

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

Leonel Tula Sanabria

Contribuição ao Estudo da Resistência à Corrosão
de Armaduras de Aço Inoxidável

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

São Paulo
Março, 2000

Leonel Tula Sanabria

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO
DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO
DE ARMADURAS DE AÇO INOXIDÁVEL

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil

Orientador:
Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo
Março, 2000

FICHA CATALOGRÁFICA

Tula Sanabria, Leonel

Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável. São Paulo, 2000.

259p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Armaduras – Corrosão 2. Concreto armado – Durabilidade 3. Aço inoxidável I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. II. t

*Aos meus pais Leonel e Herminia,
A Luisy (minha esposa),
Aos que lerem e gostarem,
(ou acharem útil)*

AGRADECIMENTOS

Chegar ao grau de Doutor em Engenharia não será apenas um mérito meu, será também uma conseqüência do salto cultural que a Revolução proporcionou à sociedade cubana dos últimos 40 anos e um fruto do aporte solidário da sociedade soviética e da brasileira que me proporcionaram estudos de graduação e pós-graduação em suas terras. Esses povos irmãos me acolheram como um filho, favorecendo-me com a ajuda de seus órgãos de fomento ao ensino e à pesquisa e adicionando os temperos de suas ricas culturas à minha vida. Por tudo isso, o grau de Doutor representa um compromisso maior com a sociedade que espera uma contribuição à prática e ao ensino da Engenharia que correspondam a esse título.

A pós-graduação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) não haveria sido possível sem a combinação de alguns fatores que merecem meu especial reconhecimento: o incentivo dado pelos meus então chefes, Prof. Rolando Armas e Prof. Emilio Castañeda, e por toda a equipe do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría que permitiu meu afastamento temporário; a ajuda de quem fora meu orientador em Cuba, meu amigo Prof. Vitervo O'Reilly, que me apresentou e recomendou ao Prof. Paulo Helene; a ajuda de meus colegas cubanos que chegaram antes ao Departamento de Engenharia de Construção Civil (PCC) da USP, Prof. Nelson Díaz e Prof. Rolando Ramírez; a minha aceitação pela EPUSP no programa de Doutorado e do Prof. Paulo Helene como meu orientador; a gestão da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo que me concedeu uma bolsa de estudo decorosa e recursos materiais para a pesquisa e para a participação em eventos; a colaboração da Villares Metals S.A. que, em convênio com a EPUSP, garantiu recursos materiais e humanos de vital importância ao projeto; a doação de materiais feita pelas empresas Cimento Eldorado, Concretex, IPT e Tintas Sumaré.

No âmbito pessoal, devo agradecer a muitos, entre professores, funcionários, colegas e amigos do PCC e de outras instituições. É impossível citá-los todos sem ultrapassar os limites de uma página e sem que, lamentavelmente, deixe de mencionar alguém. Em representação de todos eles gostaríamos de agradecer: à Prof.^a Zehbour Panossian, co-orientadora de grande parte deste trabalho; ao assessor anônimo da FAPESP que, por meio dos pareceres sobre os relatórios semestrais, converteu-se em um profundo crítico e orientador da pesquisa; ao Dr. Celso Barbosa pela bibliografia e entusiasmo aportado ao projeto; ao Prof. Pedro Kopschitz que, ao longo dos anos tornou-se corretor oficial de língua portuguesa deste trabalho, e outros colegas que também cooperaram para tornar legíveis meus textos: o Prof. Paulo Francinete, a Prof.^a Maryangela de Lima e os colegas Eliana Monteiro e Marcos Mitre. Agradeço também aos hoje engenheiros Rodrigo Lamarca, Fernando Ticianelli e Leandro Solano, ao técnico Rafael Strey, aos estudantes André e Mauro Eisinger, todos eles membros da equipe de trabalho do projeto. Agradeço a aqueles que foram os mais críticos ou os mais estimulantes ao longo desses anos: os professores Maria Alba Cincotto, Silvia Selmo, Vanderley John, Vahan Agopyan o gerente Reginaldo da Silva, o inesquecível Dorval Aguiar, os colegas Leandro Coelho, Avelino Crepaldi, Salomon Levi, Arnaldo Carneiro e outros, muitos outros que me incentivaram com amizade. Os de grande paciência, encabeçados pela Engrácia Bartuciotti.

Agradeço à Escola pelos inúmeros conhecimentos aqui adquiridos, pelos excelentes professores que me ofereceu, inclusive pelos que viram do exterior a seu convite, pela oportunidade de trabalhar sob a orientação do Prof. Paulo Helene. Obrigado, Prof. Paulo Helene, pela confiança depositada, pela orientação, pela ajuda e atenção ao longo destes anos, pelo respeito e sinceridade que caracterizaram a nossa relação.

Agradeço a todos os que, ao longo de minha vida, contribuíram para esta conquista. Agradeço aos meus pais, à minha companheira, a toda minha família, aos meus educadores e aos meus amigos.

Contribuição ao Estudo da Resistência à Corrosão de Armaduras de Aço Inoxidável

RESUMO

Esta tese propõe-se avaliar a resistência à corrosão por cloreto, de armaduras nervuradas de aço inoxidável do tipo ABNT 316L de 10 mm de diâmetro. O estudo foi comparativo, tendo como referência armaduras de aço carbono do mesmo diâmetro e propriedades mecânicas similares. Os ensaios foram divididos em duas partes: uma primeira, em que foi avaliado o comportamento eletroquímico das armaduras e uma segunda, onde avaliou-se o comportamento físico-mecânico com o avanço da corrosão.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em corpos-de-prova de concreto armado, mantidos em condições de imersão parcial em água durante 65 semanas. As barras estudadas estavam em diferentes condições de tensão (relaxadas, tracionadas, dobradas e soldadas) e com diferentes graus de contaminação (até 5% de cloreto em relação à massa de cimento). As determinações realizadas foram: curvas de polarização potenciodinâmica, potencial eletroquímico e observação visual.

A avaliação do comportamento físico-mecânico foi realizada em armaduras com diferentes níveis de corrosão, causada por corrente impressa de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ durante tempos diferentes. Foram realizados ensaios de aderência por arrancamento e de resistência à tração. Na análise integral dos resultados foi desenvolvida uma metodologia para a estimativa da vida útil. Calculada a vida útil de estruturas hipotéticas, armadas com ambos os tipos de barras estudadas, foi possível estabelecer as relações entre elas em relação à durabilidade.

A tese trouxe algumas contribuições, entre elas: foi determinada a influência da tração na redução da resistência à corrosão; foram propostos limites aceitáveis de contaminação por cloretos para as armaduras inoxidáveis e; foram dadas recomendações para a interpretação das medidas de potencial eletroquímico de armaduras inoxidáveis. O emprego das armaduras inoxidáveis foi recomendado para conseguir a durabilidade requerida de obras situadas em ambiente agressivo, que por sua importância econômica, social ou cultural, assim o justifiquem.

Contribución al Estudio de la Resistencia a Corrosión de Armaduras de Acero Inoxidable

RESUMEN

Esta tesis se propuso evaluar la resistencia a corrosión por cloruros, de armaduras corrugadas de acero inoxidable del tipo ABNT 316L de 10 mm de diámetro. El estudio fué comparativo, teniendo como referencia armaduras de acero al carbono del mismo diámetro y propiedades mecánicas semejantes. Los ensayos fueron divididos en dos partes: una primera, en que fué evaluado el comportamiento electroquímico de las armaduras y una segunda, que evaluó el comportamiento físico-mecánico con el avance de la corrosión.

Los ensayos electroquímicos fueron realizados en probetas de hormigón armado, mantenidas en condiciones de inmersión parcial en agua durante 65 semanas. Las barras estudiadas estaban en diferentes condiciones de tensión (relajadas, traccionadas, dobladas y soldadas) y con diferentes grados de contaminación (hasta 5% de cloruro en relación a la masa de cemento). Las determinaciones realizadas fueron: curvas de polarización potenciodinámica, potencial electroquímico y observación visual.

La evaluación del comportamiento físico-mecánico fué realizada en armaduras con diferentes niveles de corrosión, causada con corriente impuesta de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ durante tiempos diferentes. Fueron realizados ensayos de adherencia por arrancamiento y de resistencia a tracción. En el análisis integral de los resultados fué desarrollada una metodología para la estimativa de la vida útil. Calculada la vida útil de estructuras hipotéticas, armadas con ambos tipos de barras estudiadas, fué posible establecer relaciones entre ellas en cuanto a la durabilidad.

La tesis trajo algunas contribuciones, entre ellas: fué determinada la influencia de la tracción en la reducción de la resistencia a corrosión; fueron propuestos límites aceptables de contaminación por cloruros para las armaduras inoxidables y; fueron dadas recomendaciones para la interpretación de las medidas de potencial electroquímico en las armaduras inoxidables. Las armaduras inoxidables fueron recomendadas para conseguir la durabilidad requerida de obras situadas en ambiente agresivo, que por su importancia económica, social o cultural, así lo justifiquen.

Contribution to Study of Corrosion Resistance of Stainless Steel Rebars

ABSTRACT

This thesis intended to evaluate the corrosion resistance to chloride contamination of 316L stainless steel corrugated rebars of 10-mm diameter. The study was based on comparative tests assuming as reference the carbon steel rebars of the same diameter and similar mechanical properties. The experimental work consisted of two parts. The first part evaluated the electro-chemical behavior, and the second one evaluated the physic-mechanical behavior with corrosion advance.

The electro-chemical tests were performed with reinforced concrete specimens hold in partial moisture condition for 65 weeks. The bars were studied in different tensile conditions (relaxed, tensioned, bent and welded) and in different grades of contamination (up to 5% chloride by cement mass). The determinations included the potentiodynamic polarization curves, the electrochemical potential and the visual observation.

The evaluation of physic-mechanical behavior was performed for rebars with different corrosion stages, caused by impressed current of $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The bond test by pull-out and the tensile test were the tests used for this study. The integral analysis of experimental results allowed the development of a methodology for the service life estimation. Calculating the service life of hypothetical structures reinforced with both types of studied steels, it was possible to establish the relation from point of view of durability for each reinforcement.

The thesis got out some contributions, such as: it was determined the influence of the tension on the reduction of the corrosion resistance of steel; it was proposed the chloride threshold for stainless steel rebars and; it was given a recommendation for the interpretation of the electrochemical potential measurements in stainless steel bars. The stainless steel reinforcement was recommended for the required durability of structures located in aggressive environment, in which the economical, social or cultural importance justifies this decision.

Contribuição ao Estudo da Resistência à Corrosão de Armaduras de Aço Inoxidável

Leonel Tula

Sumário.

