

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia - PPGE3M



SAMUEL HENRIQUE FREESE  
Eng. de Materiais

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO ANTI-CORROSIVA DE ÓLEOS DE  
PROCESSO EM MATERIAIS TREFILADOS**

PORTO ALEGRE  
2012

SAMUEL HENRIQUE FREESE

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO ANTI-CORROSIVA DE ÓLEOS DE  
PROCESSO EM MATERIAIS TREFILADOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e dos Materiais - PPGE3M, como  
parte dos requisitos para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia, Modalidade Acadêmico,  
Especialidade Ciências dos Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álvaro Meneguzzi

PORTO ALEGRE

2012

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, que sempre se fez presente em todas as etapas da minha vida, dando todo incentivo e suporte necessário;

À minha namorada, Bianca, por estar ao meu lado nesta fase final do trabalho, sempre me alegrando e pressionando, quando necessário;

À UFRGS pela oportunidade de mais um ensino de excelente qualidade e ao Lacor por disponibilizar a utilização de suas instalações;

À Gerdau Aços Especiais Piratini, pela oportunidade de aprendizado e crescimento profissional, representada pelo Eng. Mauricio Metz que me deu o incentivo necessário para iniciar o mestrado, ao Eng. Carlos Daroit que me deu o incentivo necessário para finalizar o trabalho e ao colega Jair Leopoldo Janoski pelo auxílio nos ensaios com seu conhecimento;

Aos colegas de UFRGS, Juliana dos Anjos e Tiago Moreira de Abreu, pela ajuda fundamental nos ensaios necessários;

Ao Prof. Dr. Álvaro Meneguzzi pela orientação, apoio e paciência durante todo período do mestrado.

## RESUMO

Aços carbono trefilados possuem como características excelentes propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e bom acabamento superficial. Porém, para fornecimento deste material, um dos cuidados necessários é a proteção temporária contra a corrosão atmosférica, que pode ser definida como um processo resultante de reações químicas e/ou eletroquímicas, pelas quais metais e ligas se deterioram quando submetidos à ação climática. Para evitar / retardar este processo, usualmente é utilizada a aplicação de uma película de óleos formadores de barreira, protegendo o material base. Buscando avaliar a capacidade protetiva de óleos utilizados em materiais trefilados, foram selecionados 3 tipos de produtos usados no polimento e 3 tipos aplicados como proteção final. Diferentes combinações dos produtos foram avaliadas em amostras numa câmara úmida, mostrando que a capacidade protetiva dos óleos de proteção final está diretamente relacionada à sua densidade, diferentemente dos óleos de polimento que não apresentam uma relação direta com as propriedades avaliadas. Com base nestes resultados, pode-se prever a capacidade protetiva de óleos de proteção final utilizando sua densidade como referência, devido a esta relação ser linear, tendo outros fatores, como o tipo de óleo de polimento, afetando a constante da equação da curva.

**Palavras-chave:** aço trefilado; corrosão atmosférica; proteção; óleos protetivos.

## ABSTRACT

Drawn carbon steel has excellent mechanical properties, dimensional stability and good surface quality as characteristics. But, to supply this material, a necessary care is the temporary protection against atmospheric corrosion, which can be defined as a process resulting from chemical and / or electrochemical reactions, in which metals and alloys deteriorate when subjected to climate action. To avoid / retard this process, usually it's used an application of an oil coat that protects the base material. Trying to understand the protective capacity of oils used in drawn materials, 3 products used in polishing process and 3 applied as final protection were selected. Samples tested in humid chamber with different combinations of products were evaluated, showing that the protective capacity of oils used as final protection is directly related with their density, a relation that is not presented in polishing oils. With these results we can forecast the protective capacity of oils used as final protection employing its density as reference, because of the linear relation, having another factors, like the type of polishing oil, affecting the curve equation constant.

**Keywords:** drawn steel, atmospheric corrosion, protection, protective oils.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS .....	4
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS REDONDAS (3) .....	6
FIGURA 3: TREFILA COMBINADA ROLO / BARRA TIPO SCHUMAG (4).....	7
FIGURA 4: ROLOS DE UMA POLITRIZ / ENDIREITADEIRA DE BARRAS GROSSAS (50 – 150MM DE DIÂMETRO).....	8
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO DA CORROSÃO DO FERRO PRESENTE NO AÇO .....	16
FIGURA 6: MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS PRODUTOS INICIAIS DA CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE AÇO CARBONO (17) .....	18
FIGURA 7: PERFIL DE RUGOSIDADE DE UMA CHAPA DE AÇO CARBONO PROTEGIDA COM UMA CAMADA DE ÓLEO PROTETIVA .....	21
FIGURA 8: AMOSTRA 9 - SOMENTE DESENGRAXADA .....	31
FIGURA 9: AMOSTRA 1 - CONDIÇÃO ATUAL DO PROCESSO.....	31
FIGURA 10: AMOSTRA 2 - DESENGRAXANTE E SOMENTE ÓLEO POLIMENTO TIPO 6.....	32
FIGURA 11: AMOSTRA 3 - DESENGRAXANTE E SOMENTE ÓLEO POLIMENTO TIPO 5.....	32
FIGURA 12: AMOSTRA 4 - DESENGRAXANTE E SOMENTE ÓLEO POLIMENTO TIPO 4.....	33
FIGURA 13: AMOSTRA 5 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 6 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 1.....	33
FIGURA 14: AMOSTRA 6 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 5 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 2.....	34
FIGURA 15: AMOSTRA 7 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 5 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 3.....	35
FIGURA 16: AMOSTRA 8 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 5 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 1.....	35
FIGURA 17: AMOSTRA 10 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 4 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 3.....	36
FIGURA 18: AMOSTRA 11 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 4 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 2.....	36
FIGURA 19: AMOSTRA 12 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 4 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 1.....	37
FIGURA 20: AMOSTRA 13 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 6 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 3.....	37
FIGURA 21: AMOSTRA 14 - DESENGRAXANTE, ÓLEO POLIMENTO TIPO 6 E ÓLEO PROTEÇÃO FINAL TIPO 2.....	38
FIGURA 22: RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E SEVERIDADE .....	41
FIGURA 23: RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E % DE ÁREA OXIDADA.....	43

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: QUANTIDADE DE ÁGUA ADSORVIDA NA SUPERFÍCIE DO METAL .....	15
TABELA 2: COMPOSIÇÃO (%) DO AÇO SAE 1045 UTILIZADO NO TRABALHO .....	23
TABELA 3: ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO SAE 1045 UTILIZADO NO TRABALHO.....	23
TABELA 4: COMBINAÇÃO DE APLICAÇÃO DE TIPOS DE ÓLEO POR AMOSTRA TREFILADA.....	25
TABELA 5: TIPO DE CORROSÃO .....	27
TABELA 6: GRAU DE CORROSÃO.....	28
TABELA 7: CRITÉRIOS PARA ANALISADOR DE IMAGEM .....	29
TABELA 8: RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS DE CÂMARA ÚMIDA.....	30
TABELA 9: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 9 .....	31
TABELA 10: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 1 .....	31
TABELA 11: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 2 .....	32
TABELA 12: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 3 .....	32
TABELA 13: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 4 .....	33
TABELA 14: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 5 .....	33
TABELA 15: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 6 .....	34
TABELA 16: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 7 .....	34
TABELA 17: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 8 .....	35
TABELA 18: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 10 .....	36
TABELA 19: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 11 .....	36
TABELA 20: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 12 .....	37
TABELA 21: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 13 .....	37
TABELA 22: ACOMPANHAMENTO DA CONDIÇÃO DE CORROSÃO DA AMOSTRA 14 .....	38
TABELA 23: RESULTADOS DO ANALISADOR DE IMAGENS (EM PRETO A ÁREA OXIDADA).....	39
TABELA 24: DENSIDADES MEDIDAS DE CADA ÓLEO.....	40

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
3.1	AÇO CARBONO .....	3
3.2	TREFILAÇÃO .....	5
3.2.1	<i>Trefilação Rolo / Barra.....</i>	<i>6</i>
3.3	POLIMENTO E ENDIREITAMENTO.....	7
3.4	CORROSÃO.....	8
3.4.1	<i>Taxa de Corrosão.....</i>	<i>9</i>
3.4.2	<i>Produtos da Corrosão – Óxidos.....</i>	<i>9</i>
3.4.3	<i>Problemas Ocasionalados pela Corrosão.....</i>	<i>11</i>
3.4.4	<i>Tipos de Corrosão.....</i>	<i>12</i>
3.4.5	<i>Fatores que Influenciam a Corrosão .....</i>	<i>19</i>
3.5	PROTEÇÃO ANTICORROSIVA.....	19
3.5.1	<i>Proteção Catódica .....</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Proteção Anódica.....</i>	<i>20</i>
3.5.3	<i>Proteção por Barreira.....</i>	<i>20</i>
3.6	ENSAIOS DE CORROSÃO EM CÂMARA ÚMIDA.....	22
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
4.1	MATERIAIS.....	23
4.1.1	<i>Aço Carbono .....</i>	<i>23</i>
4.1.2	<i>Equipamentos.....</i>	<i>24</i>
4.1.3	<i>Óleos .....</i>	<i>24</i>
4.1.4	<i>Desengraxante .....</i>	<i>25</i>
4.2	MÉTODOS .....	25
4.2.1	<i>Avaliação de Resultado de Corrosão.....</i>	<i>27</i>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>30</b>
5.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E AVALIAÇÃO VISUAL.....	30
5.1.1	<i>Amostra 9: somente desengraxada.....</i>	<i>31</i>
5.1.2	<i>Amostra 1: condição atual do processo.....</i>	<i>31</i>
5.1.3	<i>Amostra 2: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 6 .....</i>	<i>32</i>
5.1.4	<i>Amostra 3: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 5 .....</i>	<i>32</i>
5.1.5	<i>Amostra 4: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 4 .....</i>	<i>33</i>
5.1.6	<i>Amostra 6: desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 2 .....</i>	<i>33</i>
5.1.7	<i>Amostra 7: desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 3 .....</i>	<i>34</i>
5.1.8	<i>Amostra 8: desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 1 .....</i>	<i>35</i>

5.1.9	<i>Amostra 10: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 3</i>	35
5.1.10	<i>Amostra 11: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 2</i>	36
5.1.11	<i>Amostra 12: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 1</i>	36
5.1.12	<i>Amostra 13: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 3</i>	37
5.1.13	<i>Amostra 14: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 2</i>	38
5.1.14	<i>Amostra 15: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 1</i>	33
5.2	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE % DE ÁREA OXIDADA	38
5.3	RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE DENSIDADE	40
5.4	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DENSIDADE NA CAPACIDADE PROTETIVA	41
5.4.1	<i>Relação entre Densidade e Severidade</i>	41
5.4.2	<i>Relação entre Densidade e % de Área Oxidada</i>	42
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>49</b>
9.1	FICHAS DE ENSAIO	49

# 1 INTRODUÇÃO

O processo siderúrgico possui como produtos finais diferentes tipos de materiais, com propriedades e características dimensionais específicas para cada aplicação. Para atingir estas propriedades determinadas pelo cliente, diferentes fluxos de processo são necessários, dentre eles a trefilação.

Aços trefilados ao carbono possuem como características principais excelentes propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e bom acabamento superficial. Possuem aplicações em diversos setores da indústria, entre elas a automobilística, em componentes de suspensão e molas, e construção civil, em sistemas de amarração e treliças. Para fornecimento deste material, um dos cuidados necessários é a proteção temporária contra a corrosão atmosférica.

A corrosão atmosférica é responsável por boa parte das perdas relacionadas à degradação de aços carbono, sendo a em meio aquoso responsável por aproximadamente 90% da incidência. A redução de resistência mecânica, alterações dimensionais, além do aspecto visual, são apenas exemplos das consequências deste processo corrosivo, as quais podem muitas vezes impossibilitar o uso do material na sua aplicação final.

Neste sentido, a proteção temporária através do uso de óleos se faz muito eficiente devido as suas boas propriedades anticorrosivas pela formação de um filme sobre a superfície do metal e também ao baixo custo de aplicação se comparado aos demais processos disponíveis no mercado.

Porém, o correto processo de aplicação e adequada seleção dos óleos são dificuldades encontradas na indústria e que, em grande parte dos setores, não são adequadamente estudados. Atualmente, não existem relações claras entre as propriedades dos óleos protetivos e a sua respectiva capacidade de prevenir / retardar os processos corrosivos.

Para identificar esta relação, o uso da densidade como representação geral do óleo se mostra importante no momento em que ela apresenta uma relação linear com a capacidade protetiva dos óleos de proteção final, facilitando a análise de diferentes óleos, mesmo antes do seu uso.

## **2 OBJETIVOS**

Identificar uma relação entre propriedades de óleos de polimento e proteção final e suas respectivas capacidades protetivas através de análise utilizando o ensaio de corrosão acelerado em câmara úmida, buscando aperfeiçoar o processo produtivo atual aumentando o tempo de estocagem de materiais trefilados.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Aço Carbono

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições, podemos definir o aço<sup>2</sup> como sendo uma liga Ferro-Carbono, contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos secundários (como Silício, Manganês, Fósforo e Enxofre), presentes devido aos processos de fabricação (1).

