UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

VANESSA YUMI NAGAYASSU

**Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da
agressividade de derivados de petróleo**

São Paulo

2006

VANESSA YUMI NAGAYASSU

**Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da
agressividade de derivados de petróleo**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais
Orientadora: Prof. Dra. Zehbour Panossian

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Nagayassu, Vanessa Yumi

Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da agressividade de derivados de petróleo / V.Y. Nagayassu. -- São Paulo, 2006.

177 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Corrosão 2. Derivados de petróleo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Vanessa Yumi Nagayassu

Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da agressividade de derivados de petróleo

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

À Dra. Zehbour Panossian, pela atenção e dedicação durante a orientação de todas as fases deste estudo.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio fornecido.

Ao Jean Vicente Ferrari, pelo incentivo e ajuda indispensáveis.

Ao Adriano Aparecido Garcia Bernal, à Patrícia Luciana Camargo, ao Marcos Antonio Gomes, ao Marcio Bispo de Almeida e à Gislaine Maria Bragagnolo, pela participação nas etapas experimentais deste estudo.

Ao Gutemberg de Souza Pimenta, pelas discussões, pela confiança depositada e por todo o apoio proporcionado.

Aos amigos da TRANSPETRO, em especial ao Paulo Magyar de Souza e ao Eduardo Wlaudemir Laurino, pela compreensão, apoio e incentivo na fase final deste estudo.

À Prof. Maria Elena dos Santos Taqueda e ao Cristiano Cardoso, pelas contribuições nos planejamentos estatísticos.

Ao Marcelo Martins Seckler e ao Kazuto Kawakita, pelas contribuições nas discussões.

Ao CENPES/PETROBRAS, pelo apoio financeiro para a realização deste estudo.

RESUMO

NAGAYASSU, V. Y. **Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da agressividade de derivados de petróleo.** 2006 177 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Antes de transportar os derivados de petróleo por dutos, a sua corrosividade é verificada por meio do ensaio NACE TM-0172 “*Determining Corrosive Properties of Cargoes in Petroleum Product Pipelines*” (NACE, 2001). O referido ensaio, por basear-se na avaliação visual, não tem por objetivo a determinação da taxa de corrosão e nem a verificação do tipo de corrosão e, normalmente, os profissionais que o executam não têm conhecimento da influência das variáveis que interferem nos resultados do ensaio. Desta forma, o presente estudo teve como objetivos: verificar a influência de algumas variáveis (velocidade de agitação, geometria do corpo-de-prova, temperatura, teor de água, tempo de ensaio e pH) nos resultados obtidos com o ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001), fazer avaliação quantitativa da taxa de corrosão por meio da determinação da perda de massa dos corpos-de-prova expostos ao meio, correlacionar os resultados da avaliação visual com a perda de massa, verificar se o ensaio, que é realizado em condições aeradas, simula adequadamente as condições internas dos dutos. Para condução do estudo, além do próprio ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001), foram realizados outros ensaios simples utilizando o aço-carbono COPANT 1020 na confecção dos corpos-de-prova metálicos. Com base em todos os ensaios realizados, foi possível fazer uma análise crítica do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) e justificar a adoção das diferentes condições de ensaio além de apresentar uma explicação para o mecanismo de corrosão do aço-carbono na mistura derivado/água.

Palavras-chave: corrosividade, derivados de petróleo

ABSTRACT

NAGAYASSU, V. Y. **Critical analysis of the NACE TM-0172 test to verify the corrosive properties of distillate fuels.** 2006 177 f. Thesis (Master) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Before transporting distillate fuels by pipelines, their corrosive properties are verified by the NACE TM-0172 test “*Determining Corrosive Properties of Cargoes in Petroleum Product Pipelines*” (NACE, 2001). This test, being based on a visual evaluation, has as its goal, neither the determination of the corrosion rate nor the verification of the corrosion type; the technicians usually do not know the influence of the variables that interfere in the test results. Thus, this study had as its goals: to verify the influence of some variables (stirring speed, coupon geometry, temperature, water content, test duration and pH of the water phase) in the results obtained with the NACE TM-0172 test (NACE, 2001), to make the quantitative evaluation of the corrosion rate by determination of the coupon mass loss exposed to this condition, to correlate the results of the visual evaluation with the mass loss, to verify if the test, which is made in aerated conditions, simulate properly the internal conditions of pipelines. To conduct the study, besides the NACE TM-0172 (NACE, 2001) test itself, other simple tests were made using the carbon steel COPANT 1020 to prepare the metallic coupons. Based on all the tests, it was possible to make a critical analysis of the NACE TM-0172 (NACE, 2001) test and (to) justify the adoption of different test conditions as well as there being the possibility of presenting an explanation for the mechanism of the carbon steel corrosion in the mixture distillate/water.

