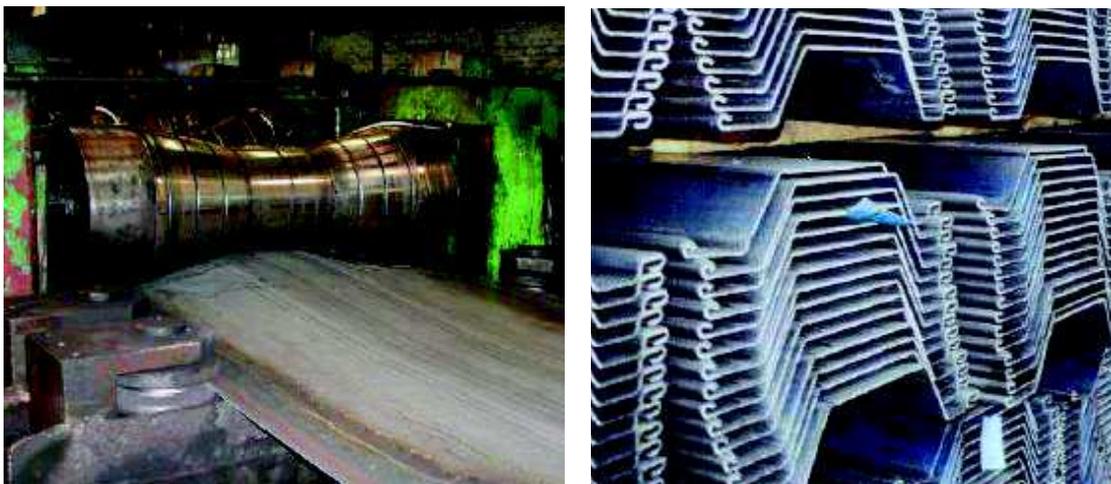
Esse processo acarreta limitações, tais como a necessidade de respeitar o limite de escoamento do aço e restrições com a espessura máxima da chapa, dificuldade de atender a limites de tolerância muito estritos e impossibilidade de determinar com precisão o raio interno e externo dos conectores.

O processo de conformação da bobina leva a uma redução da espessura da parede na região dos conectores devido à plastificação. Reduções de até 20% na espessura da parede tem sido observadas em testes, tal como registrado em relatórios internos de controle disponíveis na ArcelorMittal.

Como é um processo feito à temperatura ambiente, a conformação a frio gera concentração de tensões na área dos conectores, ocasionando o desenvolvimento de microfissuras na região, que facilitam a penetração da umidade e oxigênio e conseqüentemente, incrementam a suscetibilidade à corrosão nesses locais.

A norma europeia EN 10249 (1995) estabelece requisitos e controles para utilização de estacas conformadas a frio. A mesma também se divide em duas partes: especificações técnicas (parte 1) e tolerâncias em forma e dimensão (parte 2) e foi tomada como referência para o presente trabalho.

Figura 2 - Estacas prancha conformadas a frio



Fonte: Briard (2014, p. 10 e 16).

2.3 Conectores

Devido ao processo de fabricação das estacas-prancha conformadas a frio ser mais agressivo ao material, em termos de esforços mecânicos, do que a laminação a quente, existem recomendações mais restritivas para utilização de estacas-prancha conformadas a frio em obras permanentes.

Conforme já mencionado, a concentração de tensões na zona dos conectores decorrente do processo de conformação a frio é um aspecto crítico, pois normalmente gera microfissuras que facilitam o estabelecimento de processos corrosivos, o que pode reduzir a durabilidade e a vida útil do material.

Além desse aumento da suscetibilidade à corrosão na região dos conectores, a conformação a frio também pode gerar outros impactos, tais como o encruamento do metal durante o processo de flexão associado à conformação do conector, que leva à redução da ductilidade nesse local (Teste *Charpy V-notch - brittleness*). Além disso, se não houver controle adequado, podem ocorrer reduções exageradas da espessura da parede do material em alguns locais durante o processo.

Valores reduzidos de ductilidade podem prejudicar o desempenho, ao reduzir a capacidade de suportar cargas durante o processo de cravação sem geração de falhas, bem como prejudicar a capacidade de absorver sem grandes danos cargas dinâmicas que podem ocorrer durante o uso (passagem de tráfego, eventos sísmicos etc.).

Como já explicado, os conectores de estacas-prancha laminadas a quente são normalmente do tipo intertravado (*“interlok”*), enquanto a conexão das estacas conformadas a frio é formada pela geração de "ganchos" no extremo das placas. Essas últimas não podem ser consideradas como conexões intertravadas, de acordo com a edição alemã de Recomendações do Comitê das Estruturas em Água, Portos e Hidrovias (EAU 2012). Além disso, não há tolerâncias e requisitos mínimos sobre sobreposição para esse tipo de conector, tal como existe para os conectores de estacas-prancha laminadas a quente na norma europeia EN 10248 - parte 2.

Essa diferença pode em grande parte ser atribuída à ausência de controle de raio mínimo admissível especificado. Isso faz com que o conector das estacas conformadas a frio seja normalmente formado por ganchos com grande folga dimensional e pouco ajuste. Portanto, o nível de estanqueidade acaba sendo menor e o risco de desengate é muito maior do que para estacas-pranchas laminadas a quente.

Dadas suas características, em princípio os conectores das estacas-prancha laminadas a quente se mostram mais capazes de suportar forças elevadas de tração do que os conectores de estacas-prancha conformadas a frio, que não suportam trações elevadas sem desengatar. Portanto as estacas conformadas a frio não são recomendadas para aplicações onde esforços de tração consideráveis possam atuar nos conectores como, por exemplo, em elementos intermediários de sistemas de paredes combinadas (*combi-wall*), onde se deve assegurar adequada carga de transferência e capacidade de distribuição de esforços entre as estacas.

Devido a essas limitações das estacas-prancha conformadas a frio, o Manual de Estruturas do Departamento de Transporte da Flórida (FDTO), nos Estados Unidos, alerta aos cuidados ao considerar essas estacas para obras permanentes.

Conforme o Manual de Estruturas do FDTO (2016, p.3-11)

Testes mostraram que estaca-prancha conformada a frio falha sob flexão em aproximadamente 85% da sua capacidade de carga, enquanto a estaca laminada a quente se desenvolve a sua capacidade total de carga.

O Manual de Estruturas do FDTO (2016, 3-10) recomenda, ainda, que projetos de estacas-prancha conformadas a frio usem, para propriedades geométricas da seção, *“pelo menos 120% das propriedades geométricas de uma estaca-prancha laminada a quente equivalente”*.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dadas as diferenças esperadas de desempenho entre conectores de estacas-pranchas laminadas a quente e de estacas-prancha conformadas a frio, exploradas na seção 2, se justifica o interesse de realizar testes comparativos, focando no estudo do comportamento à corrosão de ambos os modelos.