O aço tem provavelmente o maior range de aplicações se comparado a outros materiais. A grande possibilidade de composições químicas, propriedades mecânicas e formas disponíveis para os produtos, faz do aço um produto versátil que é utilizado em componentes e produtos para diversas aplicações. Dentre as principais aplicações podem ser citadas o uso doméstico, na construção civil, na indústria da energia, na agricultura, no setor automobilístico, entre outros (2).

Na indústria siderúrgica, especialmente de aços especiais, a produção de trefilados segue fluxos adequados para cada aplicação, existindo sempre um rígido controle de qualidade. Em resumo, o processo segue as etapas abaixo:

- 1) Fusão de sucata, ferro-gusa e ferro-ligas em um forno de fusão a arco elétrico. Após a fusão, ocorre o refino primário neste mesmo equipamento. Em seguida, é realizado o refino secundário e desgaseificação no aço em uma estação de forno-panela e desgaseificador a vácuo, onde são adicionados elementos de liga, desoxidantes e eliminado o excesso de gases, principalmente hidrogênio. Enfim, o aço é solidificado através de velocidades e temperaturas controladas a fim de obter uma taxa de resfriamento adequada em uma máquina de lingotamento contínuo em seções quadradas. Após endireitamento e corte a quente, está finalizado o processamento do tarugo.
- 2) Na laminação, após um reaquecimento em temperatura adequada, o tarugo é conformado a quente através da passagem por diversos canais e

cilindros de laminação, obtendo-se dessa forma uma barra com a seção redonda desejada.

- 3) O processo de trefilação permite o acabamento a frio de barras ou rolos laminados com ótima produtividade e bom acabamento superficial. Um posterior polimento e endireitamento de precisão são realizados através da passagem da barra por um conjunto de dois rolos hiperbólicos.

De forma geral a produção de aços especiais segue o fluxo da Figura 1.

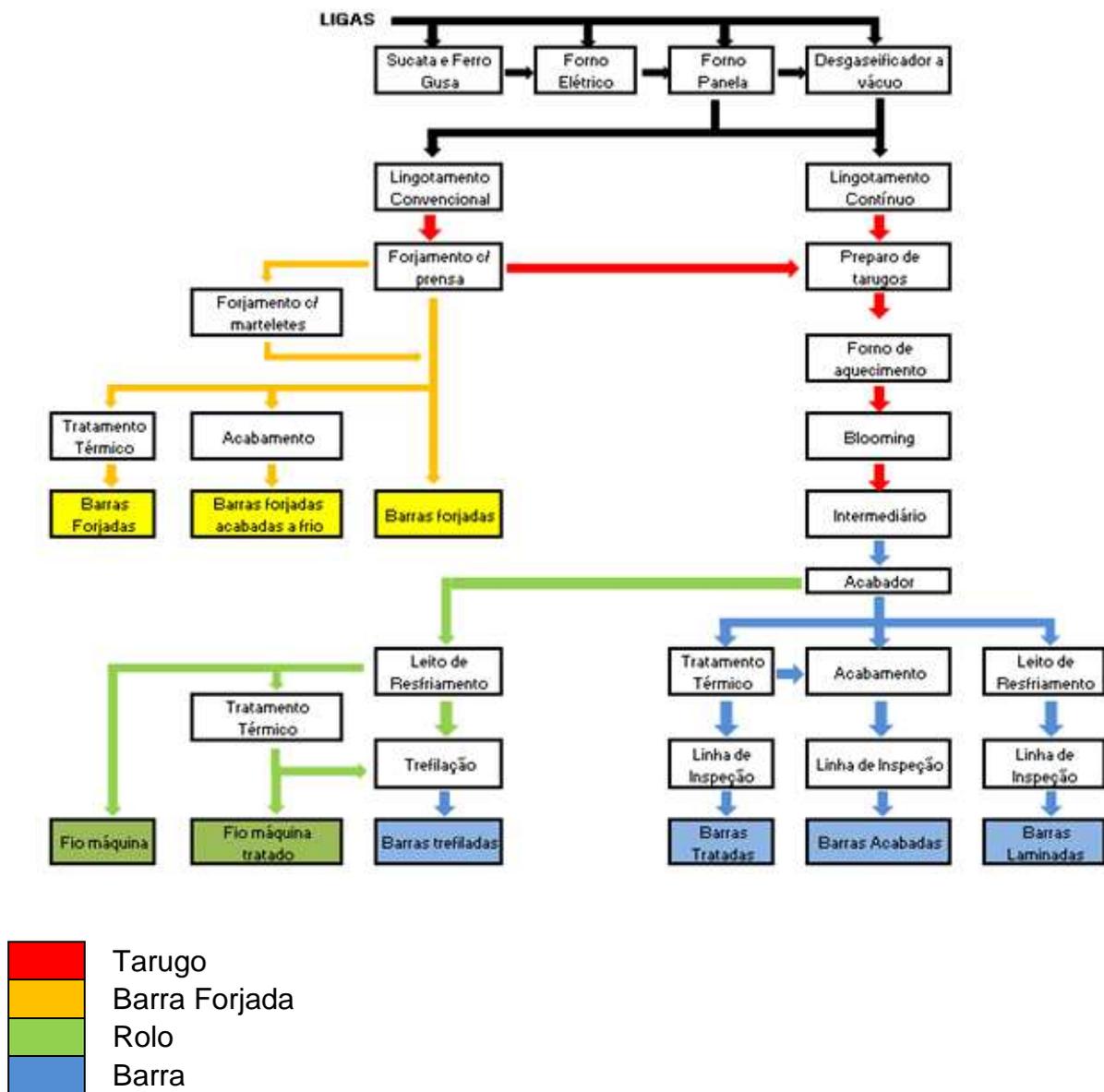


Figura 1: Esquema de produção de aços especiais

## 3.2 Trefilação

A trefilação é um dos processos mais antigos e mais importantes na fabricação de produtos metálicos contínuos de diversas geometrias possíveis. Independentemente do tipo de produto obtido, a trefilação caracteriza-se sempre pelo tracionamento do produto trefilado através de uma matriz que lhe confere a geometria e dimensões especificadas (3).

Uma avaliação que pode ser feita sobre o processo, é a análise sistêmica de todas as áreas que representam e influenciam o processo, como pode ser verificado na descrição abaixo, resumido na Figura 2.

- Área 1: zona plástica relativa ao comportamento plástico do material;
- Área 2: representa as características da matéria-prima antes da deformação iniciar;
- Área 3: representa as características do produto conformado, principalmente propriedades mecânicas;
- Área 4: considera a região de fronteira entre o material a conformar e a ferramenta;
- Área 5: representa as ferramentas de conformação (fieira);
- Área 6: representa a interação do material a conformar e do produto com o meio-ambiente;
- Área 7: representa o equipamento de conformação;
- Área 8: representa o ambiente que envolve o processo.

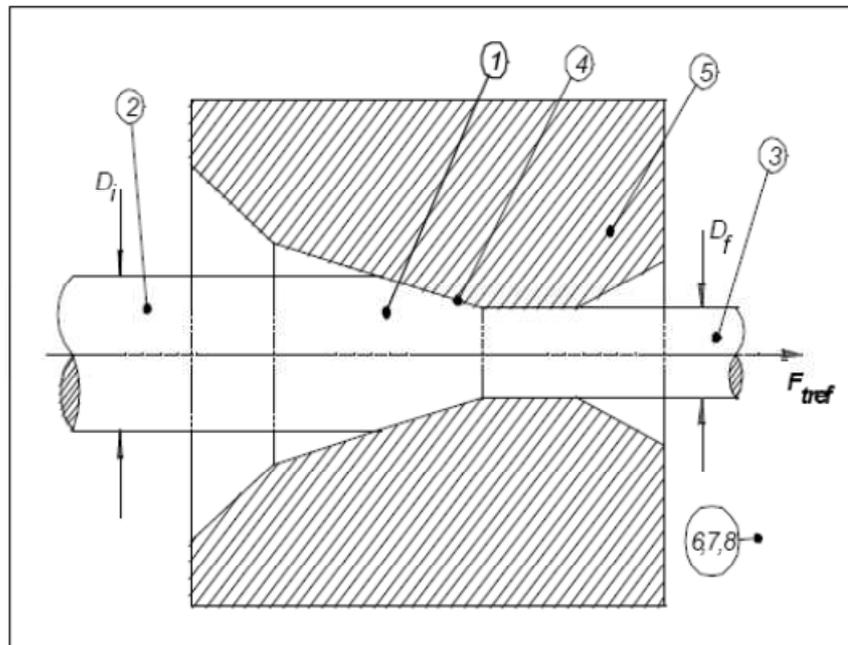


Figura 2: Representação de trefilação de barras redondas (3)

O encruamento, que é uma característica importante do material trefilado, pode ser definido como o aumento de resistência mecânica devido à deformação plástica a frio, ou seja, sob condições em que não estão presentes os mecanismos metalúrgicos que levam à recristalização do material metálico. Além do aumento de resistência mecânica devido ao encruamento, o material trefilado possui ótima estabilidade dimensional e bom acabamento superficial. Seu uso comum é para fabricação de arames diversos com aplicações simples, vindo também ser utilizado em peças mais críticas como molas e hastes de amortecedores.

### 3.2.1 Trefilação Rolo / Barra

O material trefilado pode se apresentar em várias formas, dependendo do tipo de equipamento e formato da fiação. Um dos processos existentes é a trefilação de rolo, cujo equipamento é mostrado na Figura 3, no qual o material é abastecido em forma de rolo e o produto final é dado em forma de barras.



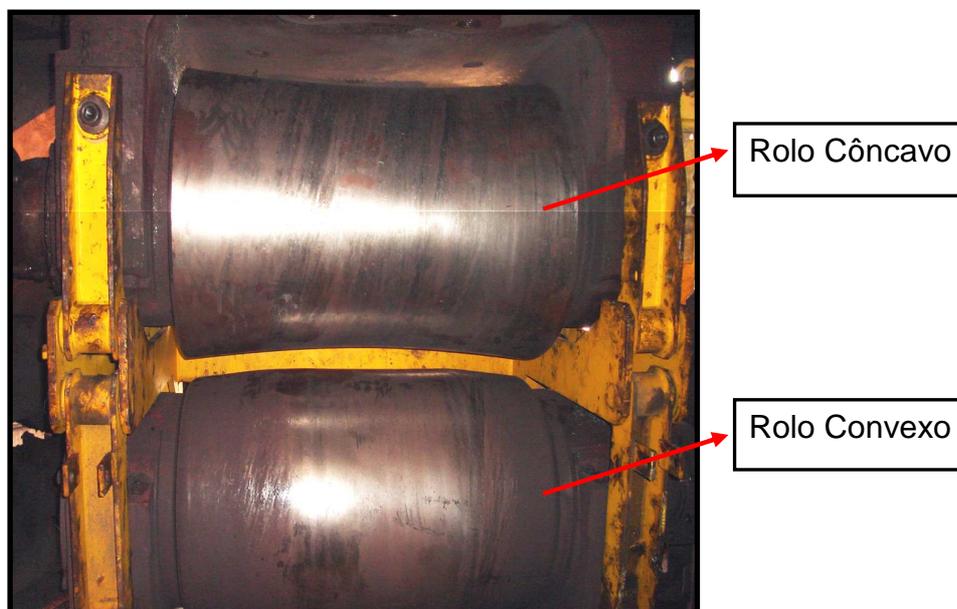
Figura 3: Trefila combinada rolo / barra tipo Schumag (4)

### 3.3 Polimento e Endireitamento

Os processos de polimento e endireitamento são essenciais para garantir as condições finais de bitola e acabamento superficial de barras trefiladas. Uma das maneiras mais utilizadas para realizar estes processos é através de equipamentos duplo-rolos.

Numa politriz duplo rolos (Figura 4), o rolo convexo força a barra a se moldar na forma do rolo côncavo, que é usado com uma espécie de batente, controlando assim o nível de flexão da barra. Devido ao giro dos rolos no seu próprio eixo, é criado um nível de tensão homogêneo ao longo do diâmetro e comprimento da barra, o qual aumenta a uniformidade das tensões residuais do material. Neste processo o polimento é dado pela deformação sofrida pela superfície do material, sendo a qualidade do polimento diretamente proporcional à condição superficial dos rolos (5).

Neste processo é utilizado óleo para refrigeração dos rolos e material em produção. Este óleo é necessário devido ao aquecimento dos rolos junto ao material, minimizando assim o desgaste excessivo dos componentes da máquina e melhorando o acabamento superficial das barras polidas e endireitadas.



**Figura 4: Rolos de uma politriz / endireitadeira de barras grossas (50 – 150mm de diâmetro)**

### **3.4 Corrosão**

Podemos definir a corrosão como sendo a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, como desgaste, variações químicas ou estruturais, tornando-os inadequados para o uso (6).

Devido à corrosão ser, de modo geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos, alterando suas respostas em trabalho, tornando-se um fenômeno de extrema importância no mundo atual.