Keywords: corrosivity, distillate fuels

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</i>	1
<i>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	4
2.1 Definição e origem do petróleo	4
2.2 Refinamento do petróleo	5
2.3 Derivados do petróleo	6
2.4 Transporte do petróleo e dos seus derivados e o meio ambiente	6
2.5 Corrosão em dutos que transportam derivados de petróleo	17
2.6 Corrosividade dos derivados de petróleo (fluidos) transportados	17
2.7 Gerenciamento da corrosão	25
2.8 Monitoramento interno de dutos	27
2.8.1 Definição.....	27
2.8.2 Objetivo.....	27
2.8.3 Importância.....	28
2.8.4 Monitoramento propriamente dito.....	29
2.8.4.1 Ensaio eletroquímicos.....	30
2.8.4.2 Ensaio de perda de massa.....	33
2.8.4.3 Instalação de sondas de resistência elétrica.....	38
2.8.4.4 Ensaios realizados num sistema dinâmico tipo loop.....	39
2.8.4.5 Passagem de pig.....	40
2.8.4.6 Ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) – “Determining Corrosive Properties of Cargoes in Petroleum Product Pipelines”.....	41
2.9 Controle	45
2.10 Estatística	47
2.10.1 Noções básicas.....	48
<i>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</i>	51
3.1 Primeira fase	51
3.1.1 Corpos-de-prova.....	52
3.1.1.1 Preparação dos corpos-de-prova.....	55
3.1.2 Copo de ensaio.....	57
3.1.3 Ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) – “Determining Corrosive Properties of Cargoes in Petroleum Product Pipelines”.....	58

3.1.4 Montagem de um dispositivo de ensaio para visualização do corpo-de-prova em ensaio.....	63
3.1.5 Ensaio de perda de massa.....	67
3.2 Segunda fase.....	68
3.2.1 Ensaio em meio aerado.....	69
3.2.2 Ensaio em meio desaerado (com injeção de gás nitrogênio).....	70
3.2.2.1 Sistema aberto.....	70
3.2.2.2 Sistema fechado.....	71
3.3 Derivado de petróleo utilizado.....	72
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS.....	73
4.1 Primeira fase.....	73
4.1.1 Estudo preliminar para verificação da influência da geometria do copo e da posição do corpo-de-prova em relação ao chanfro.....	74
4.1.2 Primeiro planejamento de experimentos.....	82
4.1.2.1 Definição das variáveis independentes (parâmetros influenciadores) do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001).....	82
4.1.2.2 Definição das variáveis dependentes.....	87
4.1.2.3 Planejamento de experimentos.....	87
4.1.2.4 Resultados.....	89
4.1.2.5 Verificação da adequação das respostas “porcentagem de área corroída” e “taxa de corrosão” como resposta do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001).....	91
4.1.2.6 Análise estatística dos resultados do primeiro planejamento de experimentos.....	93
4.1.2.7 Verificação do efeito da velocidade de agitação na porcentagem de área corroída.....	96
4.1.2.8 Verificação do efeito da geometria do corpo-de-prova na porcentagem de área corroída.....	100
4.1.2.9 Verificação do teor de água adicionado ao derivado na porcentagem de área corroída.....	101
4.1.2.10 Verificação da influência da temperatura de ensaio na porcentagem de área corroída.....	104
4.1.2.11 Verificação da influência do tempo de ensaio na porcentagem de área corroída.....	105
4.1.2.12 Verificação da influência do pH da água adicionada ao derivado na porcentagem de área corroída.....	108