INTRODUÇÃO	1
1. IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
2. PESQUISAS NA ÁREA	6
3. JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	10
3.1. ORIGINALIDADE	11
4. OBJETIVO	12
5. CONTEÚDO	12
CAPÍTULO 1. ARMADURAS INOXIDÁVEIS	13
1.1. COMPOSIÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS UTILIZADOS PARA ARMADURAS	14
1.1.1. PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA	15
1.2. PARTICULARIDADES DA CORROSÃO EM ARMADURAS INOXIDÁVEIS	18
1.2.1. PASSIVAÇÃO	19
1.2.2. TIPOS DE CORROSÃO	20
1.2.3. RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM ARGAMASSA E CONCRETO CARBONATADO	25
1.2.4. CORROSÃO GALVÂNICA E RESISTÊNCIA À CORROSÃO GALVÂNICA	26
1.2.5. SOLDABILIDADE E SEU EFEITO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO	27
1.2.6. EXPANSIBILIDADE DOS PRODUTOS DE CORROSÃO	28
1.3. CUSTO	32
1.4. CASOS DE APLICAÇÃO	33
CAPÍTULO 2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	40
2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA	40
2.1.1. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS EM PESQUISAS ANTERIORES	41
2.2. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DAS ARMADURAS	47
2.2.1. ENSAIOS RELACIONADOS COM A TERMODINÂMICA DA CORROSÃO	47
2.2.2. ENSAIOS RELACIONADOS COM A CINÉTICA DA CORROSÃO	48
2.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DAS ARMADURAS	49
2.3.1. REDUÇÃO DA ADERÊNCIA CONCRETO/ARMADURA	50
2.3.2. REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS ARMADURAS	58
2.4. ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL – ABORDAGEM LABORATORIAL	59
CAPÍTULO 3. EXPERIMENTO	63
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA	63
3.1.1. <i>PARTE 1. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO.</i>	63
3.1.2. <i>PARTE 2. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO.</i>	64
3.2. CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO UTILIZADAS NOS ENSAIOS DA <i>PARTE 1 E 2</i>	64
3.2.1. CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DAS AVALIAÇÕES ELETROQUÍMICAS	65
3.2.2. CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DAS AVALIAÇÕES FÍSICO-MECÂNICAS	66
3.3. VARIÁVEIS DA PESQUISA	67
3.3.1. VARIÁVEIS INDEPENDENTES	67
3.3.2. VARIÁVEIS DEPENDENTES	68
3.3.3. VARIÁVEIS INTERVENIENTES	69
3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.	72
3.4.1. CONCRETO	72
3.4.2. ARMADURAS	73
3.4.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO SIMPLES E ARMADO	75
3.4.4. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA UTILIZADOS NAS AVALIAÇÕES ELETROQUÍMICAS	77
3.4.5. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA UTILIZADOS NAS AVALIAÇÕES FÍSICO-MECÂNICAS	82
3.5. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO	84
3.5.1. ENSAIOS RELACIONADOS COM A TERMODINÂMICA DA CORROSÃO	84
3.5.2. ENSAIOS RELACIONADOS COM A CINÉTICA DA CORROSÃO	84

3.6.	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO	87
3.6.1.	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	87
3.6.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	88
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		89
4.1.	PARTE 1. COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO.	89
4.1.1.	MEDIÇÕES DE POTENCIAL ELETROQUÍMICO	89
4.1.2.	ENSAIOS POTENCIODINÂMICOS	91
4.2.	PARTE 2. COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO	94
4.2.1.	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	94
4.2.2.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	97
4.3.	RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO VISUAL E DA PERDA DE MASSA SOBRE AS BARRAS DA PESQUISA	100
4.3.1.	OBSERVAÇÃO VISUAL	100
4.3.2.	PERDA DE MASSA	101
CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		103
5.1.	PARTE 1. COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO	103
5.1.1.	POTENCIAL ELETROQUÍMICO	103
5.1.2.	DENSIDADES DE CORRENTE DE CORROSÃO E PREVISÃO DE COMPORTAMENTO	108
5.1.3.	RELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL ELETROQUÍMICO E A DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO	116
5.1.4.	ANÁLISE DE COMPORTAMENTO PELA INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DAS CURVAS DE POLARIZAÇÃO: 119	
5.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES FÍSICO-MECÂNICAS DA CORROSÃO	125
5.2.1.	REDUÇÃO DA ADERÊNCIA CONCRETO/ARMADURA COM O AVANÇO DA CORROSÃO	125
5.2.2.	REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO COM O AVANÇO DA CORROSÃO	132
5.3.	ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL.	140
5.3.1.	CONSIDERAÇÕES PARA O PERÍODO DE INICIAÇÃO	141
5.3.2.	CONSIDERAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO	141
5.3.3.	ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL DE PROJETO, VIDA ÚTIL DE SERVIÇO E VIDA ÚTIL TOTAL	146
CONCLUSÕES		149
1. CONCLUSÕES PROPRIAMENTE DITAS		149
2. TRANSFERÊNCIA DOS RESULTADOS AO MEIO TÉCNICO		154
3. PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS		155
ANEXOS		158
ANEXO A. CARACTERIZAÇÃO DAS ARMADURAS.		158
ANEXO B. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO E MATERIAIS COMPONENTES.		160
B.1.	MATERIAIS COMPONENTES.	160
B.1.	CONCRETO.	161
ANEXO C. CARACTERIZAÇÕES ELETROQUÍMICAS.		163
C.1.	MEDIÇÕES DE POTENCIAL ELETROQUÍMICO.	163
C.2.	CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICAS.	172
C.2.1.	CURVAS DE POLARIZAÇÃO MÉDIAS.	172
C.2.1.	COMPARAÇÃO DAS CURVAS MÉDIAS DE BARRAS RELAXADAS E TRACIONADAS.	175
C.2.2.	CURVAS MÉDIAS E ALGUMAS CURVAS INDIVIDUAIS DE BARRAS RELAXADAS.	176
C.2.3.	CURVAS MÉDIAS DE BARRAS RELAXADAS E CURVAS DE BARRAS RELAXADAS DE CORPOS-DE-PROVA EM CÂMARA ÚMIDA.	177
C.2.4.	CURVAS MÉDIAS E ALGUMAS CURVAS INDIVIDUAIS DE BARRAS TRACIONADAS.	179
C.2.5.	CURVAS MÉDIAS DE BARRAS TRACIONADAS E CURVAS DE BARRAS TRACIONADAS DE CORPOS-DE-PROVA EM CÂMARA ÚMIDA.	180
C.3.	ANÁLISE DAS CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICAS.	182
C.4. ANÁLISE DAS CURVAS PELOS DIAGRAMAS DE EVANS E DE POURBAIX.		199
C.4.1.	DIAGRAMAS DE POURBAIX	199
C.4.2.	ANÁLISE DAS CURVAS DO AÇO CARBONO PELOS DIAGRAMAS DE EVANS	200
C.4.3.	ANÁLISE DAS CURVAS DO AÇO INOXIDÁVEL PELOS DIAGRAMAS DE EVANS	201
ANEXO D. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO		205

D 1.	DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DAS BARRAS PARA OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	205
D 2.	RESULTADOS E TRATAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM BARRAS CORROÍDAS.	209
D.3.	GRÁFICOS DE CARGA <i>VERSUS</i> DESLIZAMENTO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO.	216
ANEXO E. ENSAIOS DE TRAÇÃO		217
E 2.	DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DAS BARRAS PARA OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.	217
E 2.	RESULTADOS E TRATAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.	222
E.3.	GRÁFICOS DE CARGA <i>VERSUS</i> ALONGAMENTO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DE BARRAS CORROÍDAS.	227
ANEXO F. ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO.		227
ANEXO G. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICO-MECÂNICA DO TIPO DE ATAQUE POR PITES DAS ARMADURAS ESTUDADAS		228
G.1.	PROFUNDIDADE DE SATURAÇÃO DO PITE NAS BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL	228
G.2.	PERDA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ATÉ A ETAPA DE “SATURAÇÃO” DOS PITES NAS BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL	229
G.3.	PERDA DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA MÉDIA ATÉ A ETAPA DE “LUBRIFICAÇÃO” NAS BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL E DE AÇO CARBONO	230
G.4.	PROFUNDIDADES DO ATAQUE NAS BARRAS DE AÇO CARBONO	232
G.5.	PERDA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA ETAPA DE “SATURAÇÃO” DOS PITES NAS BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL E DE AÇO CARBONO	234
G.6.	ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO DE PITES DO AÇO INOXIDÁVEL NO CONCRETO	234
ANEXO H. CÁLCULOS DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE SERVIÇO		235
H.1.	METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA VIDA ÚTIL DE SERVIÇO	237
H.2.	EXEMPLO DE CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE SERVIÇO.	239
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		253

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Medidas de proteção contra a corrosão das armaduras no concreto.....	2
Figura 2. A-D. Fotografias de algumas obras onde foram utilizadas armaduras de aço inoxidável.....	6
Figura 3. Principais países produtores mundiais de armaduras de aço inoxidável.....	8
Figura 4. Utilização combinada de armaduras inoxidáveis e de aço carbono no mesmo componente estrutural.....	26
Figura 5. Medições de expansibilidade e fissuração (TICIANELLI, 1998). A) Medida indireta de variação de diâmetro com agulha de Le Chatelier especialmente construída para o corpo-de-prova de 40 mm de diâmetro (ensaio de expansibilidade). B) Medida direta de variação de diâmetro (ensaio de expansibilidade). C) Estudo de fissuras com fissurômetro. D) Estudo indireto de evolução de fissuras com ultrassom.....	29
Figura 6. Estudo de barras em solução saturada de NaCl a 45°C, as barras de aço inoxidável colocadas na região não aerada (LAMARCA, 1998).....	31
Figura 7. Câmara de corrosão acelerada de barras em solução (LAMARCA, 1998).....	31
Figura 8. Fotografia da execução da ponte de “Shaffausen”, Suíça (CEDINOX, 1997).....	34
Figura 9. Cais em Progreso, Yucatán, México. A) Cais antigo construído entre 1937 e 1941. As juntas entre as peças premoldadas de concreto não armado, reforçadas com barras de aço inoxidável. B) Em primeiro plano o cais construído em 1970, demolido em 1987 após o colapso parcial. C) Barras de aço inoxidável sem corrosão, depois de 60 anos no concreto. D) Barra de aço inoxidável corroída severamente na dobra exposta durante 60 anos a corrosão atmosférica. E) Trecho do cais novo (de 1970) colapsado. Armaduras de aço carbono severamente corroídas. (Fotos de ARMINOX, 1999).....	38
Figura 10. Fluxograma da metodologia de avaliação de barras de aço para armadura. $f(t)$ - função do tempo. $f(t, T)$ - função do tempo e da temperatura (TULA et al., 1996).....	43
Figura 11. Percentual de pesquisas em que foram utilizadas como referência barras do tipo: “n” – de aço carbono; “n-galva” – de aço galvanizado; “n-epóxi” – de aço revestido com epóxi.....	43
Figura 12. Percentual de pesquisas em que foram estudadas barras dos diferentes tipos de aços.....	43
Figura 13. Percentual em que são utilizadas diferentes condições de exposição em pesquisas anteriores.....	45
Figura 14. Percentual em que são utilizadas diferentes determinações (as mais freqüentes) em pesquisas anteriores.....	45
Figura 15. Curva típica representativa da resistência de aderência e o deslizamento (Eligehausen et al. apud ISA (1997)).....	51
Figura 16. Representação simplificada da relação entre a resistência de aderência e o deslizamento (Tassios apud ISA (1997)).....	53
Figura 17. Comparação de τ_{b10} , τ_{bm} e τ_{bu} pela relação (EA/EF) de resultados obtidos dos ensaios de arrancamento (EA) e de flexão (EF).....	56
Figura 18. Ensaio de arrancamento.....	58
Figura 19. Modelo de vida útil, desempenho versus tempo , de HELENE (1993).....	60
Figura 20. Vida útil residual em função da densidades de corrente de corrosão para o diâmetro de 10 mm, antes e após eventual fissuração e destacamento do concreto de cobrimento segundo ANDRADE e ALONSO, 1994.....	61
Figura 21. Fim da vida útil de projeto - Perda da passivação das armaduras de aço carbono. A) Corrosão por carbonatação, detectada no teste de aspensão de fenolftaleína. B) Corrosão por cloreto, causa detectada em ensaio de determinação de cloretos, corroborada pela observação visual e a ausência de carbonatação à profundidade da barra.....	61
Figura 22. Fim da vida útil de serviço - Perda da capacidade resistente. A) Perda geral da capacidade resistente em pilares de obra litorânea (“Marina Heminway” Havana, Cuba).	