Os processos corrosivos são controlados, basicamente, por reações de oxidação-redução, onde na primeira ocorre a perda de um elétron por uma espécie química e na segunda o ganho de um elétron por outra espécie química.

Para materiais metálicos, o processo de corrosão é normalmente eletroquímico, isto é, uma reação química na qual existe a transferência de elétrons a partir de uma espécie química para outra. Átomos metálicos perdem ou cedem elétrons na chamada reação de oxidação. Por exemplo, o metal hipotético M, que

tem uma valência  $n$  (ou  $n$  elétrons de valência) pode experimentar oxidação de acordo com a reação apresentada na Equação 1 na qual  $M$  se torna um íon positivamente carregado com carga  $n^+$  e no processo perde seus  $n$  elétrons de valência (6).



Este sistema eletroquímico pode ser chamado de pilha eletroquímica e é composto por:

- 1) Ânodo: material em que há oxidação;
- 2) Eletrólito: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do ânodo para o cátodo;
- 3) Cátodo: material onde ocorrem reações de redução.

### **3.4.1 Taxa de Corrosão**

Quando o produto de corrosão formado é não poroso e aderente à superfície do metal, a taxa de corrosão, dada em massa por unidade de área em função do tempo, é controlada por difusão iônica, apresentando um comportamento parabólico. Na oxidação de metais que apresentam produtos porosos e não aderentes, o comportamento da taxa de corrosão é linear. Ainda existe um terceiro comportamento logarítmico que é encontrado em corrosões nas quais a camada de óxido é muito fina e formada a baixas temperaturas.

### **3.4.2 Produtos da Corrosão – Óxidos**

Os produtos da corrosão dos metais são geralmente compostos químicos formados por átomos de oxigênio com outros elementos. Constituem um grande grupo na química, possuindo propriedades diversas de acordo com sua composição. Para a corrosão do aço, espera-se que os produtos finais encontrados sejam óxidos de ferro de diferentes valências.

#### **3.4.2.1 Óxidos de Ferro**

Os óxidos de ferro são compostos por ferro e oxigênio. Ao todo, são dezesseis óxidos e oxihidróxidos de ferro conhecidos. São amplamente distribuídos na natureza, desempenhando um papel importante em muitos processos geológicos

e biológicos, e são amplamente utilizados por seres humanos, por exemplo, como minérios de ferro, pigmentos, catalisadores, entre outros (8).

#### **3.4.2.1.1 Óxido de Ferro (II)**

O óxido de ferro (II) é um pó de cor preta com a fórmula química FeO. Trata-se do elemento químico ferro no estado de oxidação +2 ligado ao oxigênio. Sua forma mineral é conhecida como *wustita*, não devendo ser confundida com a ferrugem, que normalmente consiste de hidratação do óxido de ferro (III).

O FeO é termodinamicamente instável abaixo de 575 ° C, adotando a estrutura cúbica do sal de rocha, onde os átomos de ferro são octaedricamente coordenados por átomos de oxigênio e vice-versa para os átomos de oxigênio.

#### **3.4.2.1.2 Óxido de Ferro (II, III)**

O óxido de ferro (II, III) é um composto químico com fórmula Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, encontrado na natureza como o mineral magnetita. Ele contém tanto íons Fe<sup>2+</sup> como Fe<sup>3+</sup> e às vezes é formulado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.FeO. Apresenta magnetismo permanente e é ferri-magnético, mas às vezes é incorretamente descrito como ferromagnético. Seu uso mais extensivo é como um pigmento preto, que é sintetizado em vez de ser extraído do mineral encontrado na natureza, além do tamanho e forma das partículas poderem variar através do método de produção.

O Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> tem uma estrutura cúbica espinélica inversa, que consiste de uma matriz cúbica repleta de íons de óxido, onde todos os íons Fe<sup>2+</sup> ocupam metade dos sítios octaédricos e Fe<sup>3+</sup> são divididos igualmente entre os demais sítios octaédricos e os sítios tetraédricos.

#### **3.4.2.1.3 Óxido de Ferro (III)**

O óxido de ferro (III) é um composto inorgânico com a fórmula Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O mineral é conhecido como hematita, sendo a principal fonte de ferro para a indústria siderúrgica. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é paramagnético, marrom avermelhado.

Apresenta diferentes formas cristalinas, sendo elas a alfa, beta, gama e épsilon, se dissolvendo facilmente em ácido forte, por exemplo, ácido clorídrico e sulfúrico. Para o aço, as principais fases deste óxido relatadas são lepidocrocita (g-

FeOOH) e goetita ( $\alpha$ -FeOOH). A lepidocrocita é, normalmente, o produto de corrosão inicial e, conforme o tempo de exposição às intempéries é mais longo, ocorre sua transformação em goetita (9).

Um pó muito fino de óxido de ferro é conhecido como “rouge de joalheiro”, “rouge vermelho”, ou simplesmente “rouge”. Ele é usado para o polimento final em joias metálicas e lentes e, historicamente, como um cosmético. O rouge “corta” mais lentamente do que alguns polidores modernos, como óxido de cério (IV), mas ainda é usado na fabricação de lentes e por joalheiros para o acabamento superior que se consegue.

O óxido de ferro (III) também é usado como um pigmento, sob os nomes "pigmento marrom 6", "pigmento marrom 7", e "pigmento vermelho 101". Alguns deles, por exemplo, o pigmento vermelho 101 e pigmento marrom 6, são aprovados pelo FDA Americano (Food and Drug Administration) para uso em cosméticos.

### **3.4.3 Problemas Ocasionados pela Corrosão**

As perdas geradas pelos processos corrosivos podem ser de muitas formas e de grau de importância diferentes dependendo da aplicação do material. Causam um aumento de custo nos processos uma vez que a definição de como o metal será protegido contra corrosão é uma variável fundamental. Entre as perdas mais comuns podem ser citadas:

- Aparência / visual: determinadas aplicações exigem uma aparência da superfície do metal sem nenhuma corrosão, pois nestes casos o sucesso do produto passa pela reação visual que o mesmo causa aos seus usuários;
- Manutenção: devido à deterioração e consequente perda de propriedades dos materiais quando corroídos, os custos de manutenção são incrementados devido à necessidade periódica de inspeção e ou troca de componentes. Esta perda é facilmente percebida na indústria petrolífera;
- Contaminação: os produtos de corrosão podem contaminar outros materiais que estejam em contato com a peça corroída;

- Material: como a corrosão é um processo onde há perda de material, a reposição do mesmo se faz necessária ao longo do tempo;
- Super dimensionamento em projetos: para minimizar os riscos de falhas catastróficas em componentes metálicos devido à corrosão, muitas vezes os mesmos são superdimensionados, elevando seus custos;
- Saúde e segurança: como peças metálicas são comumente utilizadas em componentes de segurança (por exemplo, hastes de amortecedor), uma perda de propriedades devido à corrosão pode levar à falha catastrófica do componente, gerando risco a saúde e segurança do usuário.

#### **3.4.4 Tipos de Corrosão**

A corrosão por processos eletroquímicos apresenta mecanismos idênticos constituídos por regiões nas quais há a formação de ânodos e cátodos. Porém, a perda de massa do material e a maneira pela qual se dá seu ataque se processará de diferentes maneiras e evoluções. Dentro os processos mais comuns de corrosão podem ser listados:

- Corrosão uniforme e generalizada;
- Corrosão por pites;
- Corrosão por aeração diferencial;
- Corrosão por concentração iônica diferencial;
- Corrosão atmosférica;
- Corrosão em frestas;
- Corrosão filiforme;
- Corrosão galvânica;
- Corrosão sob tensão;
- Corrosão seletiva;
- Corrosão gráfitica;
- Corrosão por dezincificação;
- Corrosão associada ao escoamento de fluidos;

- Corrosão-erosão;
- Corrosão com cavitação;
- Corrosão por turbulência.

Embora se entenda que materiais trefilados, por possuírem sua superfície encruada devido ao processo, possam ser suscetíveis ao processo de corrosão sob tensão, neste trabalho será abordado em maiores detalhes os efeitos do processo de corrosão atmosférica.

#### **3.4.4.1 Corrosão Atmosférica**

A corrosão atmosférica pode ser definida como um processo resultante de reações químicas e/ou eletroquímicas pelas quais metais e ligas se deterioram quando submetidos à ação climática (10). Tem grande importância econômica em razão do extensivo uso de metais em estruturas e componentes expostos, tais como: pontes e componentes automotivos.

É gerada através da presença de uma fina camada de água adsorvida na superfície dos materiais, a qual atua como eletrólito, dependendo de fatores como umidade relativa, poluentes, temperatura e tempo de permanência do eletrólito na superfície do metal (11). Outros fatores também podem afetar a corrosão, porém com menor impacto.

Produtos de corrosão de aços carbono formados pela corrosão atmosférica tendem a ser protetivos, devido a isto a taxa de corrosão diminui com o passar do tempo, alcançando um estado estável após alguns anos. Os ensaios de corrosão acelerados podem produzir informações comparativas importantes em pouco tempo e são úteis para avaliar a durabilidade de algum metal e seu revestimento em uma atmosfera específica (12) (13) (14) (15).

##### **3.4.4.1.1 Umidade Relativa**

A umidade relativa exerce um papel fundamental na corrosão atmosférica na qual em valores abaixo de 60% apresenta uma velocidade de corrosão no aço muito baixa, entretanto para valores maiores o impacto é grande. Ela é expressa como a relação entre a pressão de vapor do ar (medida em Pascal) e a pressão de vapor do ar obtida em condições de equilíbrio ou saturação sobre uma superfície de água

líquida ou gelo, ou seja, pode-se dizer que umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação).

Porém somente temos o impacto da umidade relativa sobre o processo de corrosão atmosférica quando atingimos o ponto de orvalho. Este define a temperatura na qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação, se acumulando na superfície dos materiais.

#### **3.4.4.1.2 Poluentes**

Usualmente as atmosferas são classificadas em cinco tipos de acordo com a presença de poluente: rural, urbana, industrial, marinha e industrial-marinha. Um dos poluentes mais importantes e frequentes em regiões industriais e urbanas é o  $\text{SO}_2$  que provém da queima de combustíveis fósseis e, caso ele tenha condições catalíticas favoráveis à formação de  $\text{SO}_3$ , este em contato com água forma o ácido sulfúrico, muito severo para a corrosão metálica. Os poluentes presentes na atmosfera podem gerar:

- Deposição de materiais não-metálicos que criam condições diferenciais de aeração, gerando corrosão localizada abaixo do depósito;
- Deposição de substâncias que retêm umidade aumentando o tempo de permanência da água na superfície metálica;
- Deposição de sais que são eletrólitos fortes;
- Deposição de material metálico podendo criar pilhas e, conseqüentemente, corrosão galvânica;
- Aceleração da corrosão devido a reações dos gases presentes (formação de ácidos, por exemplo).

#### **3.4.4.1.3 Temperatura**

Se mantido um elevado valor de umidade relativa, o aumento da temperatura causa um aumento de agressividade do meio em função do aumento da velocidade das reações envolvidas. Por outro lado, com maior influência, quanto

maior a temperatura maior a velocidade de evaporação de água de uma superfície o que diminuirá o tempo de molhabilidade com fase líquida, além do aumento de temperatura também causar a diminuição da solubilidade de gases no eletrólito, diminuindo a agressividade (10).

#### **3.4.4.1.4 Tempo de Permanência do Filme de Água**

É o tempo que a superfície metálica está coberta por um filme de água. Varia com as condições climáticas do local, como umidade relativa da atmosfera, duração e frequência das chuvas, neblina, orvalho, temperatura do ar e da superfície do metal, velocidade dos ventos e horas de Sol. Este período pode ser dividido em dois: um em que o metal está umedecido pela presença de um filme adsorvido de moléculas de água, e outro em que a superfície está recoberta por uma fase líquida (de água), devido à chuva, neblina, neve derretida e orvalho.

A quantidade de água adsorvida na superfície do metal tem um impacto forte na intensidade de corrosão. Neste item, os produtos de corrosão têm um papel importante, pois dependendo de sua natureza química vão adsorver mais ou menos água. Um exemplo é o caso de ocorrer a formação de sais higroscópicos, os quais aumentam a adsorção sobre a superfície do metal acima de uma determinada umidade relativa (umidade relativa crítica), acima da qual ocorre um aumento da intensidade de corrosão. A Tabela 1 mostra a quantidade de água adsorvida sobre o metal em diferentes condições.

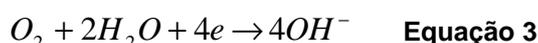
**Tabela 1: Quantidade de água adsorvida na superfície do metal**

<b>CONDIÇÃO</b>	<b>QUANTIDADE DE ÁGUA (g/m<sup>2</sup>)</b>
Umidade Relativa Crítica	0,01
100% de Umidade Relativa	1
Coberta por Orvalho	10
Molhada pela Chuva	100

### 3.4.4.1.5 Corrosão Atmosférica do Aço Carbono

A corrosão atmosférica ocorre basicamente por processos eletroquímicos, os quais contêm um ânodo e um cátodo na presença de um eletrólito. Porém os mecanismos das reações de corrosão atmosférica do aço carbono não são bem entendidos e diferentes teorias são propostas buscando explicar este fenômeno.