4.1.2.12.1 Discussão da variação de pH da água destilada em contato com ar atmosférico.....	119
4.1.2.12.2 Discussão da variação de pH observada na água destilada em contato com o ferro, sem e com contato com ar atmosférico isento de CO ₂	125
4.1.2.12.3 Discussão da variação de pH observada na água destilada em contato com o ferro e com contato com ar atmosférico contendo CO ₂	132
4.1.2.12.4 Discussão dos resultados experimentais apresentados nas Figuras 4.24 e 4.26.....	133
4.1.3 Segundo planejamento de experimentos.....	135
4.2 Segunda fase.....	138
4.2.1 Resultados dos ensaios em meio aerado.....	138
4.2.2 Resultados dos ensaios em meio desaerado.....	146
4.2.2.1 Sistema aberto.....	146
4.2.2.2 Sistema fechado.....	146
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS.....	152
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO.....	157
CAPÍTULO 7 – TRABALHOS FUTUROS.....	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
ANEXO A – Desenho esquemático e fotografia dos tipos de corpos-de-prova.....	165
ANEXO B – Procedimento de ensaio de acordo com o ensaio NACE TM-0172.....	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Transporte de petróleo e derivados	8
Figura 2.2	- Pássaro sujo de petróleo e rio coberto por petróleo	11
Figura 2.3	- “Tragédia em Vila Socó”	12
Figura 2.4	- O navio petroleiro parte-se e afunda	13
Figura 2.5	- Corrosão do aço em meio de derivado de petróleo/H ₂ O/O ₂	24
Figura 2.6	- Arranjo experimental esquemático para determinação de curvas de polarização. ET – eletrodo de trabalho; ER – eletrodo de referência; CE – contra-eletrodo	31
Figura 2.7	- Arranjo esquemático para medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. ET – eletrodo de trabalho; ER – eletrodo de referência; CE – contra-eletrodo	32
Figura 2.8	- Determinação da massa final de um corpo-de-prova	34
Figura 2.9	- Tomadas de acesso para instalação de cupom de perda de massa e sonda de resistência elétrica	35
Figura 2.10	- Desenho esquemático para ilustração de cupom de perda de massa instalado no duto	36
Figura 2.11	- Cupom tipo <i>flush</i>	37
Figura 2.12	- Taxa de corrosão em mm/ano (linha preta) e perda de espessura em µm (linha amarela)	39
Figura 2.13	- Sistema dinâmico tipo <i>loop</i> construído no Laboratório de Corrosão e Proteção do IPT	40
Figura 2.14	- <i>Pigs</i> de limpeza	41
Figura 2.15	- Taxa de corrosão versus tempo para o derivado tipo B em diferentes pHs	44
Figura 3.1	- Corpo-de-prova padronizado pelo ensaio NACE TM-0172	52
Figura 3.2	- Tipos de corpos-de-prova	55
Figura 3.3	- Corpo-de-prova fixado no agitador mecânico	56
Figura 3.4	- Lixamento do corpo-de-prova com utilização de lixa grana 100	56
Figura 3.5	- Lixamento por meio de movimentos descendentes firmes no sentido longitudinal do corpo-de-prova incluindo a extremidade, por 50 vezes	57
Figura 3.6	- Aspecto do copo utilizado no ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001). Pode-se visualizar os dois chanfros diametralmente opostos	58

Figura 3.7	- Vista geral do Equipamento “ <i>Rust Preventing Characteristics Oil Bath</i> ”. Neste estudo, este foi denominado de “Equipamento NACE”	58
Figura 3.8	- Fotografia ilustrando o equipamento com as hastes metálicas	60
Figura 3.9	- Acessórios do ensaio NACE TM-0172	61
Figura 3.10	- A superfície denominada “FRENTE” do corpo-de-prova é aquela diretamente atingida pelo fluido em movimento. “VERSO” é a superfície oposta	63
Figura 3.11	- Cálculo da área corroída do corpo-de-prova após ensaio	63
Figura 3.12	- Dispositivo para simulação do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001)	64
Figura 3.13	- Posicionamento do copo dentro da cuba	65
Figura 3.14	- Colocação da cuba sobre uma chapa aquecedora	65
Figura 3.15	- Simulação do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) realizado num dispositivo especialmente montado para permitir a visualização do corpo-de-prova em ensaio	66
Figura 3.16	- Sistema montado para medição do pH em meio de derivado/água na condição aerada	69
Figura 3.17	- Sistema montado para medição do pH em meio de derivado/água na condição desaerada	70
Figura 3.18	- Sistema montado para acompanhamento de ocorrência ou não de corrosão do aço em meio de derivado/água na condição desaerada.	71
Figura 4.1	- Copo sem chanfros	75
Figura 4.2	- Aspecto dos dois tipos diferentes de chanfros com os quais os copos utilizados no ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) são comercializados	75
Figura 4.3	- Posição do corpo-de-prova, recomendada no texto (item 4.1.4) do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001)	76
Figura 4.4	- Tipo de chanfro e posição do corpo-de-prova em relação ao chanfro adotados no Brasil para o ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001)	76
Figura 4.5	- Avaliação visual dos corpo-de-prova submetidos ao ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001), realizado no Equipamento NACE, utilizando copos com chanfros simétricos e assimétricos e sentido de rotação horário e anti-horário	78