B) Perda local da capacidade de carga de armadura de aço inoxidável (Cais de Progresso, Yucatán, México. ARMINOX, 1999).....	62
Figura 23. Fim da vida estrutural – Colapso. (Praia de Santa Maria, Havana, Cuba)	62
Figura 24. Programa experimental (TULA e HELENE, 1998).	63
Figura 25. Corpos-de-prova tipo "R" e "T" em condições de imersão parcial em água.	65
Figura 26. Corrosão acelerada por corrente impressa de 50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (na Foto, corpos-de-prova tipo "A").....	67
Figura 27. Oito concretos armados formam os corpos-de-prova de concreto utilizados nos diferentes ensaios da pesquisa.....	75
Figura 28. Preparação das barras: 1 – barra. 2 – abertura de fenda no extremo da barra. 3 – colocação do grampo de cobre em forma de "U" invertido. 4 – fixação do grampo a pressão. 5 – solda do fio elétrico. 6 – proteção do conexão elétrica com silicone sólido aplicado à quente. 7 – ponta do fio elétrico estanhada. 8 – a barra é pintada com tinta bicomponente definindo a área exposta à corrosão.....	76
Figura 29. Fôrma metálica de uma das vigas dos corpos-de-prova tipo "T" de barras tracionadas. .	77
Figura 30. Detalhe do corpo-de-prova tipo "R".....	79
Figura 31. Esquema de análise do carregamento do corpo-de-prova tipo "T"	79
Figura 32. Seções e detalhes do corpo-de-prova tipo "T".	80
Figura 33. Corpo-de-prova tipo "D".....	81
Figura 34. Corpos-de-prova tipo "A" do ensaio de arrancamento.....	82
Figura 35. Polarização catódica ao iniciar o ensaio em -250 mV em relação ao E_{ca} . 1- Curva de polarização com rama catódica (levantada na primeira etapa); 2 – Em azul, rama catódica da curva; 3 – Possível curva de polarização da mesma barra quando o início for em 0 mV em relação ao E_{ca} (curva da segunda etapa).	85
Figura 36. E_{corr} versus tempo no exemplo das barras relaxadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.....	89
Figura 37. E_{corr} versus tempo no exemplo das barras relaxadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.....	90
Figura 38. i_{corr} das barras de aço carbono calculadas pelo programa <i>ParCalc</i> . As linhas unem os valores médios de cada grupo de barras em igual teor de cloreto.	92
Figura 39. i_{corr} das barras de aço inoxidável calculadas pelo programa <i>ParCalc</i> . As linhas horizontais unem os valores médios de cada grupo de barras em igual teor de cloreto.....	92
Figura 40. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloretos em relação à massa de cimento com $GU = 86\%$ (imersão parcial) e 97% (câmara úmida).	93
Figura 41. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloretos em relação à massa de cimento com $GU = 86\%$ (imersão parcial) e 97% (câmara úmida).	93
Figura 42. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloretos. Barras relaxadas (Rn), barras dobradas (Dn), barras tracionadas (Tn) e barras soldadas (Sn).	94
Figura 43. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloretos. Barras relaxadas (Rx), barras dobradas (Dx), barras tracionadas (Tx) e barras soldadas (Sx).	94
Figura 44. Diagramas médios tensão de aderência versus deslizamento das barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável.....	95
Figura 45. Diagramas médios de tensão de aderência versus deslizamento do ensaio de arrancamento das barras de aço carbono com o avanço da corrosão.	96
Figura 46. Diagramas médios de tensão de aderência versus deslizamento do ensaio de arrancamento das barras de aço inoxidável com o avanço da corrosão.	96
Figura 47. Diagramas médios "tensão x alongamento" das barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável.	98
Figura 48. Diagramas médios de tensão versus alongamento das barras de aço carbono com o avanço da corrosão.	99

Figura 49. Diagramas médios de tensão versus alongamento das barras de aço inoxidável com o avanço da corrosão.....	99
Figura 50. Fotografia ao microscópio (20x). Superfície de barra de aço inoxidável com pites.....	101
Figura 51. Fotografia ao microscópio (20x). Superfície de barra de aço carbono com ataque localizado e alguns pites.....	101
Figura 52. Diferencias entre a perda de massa real (Δm_r) e a teórica (Δm_t) no ensaio de corrente impressa, dependentes do teor de cloreto e do cobrimento de concreto.....	102
Figura 53. E_{corr} de barras relaxadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).....	103
Figura 54. E_{corr} de barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).....	104
Figura 55. E_{corr} de barras tracionadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).....	104
Figura 56. E_{corr} de barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).....	105
Figura 57. E_{corr}^m em barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto com mais de 8 meses.....	107
Figura 58. E_{corr}^m em barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto com mais de 8 meses.....	107
Figura 59. Determinação da i_{corr} das curvas de polarização de um mesmo caso de estudo. 1 - Curvas de polarização de um mesmo caso. 2 - Possível curva catódica de redução de oxigênio, para a qual tendem as ramas catódicas das curvas do mesmo caso. 3 - Potencial $E(I=0)$ de uma das curvas. 4 - Determinação de i_{corr} da mesma curva. 5 - i_{corr} de cada uma das três curvas do exemplo. Quanto menor $E(I=0)$, maior i_{corr}	109
Figura 60. Determinação da i_{corr}^{mg} da curva de polarização média. 6 - Curva de polarização média. 7 - Potencial eletroquímico médio E_{corr}^m das barras do mesmo caso. Neste potencial avalia-se a curva média. 8 - Desenho da prolongação da curva média a partir de +100 mV em relação a E_{corr}^m . 9- Determinação da i_{corr} média gráfica (i_{corr}^{mg}). 10 - Possível curva de polarização real no potencial $E_{corr} = E_{corr}^m$. 11 - i_{corr} real correspondente a $E_{corr} = E_{corr}^m$. O valor de i_{corr} real é sempre maior que a i_{corr}^{mg} avaliada no mesmo potencial.	110
Figura 61. Curvas de polarização médias no exemplo de barras relaxadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.....	111
Figura 62. Curvas de polarização médias no exemplo de barras relaxadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.....	111
Figura 63. Curvas de polarização médias no exemplo de barras tracionadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.....	112
Figura 64. Curvas de polarização médias no exemplo de barras tracionadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.....	112
Figura 65. Comparação gráfica entre i_{corr}^{mc} e i_{corr}^{mg} das barras de aço carbono.	113
Figura 66. Comparação gráfica entre i_{corr}^{mc} e i_{corr}^{mg} das barras de aço inoxidável.	113
Figura 67. Valores de i_{corr}^{max} determinados nos ensaios acelerados para cada caso de estudo.	115
Figura 68. Relação potencial versus densidade de corrente de corrosão de barras de aço carbono relaxadas e tracionadas.	117
Figura 69. Relação potencial versus densidade de corrente de corrosão de barras de aço inoxidável relaxadas e tracionadas. As linhas contínuas não respondem a tendências matemáticas, tratam-se de tendências aparentes.	118
Figura 70. Ramas catódicas todas tendentes à mesma curva redução do oxigênio.....	120
Figura 71. Gráfico de i_{corr}' versus Cl_{cc} das barras de aço carbono e aço inoxidável para as condições ensaiadas (T – temperatura ambiente, UR – umidade relativa, GU – grau de umidade, a/c – ralação água/cimento, c – consumo de cimento). As curvas de comportamento do aço inoxidável tracionado e o aço carbono relaxado são coincidentes acima de 1% de cloreto.	125
Figura 72. Representação gráfica do comportamento da resistência de aderência à ruptura (τ_{br}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).	127

Figura 73. Representação gráfica do comportamento da resistência de aderência média (τ_{bm}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).	127
Figura 74. Representação gráfica do comportamento do deslizamento à ruptura com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).....	127
Figura 75. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de resistência de aderência à ruptura versus perda de massa .	130
Figura 76. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de resistência de aderência média versus perda de massa .	131
Figura 77. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de deslizamento à ruptura versus perda de massa	131
Figura 78. Representação gráfica do comportamento do limite de resistência (f_{st}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).	133
Figura 79. Representação gráfica do comportamento da resistência de escoamento (f_{yt}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).....	133
Figura 80. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados do limite de resistência à tração versus perda de massa	134
Figura 81. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados da resistência de escoamento versus perda de massa . Verifica-se a mesma tendência descrita para o limite de resistência.	134
Figura 82. Tendência de comportamento da resistência à tração com o avanço da corrosão em presença de íons cloreto.	135
Figura 83. Perda da resistência de escoamento, em porcentagem, com o avanço da corrosão medido em perda de massa.....	136
Figura 84. Formação de pites sobre a superfície das armaduras de aço inoxidável e de aço carbono.	138
Figura 85. Comparação quanto a seção equivalente da barra não corroída (1) e barras corroídas com as mesmas perdas de massa: a barra desgastada de maneira regular igual ao caso da corrosão generalizada (2); a corroída por pites como no caso do aço inoxidável (3); e a corroída por pites generalizados como no caso da corrosão por cloreto do aço carbono (4). Estas últimas (4) resultam as de menor seção transversal equivalente.....	138
Figura 86. Previsão da redução da resistência à tração com a corrosão de barras de diferentes diâmetros (ϕ).	139
Figura 87. Estimativa de vida útil de projeto das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.....	146
Figura 88. Estimativa de vida útil de serviço das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.....	146
Figura 89. Estimativa de vida útil total das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.....	147