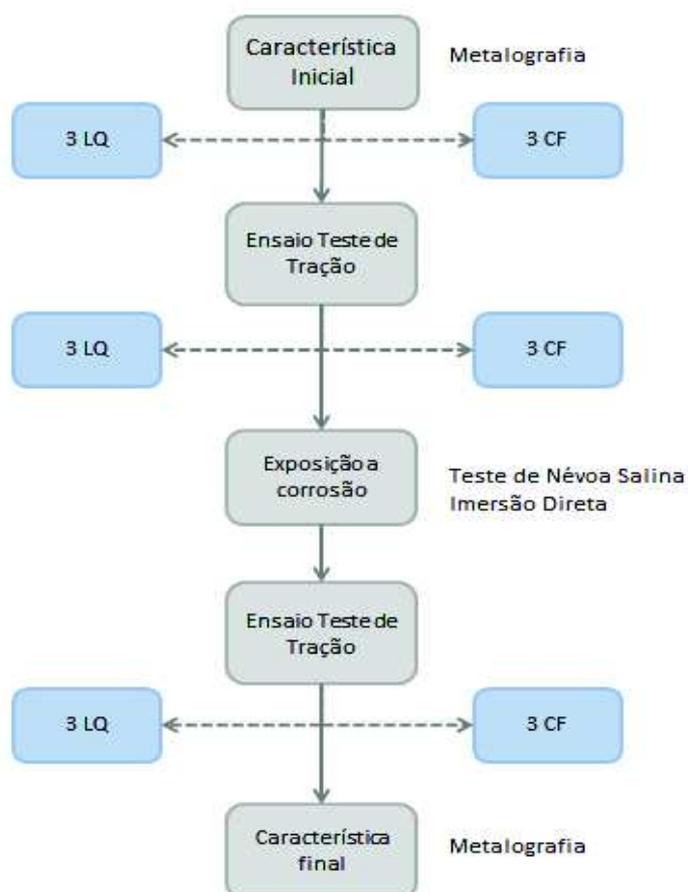
Como explicado na introdução, o presente trabalho relata os resultados de um programa experimental desenvolvido a partir de uma proposta de realizar testes comparativos de desempenho após exposição à corrosão de amostras retiradas de dois modelos de conectores de estacas-prancha de ambos os tipos.

Os desempenhos das amostras foram caracterizados através de uma análise metalográfica, que visava a analisar a aparência e o grau de corrosão de amostras retiradas da região dos conectores, antes e depois da exposição a névoa salina (*Salt Spray Test*) e imersão em solução de cloretos. Além disso, foram realizados ensaios de tração, antes e depois da exposição, visando a averiguar o eventual impacto da deterioração do material no comportamento mecânico das uniões de estacas, aspecto fundamental para seu desempenho em campo. A seguir se descreve como esses objetivos foram usados para delinear a estratégia experimental adotada.

3.1 Delineamento da estratégia experimental

Para guiar o desenvolvimento do trabalho foi empregada a estratégia experimental descrita no fluxograma da figura 3:

Figura 3 - Fluxograma da Estratégia Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi feita uma análise metalográfica nas amostras das estacas-prancha laminadas a quente e conformadas a frio e posteriormente foram realizados os testes de tração para os dois tipos de estacas-prancha.

As amostras foram expostas a corrosão e após foram submetidas novamente ao teste de tração e análise metalográfica.

3.2. Descrição dos materiais

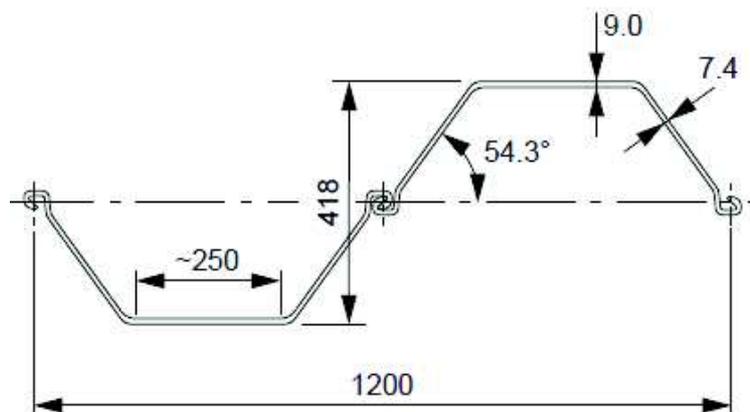
As amostras ensaiadas foram coletadas de segmentos extraídos de uma estaca-prancha laminada a quente (modelo GU13N, com grau de aço S430GP, fabricada pela ArcelorMittal RPS) e de uma estaca-prancha conformada a frio (modelo SLU14-1, com grau de aço S430GP, conforme informado pelo fabricante chinês *Shunli Sheet Piling Industrial*). A figura 5 mostra a seção da estaca-prancha laminada a quente GU13N.

Figura 4 - Vista dos segmentos de estacas-prancha laminada a quente (HR) e conformadas a frio (CF) dos quais foram retiradas as amostras de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Estaca-prancha laminada a quente GU13N



Fonte: Info-Sheet GU13N ArcelorMittal Projects.

A tabela 1 contém os dados básicos de cada uma delas, fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 1 - Especificações das estacas-prancha

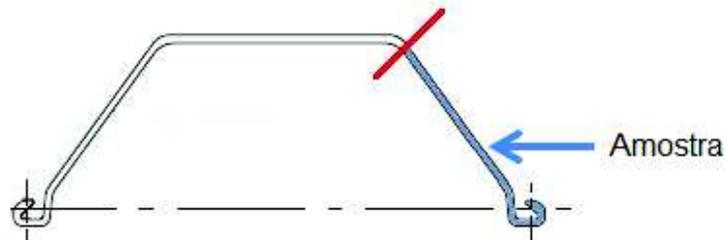
Perfil	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)		Área Seção Transversal (mm)	Peso		Momento de Inércia (cm ⁴ /m)	Módulo Flexão Elástico (cm ³ /m)
			Flange	Alma		Estaca (kg/m)	Parede (kg/m ²)		
GU13N	600	418	9	7,4	127	59,9	100,0	26590	1270
SLU14-1	750	445	8	8	132	77,8	103,7	28685	1410

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para geração das amostras foram feitos cortes nos segmentos disponíveis, de forma a gerar tiras planas com 7 cm de largura, conforme indicado na Figura 6.. Para cada tipo de estaca foram obtidas 14 amostras, usadas para a realização dos testes. As mesmas foram separadas para uso nos ensaios, da seguinte forma, respeitando o estabelecido na estratégia experimental:

- 2 amostras para teste metalográfico (antes e depois da exposição);
- 6 amostras (3 pares) para ensaio de tração antes da exposição ;
- 6 amostras (3 pares) para teste de tração depois da exposição.

Figura 6 - Exemplo da amostra para teste



Fonte: Elaborado pelo autor.