Figura 4.6	- Avaliação visual dos corpos-de-prova de aço-carbono submetidos ao ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001), no Equipamento NACE, utilizando copos com chanfros simétricos, posição frontal (Figura 4.4) e a meio caminho (Figura 4.3)	81
Figura 4.7	- Ilustração do escoamento principal da mistura formado durante o ensaio 7	82
Figura 4.8	- Ilustração do escoamento principal da mistura formado durante o ensaio 8	82
Figura 4.9	- Simulação de ensaios com velocidades de agitação de 550 rpm e 1050 rpm durante cinco minutos. Demais condições recomendadas pelo ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001)	84
Figura 4.10	- Corpos-de-prova: (a) tipo 1; (b) tipo 2; (c) tipo 3; (d) tipo 4	85
Figura 4.11	- Simulação de ensaios, no Equipamento ‘NACE Visualização’, com diferentes velocidades de agitação com valores variando de 550 rpm a 1050 rpm. Tempo de ensaio 5 min e água substituída por uma solução de sulfato de cobre. Demais condições de ensaio conforme procedimento NACE	97
Figura 4.12	- Corpos-de-prova após simulação do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001), feita no Equipamento ‘NACE Visualização’, com diferentes velocidades de agitação. Demais condições de ensaio conforme procedimento NACE	98
Figura 4.13	- Ilustração das forças centrífugas durante a agitação da mistura derivado/água	99
Figura 4.14	- Simulação de ensaios no Equipamento ‘NACE Visualização’, com corpos-de-prova tipo 1 e tipo 2, durante cinco minutos. Demais condições de ensaio conforme procedimento NACE	100
Figura 4.15	- Corpos-de-prova tipo 1 e tipo 2 ensaiados, no Equipamento NACE. As condições de ensaio foram mantidas aquelas do procedimento NACE	101
Figura 4.16	- Simulação de ensaios, no Equipamento ‘NACE Visualização’, com três teores de águas diferentes: 5%, 10% e 20%. Tempo de ensaio 5 min e água substituída por uma solução de sulfato de cobre. Demais condições de ensaio conforme procedimento NACE	102
Figura 4.17	- Corpos-de-prova ensaiados, no Equipamento ‘NACE Visualização’. conforme o procedimento NACE. Somente o teor de água foi variado	103