Na área anódica ocorre a oxidação do ferro a íons ferrosos (Equação 2). Já na região catódica ocorre a formação do íon hidroxila a partir da redução do oxigênio dissolvido (Equação 3).



A reação catódica ocorre devido aos elétrons gerados pela reação anódica e que se deslocam no metal do ânodo para o cátodo conforme pode ser visto na Figura 5.

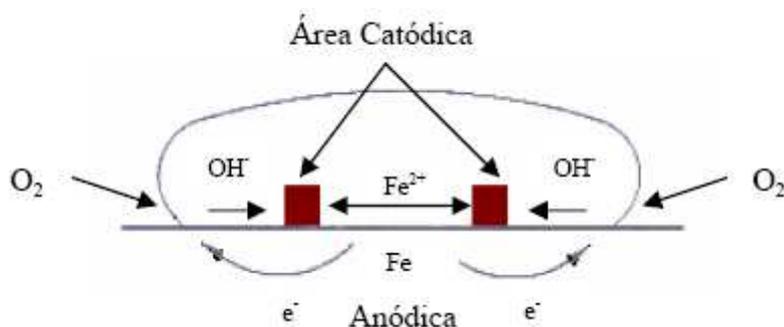
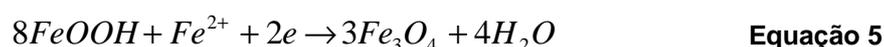


Figura 5: Representação da corrosão do ferro presente no aço

Outra consequência das duas reações eletroquímicas básicas é a precipitação do produto marrom. Trata-se de um produto final do processo corrosivo, conhecido popularmente como ferrugem. Ele tem uma composição complexa, porém basicamente é constituído por compostos da forma  $FeOOH$  e  $Fe_3O_4$ . A formação do primeiro composto ocorre por uma reação não eletroquímica (Equação 4) e o segundo seria formado a partir do primeiro por uma reação eletroquímica catódica (Equação 5).

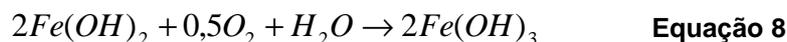


Além das reações anteriores, na região periférica, devido à elevação do pH, provocada pela produção de íons hidroxila, criam-se condições favoráveis à formação de uma película de óxidos na superfície do metal (Equação 6).



Devido a fatores como cinética de eletrodo, temperatura, pH, concentração, geometria do metal e propriedades das películas que se formam, podem existir diversos produtos de corrosão atmosférica do aço, de diferentes naturezas e mecanismos de formação (16).

Outra abordagem para descrição da corrosão atmosférica do ferro é a oxidação do mesmo em duas etapas. Na primeira (Equação 7), o Fe é oxidado a  $Fe^{2+}$  no composto  $Fe(OH)_2$  e na segunda etapa (Equação 8) a  $Fe^{3+}$  no composto  $Fe(OH)_3$ .



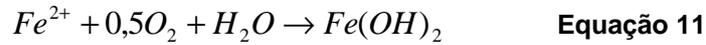
Se considerarmos as duas abordagens descritas acima, podemos dividir o processo de corrosão atmosférica em 4 etapas (Figura 6):

- a) Gotas de água presentes na umidade do ar condensam sobre a superfície do metal. Como a periferia da gota é mais fina que o interior, a difusão de oxigênio da atmosfera para a superfície do aço é mais acelerada. Assim, a corrosão ocorre na periferia da gota de água devido à alta concentração de oxigênio. Elétrons fluem da região com menos oxigênio, que serve como ânodo, para a região rica em oxigênio, que serve como cátodo.

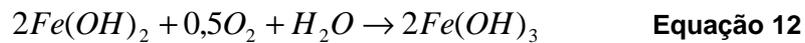


- b) Na presença de um pequeno filme de eletrólito, a corrosão atmosférica se processa balanceando as reações anódicas e catódicas. A reação de oxidação anódica envolve a dissolução do metal, considerando que a reação catódica é muitas vezes assumida como a reação de redução de oxigênio. Hidróxido de

ferro é a primeira barreira de difusão formada na superfície. O íon  $OH^-$  reage com o  $Fe^{2+}$  para formar o hidróxido.



- c) A solubilidade do hidróxido formado no eletrólito e a formação de filmes passivos afetam a taxa global do processo de dissolução anódica do metal. A reação continua com o hidróxido reagindo com mais oxigênio e água.



O acesso ao oxigênio dissolvido converte o óxido de ferro para hidróxido novamente.



- d)  $FeOOH$  é instável e com muitas formas e vai se transformar para  $Fe_2O_3 + H_2O$ .

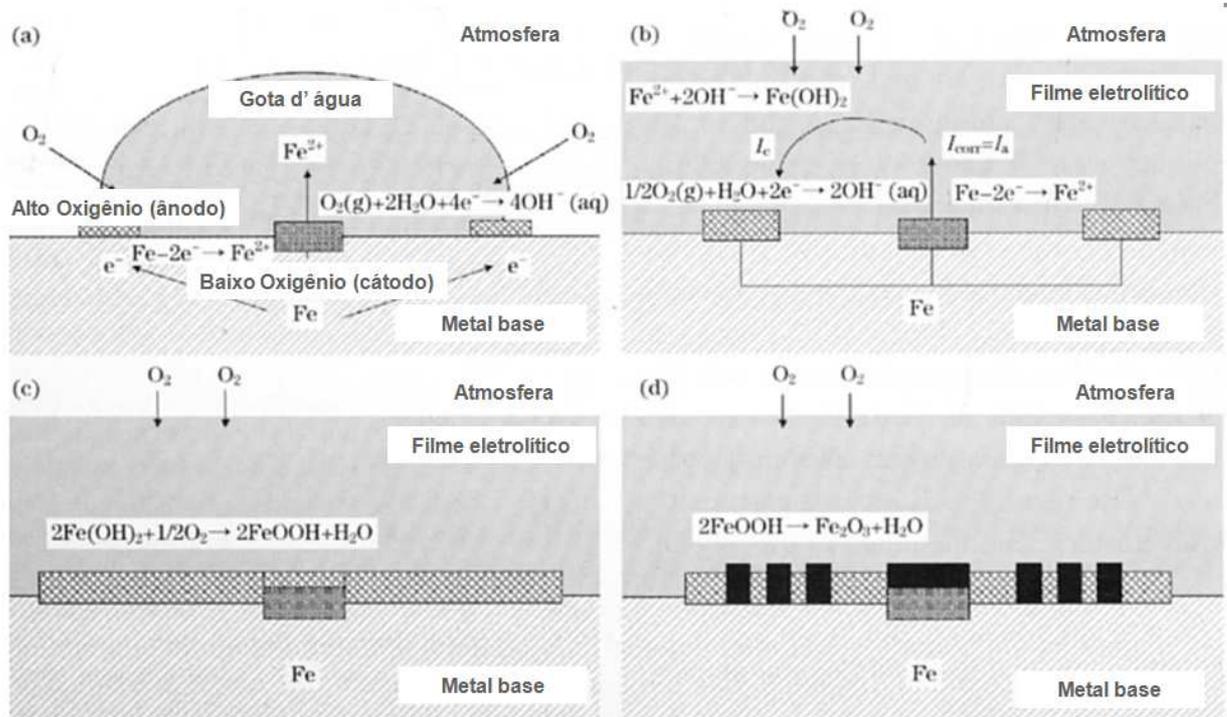


Figura 6: Mecanismo de formação dos produtos iniciais da corrosão atmosférica de aço carbono (17)

### **3.4.5 Fatores que Influenciam a Corrosão**

Para a análise da corrosão devem ser sempre considerados basicamente três grandes fatores:

- Material metálico: características específicas do material como composição química e processo de fabricação;
- Meio corrosivo: características específicas do meio como concentração, impurezas, pH, etc;
- Condições operacionais: solicitações mecânicas, proteção anticorrosiva, etc.

## **3.5 Proteção Anticorrosiva**

O objetivo da proteção anticorrosiva é evitar o consumo exagerado do material base, o qual pode provocar sua falha. Existem diversos métodos para proteção anticorrosiva utilizados atualmente, podendo ser vistos do ponto de proteção eletroquímica ou como barreira.

Outra classificação utilizada é a de proteção de longa duração ou proteção temporária. A segunda, objeto de estudo do trabalho, é voltada para artigos e peças que requerem proteção apenas durante a estocagem, em etapas de produção ou para atender a picos sazonais de demanda e durante o transporte. Os métodos de proteção mais frequentemente empregados são a redução da umidade relativa nos galpões de estocagem, uso de inibidores (voláteis) de fase gasosa e uso de revestimentos temporários (proteção por barreira) como óleos ou graxas, as quais se adicionam substâncias para aumentar a repelência à água e aumentar a aderência à superfície.

Porém, para os processos de proteção anticorrosiva, a condição da superfície a ser protegida é fundamental. Sendo assim, para uma melhor qualidade de proteção as impurezas existentes no metal base devem ser removidas.

### **3.5.1 Proteção Catódica**

Proteção catódica é um processo de controle contra a corrosão de metais (tubulações e estruturas). O princípio básico é tornar o elemento metálico a ser protegido - um aqueduto, por exemplo - em um cátodo de uma célula de corrosão, o

que pressupõe a presença de um ânodo. Assim, o processo natural de perda de elétrons da estrutura para o meio, fenômeno que causa a corrosão, é compensado pela ligação da estrutura metálica a um ânodo de sacrifício. O direcionamento da corrente elétrica preserva a estrutura metálica, ocorrendo corrosão controlada no ânodo (18).

### **3.5.2 Proteção Anódica**

A proteção anódica baseia-se na formação de uma película protetora nos materiais metálicos por aplicação de corrente externa. Esta corrente ocasiona a polarização anódica, que possibilita a passivação do material metálico (6). Para o uso deste método de proteção, algumas premissas devem ser observadas:

- Material deve apresentar passivação no meio corrosivo;
- Todas as partes expostas devem estar passivadas e mantidas nesta condição.

### **3.5.3 Proteção por Barreira**

Proteção anticorrosiva na qual substâncias formam um filme protetivo aderido sobre o material, isolando-o do contato com a atmosfera. Existem diversos produtos com esta finalidade, dentre eles uns dos mais utilizados e com bons resultados são os óleos, utilizados como proteção temporária, geralmente contendo inibidores antioxidantes em sua matriz. De maneira geral, são soluções com inibidores de corrosão (menos de 5%) e antioxidantes (menos de 5%) em um óleo derivado do petróleo (19). No campo de proteção anticorrosiva com inibidores de corrosão, os VCIs, do inglês *volatile corrosion inhibitors*, são utilizados como método de proteção ativa contra corrosão, o que significa que os inibidores influenciam efetivamente os processos químicos de corrosão. Os VCIs criam um filme relativamente contínuo sobre o item a ser protegido (superfície metálica), porém não são aplicáveis para todos os materiais (20).

O espaço de tempo em que uma barreira deixa de ser eficiente depende das seguintes características:

- Inerente permeabilidade do filme;
- Espessura da película;

- Limpeza da superfície;
- Qualidade da aplicação;
- Adesão da película à superfície;
- Severidade do meio corrosivo (21).

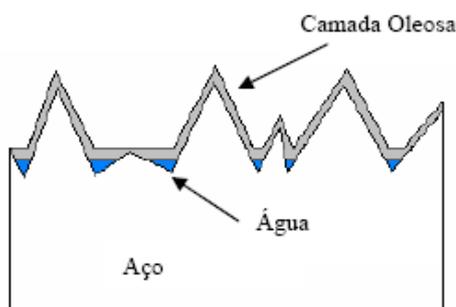
Como visto acima, a condição de limpeza da superfície onde será aplicado o revestimento é fundamental para o sucesso do mesmo, porém, devido as condições específicas de alguns processos, esta etapa nem sempre é realizada de maneira adequada.

### 3.5.3.1 Óleos

Muito utilizados para proteção temporária dos produtos durante transporte e armazenamento devido a sua facilidade de remoção e pelo seu tempo de proteção. Atuam como formadores de barreira (películas) protegendo anodicamente o material base, através da adsorção de grupos polares na sua superfície.

Os tipos de óleos utilizados como proteção anticorrosiva são em sua maioria minerais. Alguns também necessitam de outras propriedades conjuntas, principalmente os utilizados em processos de usinagem e conformação, os quais precisam proporcionar também uma boa refrigeração devido as elevadas temperaturas atingidas nestes processos. Estas características usualmente são concorrentes, ou seja, é preciso avaliar o processo detalhadamente para definir o tipo de óleo a ser utilizado em cada etapa.

Uma análise mais detalhada da superfície metálica, com filme de óleo, revela que saliências e cantos no perfil de rugosidade do metal são prejudiciais à proteção anticorrosiva, conforme mostra a Figura 7 (22).



**Figura 7: Perfil de rugosidade de uma chapa de aço carbono protegida com uma camada de óleo protetiva**

Quando uma chapa com óleo é exposta às intempéries, a água, que possui uma densidade superior a do óleo, penetra nos vales de rugosidade e desloca a película de óleo, entrando em contato com o metal. Isto ocorre, pois não há uma ligação química entre a molécula de óleo e a superfície metálica (11).