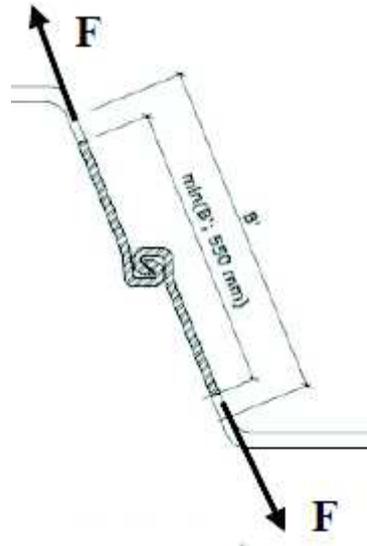
Figura 7 - Vista dos conectores das amostras das estacas-prancha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado na Figura 8, os corpos de prova para ensaios de tração foram obtidos conectando duas amostras individuais. Os mesmos foram realizados conforme os procedimentos dos anexos D e F da norma europeia EN10248-1:2013.

Figura 8 - Exemplo do teste de tração



Fonte: Norma EN10248-1:2013.

Amostras das estacas-prancha laminadas a quente e conformadas a frio (Figura 9).

Figura 9 - Vista das amostras de ensaio das estacas-prancha laminadas a quente e conformadas a frio



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Ensaios

As amostras foram inicialmente submetidas à exposição em Câmara de névoa salina, conforme o procedimento de ensaio da NBR 8094 (similar ao da ASTM B 117). As condições do ensaio empregadas foram:

- Câmara de 1000 litros;
- Temperatura = $35 \pm 2^\circ\text{C}$;
- Concentração NaCl = 50 ± 5 g/L pH solução = 6,5 – 7,2;
- Pressão do ar = 0,7 – 1,4 kgf/cm²;
- Volume condensado para 80 cm² = $1,5 \pm 0,5$ mL/h;

Após 72 horas verificou-se que a formação de corrosão era muito elevada, o que podia prejudicar os equipamentos. Decidiu-se, então, prosseguir com a exposição através da colocação das amostras em teste de imersão direta com cloreto de sódio conforme mostrado na Figura 10. Como o objetivo era analisar comparativamente o desempenho das amostras esse ajuste no programa não causou problemas à análise.

As condições de exposição em imersão foram:

- Composição da solução: 50 gramas de cloreto sódio / 1 litro de água.
- Data do início do ensaio: 18/04/16 – 15:15hs;
- Data do término do ensaio: 16/04/16 – 15:15hs;
- Tempo total: 28 dias => 672 horas.

Figura 10 - Imersão direta (pré e pós ensaio de imersão direta)



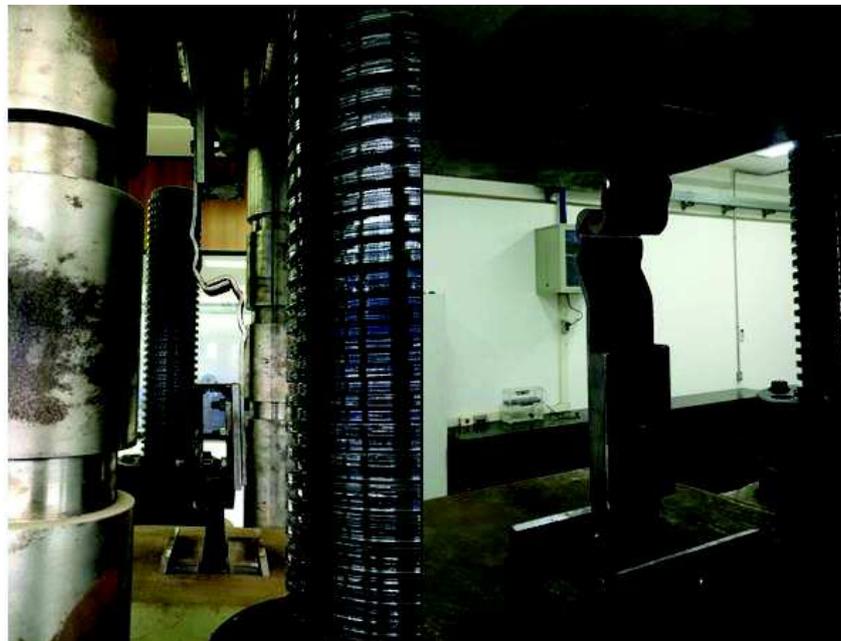
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização da análise microestrutural foi retirada uma pequena amostra longitudinal de uma das amostras antes e depois da exposição. As amostras foram preparadas para a observação metalográfica mediante embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento, seguindo o procedimento interno do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

Para revelar a microestrutura foi efetuado o ataque químico com solução reativa de Nital 2% seguindo-se o procedimento interno. As amostras foram observadas através de Microscopia Ótica (MO), utilizando-se um microscópio marca Zeiss, modelo Axio, com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

Para caracterização da resistência mecânica, as amostras restantes, antes e depois da exposição, foram submetidas a ensaios de tração direta, com emprego de uma prensa universal Shimadzu UH-F2000kNI controlada por computador, mostrada na Figura 9. Para os ensaios foi adotado controle por deslocamento com velocidade de 5mm/min.

Figura 11 - Teste de tração estacas CF e HR



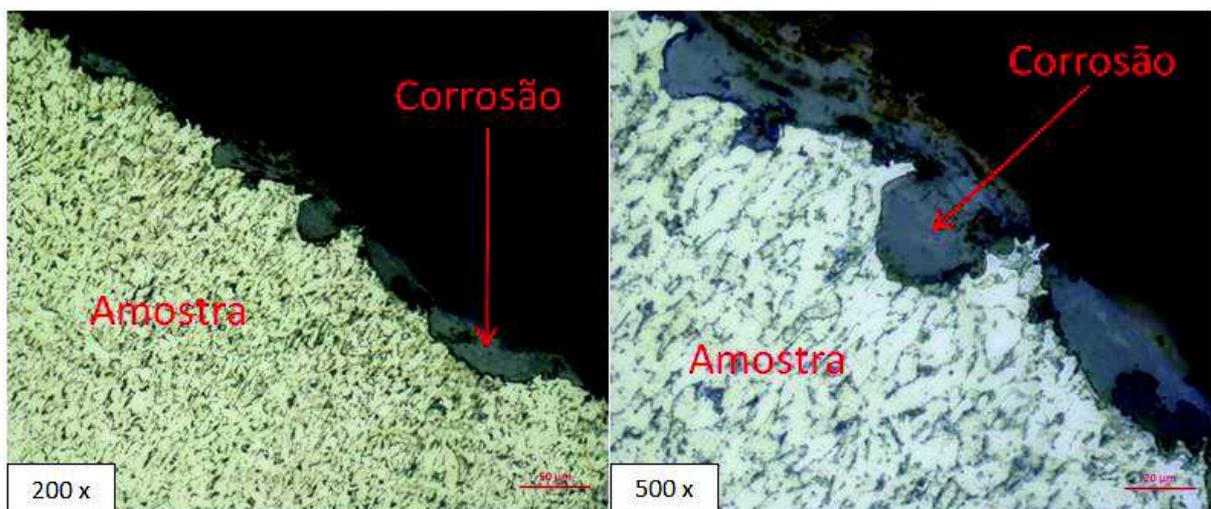
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados dos ensaios metalográficos pré-exposição