LISTA DE FIGURAS DOS ANEXOS

Figura A. 1. Dimensões geométricas características das barras de aço carbono da pesquisa.	158
Figura A. 2. Dimensões geométricas características das barras de aço inoxidável da pesquisa.	159
Figura B. 1. Representação gráfica das resistências à compressão médias a 28 dias dos concretos utilizados na pesquisa com diferentes teores de cloreto em relação à massa de cimento.	162
Figura B. 2. Representação gráfica da ρ das superfícies seca e molhada dos diferentes concretos da pesquisa. Note-se que a adição de cloreto reduz a ρ do concreto.	162
Figura B. 3. Relação entre a umidade interna dos corpos-de-prova de concreto submetidos a imersão parcial e a porcentagem de vazios.	162
Figura C. 1. Comportamento provável da relação potencial versus densidade de corrente de corrosão das barras de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.	171
Figura C. 2. Curvas de polarização médias das barras relaxadas de aço carbono em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.	172
Figura C. 3. Curvas de polarização médias das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto. A) Curvas médias e potenciais médios. B) Detalhe para determinação gráfica da densidade de corrente de corrosão.	172
Figura C. 4. Curvas de polarização médias das barras tracionadas de aço carbono em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.	173
Figura C. 5. Curvas de polarização médias das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto. A) Curvas médias e potenciais médios. B) Detalhe para determinação gráfica da densidade de corrente de corrosão.	173
Figura C. 6. Curva de polarização de barra de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto apresentando a configuração típica do pite (cura analisada no Anexo C.4.3)	174
Figura C. 7. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos sem cloreto.	175
Figura C. 8. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto.	175
Figura C. 9. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto.	175
Figura C. 10. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto.	175
Figura C. 11. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto.	175
Figura C. 12. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto.	175
Figura C. 13. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto.	176
Figura C. 14. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto.	176
Figura C. 15. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	176
Figura C. 16. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	176
Figura C. 17. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	176
Figura C. 18. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	176
Figura C. 19. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	177

Figura C. 20. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	177
Figura C. 21. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	177
Figura C. 22. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	177
Figura C. 23. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	177
Figura C. 24. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	177
Figura C. 25. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 26. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 27. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 28. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 29. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 30. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	178
Figura C. 31. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 32. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 33. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 34. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 35. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 36. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	179
Figura C. 37. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	180
Figura C. 38. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.	180
Figura C. 39. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	180
Figura C. 40. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.	180

Figura C. 41. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	180
Figura C. 42. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	180
Figura C. 43. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	181
Figura C. 44. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	181
Figura C. 45. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	181
Figura C. 46. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.....	181
Figura C. 47. Diagramas de Pourbaix para os sistemas Fe-água e Cr-água (POURBAIX, 1987)...	199
Figura C. 48. Análise dos diagramas de Evans para o aço carbono. Influência da ação dos cloretos e da tensão. 1 – Curva anódica do Fe. 2 – Potencial de equilíbrio do O. 3 – Curva catódica do O. 4 – Curva anódica do O. 5 – Potencial de corrosão da barra. 6 – Curva de polarização da barra de aço carbono.	201
Figura C. 49. Análise dos diagramas de Evans para o aço carbono. Influência da ação dos cloretos e da tensão. 1 – Curva anódica do Fe. 2 – Potencial de equilíbrio do O. 3 – Curva catódica do O. 4 – Curva anódica do O. 5 – Potenciais de corrosão das barras. 6 – Curvas de polarização das barras de aço inoxidável. 7 – Curva anódica do Cr. 8 – Potencial de equilíbrio do oxigênio segundo Diagrama de Pourbaix para sistema Cr-água em pH=13,5. 9 – Aparente potencial de dissolução da película protetora de óxido de Cr. 10 – Curva típica de metais transpassiváveis que apresentam película protetora instáveis (PANOSSIAN, 1993). Estado de passivação das barras relaxadas. 11 – Igual ao 10 das barras tracionadas. 12 – Curva anódica de um outro elemento metálico da liga. Reação anódica não identificada, típica da perda de passivação com teores acima de 5% de cloreto.	204
Figura D. 1. Ruptura em deslizamentos menores que 1 mm (Figuras A e B).....	216
Figura D. 2. Ruptura em deslizamentos maiores que 1 mm (Figuras A e B).	216
Figura D. 3. Ruptura em deslizamentos maiores que 2 mm.	216
Figura E. 1. Exemplo de gráfico de carga versus alongamento de barras de aço carbono.	227
Figura E. 2. Exemplo de gráfico de carga versus alongamento de barras de aço inoxidável.	227
Figura F. 1. Exemplo de gráfico de calibragem do LVDT.	227
Figura F. 2. Exemplo de gráfico de calibragem da prensa.....	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Aplicações típicas das armaduras inoxidáveis.	4
Tabela 2. Casos de aplicação de armaduras inoxidáveis.....	4
Tabela 3. Principais instituições estrangeiras de pesquisa ou patrocinadoras envolvidas em projetos de desenvolvimento das armaduras inoxidáveis.....	9
Tabela 4 Alguns eventos importantes no desenvolvimento da indústria dos aços inoxidáveis (PADILHA e GUEDES, 1994; ABCEM, 1996; CASCUDO et al., 1996).....	13
Tabela 5. Composição química recomendada para os aços inoxidáveis europeus empregados em armaduras (WALKER et al., 1998).....	15
Tabela 6. Composição química recomendada pela NBR-5601/1981.	15
Tabela 7 Comparação entre o ABNT 316L e o aço europeu 1.4429 quanto à composição química.	15
Tabela 8 Comparação entre a composição do aço ABNT 316L e do aço inoxidável empregado nesta pesquisa.....	15
Tabela 9 Índice <i>SE</i> para diferentes tipos de aços inoxidáveis (extraído de NÜRNBERGER et al., 1996 e WALKER et al., 1998).....	24
Tabela 10. Resultados das medições de i_{corr} em [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]. Smith et al. (1992) apud McDONALD et al. (1995). Ensaios em solução.....	25
Tabela 11 Relação dos custos de armaduras inoxidáveis em relação aos das de aço carbono (NÜRNBERGER et al., 1996; NiDI, 1997).	33
Tabela 12. Cálculo <i>CTCV</i> [Francos Suíços] das diferentes variantes propostas de armadura da ponte de Shaffausen.	35
Tabela 13. Apresentação dos custos totais iniciais das diferentes variantes. McDONALD et al. (1995).	36
Tabela 14. Custos das variantes em relação ao custo da variante com aço carbono de cada projeto. McDONALD et al. (1995).....	36
Tabela 15. Aspectos relacionados com os requisitos de desempenho das barras de aço para armadura (TULA et al., 1996).....	42
Tabela 16. Valores de densidade de corrente impressa utilizada em diferentes ensaios que avaliaram resistência à aderência e fissuração do cobrimento.	46
Tabela 17. Interpretação do E_{corr} para armaduras convencionais de aço carbono em concretos contaminados por cloreto, segundo ASTM C876:1990.	47
Tabela 18. A aderência concreto/armadura é devido à três fatores (ACI 408, 1991; ISA, 1997).....	51
Tabela 19. Variáveis independentes da pesquisa.	68
Tabela 20. Variáveis dependentes.....	69
Tabela 21. Propriedades à tração. (considerando o diâmetro nominal de 1 cm).....	74
Tabela 22. Possíveis combinações dos materiais que formam os corpos-de-prova de concreto utilizados na pesquisa. A mesma simbologia é utilizada na denominação dos corpos-de-prova da pesquisa.	75
Tabela 23. Nomenclatura dos corpos-de-prova da Parte 1 . Corpos-de-prova principais e complementares.....	82
Tabela 24. Denominação dos tipos de corpos-de-prova "A" do ensaio de arrancamento e "B" do ensaio de resistência à tração.	83
Tabela 25. Condições de ensaio adotadas nas diferentes etapas da realização dos ensaios potenciodinâmicos.....	84
Tabela 26. Idade e quantidade de medições de E_{corr}	90
Tabela 27. Potenciais de corrosão médios E_{corr}^m [mV_{SCE}] (desvio padrão médio de 73 mV).....	90
Tabela 28. Idade média dos corpos-de-prova utilizados e quantidade de ensaios potenciodinâmicos.....	91
Tabela 29. Densidades de corrente de corrosão médias calculadas pelo programa <i>ParCalc</i> - i_{corr}^{mc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).	91

Tabela 30. Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios de arrancamento utilizados para a determinação do comportamento da aderência com a corrosão.....	95
Tabela 31. Aderência pelo ensaio de arrancamento de barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável. τ_{br} - resistência de aderência à ruptura; τ_{bm} - resistência de aderência média; Δr - deslizamento médio à ruptura; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.....	95
Tabela 32. Aderência pelo ensaio de arrancamento de barras corroídas de aço carbono e aço inoxidável. C.I. - corrente impressa; α - perda de massa real; τ_{br} - resistência de aderência à ruptura; τ_{bm} - resistência de aderência média; Δr - deslizamento médio à ruptura; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.	97
Tabela 33. Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios de tração utilizados para a determinação do comportamento da resistência à tração com a corrosão.	97
Tabela 34. Resistência à tração de barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável. f_{st} - limite médio de resistência; f_{ym} - resistência média de escoamento; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas. (considerando o diâmetro real da barra).....	97
Tabela 35. Resistência à tração de barras corroídas de aço carbono e aço inoxidável. C.I. - corrente impressa; α - perda de massa real; f_{st} - limite de resistência médio; f_{ym} - resistência de escoamento média; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.....	98
Tabela 36. Diferencias em [%] entre a perda de massa real (Δm_r) e a teórica (Δm_t) nos ensaios de corrente impressa da <i>Parte 1 e 2</i> da pesquisa.....	102
Tabela 37. Densidades de corrente de corrosão médias determinadas graficamente - i_{corr}^{mg} ($\mu A/cm^2$).....	111
Tabela 38. Densidades de corrente de corrosão máximas - i_{corr}^{max} ($\mu A/cm^2$).....	114
Tabela 39. Avaliação do estado termodinâmico das armaduras de aço inoxidável pela leitura do potencial eletroquímico.....	118
Tabela 40. Densidades de corrente de corrosão recomendadas na estimativa de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas ao ataque de cloretos - i_{corr}' ($\mu A/cm^2$).....	124
Tabela 41. Teor de cloreto limite que provoca a despassivação das armaduras.	124
Tabela 42. Equações recomendadas para a determinação da possível densidade de corrente de corrosão dada uma certa contaminação por cloreto.	125
Tabela 43. Cálculo de R' para as barras dos dois tipos de aço em 12 dias de ensaio (momento de início da etapa de "saturação" dos pites) e em 20 dias (fim do ensaio).....	137
Tabela 44. Características do ataque por cloreto nas barras de aço inoxidável e aço carbono no início da etapa de "saturação" dos pites.	139
Tabela 45. Etapas do cálculo e previsão de vida útil dirigido para o fenômeno da corrosão das armaduras (adaptado de HELENE, 1993).....	141