Figura 4.18 -	Corpos-de-prova ensaiados, no Equipamento NACE, segundo o procedimento NACE. Somente a temperatura foi variada	105
Figura 4.19 -	Corpos-de-prova ensaiados, no Equipamento NACE, segundo o procedimento NACE. Somente o tempo de ensaio foi variado. Ilustração dos tempos 40 min, 50 min, 60 min, 70 min e 80 min	107
Figura 4.20 -	Corpos-de-prova ensaiados, no Equipamento NACE, segundo o procedimento NACE. Somente o tempo de ensaio foi variado. Ilustração dos tempos 90 min, 120 min, 180 min e 240 min	108
Figura 4.21 -	Curvas de polarização teóricas do aço-carbono em água, na condição de corrente limite de oxigênio igual a 1.10^{-4} A/cm ² e valores de pH iguais a 4,5; 7,0 e 10,0	110
Figura 4.22 -	Variação do pH da fase aquosa do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) para valores iniciais de pH de 4,5; 7,0 e 10,0	112
Figura 4.23 -	Ensaio de simples imersão de chapas de aço-carbono em água destilada com diferentes valores de pH inicial. Pode-se verificar que nos três casos, o pH da água tende a um valor próximo do neutro	114
Figura 4.24 -	Variação do pH com o tempo durante ensaios realizados sem adição de derivado, mas com imersão de corpo-de-prova em água destilada	116
Figura 4.25 -	Ilustração da montagem do ensaio realizado sem adição de derivado e de corpo-de-prova para verificação da variação de pH da água	117
Figura 4.26 -	Gráficos de pH referentes aos ensaios realizados sem adição de derivado, sem imersão de corpo-de-prova (a), (c), (d). Para pH 4,5, um corpo-de-prova foi imerso após decorrido 4 h e o pH monitorado durante 4 h adicionais (b)	118
Figura 4.27 -	Gráfico pH x [Fe ²⁺]	129
Figura 4.28 -	Variação do pH da água com o tempo durante os ensaios realizados no sistema bifásico nafta/água aerado, com imersão de corpo-de-prova de aço-carbono: (a) água com pH inicial 4,5; (b) água com pH inicial 7,0; (c) água com pH inicial 9,5	140
Figura 4.29 -	Aspecto do corpo-de-prova durante o ensaio realizado no sistema bifásico nafta/água (pH 4,5) aerado. Ilustração dos tempos 0 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min e após ensaio	141

Figura 4.30 -	Aspecto do corpo-de-prova durante o ensaio realizado no sistema bifásico nafta/água (pH 7,0) aerado. Ilustração dos tempos 0 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min e após ensaio	142
Figura 4.31 -	Aspecto do corpo-de-prova durante o ensaio realizado no sistema bifásico nafta/água (pH 9,5) aerado. Ilustração dos tempos 0 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min e após ensaio	143
Figura 4.32 -	Modelo de corrosão do aço em meio de derivado de petróleo/H ₂ O/O ₂ proposto por Groysman e Erdman (2000) modificado	145
Figura 4.33 -	Aspectos dos corpos-de-prova durante os ensaios realizados com água pH 4,5; 7,0 e 9,5 para os tempos 0 min, 30 min e 60 min, no sistema fechado descrito no item 3.2.2.2	147
Figura 4.34 -	Aspectos dos corpos-de-prova durante os ensaios realizados com água pH 4,5; 7,0 e 9,5 para os tempos 90 min, 120 min e 150 min, no sistema fechado descrito no item 3.2.2.2	148
Figura 4.35 -	Aspectos dos corpos-de-prova durante os ensaios realizados com água pH 4,5; 7,0 e 9,5 para os tempos 180 min, 210 min e 240 min, no sistema fechado descrito no item 3.2.2.2	149
Figura 4.36 -	Aspectos dos corpos-de-prova após os ensaios realizados com água: (a) pH 4,5; (b) pH 7,0; (c) pH 9,5	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Derivados obtidos do petróleo e seus principais usos	7
Tabela 2.2	- Resumo cronológico de incêndios, vazamentos, explosões e tragédias publicado pelo jornal O Estado de São Paulo sob a denominação “As manchas da empresa”	10
Tabela 2.3	- Os piores vazamentos na Europa e no mundo	12
Tabela 2.4	- Características gerais de acidentes em dutos (Europa e Estados Unidos)	14
Tabela 2.5	- Composição química da fase aquosa depois do contato com derivados de petróleo (sete dias, 25°C)	22
Tabela 2.6	- Solubilidade do O ₂ a 25°C em alguns meios orgânicos e água	23
Tabela 2.7	- Composição do aço-carbono segundo especificação SAE-1020	36
Tabela 2.8	- Avaliação dos corpos-de-prova de aço-carbono conforme o ensaio NACE TM-0172	42
Tabela 2.9	- Composição química dos aços COPANT 1015, COPANT 1018, COPANT 1020 e COPANT 1025 segundo a norma NBR NM 87	42
Tabela 2.10	- Grau de corrosividade dos derivados tipo A, tipo B e tipo C	44
Tabela 3.1	- Composição química da barra de aço-carbono utilizada para confecção dos corpos-de-prova	53
Tabela 4.1	- Definição das variáveis e seus níveis	83
Tabela 4.2	- Matriz de ensaios do planejamento	88
Tabela 4.3	- Resultados obtidos em cada ensaio planejado	90
Tabela 4.4	- Resultados do ensaio para verificação da reprodutibilidade do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) tendo como resposta “porcentagem de área corroída”	92
Tabela 4.5	- Resultados do ensaio para verificação da reprodutibilidade do ensaio NACE TM-0172 (NACE, 2001) tendo como resposta “taxa de corrosão”	92
Tabela 4.6	- Análise estatística dos resultados obtidos em cada ensaio planejado	94
Tabela 4.7	- Análise estatística dos resultados obtidos em cada ensaio planejado	111
Tabela 4.8	- Possíveis reações que podem ocorrer em sistemas envolvendo H ₂ O e CO ₂ (água em contato com atmosferas não-contaminadas) e alguns dados importantes	120