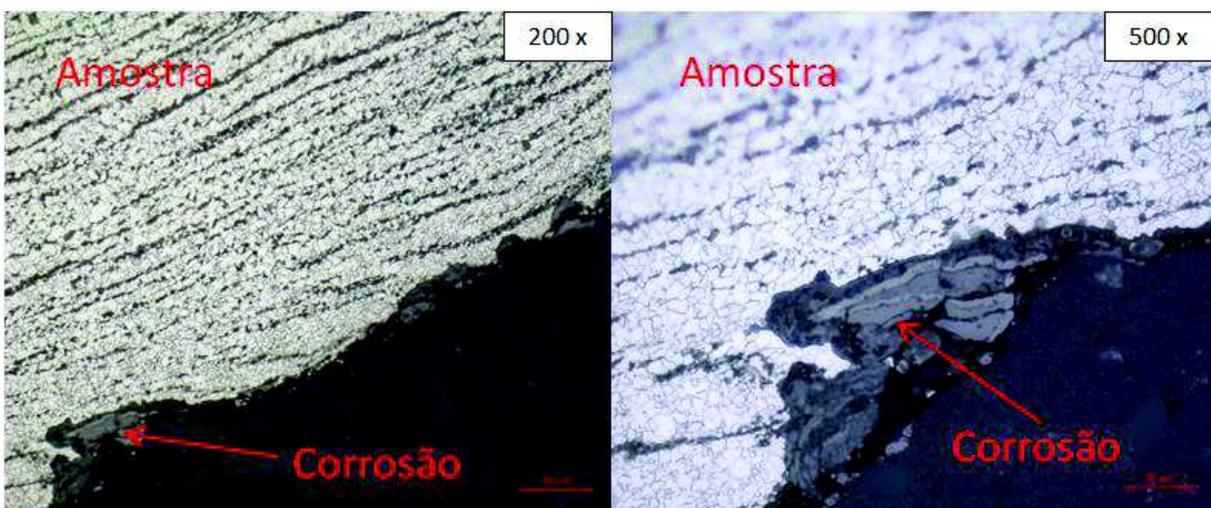
Como mostrado nas figuras 12 e 13, a análise metalográfica das amostras de estacas-prancha, antes da exposição, já foram encontrados alguns pontos de corrosão, com aparência similar para ambos os tipos de estaca.

Figura 12 - Estaca-prancha CF (aumento de 200x e 500x)



Fonte: Elaborado pelo autor.

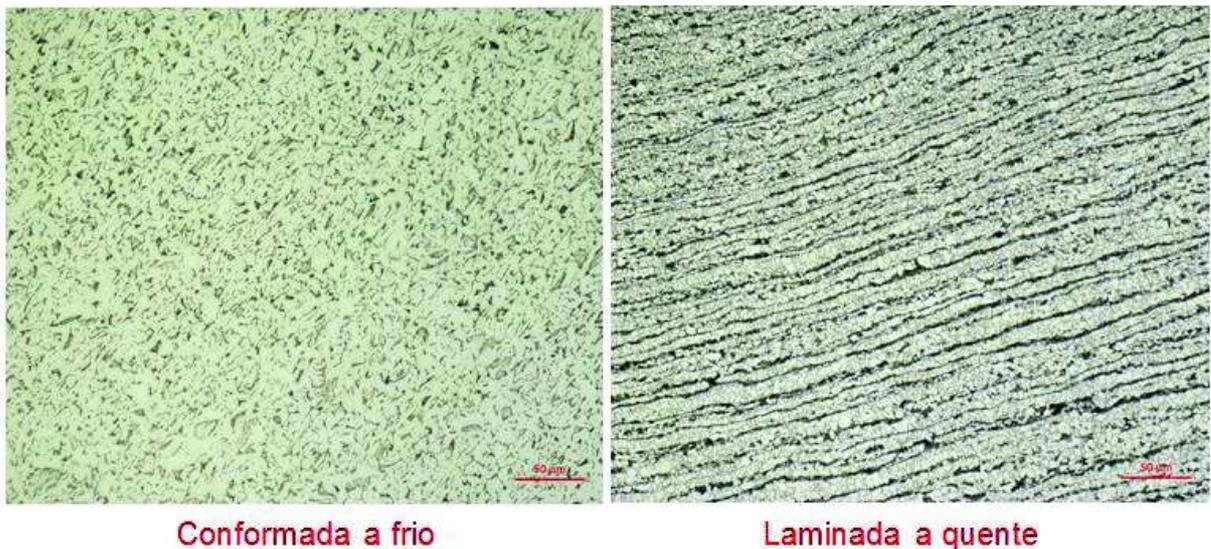
Figura 13 - Estaca-prancha HR (aumento de 200x e 500x)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a microestrutura, foi possível verificar algumas diferenças entre as morfologia dos grãos de cada tipo de estaca-prancha, sendo que a estaca conformada a frio apresentou uma presença maior de ferrita (cor clara) com uma maior dispersão, enquanto a estaca laminada a quente apresentou uma presença maior de perlita (cor escura), com linhas homogêneas (figura 13).

Figura 14 - Estaca-prancha CF e HR - Microestrutura (aumento de 200x)

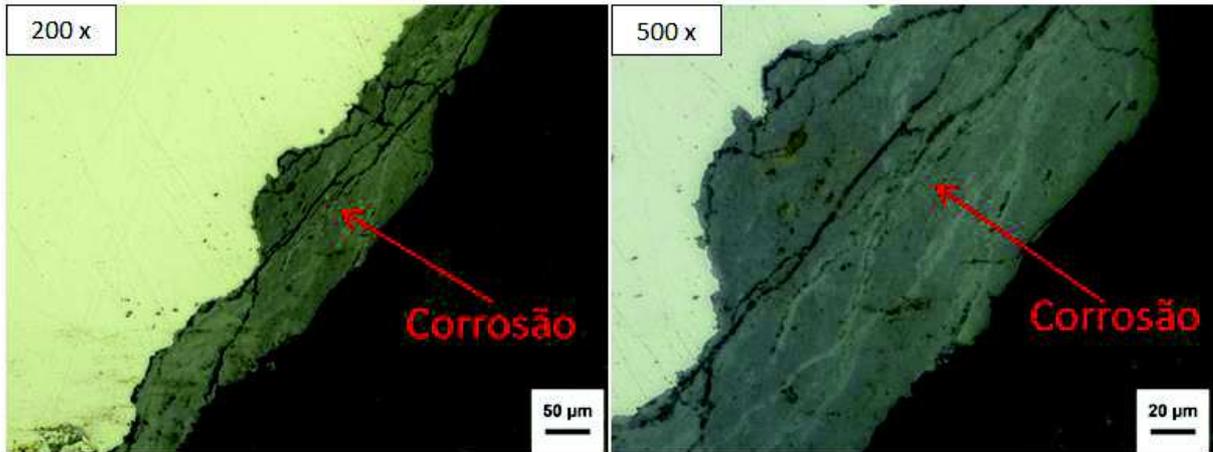


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Resultados dos ensaios metalográficos pós-exposição