Nos processos de trefilação, normalmente os óleos são utilizados em três etapas:

- 1) Trefilação (matriz): óleo essencialmente com propriedades refrigerantes devido às elevadas temperaturas geradas pelo atrito com o material;
- 2) Polimento (politriz): óleo com necessidade de propriedades refrigerantes, já oferecendo também uma proteção anticorrosiva. É aplicado durante o polimento em toda superfície das barras, precisando ter uma viscosidade relativamente baixa. Nesta etapa, os contaminantes do banho de óleo exercem um papel fundamental na resistência à corrosão do material, pois presentes em excesso, formam na superfície do material micro-pilhas, acelerando a corrosão;
- 3) Embalagem (usualmente aplicação manual): óleo com propriedades unicamente protetivas. É aplicado com borrifador e, para isso, devido à sua elevada viscosidade, é mantido a cerca de 40 °C, facilitando o processo.

### **3.6 Ensaios de Corrosão em Câmara Úmida**

Atualmente, estão disponíveis uma série de ensaios de corrosão, cada qual com uma aplicação específica. Basicamente as diferenças entre estes ensaios são relativas ao tipo de eletrólito, tipo de exposição e duração dos testes (23).

Dentre os ensaios existentes, o de câmara úmida simula atmosferas com alta umidade relativa e alta temperatura. Estas atmosferas aceleram o processo de corrosão, simulando em pouco tempo o que aconteceria se a mesma amostra fosse exposta em intempérie real durante um longo tempo de exposição.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Aço Carbono

Foram separadas 14 amostras de barras trefiladas e polidas de diâmetro de 20,32mm do aço SAE 1045, processados em uma trefila rolo / barra, que atualmente apresentam um baixo tempo de estocagem devido à suscetibilidade deste aço à corrosão atmosférica. A composição básica deste material e fluxo de produção segue conforme as tabelas 2 e 3.

**Tabela 2: Composição (%) do aço SAE 1045 utilizado no trabalho**

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
Mín.	0,43	0,60	0,000	0,000
Máx.	0,50	0,90	0,030	0,050

**Tabela 3: Etapas do processo de fabricação do aço SAE 1045 utilizado no trabalho**

<b>Etapas do Processo</b>
Lingotamento em tarugo quadrado
Laminação para fio máquina redondo
Trefilação para barras redondas
Endireitamento e polimento
Embalagem
Armazenamento no estoque Final

Para estes materiais é necessária uma proteção temporária, pois os mesmos sofrerão processos posteriores para serem utilizados como hastes de amortecedores.

### **4.1.2 Equipamentos**

Para o processo de trefilação destes materiais, foi utilizada uma trefila rolo / barra existente na Gerdau Aços Especiais Piratini do fabricante Schumag, a qual possui como principais características:

- Material de partida: fio máquina;
- Material final: barras redondas;
- Processos: abastecimento, desbobinamento, pré-endiretamento, jateamento (com granalha), trefilação (fieira lubrificada), pré-endiretamento, corte, endiretamento em polimento (processo lubrificado), chanframento, inspeção e embalagem (com aplicação de óleo manual);

Os ensaios acelerados de corrosão foram realizados em uma câmara úmida na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR). Já as análises micrográficas foram feitas na Gerdau Aços Especiais Piratini.

### **4.1.3 Óleos**

Os óleos analisados são minerais e comercializados por seus respectivos fabricantes para uso em ambientes industriais. Podem ser divididos em dois grupos, os de polimento, utilizados na etapa de polimento com objetivo principal de refrigerar os rolos da politriz, e os de proteção final, aplicados no material já trefilado, polido e endireitado para prevenir a corrosão.

#### 1) Polimento

- Óleo 1: Fabricante 1
- Óleo 2: Fabricante 2
- Óleo 3: Fabricante 3

#### 2) Proteção final

- Óleo 4: Fabricante 4
- Óleo 5: Fabricante 5
- Óleo 6: Fabricante 6

#### 4.1.4 Desengraxante

Foi utilizado um desengraxante alcalino comercial aquecido previamente a 80° C para fazer a limpeza da superfície das amostras, minimizando assim interferências de produtos residuais (óleos e particulados) das amostras nos resultados dos ensaios.

## 4.2 Métodos

Foram trefiladas barras, conforme procedimentos atuais do equipamento, e retiradas amostras de aproximadamente 100 mm e numeradas em sequencia. Estas amostras foram levadas ao laboratório e receberam o processo protetivo conforme Tabela 4, na busca de simular as combinações possíveis entre os óleos analisados. A aplicação do processo protetivo foi realizada por imersão (sem tempo de permanência imerso) em laboratório, seguindo a sequência desengraxante, óleo politriz e óleo proteção final, sem intervalo e secagem entre os diferentes produtos. Após aplicação as amostras foram penduradas para escoamento por 24 horas.

**Tabela 4: Combinação de aplicação de tipos de óleo por amostra trefilada**

	Desengraxante	Óleo Politriz			Óleo Proteção Final		
		Óleo 4	Óleo 5	Óleo 6	Óleo 1	Óleo 2	Óleo 3
Amostra 9	X						
Amostra 1				X		X	
Amostra 2	X			X			
Amostra 3	X		X				
Amostra 4	X	X					
Amostra 5	X			X	X		
Amostra 6	X		X			X	
Amostra 7	X		X				X
Amostra 8	X		X		X		
Amostra 10	X	X					X

Amostra 11	X	X				X	
Amostra 12	X	X			X		
Amostra 13	X			X			X
Amostra 14	X			X		X	

A amostra 9 foi criada para possibilitar o cálculo de severidade (será apresentado a seguir), pois simula a condição de corrosão do aço sem nenhum tipo de revestimento protetivo, sendo a pior condição possível do ensaio, ou seja, para as demais amostras se o processo utilizado apresenta algum efeito protetivo contra a corrosão, o resultado deverá obrigatoriamente ser melhor do que o encontrado na amostra 9. A amostra 1 simula a condição atual em que está desenhado o processo protetivo no equipamento existente na Gerdau Aços Especiais Piratini, o qual não utiliza desengraxante.

Após oleamento e escorrimento, as amostras foram colocadas na câmara úmida, penduradas por um fio, para avaliação da resistência a corrosão, sendo verificadas em 4, 21, 48, 72, 168, 192, 216, 240, 336, 360, 384, 408, 432 e 504 horas de ensaio e analisadas em cada período conforme capítulo 4.2.1. As condições do ensaio seguiram conforme a NBR 8095/1983 que tem como principais pontos:

- Temperatura do ar saturado a (40 +/- 3) °C;
- Atmosfera saturada com contínua condensação de água sobre os corpos de prova;
- Avaliação dos resultados deve ser realizada por um especialista.

Foram criadas fichas de acompanhamento de cada amostra e após encerramento do ensaios com 504 horas, retiradas fotos com resolução de 1920 x 1080 px, modo automático com flash.

As densidades dos óleos também foram medidas para possibilitar o relacionamento desta propriedade com a capacidade protetiva de cada óleo, com o objetivo de criar uma relação desta com a densidade.

## 4.2.1 Avaliação de Resultado de Corrosão

### 4.2.1.1 Avaliação Visual

Existem diversos critérios para avaliação dos resultados de corrosão, sendo a grande maioria baseada em análises visuais comparativas com imagens definidas como padrões de referência. Neste trabalho será apenas detalhado o método utilizado pelo Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais, local onde foram realizados os ensaios práticos.

A padronização existente busca estabelecer critérios para avaliação do grau de corrosão em superfícies metálicas revestidas ou não, através de comparação com padrões visuais e descrições. Utiliza como base normas já existentes publicadas para avaliação de superfícies ferrosas com pintura, avaliando a corrosão vermelha. Usualmente é empregada após a realização de ensaios acelerados. Devido à avaliação ser visual alguns cuidados devem ser tomados, como:

- Não confundir manchas e falhas de acabamentos com corrosão;
- Limpar a superfície antes dos ensaios, pois sujeiras ou outros materiais podem dificultar a avaliação;
- A condição de corrosão pode variar ao longo da amostra, por isso deve-se ter prudência ao selecionar apenas um grau de corrosão que represente a peça, e se necessário caso haja muita discrepância ao longo da peça, subdividi-la para avaliação.

O tipo de distribuição e intensidade de corrosão são definidos de acordo com as tabelas 5 e 6.

**Tabela 5: Tipo de corrosão**

ÍNDICE	COR	MATERIAIS
B	Branco	Zinco, estanho, alumínio
V	Vermelho	Ferro, ligas ferrosas
CR	Cromatizado	Cromatizados
Vd	Verde	Cobre, latão, bronze

**Tabela 6: Grau de corrosão**

GRAU	DESCRIÇÃO
0	Perfeito, sem corrosão
1	Pontos em área localizadas
2	Pontos em geral
3	Área localizadas
4	Parcial: pontos e áreas
5	Total

Para possibilitar a análise numérica dos resultados dos ensaios realizados, foi desenvolvido pelo autor o conceito de severidade, a qual é calculada conforme a Equação 14, e severidade relativa, calculada conforme a Equação 15, sendo um indicador relativo e varia de 0 a 1, sendo 1 o valor para a amostra 9, somente desengraxada. Este conceito relaciona o tempo em que a amostra está na câmara úmida com relação ao resultado de sua avaliação conforme capítulo 4.2.1, tendo como base o resultado da amostra 9, somente desengraxada.

$$Severidade = \frac{\sum_{Avaliações}^{TempoEnsaio} TempoEnsaio * AvaliaçãoPeça}{Avaliações} \quad \text{Equação 14}$$

$$Severidade\ Relativa = \frac{\sum_{Avaliações}^{TempoEnsaio} TempoEnsaio * AvaliaçãoPeça}{SeveridadeAmostraSomenteDesengraxada} \quad \text{Equação 15}$$

É fundamental, para que todos os resultados possam ser comparados, que o número de avaliações de cada amostra e os tempos de ensaio devam ser os mesmos. Este conceito ficará mais claro no momento de apresentação dos resultados.

#### 4.2.1.2 Avaliação com Analisador de Imagens

Após os ensaios em câmara úmida, as regiões centrais, consideradas mais críticas por avaliação visual de cada amostra, foram cortadas e analisadas com lupa

óptica. Cada amostra gerou uma imagem com aumento de 10X, representando uma região de 29 x 20 mm.

Buscando identificar qual a área de cada amostra que está oxidada, as imagens feitas foram analisadas no software *GSA Image Analyser*, separando a região oxidada em duas condições de análise: área escura (região 1, composta por magnetita) e área alaranjada (região 2, composta pela lepidocrocita e goetita). Com estas regiões delimitadas utilizando faixas de cores através do padrão RGB (red / green / blue) conforme Tabela 7, pôde ser calculada a área da amostra corroída no final do ensaio de câmara úmida.

**Tabela 7: Critérios para analisador de imagem**

	Região 1			Região 2		
	R	G	B	R	G	B
Limite Superior (+)	15	15	15	50	50	50
Alvo	60	40	40	240	60	20
Limite Inferior (-)	15	15	15	103	50	50

#### 4.2.1.3 Medição da densidade dos óleos

Para possibilitar a comparação entre os resultados de capacidade protetiva de cada óleo com a sua respectiva densidade, foram separadas amostras de cada óleo utilizando um picnômetro de volume nominal de 50ml. O volume real foi medido e os óleos pesados em uma balança de precisão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Resultados do Ensaio de Câmara Úmida e Avaliação Visual

Inicialmente se esperava um tempo de ensaio em câmara úmida de aproximadamente 10 dias (240 horas) para a completa corrosão de algumas peças em grau 5 devido a ser um ensaio acelerado e a média histórica de tempo de estocagem sem corrosão em área coberta para estes materiais ser de 20 dias (480 horas). Porém após este período, o grau de oxidação era baixo em várias peças, e inexistente em outras. Devido a isto o ensaio foi estendido para 504 horas, facilitando assim a avaliação dos resultados, tanto visual quanto por microscopia.

O resultado geral na câmara úmida pode ser verificado na Tabela 8 abaixo, porém algumas observações importantes são:

- 1) Todas as amostras tratadas com o óleo 3 apresentaram corrosão tipo V5;
- 2) Todas as amostras tratadas com o óleo 1 começaram a apresentar corrosão somente após 240 horas, obtendo-se os melhores resultados nas amostras 12 e 15;
- 3) A amostra somente desengraxada realmente apresentou o pior resultado.

**Tabela 8: Resultados gerais dos ensaios de câmara úmida**

	Severidade	Severidade Relativa	Horas de Ensaio														
			4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504	
1	9456	61,2%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4	V4	V4	
2	7728	50,0%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V3	V3	V3	V3	
3	13681	88,5%	V1	V1	V1	V1	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V4	V4	V5	V5	
4	14328	92,7%	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V5	V5	V5	V5	
5	2808	18,2%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	
6	9120	59,0%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V3	V3	V3	V4	
7	13488	87,3%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V5	V5	V5	V5	V5	V5	
8	7080	45,8%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V3	V3	V3	V4	
9	15459		V3	V3	V3	V3	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V5	V5	V5	V5	
10	7776	50,3%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1	V3	V3	V4	V5	
11	6816	44,1%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4	
12	504	3,3%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	
13	10272	66,4%	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1	V1	V4	V4	V4	V5	V5
14	6816	44,1%	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4	

A seguir serão expostas as fotografias das amostras, bem como descrição do processo realizado e comentários sobre a condição final de cada peça.