LISTA DE TABELAS DOS ANEXOS

Tabela A. 1. Geometria das barras da pesquisa. Dimensões médias.	158
Tabela A. 2. Composição química dos aços das barras da pesquisa. Ensaio realizado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA. (26 / junho / 1998) ...	158
Tabela A. 3. Dureza Brinell a temperatura de 22 ^o , carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm de diâmetro. Ensaio realizado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA. (26 / junho / 1998).....	158
Tabela A. 4. Propriedades à tração a temperatura de 22 ^o . Ensaio realizado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA., no CPqD/PCC/EPUSP, e no CETEC Engenharia S/C LTDA (considerando o diâmetro nominal de 1cm).....	159
Tabela B. 1. Ensaio de caracterização do cimento.	160
Tabela B. 2. Composição química potencial do cimento.....	160
Tabela B. 3. Areia. Propriedades físicas.	160
Tabela B. 4. Brita. Propriedades físicas.	160
Tabela B. 5. Análise granulométrica dos agregados.	160
Tabela B. 6. Composição química do aditivo CaCl ₂ ·2H ₂ O.....	161
Tabela B. 7. Traço e propriedades reológicas do concreto fresco. Tabela resumo (valores médios).....	161
Tabela B. 8. Resistência à compressão média determinada durante todas as moldagens dos corpos-de-prova da pesquisa (NBR 5739:1980) – cada valor é a média de dois cilindros por cada betonada.....	161
Tabela B. 9. Valores médios do teor de vazios e da umidade de equilíbrio (<i>GU</i>) dos concretos em condições de imersão parcial, relacionados aos valores médios de resistência à compressão e de ar aprisionado no concreto fresco.	161
Tabela B. 10. Resistividade média (ρ) dos concretos utilizados na pesquisa em condições de imersão parcial (NBR 9204). Tabela resumo.....	162
Tabela C. 1. Medidas de potencial de barras de aço carbono relaxadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.....	163
Tabela C. 2. Medidas de potencial de barras de aço inoxidável relaxadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.....	165
Tabela C. 3. Medidas de potencial de barras de aço carbono tracionadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.....	167
Tabela C. 4. Medidas de potencial de barras de aço inoxidável tracionadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.....	169
Tabela C. 5. Resultados obtidos do programa <i>ParCalc</i> que analisa as curvas de polarização.	182
Tabela C. 6. Resultados do programa <i>ParCalc</i> e das determinações gráficas das curvas de polarização.	189
Tabela C. 7. Resultados das curvas de polarização dos ensaios complementares.	197
Tabela D. 1. Barras dos ensaios de arrancamento. Características geométricas. Massa e perda de massa.....	205
Tabela D. 2. Resultados dos ensaios de arrancamento.....	209
Tabela D. 3. Tratamento dos resultados dos ensaios de arrancamento.....	213
Tabela E. 1. Barras dos ensaios de tração. Características geométricas. Massa e perda de massa.	217
Tabela E. 2. Resultados dos ensaios de resistência à tração.	222

INTRODUÇÃO

1. Importância do tema

O concreto garante, em princípio, uma perfeita proteção contra a corrosão das armaduras convencionais de aço carbono. A alta alcalinidade da solução aquosa dos poros capilares proporciona condições para a passivação do aço carbono. Por outro lado, o revestimento forma uma barreira física ao ingresso de agentes externos que contribui para a manutenção dessas condições de passivação durante um período de tempo conhecido como vida útil de projeto¹.

A má qualidade do concreto, problemas de execução, fissuras de qualquer origem, a elevada umidade e presença de íons cloreto livres no concreto, advindos de aditivos aceleradores à base de cloretos ou da contaminação atmosférica, são entre outros as causas principais da perda de proteção. Em meios agressivos, a despassivação por carbonatação, ou por presença de cloretos, mesmo localizada, pode desencadear um processo de deterioração progressivo e sinérgico. Nestas condições, bastam oxigênio, umidade e diferenças de potenciais entre regiões da barra para que a corrosão aconteça.

A corrosão é um processo eletroquímico que se manifesta com perda de massa² e formação de produtos de corrosão. Nas armaduras, a corrosão compromete a integridade do concreto de revestimento, prejudica o conforto visual da edificação e ameaça a sua segurança estrutural. O avanço da corrosão nas armaduras provoca a redução da capacidade de carga à tração (redução da resistência à tração relativa ao diâmetro nominal) e da aderência concreto/armadura. Esta situação conduz à deterioração da capacidade resistente do componente estrutural. Por outro lado, os produtos de corrosão formados, em geral, não encontram espaços suficientes dentro dos poros do concreto, provocando com sua ação expansiva a fissuração do revestimento. Em ambientes muito

¹ Também conhecido como período de iniciação. Normalmente corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura.

² Nos casos da corrosão intergranular e da corrosão sob tensão a perda de massa é verificável apenas pela observação ao microscópio.

úmidos, parte dos produtos de corrosão conseguem migrar até a superfície do concreto, provocando o aparecimento das manchas de “ferrugem”.

A corrosão das armaduras constitui um dos problemas patológicos que em maior medida afeta a durabilidade das obras civis e é o problema econômico de maior importância na construção (HELENE, 1993). Incrementos na durabilidade de obras situadas em ambientes agressivos são possíveis através da melhora na qualidade dos projetos, dos materiais, da execução e da manutenção ao longo da vida de serviço.

A proteção contra corrosão de armaduras no concreto tem sido abordada de duas maneiras (ver Figura 1). A primeira, a proteção através de medidas básicas, baseadas na melhoria da qualidade, do ponto de vista físico-químico do concreto de cobrimento. A segunda, mais recente, entre as quais são adotados: os métodos eletroquímicos de proteção, a proteção superficial por película e, mais recentemente, o emprego de “armaduras inoxidáveis” (também conhecidas como “armaduras resistentes à corrosão”).

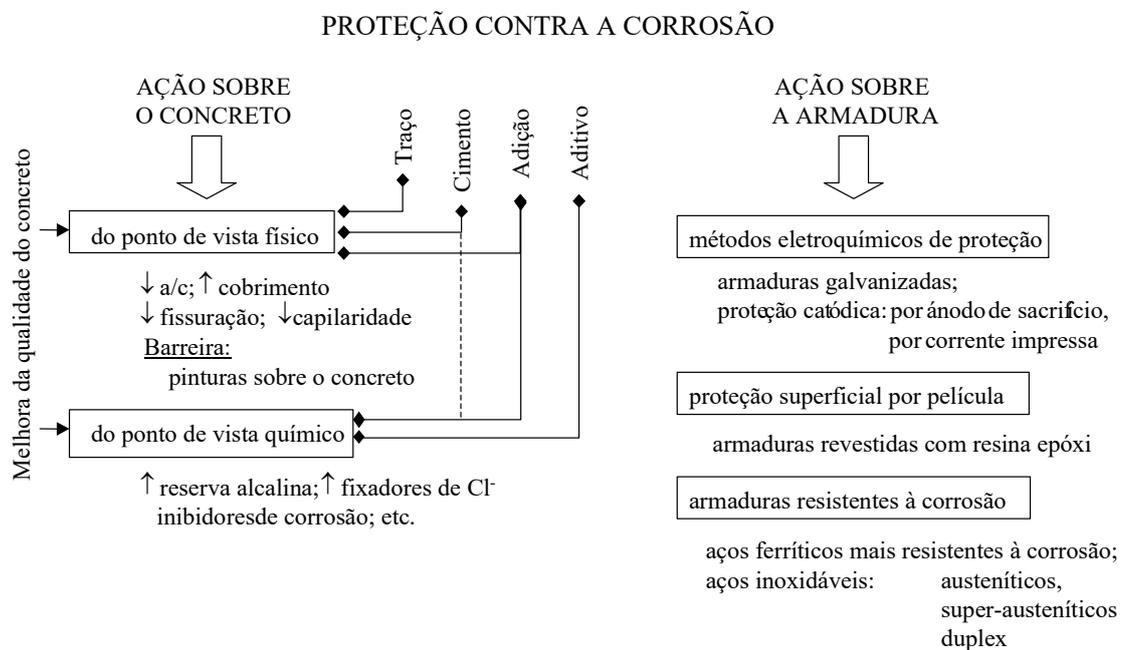


Figura 1. Medidas de proteção contra a corrosão das armaduras no concreto.

O emprego de armaduras de aço inoxidável aparece como solução alternativa a métodos mais comuns que ainda apresentam determinadas limitações, associadas principalmente a sua eficiência: a galvanização³, os revestimentos com resina epóxi, o emprego de inibidores de corrosão no concreto e a proteção catódica. As armaduras inoxidáveis ganham cada vez maior aceitação em situações de extrema agressividade ambiental (principalmente de contaminação por cloreto, umidade e temperatura elevadas). Nestas condições o emprego de armaduras galvanizadas ou revestidas com epóxi tem se mostrado insuficiente, a adição ao concreto de inibidores de corrosão não garante uma proteção duradoura (BERKE, 1991), e os custos de aplicação da proteção catódica ainda são muito elevados (ABBOTT, 1997).

As armaduras inoxidáveis são entre 4 e 13 vezes mais caras que as armaduras de aço carbono⁴. Esta situação afeta diretamente os custos iniciais das obras, o que em determinados investimentos constitui uma seríssima limitação. Dependendo das características da obra e do grau de substituição das armaduras, os custos totais iniciais podem mostrar um incremento que oscila entre 0,5% e 16% (McDONALD et al., 1995; Inoxidable, 1997). Respeito aos custos totais, somados os custos diretos e indiretos de exploração ao longo da vida útil, as estruturas armadas com aço inoxidável apresentam enormes vantagens. Os custos totais de estruturas que empregam este “método de proteção” são muitas vezes menores aos custos totais das estruturas de concreto armado tradicionais, tanto menores quanto menor a taxa de inflação econômica do país. É por esta razão que nos últimos dez anos vêm se observando um notável incremento das aplicações das armaduras inoxidáveis principalmente em estruturas marinhas e obras de arte em países da Europa e América do Norte. Isto acompanhado de um número apreciável de novas pesquisas e de indústrias produtoras deste material, que segundo previsões de COCHRANE (1993) atinge 0,2% do mercado de armaduras em países desenvolvidos.

³ Galvanização é o nome popular dada à zincagem por imersão a quente.

⁴ Para as armaduras de aço inoxidável 316 a bibliografia fala em custos entre 5 e 7 vezes maiores que os das armaduras convencionais de aço carbono.

Na Tabela 1 apresentam-se as estruturas onde são empregadas com maior frequência as armaduras inoxidáveis. Na Tabela 2 são colocados alguns exemplos de obras onde foram aplicadas estas armaduras.

Tabela 1 Aplicações típicas das armaduras inoxidáveis.

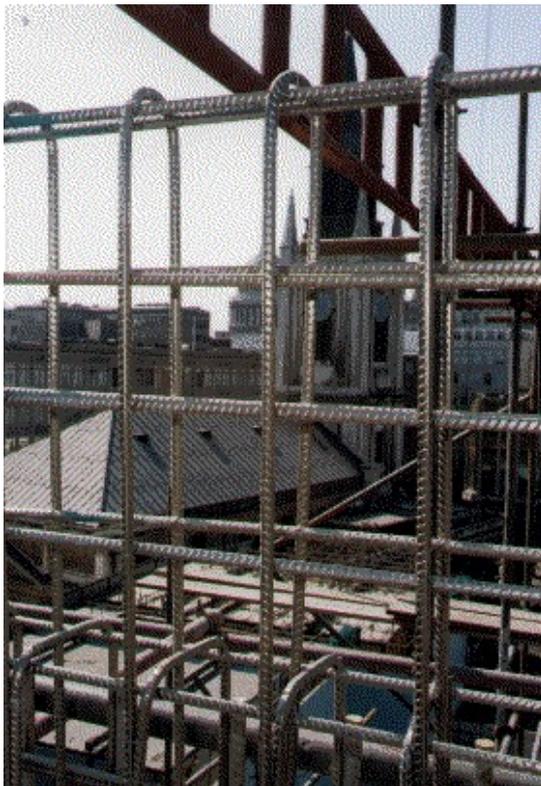
Tipo de aplicação	
Pontes onde são necessários uso de saís de descongelamento.	Estruturas de difícil acesso para aplicação de proteção superficial adicional, no tempo.
Estruturas em obras industriais de alta contaminação.	Obras de arte em geral com exigências de vida útil maior que 120 anos.
Componentes estruturais e arquitetônicos muito delgados (de cobrimentos mínimos).	Reforço externo ou armaduras de ancoragem de estruturas existentes.
Obras marinhas.	Armaduras de conexão em juntas de concretagem.
Telas eletro-soldadas para concreto projetado.	