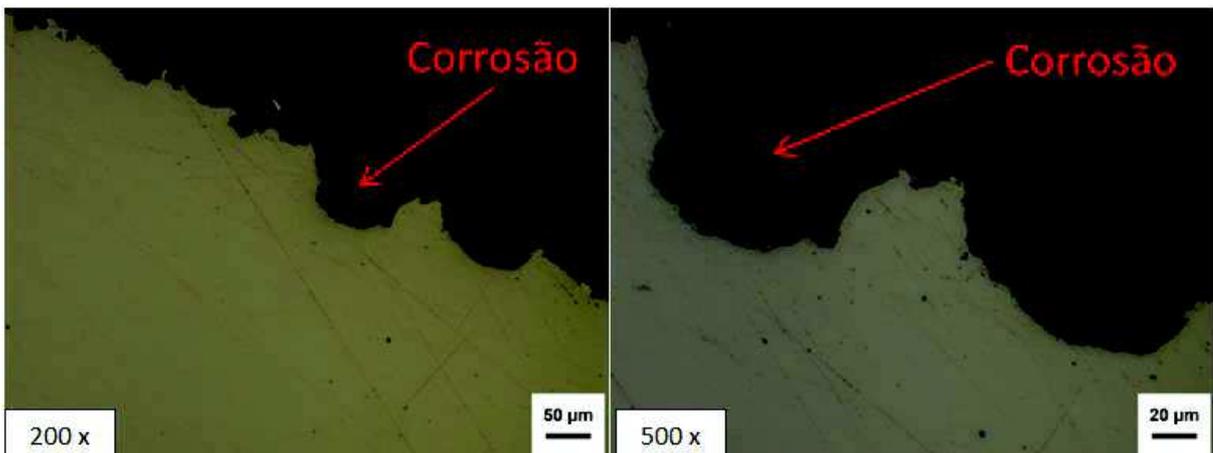
Como se pode verificar nas Figuras 15 a 18, que mostram os pontos mais deteriorados, a análise metalográfica das amostras após exposição evidencia corrosão bem mais acentuada do que a registrada nas amostras iniciais, como esperado.

Figura 15 - Estaca-prancha CF (aumento de 200x e 500x)



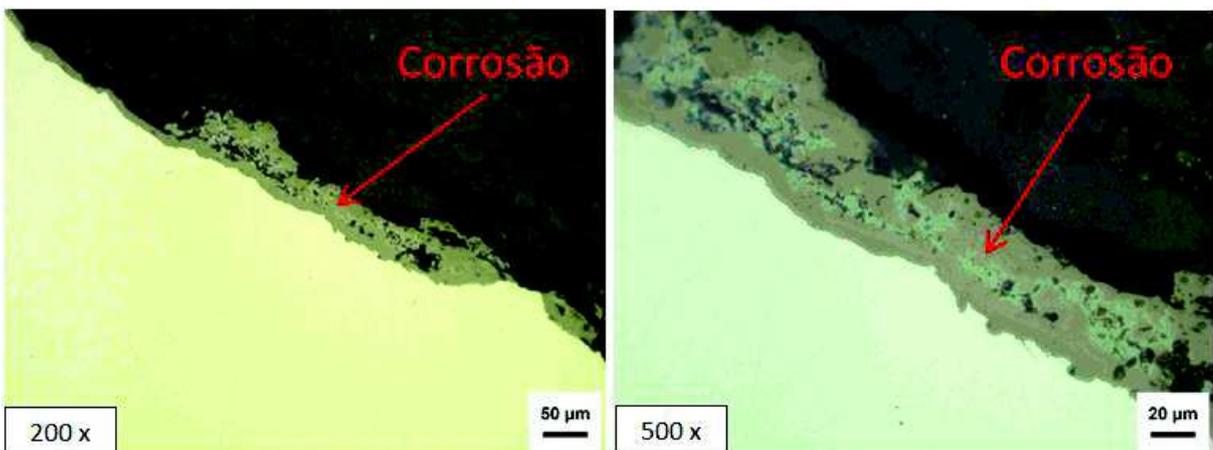
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Estaca-prancha CF (aumento de 200x e 500x)



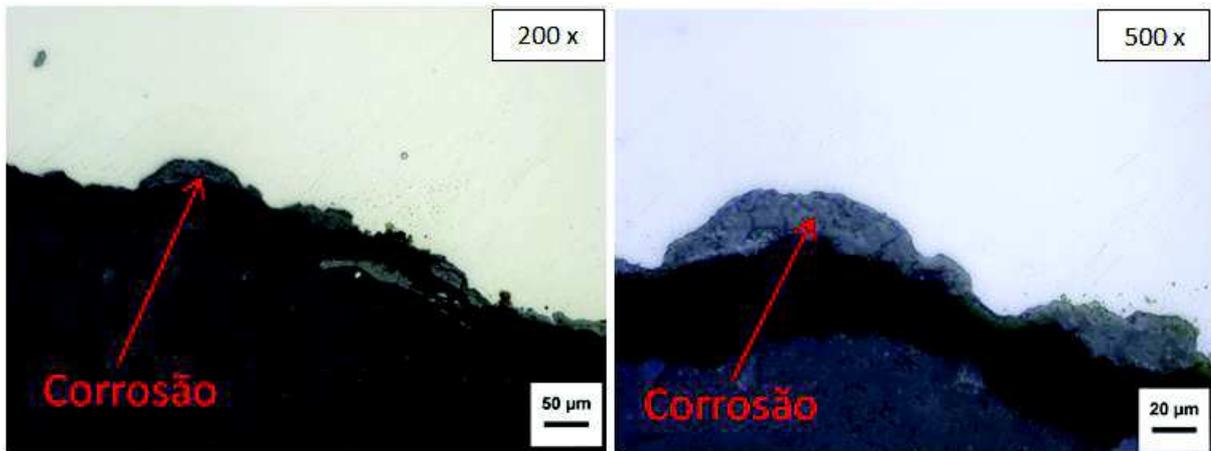
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Estaca-prancha HR (aumento de 200x e 500x)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Estaca-prancha HR (aumento de 200x e 500x)