### 5.1.1 Amostra 9: somente desengraxada

O material somente desengraxada apresentou grau de oxidação 3 desde as primeiras horas do ensaio.

**Tabela 9: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 9**

Horas de Ensaio														
	4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
9	V3	V3	V3	V3	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V5	V5	V5	V5



**Figura 8: Amostra 9 - somente desengraxada**

### 5.1.2 Amostra 1: condição atual do processo

O material com a condição atual de processo apresentou grau de oxidação somente a partir de 216 horas e acabou o ensaio com corrosão vermelha parcial em pontos e áreas.

**Tabela 10: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 1**

Horas de Ensaio														
	4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
1	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4	V4	V4



**Figura 9: Amostra 1 - condição atual do processo**

### 5.1.3 Amostra 2: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 6

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 6, apresentou os primeiros indício de corrosão após 216, finalizando o ensaios com corrosão vermelha em área localizadas.

Tabela 11: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 2

Horas de Ensaio														
	4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
2	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V3	V3	V3	V3



Figura 10: Amostra 2 - desengraxante e somente óleo polimento tipo 6

### 5.1.4 Amostra 3: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 5

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 5, já apresentou os primeiros indícios de corrosão no início do ensaio, finalizando com corrosão vermelha total.

Tabela 12: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 3

Horas de Ensaio														
	4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
3	V1	V1	V1	V1	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V4	V4	V5	V5



Figura 11: Amostra 3 - desengraxante e somente óleo polimento tipo 5

### 5.1.5 Amostra 4: desengraxante e somente óleo de polimento tipo 4

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 4, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 168 horas, porém já num nível mais elevado, já tendo corrosão vermelha total com 384 horas de ensaio.

Tabela 13: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 4

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
4		V0	V0	V0	V0	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V5	V5	V5	V5



Figura 12: Amostra 4 - desengraxante e somente óleo polimento tipo 4

### 5.1.6 Amostra 5: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 1

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 1, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 432 horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha áreas localizadas.

Tabela 14: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 5

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
15		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3



Figura 13: Amostra 5 - desengraxante, óleo polimento tipo 6 e óleo proteção final tipo 1

### 5.1.7 Amostra 6: *desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 2*

O material desengraxado e tratado com, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 2, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 240 horas, porém já num nível mais elevado, e finalizando o ensaio com corrosão vermelha parcial em pontos e áreas.

**Tabela 15: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 6**

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
6		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V3	V3	V4	V4	V4



**Figura 14: Amostra 6 - desengraxante, óleo polimento tipo 5 e óleo proteção final tipo 2**

### 5.1.8 Amostra 7: *desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 3*

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 3, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 216 horas, já tendo corrosão vermelha total com 336 horas de ensaio.

**Tabela 16: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 7**

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
7		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V5	V5	V5	V5	V5	V5



Figura 15: Amostra 7 - desengraxante, óleo polimento tipo 5 e óleo proteção final tipo 3

### 5.1.9 Amostra 8: desengraxante, óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 1

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 5 e óleo de proteção final tipo 1, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 336 horas, porém já num nível mais elevado, e finalizando o ensaio com corrosão vermelha parcial em pontos e áreas.

Tabela 17: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 8

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
8		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3	V3	V3	V3	V4



Figura 16: Amostra 8 - desengraxante, óleo polimento tipo 5 e óleo proteção final tipo 1

### 5.1.10 Amostra 10: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 3

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 3, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 216 horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha total.

Tabela 18: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 10

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
10		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1	V3	V3	V4	V5



Figura 17: Amostra 10 - desengraxante, óleo polimento tipo 4 e óleo proteção final tipo 3

#### 5.1.11 Amostra 11: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 2

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 2, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 336 horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha parcial em pontos e áreas.

Tabela 19: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 11

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
11		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4



Figura 18: Amostra 11 - desengraxante, óleo polimento tipo 4 e óleo proteção final tipo 2

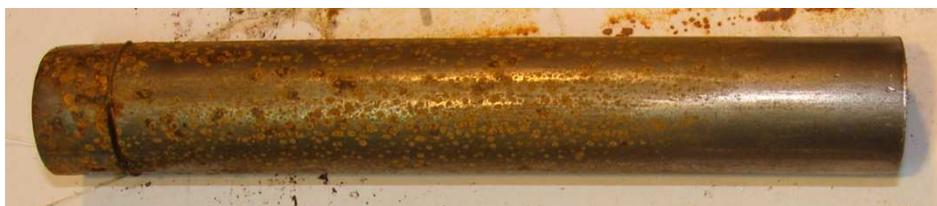
#### 5.1.12 Amostra 12: desengraxante, óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 1

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 4 e óleo de proteção final tipo 1, apresentou os primeiros indícios de corrosão somente com 432

horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha em pontos em áreas localizadas, tendo o melhor resultado do ensaio.

**Tabela 20: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 12**

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
12		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1



**Figura 19: Amostra 12 - desengraxante, óleo polimento tipo 4 e óleo proteção final tipo 1**

### **5.1.13 Amostra 13: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 3**

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 3, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 192 horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha total.

**Tabela 21: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 13**

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
13		V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1	V4	V4	V4	V5	V5



**Figura 20: Amostra 13 - desengraxante, óleo polimento tipo 6 e óleo proteção final tipo 3**

### 5.1.14 Amostra 14: desengraxante, óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 2

O material desengraxado e tratado com óleo de polimento tipo 6 e óleo de proteção final tipo 3, apresentou os primeiros indícios de corrosão com 336 horas, finalizando o ensaio com corrosão vermelha parcial em pontos e áreas. Nota-se que se comparada a amostra 1, a única diferença foi a utilização do desengraxante, o qual retardou o processo de corrosão.

**Tabela 22: Acompanhamento da condição de corrosão da amostra 14**

		Horas de Ensaio													
		4	21	48	72	168	192	216	240	336	360	384	408	432	504
14		V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V3	V3	V4	V4



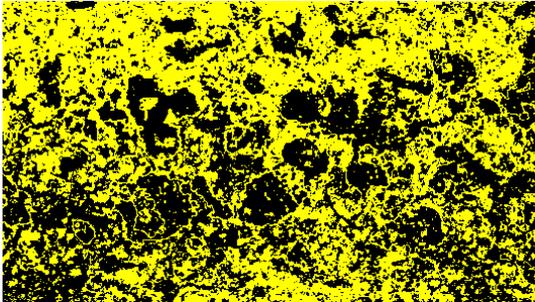
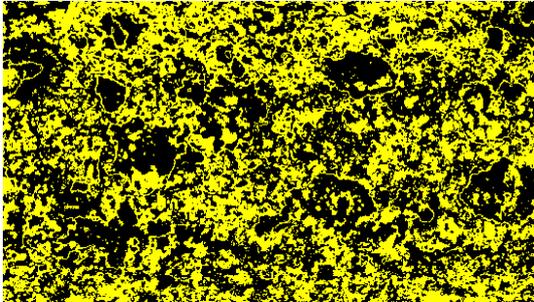
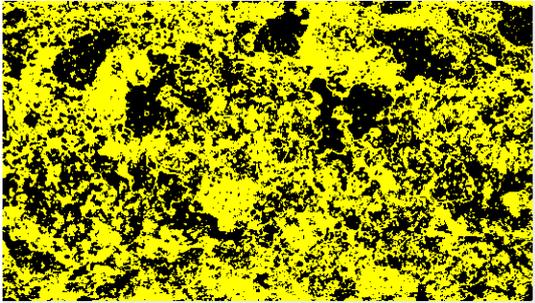
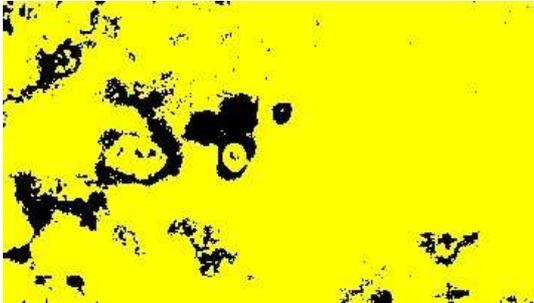
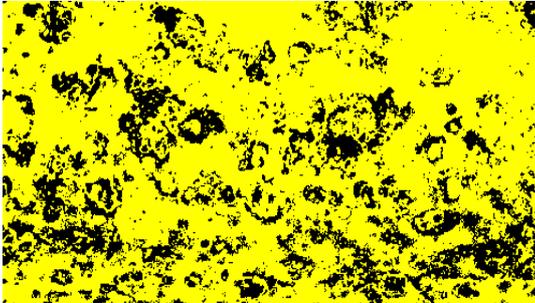
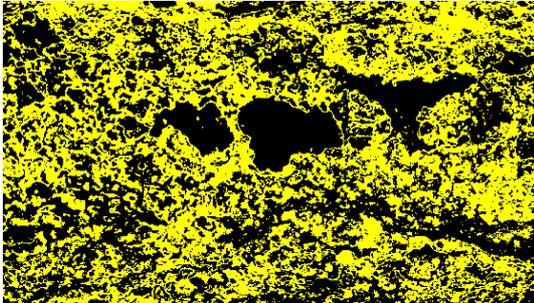
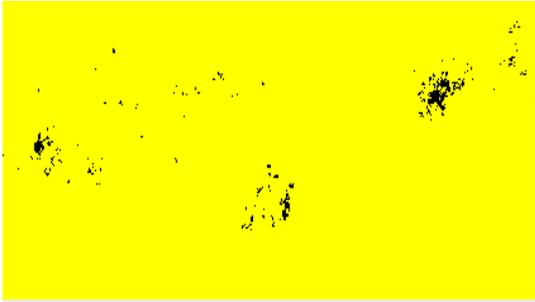
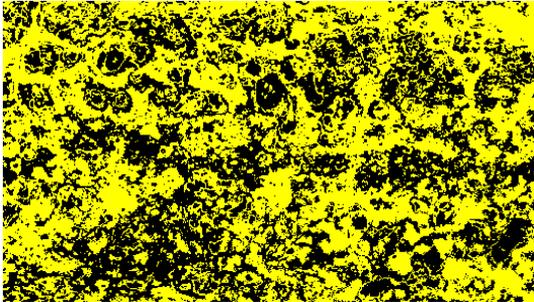
**Figura 21: Amostra 14 - desengraxante, óleo polimento tipo 6 e óleo proteção final tipo 2**

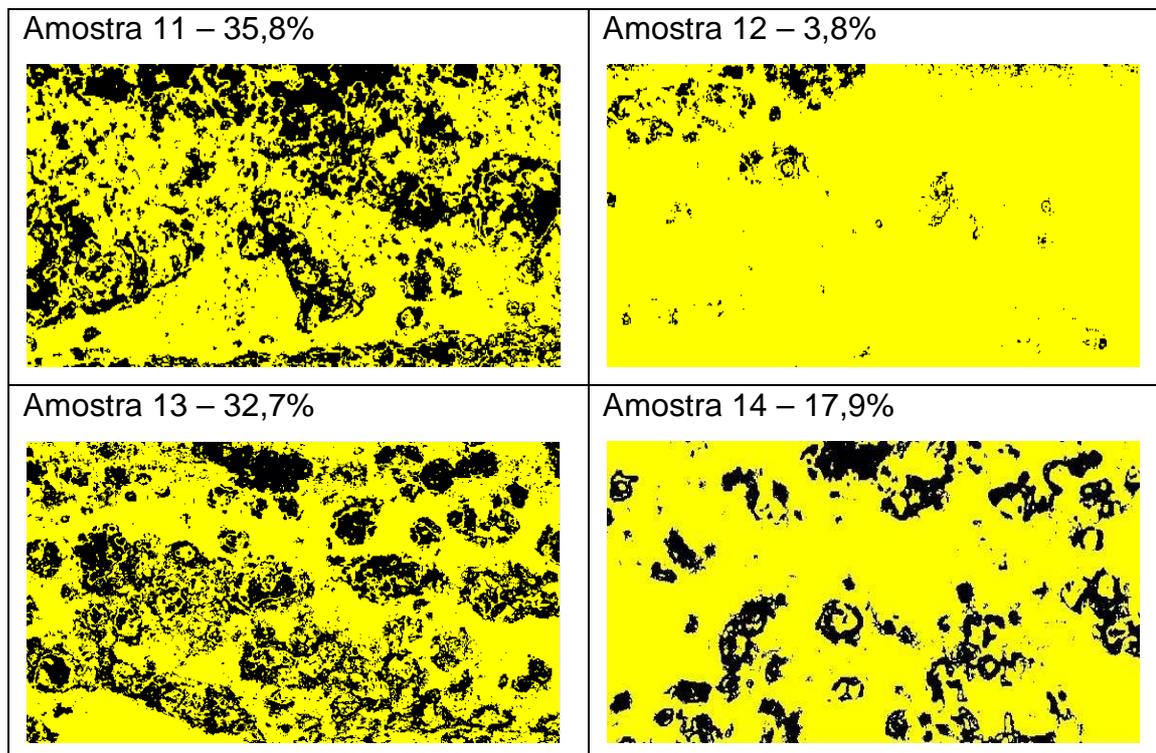
## 5.2 Resultados da Avaliação de % de Área Oxidada

Para avaliação do percentual de área oxidada, como apresentado na metodologia, foi utilizado o software *GSA Image Analyser*. Os resultados devem ser analisados com foco comparativo devido a diferentes ajustes no programa gerarem diferentes valores. Abaixo seguem algumas observações e os resultados das análises.