Tabela 2. Casos de aplicação de armaduras inoxidáveis.

Construção	Aço (ABNT)	Obra	País
1925	--	Barras lisas ($\phi = 25$ mm) de reforço da catedral "Saint Paul", Londres (NiDI, 1996)	Reino Unido
1940	--	Reforço em juntas entre peças premoldadas de concreto. Cais de Progresso, Yucatán (ARMINOX, 1999).	México
1967	--	Estruturas de prédios altos (McDONALD, et al., 1995) <i>Considerada a primeira aplicação do aço inoxidável em armaduras para concreto</i>	Noruega
1983	304	Rodovia I-295, Hamilton Township, New Jersey (www.stainless-rebar.org , 1998)	EUA
1985	304	Ponte na rodovia I-696, Detroit, Michigan (McDONALD, et al., 1995)	EUA
1985	304	Ponte na "Rodovia I-295" Trenton, New Jersey (NiDI, 1997)	EUA
Aprox. 1985	316	Reforço do lado frente ao mar do "Scarborough" (SMITH, 1998)	Reino Unido
1989	316	Reconstrução da ponte "Alpine" de 1570, Bassano del Grappa, Vicenza (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
--	--	Edifício "Credito Industriale Sardo Bank", Cagliari (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
--	--	Edifício "Procaccini Center", Milão (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
1990	316	Reparo em exteriores da "Opera de Sydney" (SMITH, 1998)	Austrália
1993	304	Reconstrução do Sistema Rodoviário M4 (NiDI, 1997)	Reino Unido
1993	304	Ponte "Shaffausen" sobre o rio Rin (CEDINOX, 1997)	Suíça
1994	304	Restauração da igreja "São Martin", Mota Del Marques, Segovia (CÁMARA e LATORRE, 1995)	Espanha
Provavelmente em 1995	316	Restauração do "Duomo de Milão", Milão (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
	316	Restauração da torre "Bargello", Florencia (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
	316	Restaurações do "Teatro da Escala de Milão", Milão (www.stainless-rebar.org : 1998)	Itália
	304	Túneis das rodovias A7, A10, A12 (www.stainless-rebar.org , 1998)	Itália
1995	316	Túnel em Cradlewell, Newcastle (NiDI, 1997)	Reino Unido

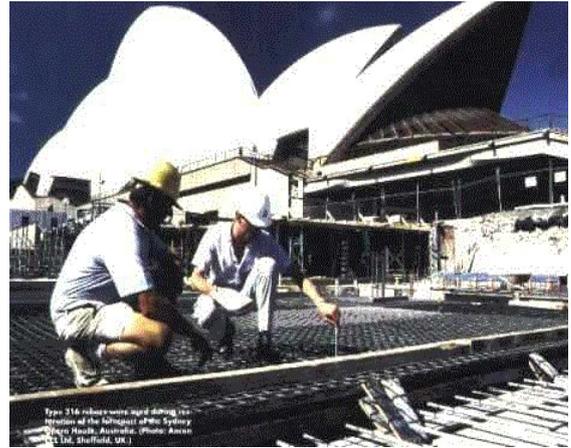
Continuação Tabela 2.

Construção	Aço (ABNT)	Obra	País
1996	316L	Ponte rodoviário 407, Toronto, Ontario (SMITH, 1998; McGURN, 1996)	Canadá
1996	304	Ampliação do “Guildhall Yard East”, Londres (ABBOTT, 1996)	Reino Unido
1997	316L	Ponte “Mullet”, Ontario (NiDI, 1997)	Canadá
1998	316L	Ponte rodoviário “Brush”, Oregon (NiDI, 1997; SMITH, 1998)	EUA
1998	--	Restauração do “John Nash's Cambridge Park Terrace - Regent's Park”, London (www.stainless-rebar.org , 1999)	Reino Unido
1998	--	Restauração da “British Library”, London (www.stainless-rebar.org , 1999)	Reino Unido
1998	--	Restauração do museu “Ilfracombe Pavilion”, North Devon (www.stainless-rebar.org , 1999)	Reino Unido
1998	--	Recuperação do viaduto “Knucklas”, North Wales (www.stainless-rebar.org , 1999)	Reino Unido
1998	--	Facilidades portuárias (www.stainless-rebar.org , 1999)	E.A.U. e Qatar
1998	duplex	Laje de estacionamento “Garden State Parkway”, New Jersey. (www.stainless-rebar.org , 1999)	EUA
1998	316L	Ponte Smith River, Oregon (SMITH, 1998)	EUA
Planejada para 1999	316L	Ponte “Church” na “Rodovia 401”, Ajax, Toronto, Ontario (NiDI, 1998)	Canadá

A) Ampliação do “Guildhall Yard East”, Londres, Reino Unido (Foto da www.stainless-rebar.org)B) Túnel em Cradlewell, Newcastle, Reino Unido (Foto da www.stainless-rebar.org)



C) Ponte “Church”, Ontario, Canadá (Foto da www.stainless-rebar.org)



D) Reparo em exteriores da “Opera de Sydney”, Austrália (Foto da www.stainless-rebar.org)

Figura 2. A-D. Fotografias de algumas obras onde foram utilizadas armaduras de aço inoxidável.

2. Pesquisas na área

Os primeiros trabalhos de avaliação de armaduras de aço inoxidável datam da década de 80. No Congresso da Sociedade Inglesa do Concreto de 1982 aparecem as duas primeiras publicações sobre o tema, apresentando experiências práticas de aplicação (NÜRNBERGER et al., 1996). Em 1986 a norma inglesa BS 6744:1986 inclui os aços inoxidáveis dos tipos ABNT 304 e 306⁵ para armaduras destinadas ao concreto armado, precedendo em dez anos a norma norte americana ASTM A955-96.

A revisão bibliográfica de publicações internacionais especializadas, das áreas de engenharia civil, materiais e corrosão, levantou 20 pesquisas sobre este tema, envolvendo uns 40 especialistas de dez países. Destacam-se pela quantidade e qualidade dos trabalhos: Canadá, EUA, Itália e Reino Unido. Nenhuma pesquisa de países da América Latina foi noticiada.

Em 1985 ZOOB et al. publicaram um estudo de 4 anos com barras de aço inoxidável ABNT 304. Não observaram corrosão das armaduras em concreto contaminado com até 2,1% de cloreto em relação à massa de cimento (Cl_{cc}).

⁵ Sempre que exista equivalência será indicada a classificação ABNT, quando não, coloca-se a norma de origem.

Em 1987 JENKINS apresenta um estudo de monitoramento de armaduras protendidas dos pilares de um cais, armados uns com barras de aço carbono e outros com barras de aço inoxidável. As medidas de i_{corr} nas armaduras de aço carbono e a observação visual sobre os pilares armados em aço inoxidável, mostraram um melhor comportamento das armaduras inoxidáveis.

Em 1989 TREADAWAY et al. publicam uma extensa pesquisa com ensaios de longa duração realizados sobre armaduras de aços ferríticos, e os austeníticos ABNT 304 e ABNT 316, em concretos contaminados com até 3,2% de cloreto (Cl_{cc}). Após 10 e 20 anos de exposição natural os aços austeníticos mostraram o melhor estado de conservação. O aço ABNT 316 não apresentou ataque. Foi observado muito pouco ataque no aço ABNT 304. Os aços ferríticos apresentaram bom desempenho em teores de cloreto menores que 0,96%.

Em 1992 é publicada por RASHEEDUZZAFAR et al. uma pesquisa de 7 anos que estudou armaduras de aço austenítico ABNT 304 comparando-as com similares de aço carbono, de aço galvanizado e de aço revestido com epóxi. O teor limite de cloreto (Cl_{cc}) detectado para o aço revestido com epóxi ficou entre 0,6% e 1,2%, enquanto que o aço inoxidável tipo ABNT 304 não apresentou corrosão nem em teores da ordem de 4,8%.

O aço duplex (ASTM S31803) foi estudado por PASTORE e PEDEFERRI em 1991, que não encontraram diferenças significativas de comportamento em relação aos aços austeníticos tipo ABNT 304 e ABNT 316.

O emprego de aços inoxidáveis ferríticos, não é hoje mais recomendado, por se entender que não possuem uma relação custo/benefício adequada (WALKER et al., 1998). Contudo, por serem mais baratos, continuaram sendo incluídos em muitas pesquisas até há poucos anos: Callaghan apud NÜRNBERGER (1996) com um estudo de 4½ anos de duração; outro estudo do próprio CALLAGHAN (1993) com duração de 2 anos envolvendo outros aços além do ferrítico; NÜRNBERGER et al. (1993) pesquisaram os ferríticos, austeníticos e o aço duplex (ASTM S31803), determinando que o melhor

comportamento corresponde ao aço duplex, seguido dos aços austeníticos. A pesquisa de BUTZMANN (1994) recomendou empregar o aço ferrítico somente para quando não há risco de contaminação por cloreto.

Em 1995 McDONALD et al., e em 1996 NÜRNBERGER et al. apresentaram os dois trabalhos de revisão bibliográfica que maior contribuição têm dado para o estabelecimento do estado da arte no tema. Logo após, em 1998 estava sendo preparado o “Guia para emprego de armaduras de aços inoxidáveis” (WALKER et al., 1998), que foi consultado em sua primeira versão durante a elaboração desta tese⁶. Este documento resume a experiência acumulada em pesquisas e aplicações práticas anteriores. Recomenda apenas a utilização dos aços austeníticos ABNT 304 e ABNT 316L, o super austenítico (BS ES 1.4529) e o duplex (BS ES 1.4462)⁷, especificando este último somente para estrutura não expostas a altas temperaturas.

De maneira geral, em todas as pesquisas consultadas as armaduras inoxidáveis demonstraram um desempenho aceitável quando submetidos a condições excepcionais de agressividade. Ainda nas situações mais críticas analisadas: aço soldado, concreto carbonatado e contaminado com cloreto, os aços inoxidáveis tiveram um comportamento muitas vezes superior ao aço carbono, ao aço galvanizado e ao aço revestido com epóxi.

As principais firmas fornecedoras de armaduras de aço inoxidável têm sido encontradas nos seguintes países:



Figura 3. Principais países produtores mundiais de armaduras de aço inoxidável.

⁶ Por cortesia do Prof. Pietro Pedeferrri do Politécnico de Milão, co-autor do documento.

⁷ Equivalente ao ASTM S31803.

As organizações ativamente envolvidas em pesquisas no tema das armaduras inoxidáveis e outras que são patrocinadoras de projetos de desenvolvimento, apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3. Principais instituições estrangeiras de **pesquisa** ou patrocinadoras envolvidas em projetos de desenvolvimento das armaduras inoxidáveis.