Tabela 4.9	- Valores de pH final da água em contato com ar atmosférico para diferentes valores de pH inicial da água. Valores experimentais correspondentes à Figura 4.26 e valores calculados manualmente e com o aplicativo MINTEQA2/PRODEFA2 (1990)	124
Tabela 4.10	- Possíveis reações que podem ocorrer em sistemas envolvendo Fe^{2+} , Fe^{3+} , H^+ , OH^- , H_2O	125
Tabela 4.11	- Resumo dos resultados dos experimentos apresentados nas Figuras 4.24 e 4.26	134
Tabela 4.12	- Segundo planejamento de experimentos: definição das variáveis e seus níveis	136
Tabela 4.13	- Matriz de ensaios do segundo planejamento de experimentos	137
Tabela 4.14	- Resultados do segundo planejamento de experimentos	138
Tabela 4.15	- Resumo dos resultados dos experimentos apresentados nas Figuras 4.24 e 4.28	139
Tabela 4.16	- Resultados dos experimentos apresentados nas Figuras 4.33 a 4.35	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>pig</i>	<i>pipeline inspection gadget</i>
ET	eletrodo de trabalho
ER	eletrodo de referência
CE	contra-eletrodo
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
COPANT	<i>Comisión Pan-americana de Normas Técnicas</i>
DERD	<i>Defense Standard 91-91</i>
PTFE	politetrafluoretileno
UNS	<i>Unified Numbering System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

E^*	potencial de corrosão
i^*	densidade de corrente de corrosão
E_1	potencial no ponto estacionário 1
i_1	corrente no ponto estacionário 1
$E_{(t)}$	potencial aplicado a partir de um potencial de circuito aberto
$I_{(t)}$	corrente obtida após a aplicação de um potencial
t	tempo
R_s	resistência do elemento sensor da sonda de resistência elétrica (instalação de sondas de resistência elétrica)
ρ	resistividade do material do elemento sensor (instalação de sondas de resistência elétrica)
L	comprimento do elemento sensor (instalação de sondas de resistência elétrica)
S	área da seção transversal (instalação de sondas de resistência elétrica)
pH	potencial hidrogeniônico
p	nível de significância
l	número de níveis
k	número de variáveis independentes
l^k	número de experimentos de um planejamento fatorial com l níveis e k variáveis independentes
ε	nível de significância
Δm	perda de massa expressa em g (ensaio de perda de massa)
m_i	massa inicial expressa em g (ensaio de perda de massa)
m_f	massa final expressa em g (ensaio de perda de massa)
$T_{\text{corrosão}}$	taxa de corrosão expressa em $\mu\text{m/ano}$ (ensaio de perda de massa)
d	densidade do corpo-de-prova expressa em g/cm^3 (ensaio de perda de massa)
A	área do corpo-de-prova expressa em cm^2 (ensaio de perda de massa)
t	tempo do ensaio expresso em ano (ensaio de perda de massa)
R_p	resistência de polarização linear
α	grau de agitação (planejamento de experimentos)

β	geometria do corpo-de-prova (planejamento de experimentos)
γ	temperatura (planejamento de experimentos)
δ	teor de água (planejamento de experimentos)
ϕ	tempo de ensaio (planejamento de experimentos)
θ	pH da água (planejamento de experimentos)