- 1) Todas as amostras tratadas com o óleo 3 apresentaram % de área oxidada superior a 30%;
- 2) Todas as amostras tratadas com o óleo 1 apresentaram % de área oxidada inferior a 5%;
- 3) As amostras com somente óleo de polimento apresentaram resultados muito ruins (média de ~47%).

Tabela 23: Resultados do analisador de imagens (em preto a área oxidada)

Amostra 2 – 48,7%	Amostra 3 – 50,0%
	
Amostra 4 – 44,1%	Amostra 5 – 9,74%
	
Amostra 6 – 23,8%	Amostra 7 – 49,9%
	
Amostra 8 – 0,7%	Amostra 10 – 43,9%
	



### 5.3 Resultado das Medições de Densidade

Os valores de densidade obtidos para cada óleo são apresentados na Tabela 24. Dentre os óleos de polimento, o óleo 5 apresentou o maior valor. Já nos óleos de proteção final o óleo 1 apresentou o valor mais alto.

**Tabela 24: Densidades medidas de cada óleo**

	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Óleo 1	44,416	51,4493 +/- 0,0100cm <sup>3</sup>	0,863
Óleo 2	42,223		0,821
Óleo 3	40,696		0,791
Óleo 4	43,060		0,837
Óleo 5	44,776		0,870
Óleo 6	43,431		0,844

## 5.4 Avaliação da Influência da Densidade do Óleo na Capacidade Protetiva

Conforme verificado no capítulo 3.5.3.1, a capacidade protetiva de óleos utilizados para este fim está relacionada com a capacidade deste material evitar/retardar o contato da água presente na atmosfera com o metal base. Entende-se que esta capacidade pode ser representada pela densidade tendo em vista que as demais variáveis, como espessura do filme são mantidas constantes para o mesmo processo de aplicação.

### 5.4.1 Relação entre Densidade e Severidade

Com os valores de densidade de cada óleo medidos, assim como a severidade calculada para cada processo protetivo, estes parâmetros foram relacionados e são apresentados na Figura 22. Nota-se que foi necessária fazer a suposição de que para as amostras que utilizaram óleo de polimento e de proteção final, a mistura contemplou 50% de cada um.

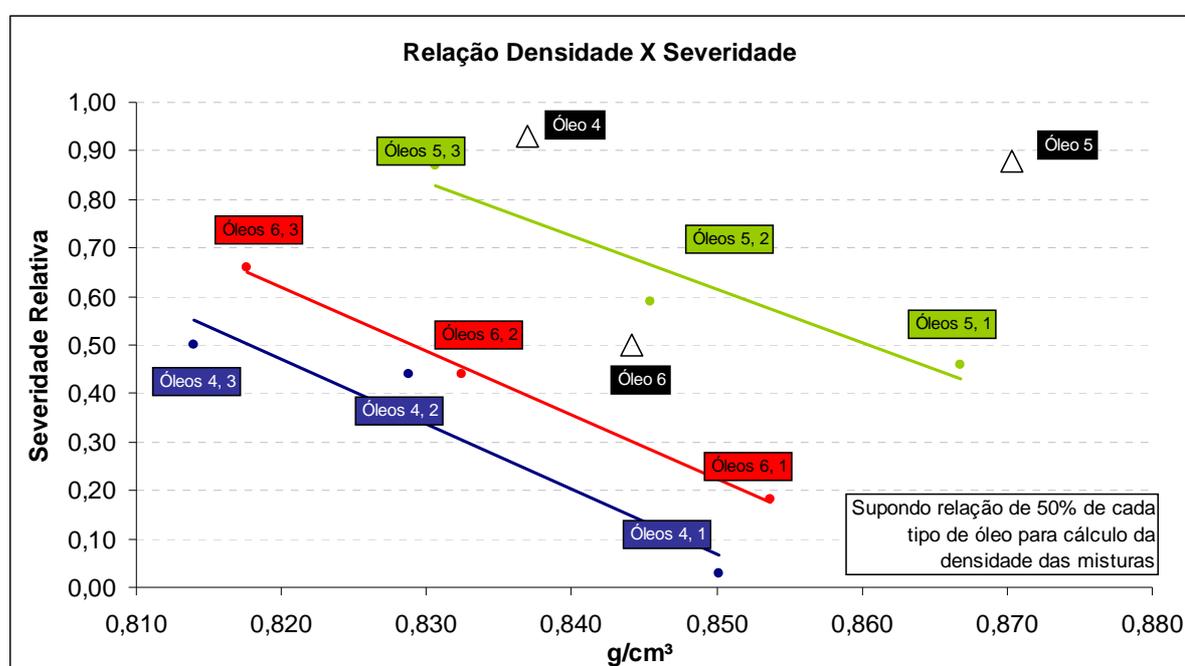


Figura 22: Relação entre densidade e severidade

Analisando os dados da relação entre severidade relativa e densidade dos óleos, é possível perceber uma relação linear quando é fixado o óleo de polimento e

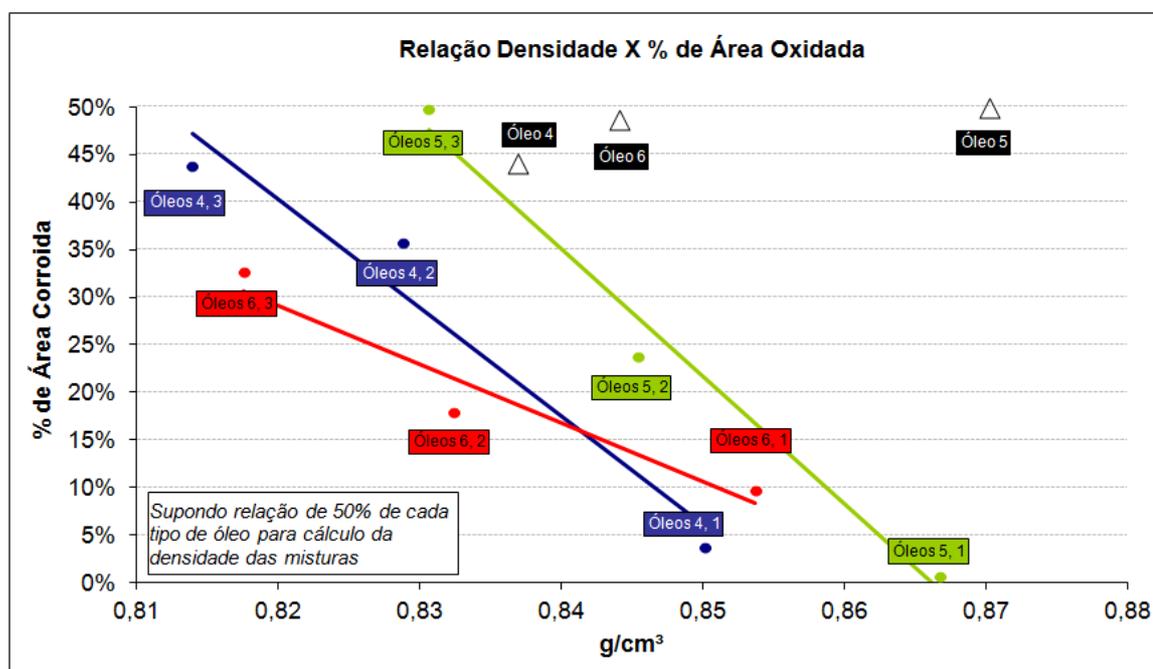
variado apenas o de proteção final, como pode ser visto nas curvas azul (fixado óleo de polimento 4), vermelha (fixado óleo de polimento 6) e verde (fixado óleo de polimento 5). Esta tendência pode ser dada pela equação da curva  $Y = Ax + b$ , sendo “A” a constante de proporcionalidade, “x” a densidade do óleo de proteção final e “b” a constante relacionada às demais variáveis de processo, entre elas o tipo de óleo de polimento.

Além desta relação linear, pode-se também observar uma inclinação semelhante nas três curvas, propondo a ideia de que o incremento em proteção anticorrosiva dado pelo aumento da densidade é sempre o mesmo, independente das demais características do processo.

Quando analisamos o comportamento dos óleos de polimento (óleos 4, 5 e 6), a relação verificada para os óleos de proteção final com a densidade não existe. Isto pode ser explicado por estes óleos terem como propriedade principal a refrigeração, e não proteção, tendo assim em sua composição características diferenciadas.

#### **5.4.2 Relação entre Densidade e % de Área Oxidada**

Com os valores de densidade de cada óleo medidos, assim como a % de área calculada para cada processo protetivo, estes parâmetros foram relacionados e são apresentados na Figura 23. Nota-se que foi necessário fazer a mesma suposição anterior de que para as amostras que utilizaram óleo de polimento e de proteção final, a mistura contemplou 50% de cada um.



Analisando os dados da relação entre % de área oxidada e densidade dos óleos, é possível perceber uma relação linear quando é fixado o óleo de polimento e variado apenas o de proteção final, como pode ser visto nas curvas azul (fixado óleo de polimento 4), vermelha (fixado óleo de polimento 6) e verde (fixado óleo de polimento 5). Esta tendência pode ser dada pela equação da curva  $Y = Ax + b$ , sendo "A" a constante de proporcionalidade, "x" a densidade do óleo de proteção final e "b" a constante relacionada às demais variáveis de processo, entre elas o tipo de óleo de polimento.

Na análise desta relação, não é verificada a mesma inclinação das curvas devido à divergência das análises com óleo de polimento 6. Esta alteração pode ser explicada pelas seguintes suposições:

- a) Quando analisada somente a condição final das amostras e não o processo inteiro, como pressupõe a severidade relativa, não é mantido o mesmo incremento devido ao aumento de densidade dos óleos protetivos;

- b) A amostra 5 (óleos 6 e 1) apresentou alguma variação não prevista (descartando este ponto, teremos a mesma inclinação em todas as curvas).

## 6 CONCLUSÕES

O ensaio de câmara úmida se mostrou uma importante ferramenta para avaliação da proteção anticorrosiva em aços trefilados pois através dele pôde-se verificar a baixa capacidade protetiva do uso de somente óleo de polimento 4 e 5, bem diferente do resultado utilizando óleo de proteção final 1, que protege a superfície do material por um período de tempo muito maior.

Analisando a relação entre densidade dos óleos de proteção final e sua respectiva severidade, bem como a relação com a porcentagem de área oxidada, encontrou-se uma tendência linear entre as duas variáveis, podendo-se, assim, prever a capacidade protetiva de óleos por ambos os métodos. Deve-se levar em conta que os demais fatores que atuam na proteção por barreira, como espessura da película, limpeza da superfície, qualidade da aplicação, adesão da película a superfície e severidade do meio corrosivo sejam mantidos constantes.

Portanto, a relação entre densidade e capacidade protetiva é linear e válida para óleos de proteção final, podendo ser prevista, facilitando assim a definição do tipo de produto que será utilizado, reduzindo os tempos de testes e facilitando o processo decisório. Já para os óleos de polimento não existe este mesmo comportamento, podendo os mesmos ser definidos basicamente com base na sua propriedade de refrigeração.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser mais explorados os seguintes pontos:

- avaliação do comportamento da capacidade protetiva em aços usinados (avaliar a influência do encruamento superficial na corrosão);
- avaliar a influência de inibidores de corrosão e interações entre os diferentes óleos;
- avaliar a relação da severidade relativa para ensaios acelerados e nas condições normais de processo;
- avaliar % de área corroída para ensaios acelerados e nas condições normais de processo;
- avaliar a capacidade protetiva para diferentes tipos de aços (verificar se a inclinação das curvas da relação com densidade se mantêm semelhante);
- implementar a alteração no processo industrial, utilizando desengraxante e óleo de proteção final tipo 1.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Chiaverini, V.** *Aços e Ferros Fundidos*. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002.
2. Steel Applications. *Steel University*. [Online] World Steel Association, 2012. [Citado em: 12 de 12 de 2012.]  
<http://steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=2&pageid=-424514437>.
3. **Button, S.** *Trefilção*. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
4. Avantajmakine. *Products*. [Online] Avantajmakine, 2012. [Citado em: 14 de 07 de 2012.]  
<http://avantajmakine.com/xurundetay.asp?LG=EN&marka=24&model=27&makina=152>.
5. **Freese, S. e Meneguzzi, A.** Otimização dos Parâmetros de Endireitamento de uma Endireitadeira Duplo-Rolos. *Trabalho de Conclusão de Curso*. 2007.
6. **G., Vicente.** *Corrosão*. Rio de Janeiro : LTM, 1982.
7. **Callister, W. D.** *Materials science and engineering: A introduction*. Rio de Janeiro : LTC, 2002.
8. Nanum. *Óxido de Ferro*. [Online] Nanum - Nanotecnologia, 2012. [Citado em: 16 de 08 de 2012.]  
<http://www.nanum.com.br/interna.php?area=produto&idldioma=1&escolha=13>.
9. *Caracterização de Produtos de Corrosão de Aço Carbono e Aço Patinável Submetidos a Ensaio Acelerado de Corrosão e de Interperismo*. **Antunes, R.** Salvador - BA : s.n., 2002.
10. **Agostinho, S. e Aoki, I.** *Corrosão Metálica: Caracterização e Prevenção*. São Paulo : s.n., 2000.
11. **Capioto, N.** *Uso do silano BTSE como protetivo contra a corrosão de laminados de aço carbono*. São Paulo : s.n., 2006.
12. **Revie, W.** *Uhlig's Corrosion Handbook*. Nova York : John Wiley & Sons, 2000.
13. **Robergue, R.** *Handbook of Corrosion Engineering*. Nova York : McGraw-Hill Professional, 1999.