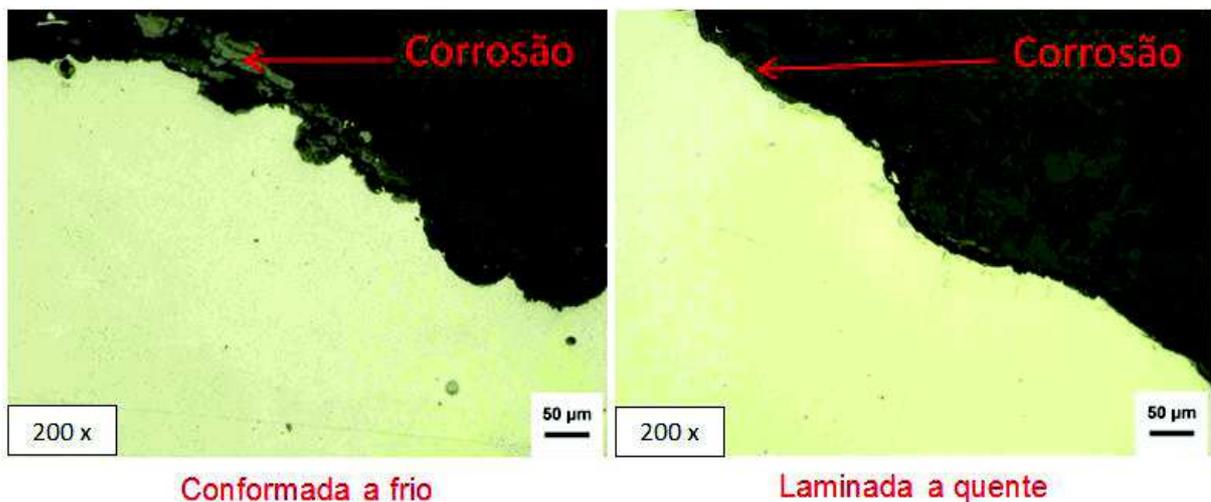
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando as figuras nota-se que as amostras dos conectores gancho “hook” apresentaram claramente corrosão mais intensa, havendo ataque corrosivo de até 145 μm , enquanto nas amostras do conector “interlock” teve ataque corrosivo de até 63 μm .

Na figura 19 podemos fazer uma comparação visual entre a camada de corrosão verificada ao longo do perímetro de cada tipo de estaca.

A corrosão observada no perímetro de contato das amostras da estaca-prancha conformada a frio mostrou-se mais acentuada em regiões localizadas (apresentando maior concentração de óxidos) enquanto que nas amostras da estaca-prancha laminada a quente, apresentou uma corrosão uniforme com um menor ataque corrosivo.

Figura 19 - Estaca-prancha CF e HR (aumento de 200x)

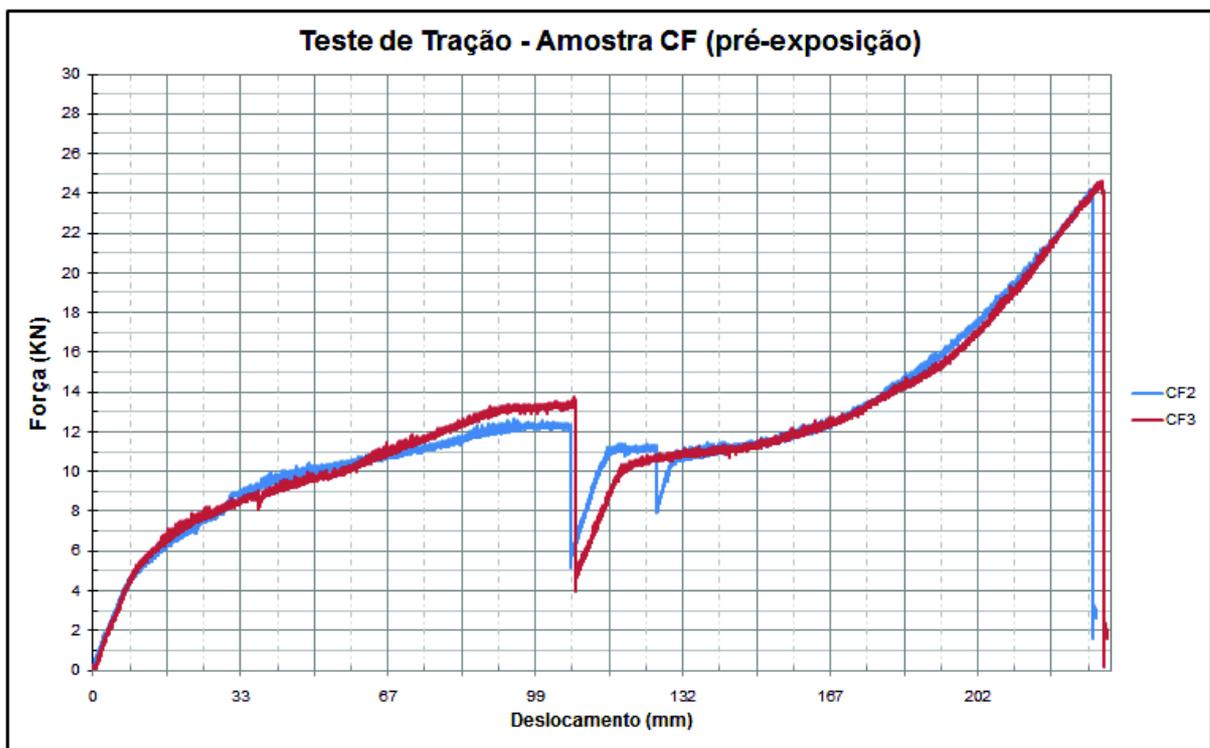


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Resultados dos testes de tração pré-exposição