Instituição	País
Instituto de Pesquisas e Ensaios, Stuttgart	Alemanha
Ministério do Trabalho e da Agricultura	Bahrain
Conselho Nacional de Investigações (NRC) Departamento de Transporte de Oregon Instituto de Pesquisas na Construção (IRC) Instituto dos Materiais Industriais (IMI) <i>Queen's University</i> , Kingston, Ontario Ministério de Transporte de Ontario (MTO) Universidade de New Brunswick, Ontario	Canadá
<i>American Concrete Institute (ACI)</i> Colégio de Engenharia da Universidade Estatal de Iowa Departamento de Transporte de Michigan Departamento de Transporte de New Jersey <i>Federal Highway Administration (FHWA)</i> <i>Specialty Steel Industry of North America (SSINA)</i>	EUA
<i>European Federation of Corrosion (EFC)</i> <i>Nickel Development Institute (NiDI)</i>	INTERNACIONAIS
Instituto Politécnico da Universidade de Milão Universidade de Roma Universidade de Veneza	Itália
<i>Building Research Establishment</i> <i>Concrete Society</i> Universidade de Sheffield <i>University College of London</i>	Reino Unido
Conselho de Investigações Científicas e da Indústria (CSIR) <i>Southern African Stainless Steel Development Association (SASSDA)</i>	SOUTH AFRICA

3. Justificativa do estudo

A utilização de armaduras inoxidáveis, em obras de relativa importância econômica, é sem dúvida de grande interesse para a Engenharia Civil nacional, principalmente em estruturas localizadas em ambientes muito agressivos, onde outras medidas de proteção seriam insuficientes para satisfazer as exigências de projeto quanto à durabilidade.

O emprego de armaduras de aço inoxidáveis registra-se apenas em países de economia avançada na Europa e América do Norte. Não há registro de uso até hoje no Brasil, nem em países de América Latina⁸, e África. Isto, não só pela falta de conhecimentos técnicos, mas também por se tratar de um material caro, diferenciando-o de outros materiais de aplicação mais ampla.

Nos projetos onde foram empregadas armaduras inoxidáveis utilizou-se o critério econômico de avaliação do “Custo Total de Ciclo de Vida”⁹ (*CTCV*), indicador que leva em conta todos os custos ao longo da vida de serviço da estrutura, desde os iniciais, os de manutenção, até os custos indiretos induzidos por possíveis intervenções. Enquanto não for desenvolvida no meio técnico, a consciência de avaliar os investimentos pela ótica do *CTCV*, haverá dificuldades para a aplicação de novas tecnologias.

Após quase 20 anos de pesquisas com armaduras inoxidáveis, existem ainda algumas lacunas no conhecimento técnico, devido, principalmente, à dispersão das pesquisas quanto aos materiais utilizados (mais de 10 tipos de ligas) e os diferentes métodos experimentais empregados. Em igual período, as investigações com barras de aço carbono avançaram muito mais no que diz respeito à medição da corrosão e estimativa de vida útil.

⁸ Os casos do cais de Progreso (México) em 1940 como o da catedral de “Saint Paul” em Londres (Reino Unido) em 1925 não significam a introdução de uma nova tecnologia, e sim apenas, a eleição correta do material, casos pioneiros em sua época.

⁹ Na bibliografia consultada emprega-se o termo em inglês: “*Life Cycle Cost*”

A partir de 1995 observa-se uma preocupação crescente por parte das instituições de pesquisa e dos produtores, na organização de eventos e na divulgação dos resultados das mais recentes investigações e aplicações (destaque especial merece neste aspecto o trabalho desenvolvido pelo NiDI¹⁰). Está sendo feita a revisão da norma BS 6744:1986, e em breve estará circulando o manual de utilização e projeto que está sendo preparado pelo comitê europeu sobre o assunto (WALKER et al., 1998). Estes dois fatos permitirão também, a melhor orientação de futuras pesquisas tecnológicas.

A realização de uma pesquisa nacional neste tema permitirá: a divulgação da experiência internacional acumulada; contribuir para o conhecimento nacional do tema; fornecer as recomendações técnicas necessárias para uma possível incorporação à prática construtiva nacional e, finalmente; discutir sobre aspectos tecnológicos, elevando por um lado o nível do conhecimento e estimulando por outro a continuidade das investigações na área.

3.1. Originalidade

No âmbito nacional a pesquisa com armaduras inoxidáveis é original porque: trabalha um material novo, que não existe ainda no mercado brasileiro, que não foi utilizado ainda na prática, que não foi estudado antes nem está sendo estudado no momento por nenhuma outra instituição de pesquisa do país; trabalha com uma metodologia de avaliação sistêmica da durabilidade das armaduras, baseada nos critérios mais modernos de desempenho.

No âmbito internacional a pesquisa é original porque aborda aspectos não estudados em pesquisas anteriores: entre as variáveis independentes inclui a condição de barras tracionadas; estudam-se as manifestações físico-mecânicas da corrosão nas barras inoxidáveis; propõem-se parâmetros que definem o comportamento das armaduras inoxidáveis em concretos contaminados com cloreto, tais como: teor de cloreto estimado que promove a despassivação, densidades de corrente de corrosão estimadas

¹⁰ NiDI. *Nickel Development Institute*. Organização Internacional não lucrativa que publica a revista Nickel em vários idiomas. Tem sede própria no Brasil.

para diferentes graus de contaminação, potenciais de passivação e de pite; propõe-se uma metodologia de cálculo de vida útil para estruturas armadas com barras de aço inoxidável.

4. Objetivo

Tem-se por objetivo, a avaliação do desempenho quanto à resistência à corrosão da armadura nervurada de aço inoxidável ABNT 316L de 10 mm de diâmetro, através do estudo comparativo com armadura similar de aço carbono CA50. Avaliam-se os requisitos relacionados com a segurança estrutural e a durabilidade em condições de intensa umidade e contaminação por cloreto.

5. Conteúdo

No capítulo I apresentam-se as particularidades das armaduras inoxidáveis quanto a sua composição e resistência à corrosão, assim como são colocados alguns exemplos de aplicação. No capítulo II é apresentada a parte experimental da pesquisa. Partindo da análise dos conceitos de desempenho é proposta uma metodologia de avaliação para armaduras metálicas. A determinação das variáveis e dos métodos de ensaio considerou a experiência acumulada em pesquisas anteriores. É exposto em detalhes o programa experimental da pesquisa dividida em quatro partes.

Os capítulos III e IV de resultados e análise dos resultados, respectivamente, apresentam as informações de maneira simplificadas, com o objetivo de não carregar o texto principal. Informações mais detalhadas dos ensaios, assim como desenvolvimentos teóricos e cálculos utilizados na análise podem ser encontrados nos Anexos, devidamente indicados ao longo dos capítulos III e IV.

Nas conclusões, propõem-se um grupo de questões novas e outras a serem aprofundadas em pesquisas futuras, descreve-se a estratégia para a transferência dos resultados ao meio técnico e, finalmente, responde-se ao objetivo principal da pesquisa e expõem-se todos os aspectos considerados relevantes entre os resultados analisados, a título de conclusão.

Capítulo 1. ARMADURAS INOXIDÁVEIS

A extração do ferro e a fabricação do aço sofreram um enorme e contínuo desenvolvimento ao longo dos anos. Mas um grande problema permaneceu sem solução, os objetos de aço não eram suficientemente resistentes à corrosão, o que restringia o seu uso. A maquinaria desenvolvida durante a Revolução Industrial do século 19, os edifícios altos e obras de arte erguidas, os artefatos militares eram construídos basicamente de aço. Problemas como a dureza, o acabamento superficial e a resistência mecânica estariam resolvidos pelo menos satisfatoriamente. As primeiras explicações e soluções aos problemas da corrosão, no entanto, não apareceram até o início do século 20. O descobrimento dos aços inoxidáveis, ocorrido na década de 1910, significou um dos maiores eventos no desenvolvimento histórico dos materiais em geral.

Na Tabela 4, resumem-se as datas que marcaram etapas importantes no desenvolvimento deste material (PADILHA e GUEDES, 1994). Na Tabela 1, do item 1 da Introdução, foram apresentadas as datas relacionadas às primeiras aplicações das armaduras de aço inoxidável.

Tabela 4 Alguns eventos importantes no desenvolvimento da indústria dos aços inoxidáveis (PADILHA e GUEDES, 1994; ABCEM, 1996; CASCUDO et al., 1996).

Data	Local	Evento
1908	Alemanha	Começa a produção de ligas contendo Cr e Cr-Ni
1910		Estabiliza-se a produção da liga contendo de 13% a 14% de Cr e 35% de Ni.
Finais de 1912		Aparece a primeira patente de produção de aço austenítico (Fried Krupp), contendo 0,25% de C, 20% de Cr e 7% de Ni.
1914		Firma Krupp - primeira a comercializar mundialmente aços inoxidáveis.
1911	EUA	Fabrica-se um aço com baixo teor de C (de 0,007 a 0,015%) contendo de 14% a 16% de Cr.
1912	Inglaterra	Produz-se um aço com 0,24% de C e 12,8% de Cr.
1934	Produção mundial	56 000 toneladas de aço austenítico.
1953		Mais de 1 milhão de toneladas de aço inoxidável.
1950 - 1980		A produção de aços inoxidáveis aumentou cerca de 20 vezes (2/3 correspondia ao aço inoxidável austenítico).
1994	Brasil	Mais de 1,5 milhões de toneladas produzidas de aço inoxidável (6% da produção total de aço)

1.1. Composição dos aços inoxidáveis utilizados para armaduras

Os aços ditos “inoxidáveis” são na realidade passíveis de oxidação em determinadas circunstâncias. Contudo, a expressão “aços inoxidáveis” é mantida por tradição porque são aços que se caracterizam por uma resistência à corrosão maior que a do aço carbono, o que justifica essa terminologia. Os aços inoxidáveis caracterizam-se por um teor mínimo de cromo da ordem de 10% a 12%¹¹.

Costumam-se agrupar os aços inoxidáveis, segundo sua estrutura metalográfica. A estrutura metalográfica dos aços inoxidáveis é determinada basicamente por sua composição química, sobretudo pelos teores de C, Cr, Ni, Mn, Mo, etc., bem como pelos tratamentos térmicos realizados. Estes fatores determinam a formação das fases (ferrítica¹², austenítica¹³ e martensítica¹⁴). Os aços inoxidáveis são classificados então em função da fase predominante:

Aços inoxidáveis *ferríticos*,
Aços inoxidáveis *martensíticos*,
Aços inoxidáveis *austeníticos*,
Aços inoxidáveis de estrutura dupla (*duplex*).

Apesar de registrar-se na literatura o emprego de armaduras inoxidáveis ferríticas, hoje a atenção é dada exclusivamente para barras de aços inoxidáveis austeníticos e duplex (microestrutura austenítica e ferrítica) (WALKER et al., 1998).