14. **Shreir, J., Jarman, L. e Burstein, A.** *Metal Environmental Effects*. Oxford : Oxford: Butterworth Heinemann, 1994.
15. **Evans, J. e Taylor, R.** *Mechanism of Atmospheric Rusting*. Cambridge : Corrosion Science, 1972.
16. **West, J.** *Basic corrosion oxidation*. Nova York : s.n., 1986.
17. **Xiao, K., et al.** Corrosion Products and Formation Mechanism During Initial Stage of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel. *Journal of Iron and Steel Research*. 15 (pg. 42 - 48), 2008.
18. **Abbate, Vinícius.** Pini Web. *Proteção catódica contra a corrosão*. [Online] Editora PINI Ltda, 2003. [Citado em: 14 de 07 de 2012.] <http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/protecao-catodica-contr-a-corrosao-80088-1.asp>.
19. **Helwig, L.** *Perform*. 1986.
20. **A. Ghanbarzadeh, E. Akbarinezhad.** Sulfonation of Base Oils as Corrosion Inhibitor for Temporary Protection of Steel in Atmospheric Environment. *Progress in Organic Coatings*. 2006, Vols. 56 (pg. 39–45), pp. 39-45.
21. *Recuperar*. **Silva, E.** 47 (Meu problema), São Paulo : s.n., 2002.
22. *Protetivos Temporários Contra a Corrosão*. **Sabóia, F.** São Paulo : EBRATS 87: anais, 1987.
23. **Chagas, F.** Downloads. *Infosolda*. [Online] [Citado em: 10 de 12 de 2012.] [www.infosolda.com.br/new\\_site/getFile.php?t=p&i=54](http://www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=p&i=54).
24. **Wolynec, S.** *Técnicas eletroquímicas em corrosão*. São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1998.
25. Wikipedia. *Aço*. [Online] Wikipédia, a enciclopédia livre, 2012. [Citado em: 16 de 08 de 2012.] <http://pt.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7o>.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Fichas de ensaio

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
LABORATÓRIO DE CORROÇÃO,  
PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS

LACOR

Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: ALUNO ALVARO N° Cadastro Cliente: \_\_\_\_\_ Data/hora de início ensaio: 30/05/2014 12h

AMOSTRAS Identificação interna: \_\_\_\_\_  
Descrição: \_\_\_\_\_

ENSAIO / NORMA  Câmara Úmida /  SO<sub>2</sub> / Total de horas solicitadas: \_\_\_\_\_  
AVALIAÇÃO  Corrosão  Espessura  Outra: \_\_\_\_\_

Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base								Revestimento	
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)									
				3015 4h	315 24h	316 48h	216 72h	316 96h	616 168h	716 252h			
1				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0		
2				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0		
3				V1	V1	V1	V1	V1	V3	V3			
4				V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3			
5				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			
6				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			

Rubrica do Laboratorista: [assinatura]

**Critério LACOR para Avaliação de Corrosão**

Aspecto ou Acabamento				Graus de Corrosão				
B - Branco	V - Vermelho	Vd - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral	3 - Áreas localizadas	4 - Parcial: pontos e áreas
Norma: NBR 10443				Parâmetro: Espessura				
				Grau: µm				

OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s): \_\_\_\_\_ Volume de SO<sub>2</sub>: \_\_\_\_\_  
NORMAS UTILIZADAS (NBR 8095 / ASTM D 2247)

Laboratorista: REGINA Data: \_\_\_\_\_ Página \_\_\_ de \_\_\_

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
LABORATÓRIO DE CORROÇÃO,  
PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS

LACOR

Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: \_\_\_\_\_ N° Cadastro Cliente: \_\_\_\_\_ Data/hora de início ensaio: \_\_\_\_\_

AMOSTRAS Identificação interna: \_\_\_\_\_  
Descrição: \_\_\_\_\_

ENSAIO / NORMA  Câmara Úmida /  SO<sub>2</sub> / Total de horas solicitadas: \_\_\_\_\_  
AVALIAÇÃO  Corrosão  Espessura  Outra: \_\_\_\_\_

Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base								Revestimento	
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)									
				3015 4h	315 24h	316 48h	216 72h	316 96h	616 168h	716 252h			
7				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			
8				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			
9				V3	V3	V3	V3	V3	V3	V3			
10				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			
11				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			
12				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0			

Rubrica do Laboratorista: [assinatura]

**Critério LACOR para Avaliação de Corrosão**

Aspecto ou Acabamento				Graus de Corrosão				
B - Branco	V - Vermelho	Vd - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral	3 - Áreas localizadas	4 - Parcial: pontos e áreas
Norma: NBR 10443				Parâmetro: Espessura				
				Grau: µm				

OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s): \_\_\_\_\_ Volume de SO<sub>2</sub>: \_\_\_\_\_

Laboratorista: REGINA Data: \_\_\_\_\_ Página \_\_\_ de \_\_\_



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
 ESCOLA DE ENGENHARIA  
 DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
 LABORATÓRIO DE CORROSÃO,  
 PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS



Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: <u>ALUNO</u>		Nº Cadastro Cliente:		Data/hora de início ensaio:										
AMOSTRAS		Identificação interna:												
		Descrição:												
ENSAIO / NORMA		<input checked="" type="checkbox"/> Câmara Úmida /		<input type="checkbox"/> SO <sub>2</sub> /										
AVALIAÇÃO		<input checked="" type="checkbox"/> Corrosão		<input type="checkbox"/> Espessura										
				Total de horas solicitadas:										
				<input type="checkbox"/> Outra:										
RESULTADOS														
Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base				Revestimento						
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)										
				3015	3115	316	216	316	416	716				
				4h	24h	48h	72h	96h	168h	192h				
13				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0				
14				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0				
15				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0				
Rubrica do Laboratorista		B B Y2 Y3 Y4 Y5 Y6 Y7 Y8 Critério LACOR para Avaliação de Corrosão												
Aspecto ou Acabamento		Graus de Corrosão												
B - Branco	V - Vermelho	Vd - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral	3 - Áreas localizadas	4 - Parcial : pontos e áreas	5 - Total					
Norma: NBR 10443		Parâmetro: Espessura		Grau: µm										
OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s):				Volume de SO <sub>2</sub> :										

Laboratorista: REGINA

Data:

Página \_\_\_ de \_\_\_



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
 ESCOLA DE ENGENHARIA  
 DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
 LABORATÓRIO DE CORROSÃO,  
 PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS



Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: <u>SAMPLE</u>		Nº Cadastro Cliente: <u>TIAGO</u>		Data/hora de início ensaio:										
AMOSTRAS		Identificação interna: <u>85520678</u>												
		Descrição: <u>TIAGO APREK 1989 @ gmail.com</u>												
ENSAIO / NORMA		<input checked="" type="checkbox"/> Câmara Úmida /		<input type="checkbox"/> SO <sub>2</sub> /										
AVALIAÇÃO		<input checked="" type="checkbox"/> Corrosão		<input type="checkbox"/> Espessura										
				Total de horas solicitadas:										
				<input type="checkbox"/> Outra:										
RESULTADOS														
Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base				Revestimento						
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)										
				816	916	1316	1416	1516	1616	1716	2016			
				24h	240h	336	360h	384h	408	432	504			
1				V1	V1	V3	V3	V4	V4	V4	V4			
2				V1	V4	V3	V3	V3	V3	V3	V3			
3				V4	V4	V4	V4	V4	V4	V5	V5			
4				V4	V4	V4	V4	V5	V5	V5	V5			
5				V0	V0	V1	V1	V3	V3	V3	V3			
6				V0	V0	V3	V3	V3	V3	V3	V4			
Rubrica do Laboratorista		G Y3 Y4 Y5 Y6 Y7 Y8 Y9 Critério LACOR para Avaliação de Corrosão												
Aspecto ou Acabamento		Graus de Corrosão												
B - Branco	V - Vermelho	Vd - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral	3 - Áreas localizadas	4 - Parcial : pontos e áreas	5 - Total					
Norma: NBR 10443		Parâmetro: Espessura		Grau: µm										
OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s):				Volume de SO <sub>2</sub> :										
NORMAS UTILIZADAS (NBR 5095 / ASTM D 2247)														

Laboratorista: REGINA

Data:

Página \_\_\_ de \_\_\_

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
LABORATÓRIO DE CORROSÃO  
PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS

LACOR

Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: \_\_\_\_\_ N° Cadastro Cliente: \_\_\_\_\_ Data/hora de início ensaio: \_\_\_\_\_

AMOSTRAS Identificação interna: \_\_\_\_\_  
Descrição: \_\_\_\_\_

ENSAIO / NORMA  Câmara Úmida /  SO<sub>2</sub> / Total de horas solicitadas: \_\_\_\_\_  
 AVALIAÇÃO  Corrosão  Espessura  Outra: \_\_\_\_\_

**RESULTADOS**

Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base								Revestimento	
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)									
				816	916	1316	1416	1516	1616	1716	2016		
				236h	240h	336	360	384h	408	432	504		
7				V3	V3	V5	V5	V5	V5	V5	V5		
8				V0	V0	V3	V3	V3	V3	V3	V4		
9				V4	V4	V6	V5	V5	V5	V5	V5		
10				V2	V2	V4	V4	V3	V3	V4	V5		
11				V0	V0	V4	V4	V3	V3	V4	V4		
12				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V4		
Rubrica do Laboratorista				R	R	R	R	R	R	R	R		

**Critério LACOR para Avaliação de Corrosão**

Aspecto ou Acabamento				Graus de Corrosão		
B - Branco	V - Vermelho	Vg - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral
Norma: NBR 10443				Parâmetro: Espessura		
				4 - Parcial: pontos e áreas		
				5 - Total		
				Grau: µm		

OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s): \_\_\_\_\_ Volume de SO<sub>2</sub>: \_\_\_\_\_

Laboratorista: REGINA Data: \_\_\_\_\_ Página \_\_\_ de \_\_\_

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS  
LABORATÓRIO DE CORROSÃO  
PROTEÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS

LACOR

Documento nº.: 02.02.03.06/04

**ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO DE CÂMARA ÚMIDA E SO<sub>2</sub> DE REVESTIMENTOS**

SOLICITAÇÃO Nº: \_\_\_\_\_ N° Cadastro Cliente: \_\_\_\_\_ Data/hora de início ensaio: \_\_\_\_\_

AMOSTRAS Identificação interna: \_\_\_\_\_  
Descrição: \_\_\_\_\_

ENSAIO / NORMA  Câmara Úmida /  SO<sub>2</sub> / Total de horas solicitadas: \_\_\_\_\_  
 AVALIAÇÃO  Corrosão  Espessura  Outra: \_\_\_\_\_

**RESULTADOS**

Amostras	Material Metálico Base	Revestimento		Metal Base								Revestimento	
		Material	Esp (µm)	DATA DA AVALIAÇÃO / PERÍODO (HORAS)									
				816	916	1316	1416	1516	1616	1716	2016		
				236h	240h	336	360h	384h	408	432	504		
13				V4	V4	V4	V4	V4	V4	V5	V5		
14				V0	V0	V4	V4	V3	V3	V4	V4		
15				V0	V0	V0	V0	V0	V0	V3	V3		
Rubrica do Laboratorista				R	R	R	R	R	R	R	R		

**Critério LACOR para Avaliação de Corrosão**

Aspecto ou Acabamento				Graus de Corrosão		
B - Branco	V - Vermelho	Vg - Verde	CR - Cromatizado	0 - Perfeito	1 - Pontos em áreas localizadas	2 - Pontos em geral
Norma: NBR 10443				Parâmetro: Espessura		
				3 - Áreas localizadas		
				4 - Parcial: pontos e áreas		
				5 - Total		
				Grau: µm		

OBSERVAÇÕES: Área superficial total da(s) peça(s): \_\_\_\_\_ Volume de SO<sub>2</sub>: \_\_\_\_\_

Laboratorista: REGINA Data: \_\_\_\_\_ Página \_\_\_ de \_\_\_