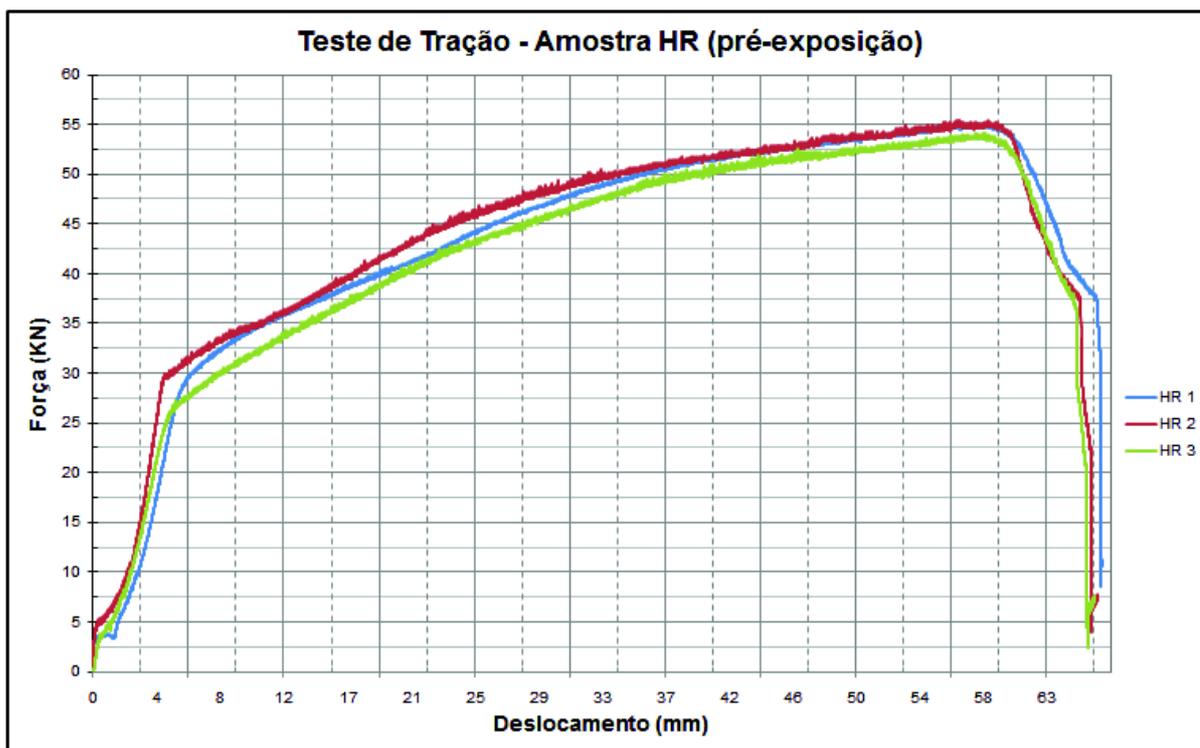
Observando os gráficos 1 e 2 verifica-se que as amostras de estacas-prancha laminadas a quente apresentaram desempenho mecânico superior em relação às amostras de estacas conformadas a frio. Na média as primeiras suportaram cargas de 54,5 kN antes de perder a capacidade de suporte na conexão, enquanto as últimas já chegavam ao limite de resistência da conexão quando as cargas atingiam cerca de 24,5kN. Esse é um comportamento esperado pela melhor forma de geração e ajuste dos conectores das estacas laminadas a quente.

Gráfico 1 - Estaca-prancha CF (Teste de tração)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Estaca-prancha HR (Teste de tração)



Fonte: Elaborado pelo autor.

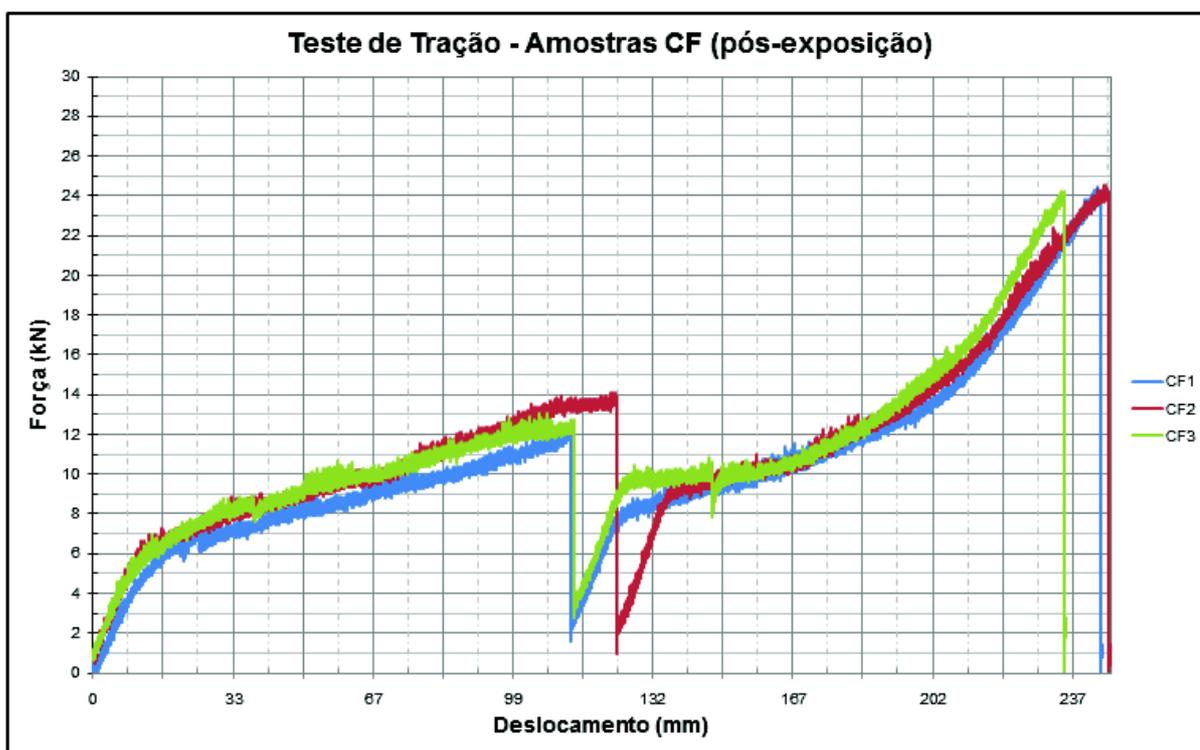
4.4 Resultados dos testes de tração pós-exposição

Considerando o teste de tração pós-exposição, verificamos que as estacas-prancha laminadas a quente tiveram um desempenho médio de 51,8kN enquanto as estacas conformadas a frio tiveram um desempenho médio de 24,4kN,

Não houve grande mudança de comportamento nem perda mecânica elevada se comparado aos testes de tração pré-exposição e pós-exposição.

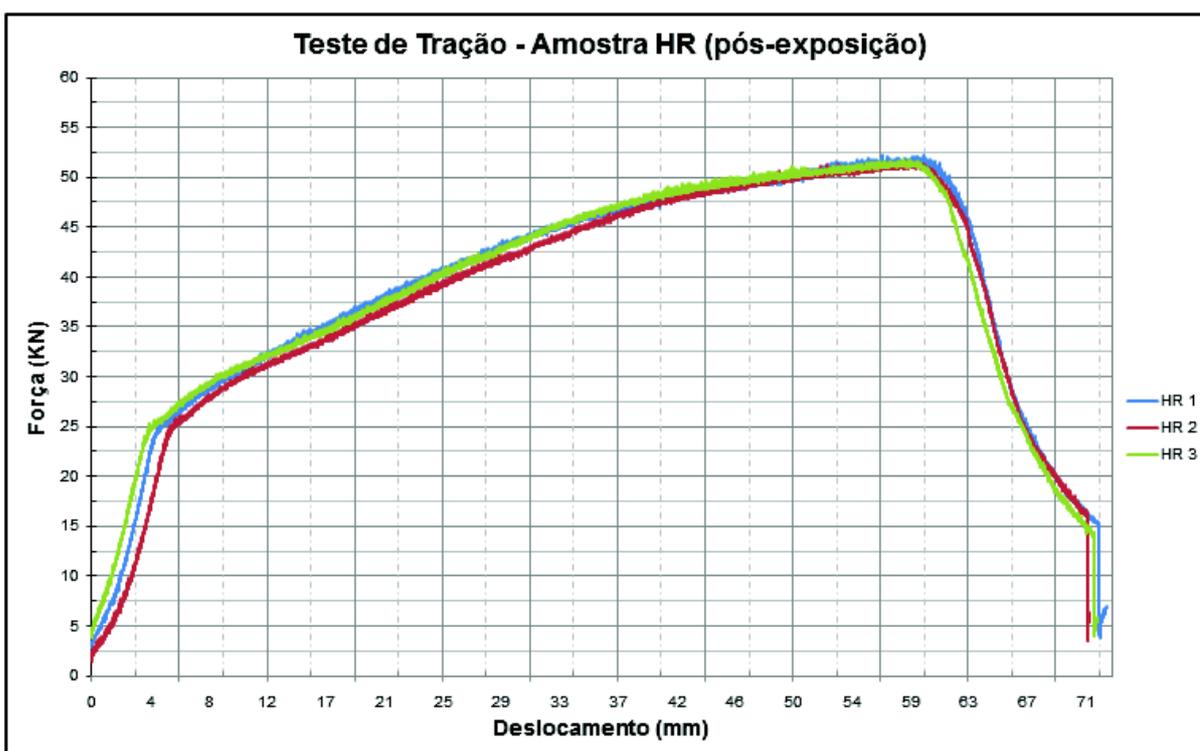
Os gráficos 3 e 4 apresentam os resultados dos testes.

Gráfico 3 - Estaca-prancha CF (Teste de tração)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Estaca-prancha HR (Teste de tração)



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observando os resultados das análises metalográficas não foi possível identificar trincas ou outro tipo de anomalia nas amostras, porém foi possível verificar que as amostras das estacas conformadas a frio apresentaram um nível maior de corrosão.

Em relação aos resultados dos ensaios de tração, o desempenho do conector das estacas-prancha laminadas a quente apresentou um desempenho 120% maior que dos conectores da estaca conformada a frio, como indicado na tabela 2.

Após a exposição houve uma perda de 2,7kN (4,9%) na força necessária para ruptura do conector, enquanto o conector da estaca conformada a frio apresentou uma perda de apenas 0,1kN (0,4%).

Tabela 2 - Resultado do desempenho do teste de tração

Amostras	Conformada a frio		Laminada a quente	
	Pré	Pós	Pré	Pós
	Força (kN)	Força (kN)	Força (kN)	Força (kN)
1	24,8	24,4	55,1	52,2
2	24,2	24,5	54,9	51,6
3	24,6	24,2	53,6	51,7
Média	24,5	24,4	54,5	51,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi verificado também a perda de espessura no conector gancho da estaca conformada a frio de 1mm numa espessura da chapa de 8mm, resultando numa perda de 12,5% de espessura na dobra do conector (figura 20).

Figura 20 - Amostra conector da estaca HR e CF



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

Através dos testes de tração de tração podemos verificar que, como esperado, os conectores intertravados “*interlock*” da estaca-prancha laminada a quente tiveram um desempenho muito melhor que os conectores tipo gancho “hook”, demonstrando que esses conectores gancho de estacas conformadas a frio necessitam de cuidados quando aplicados em obras permanentes e principalmente onde tração nos conectores ocorre, por exemplo, em elementos intermediários em sistema de paredes combinadas, paredes onde se deve assegurar adequada carga de transferência e capacidade de distribuição de esforços entre as estacas

Foi identificada corrosão uniforme e também localizada nas amostras e verificado claramente que a corrosão foi mais intensa nas amostras do conector gancho (conformada a frio) apresentando ataque corrosivo de até 145 μm enquanto nas amostras do conector “*interlock*” (laminada a quente) o ataque corrosivo foi de até 63 μm .

A corrosão observada no perímetro de contato das amostras da estaca-prancha conformada a frio mostrou-se mais acentuada em regiões localizadas enquanto que nas amostras da estaca-prancha laminada a quente, apresentou uma corrosão uniforme com um menor ataque corrosivo.

O processo corrosivo foi mais intenso nas amostras das estacas-prancha conformadas a frio e a repercussão em termos de resistência foi maior nas amostras das estacas-prancha laminadas a quente.

Em geral a estaca-prancha laminada a quente tem desempenho superior, mas é fundamental estudar a vida útil desses elementos e para isso demandam-se mais ensaios para que se possa caracterizar adequadamente o comportamento da corrosão.

Comparative Analysis of Connectors Corrosion in Hot Rolled Steel Sheet Pile and Cold Formed Steel Sheet Pile

Abstract: There are two models of steel sheet piles distinguished by its manufacturing process, one hot-rolled and the other cold formed. The main difference between them is its connection. The hot rolled steel sheet pile has an interlock connection and the cold formed steel sheet pile has a “hook” connection. As these elements are used in contact with the ground and water, there are concerns regarding its resistance to corrosion. The present paper proposes an analysis of the corrosion behavior in these two types of connectors. This paper reports the results of a corrosion behavior analysis in both types of connectors, as these are the most vulnerable parts of the steel sheet pile for corrosion. It was done a comparative analysis of the microscopic appearance of samples from both steel sheet piles before and after exposure to a combination of Salt Spray Test and immersed in chloride solution. Furthermore, tensile tests were carried out on samples to determine the impact of connection resistance.

Key-words: Steel Sheet Pile. Connector. Corrosion. Hot rolled. Cold formed.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL, **Catálogo Foundation Solutions – Projects Central & South America**. Belo Horizonte, 2016. 24 p.

ARCELORMITTAL, **Estacas Pranchas Metálicas Laminadas a Quente: Catálogo Geral** 2015. 2015.

ARCELORMITTAL. **Info-sheet GU13N**. Luxemburgo, 2012. 5 p.

ARCELORMITTAL. **Pilling Handbook**. 9. ed. Luxemburgo, 2016. 448 p.

BRIARD, P. **Cold Formed Sheet Pile**. ArcelorMittal RPS. 2014.

BRITISH STANDARD (BS). **EN 10248-1**: Hot rolled sheet piling of non alloy steels – Part 1: Technical delivery conditions.1995.

BRITISH STANDARD (BS). **EN 10248-2**: Hot rolled sheet piling of non alloy steels – Part 2: Tolerances on shape and dimensions.1995.

BRITISH STANDARD (BS). **EN 10249-1**: Cold formed sheet piling of non alloy steels – Part 1: Technical delivery conditions.1995.

BRITISH STANDARD (BS). **EN 10249-2**: Cold formed sheet piling of non alloy steels – Part 2: Tolerances on shape and dimensions.1995.

BRITISH STANDARD (BS). **EN 12063**: Execution of special geotechnical work – Sheet-pile walls.1999.

DA SILVA, M. H. **Soluções para Fundação e Contenção**: Estaca-prancha. ArcelorMittal Projects. 2016.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (FDOT). **Structures Design Guidelines**. v. 1. 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. p. 2.

GERMAN PORT TECHNOLOGY ASSOCIATION; GERMAN GEOTECHNICAL SOCIETY. **Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012**. Wilhelm Ernst & Sohn. 2012.