Os aços inoxidáveis austeníticos têm Cr e Ni como elementos principais de liga, no caso dos aços inoxidáveis duplex, os teores de Cr são altos e os de Ni, baixos. Na Tabela 5 apresentam-se as composições químicas recomendadas pelo Comitê europeu “*Concrete Society Steering Committee*” que, através da revisão da norma britânica BS 6744:1986, prepara a norma européia para este produto.

¹¹ Segundo PANOSSIAN (1993) em geral aços inoxidáveis devem ter um teor mínimo de 10% Cr, sendo que 12% é o teor mínimo que garante uma camada passivante estável. Já a BS EN 10088- 1:1995 define para os aços inoxidáveis um teor mínimo de 10,5% de Cr e máximo 1,2% de C.

¹² Ferrita é a solução sólida de carbono (0,0218% de carbono) no ferro alfa (estrutura cúbica de corpo centrado) (PANOSSIAN, 1993).

¹³ Austenita é a solução sólida de carbono (0,77% de carbono) no ferro gama (estrutura cúbica de face centrada) (PANOSSIAN, 1993).

¹⁴ Martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro alfa (PANOSSIAN, 1993).

Tabela 5. Composição química recomendada para os aços inoxidáveis europeus empregados em armaduras (WALKER et al., 1998).

Designação			Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex								
BS EN 10088-1 :1995	BS 6744: 1986	ABNT*	C% máx.	Si% máx.	Mn% máx.	S% máx.	Cr% min./máx.	Ni% min./máx.	Mo% min./máx.	P% min/máx	N% min./máx.
1.4301	304S31	304	0,07	1,0	2,0	0,03	17,0/19,5	8,0/10,5	-	0,045	0,11 máx.
1.4436	316S33	-	0,05	1,0	2,0	0,03	16,5/18,5	10,5/13,0	2,5/3,0	0,045	0,11 máx.
1.4429	high proof	316L	0,03	1,0	2,0	0,015	16,5/18,5	11,0/14,0	2,5/3,0	0,045	0,12/0,22
1.4462	duplex	-	0,03	1,0	2,0	0,015	21,0/23,0	4,5/6,5	2,5/3,5	0,035	0,10/0,22
1.4529	super austenitic	-	0,02	0,5	1,0	0,01	19,0/21,0	24,0/26,0	6,0/7,0	0,030	0,15/0,25

* Correspondência aproximada à europeia analisando a Tabela 6.

A norma brasileira NBR-5601/1981 estabelece a composição para os aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304, 304L, 316 e 316L apresentada na Tabela 6:

Tabela 6. Composição química recomendada pela NBR-5601/1981.

Tipo de aço ABNT	Composição química, % máxima							
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	P
304	0,08	1,0	2,0	0,03	18,0/20,0	8,0/10,5	--	0,045
304L	0,03	1,0	2,0	0,03	18,0/20,0	8,0/12,0	--	0,045
316	0,08	1,0	2,0	0,03	16,0/18,0	10,0/14,0	2,0/3,0	0,045
316L	0,03	1,0	2,0	0,03	16,0/18,0	10,0/14,0	2,0/3,0	0,045

O aço ABNT 316L tem o seu similar europeu no aço 1.4429, comparados na Tabela 7.

Tabela 7 Comparação entre o ABNT 316L e o aço europeu 1.4429 quanto à composição química.

Aço	C% máx.	Si% máx.	Mn% máx.	S% máx.	Cr% min./máx.	Ni% min./máx.	Mo% min./máx.	P% máx.	N% min./máx.
(BS EN 10088-1) 1.4429	0,03	1,0	2,0	0,015	16,5/18,5	11,0/14,0	2,5/3,0	0,045	0,12/0,22
(ABNT) 316L	0,03	1,0	2,0	0,03	16,0/18,0	10,0/14,0	2,0/3,0	0,045	-

Tabela 8 Comparação entre a composição do aço ABNT 316L e do aço inoxidável empregado nesta pesquisa.

Aço	[%]	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	P	N	Cu
316L Da pesquisa		0,0224	0,33	1,86	0,0255	16,16	10,12	2,14	0,033	0,089	0,33
316L pela Tabela 7		< 0,03	< 1,0	< 2,0	< 0,03	16,0 ÷ 18,0	10,0 ÷ 14,0	2,0 ÷ 3,0	< 0,045	--	--

1.1.1. Principais Elementos de Liga

A seguir, apresenta-se resumidamente a influência dos principais elementos de liga nas propriedades do aço inoxidável austenítico (DAVINSON et al., 1987).

Carbono

O aço é, antes de tudo, uma solução sólida de Fe e C. Nos aços inoxidáveis o teor de C influencia nas propriedades em diferentes sentidos. A partir de um certo teor, o C torna temperáveis¹⁵ determinados aços inoxidáveis porque favorece a formação de austenita. Quanto às características de resistência à corrosão, o C tem uma influência desfavorável nos aços austeníticos: aços com teores mais elevados são mais propensos a sofrerem corrosão intergranular¹⁶ pela precipitação de carbonetos de cromo nos contornos dos grãos. Nos aços ferríticos, o C também forma carbonetos de cromo, porém não estão necessariamente relacionados com sensitização¹⁷ (PANOSSIAN, 1993).

Cromo

É o elemento de liga principal dos aços inoxidáveis, pois, adicionado em teores mínimos de 10%, ele é o responsável pela formação da película de passivação¹⁸ que protege o aço contra a corrosão. O Cr é um elemento cuja adição restringe o campo de formação da austenita, por isso se faz necessária a adição de outros elementos que sejam “formadores de austenita”¹⁹ (ARAUJO, 1997). Do ponto de vista mecânico, entre 10% e 29% de Cr observa-se uma melhoria das propriedades mecânicas do aço, pois como o Ni, constitui um “reforçador de matriz”. O limite de Cr que se dissolve no ferro γ ²⁰ é de 13%, teores maiores estão dissolvidos na fase ferrítica (ferro α) ou formando carboneto de cromo que, precipitados nos contornos de grão, favorecem a corrosão intergranular (ARAUJO, 1997). Teores de C abaixo de 0,03% evitam a formação de carbonetos de cromo. Também para este fim podem ser empregados determinados teores de Ti.

¹⁵ Temperabilidade de um aço refere-se à capacidade de formar martensita ao ser resfriado a partir de uma determinada temperatura e assim, atingir dureza elevada e, também, uma maior tenacidade. Na prática, é expressa pela profundidade de têmpera atingida num ensaio padronizado (ARAUJO, 1997).

¹⁶ Ver item 1.2.2.1. Corrosão intergranular.

¹⁷ Sensitização: precipitação de carboneto de cromo no contorno dos grãos, que em aços inoxidáveis austeníticos diminui a resistência à corrosão.

¹⁸ Ver item 1.2.2 Passivação e Repassivação.

¹⁹ Entre os denominados elementos “formadores de austenita” estão: Mn, Ni, Co, Cu, C e N.

Entre os denominados “formadores de ferrita” encontram-se: Cr, Si, Mo, Ti, Al, etc.

²⁰ Forma alotrópica do Fe na fase austenítica

Níquel

A principal razão de incluir o Ni na liga (um dos elementos que mais acentuadamente encarece o produto final) é que ele favorece a formação de austenita²¹, facilitando com isto o processo siderúrgico. Por isso é um elemento muito característico dos aços inoxidáveis. De maneira geral ajuda a elevar a resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico. Dissolve, em qualquer proporção, no ferro γ (ARAUJO, 1997). No ABNT 316L, as proporções de Ni são entre 10% e 14%. Do ponto de vista mecânico constitui um “reforçador de matriz”, melhorando as propriedades mecânicas do aço (ARAUJO, 1997).

Manganês

O Mn possui pequena influência direta na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos (PADILHA e GUEDES, 1994), podendo ter algum efeito positivo no aumento da resistência à corrosão por pite (PANOSSIAN, 1993). No entanto, pequenas quantidades deste elemento, associadas à presença de Ni melhoram substancialmente as funções atribuídas ao Ni quanto à formação de austenita. Quanto as propriedades mecânicas o Mn aumenta a resistência à tração e melhora a soldabilidade²².

Molibdênio

Combinado com o Cr, este elemento tem grande ação na estabilidade do filme de passivação na presença de cloretos. Sua ação é especialmente importante no aumento da resistência à corrosão por pite e em frestas (PANOSSIAN, 1993), principalmente quando adicionado em teores entre 2% e 4%²³.

Titânio e Nióbio

O Ti e o Nb são adicionados, principalmente, aos aços inoxidáveis austeníticos para reduzir a corrosão intergranular, porque, tendo mais afinidade pelo C do que o Cr, formam carbonetos de titânio e de nióbio preferencialmente ao carboneto de cromo. A função principal destes elementos é a de diminuir a disponibilidade de C dificultando a

²¹ Segundo ARAÚJO (1997), aços contendo mais de 30% de Ni mesmo com resfriamento lento, são austeníticos a temperatura ambiente.

²² Ver item 1.3.7. Soldabilidade e seu efeito na resistência à corrosão.

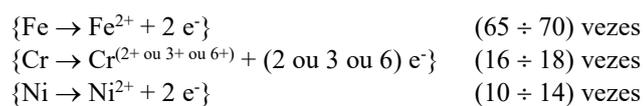
²³ Aços Inoxidáveis. Edição da VILLARES SA., sd

sensitização. A adição de Ti tende a aumentar a suscetibilidade à corrosão por pite (PANOSSIAN, 1993).

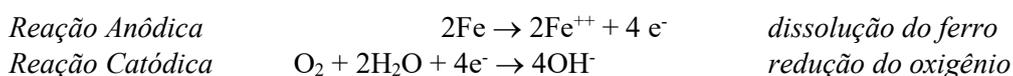
1.2. Particularidades da corrosão em armaduras inoxidáveis

A seguir apresentam-se as particularidades da corrosão para as barras de aço inoxidável. Informações mais detalhadas sobre a natureza e os mecanismos da corrosão em metais, poderão ser encontradas em publicações específicas do assunto, recomendando-se o manual de PANOSSIAN (1993). Para maiores detalhes sobre a corrosão de barras de aço carbono no concreto recomenda-se HELENE (1986 e 1993).

As particularidades da corrosão de armaduras inoxidáveis residem nas condições em que se produz a *passivação* e a *repassivação*, assim como na forma em que se manifesta a corrosão (*tipos de corrosão*). Pela importância que na composição dos aços austeníticos têm, o Fe com 65% a 70%, o Cr com 16% a 18% e o Ni com 10% a 14%, é de se esperar que eles mesmos sejam os elementos de maior participação nas reações eletroquímicas. Durante a passivação a película de óxido de Cr formada sobre a superfície do aço é a controladora do processo, isolando o aço do meio, e impedindo a participação dos outros elementos. Quebrada a película pela perda local da passivação, novamente todos os elementos entram em reação com o meio. Fe, Cr e Ni participam das reações, segundo as equações:



Uma vez iniciado o processo de corrosão no aço inoxidável, a preponderância nas reações eletroquímicas é do Fe, em maior proporção e com densidades de corrente de corrosão mais elevadas que o Cr e o Ni. Nestas condições a participação dos outros dois metais não é significativa e o sistema pode ser simplificado às mesmas reações que ocorrem durante a corrosão do aço carbono, isto em presença de água, oxigênio e uma quantidade determinada de íons cloreto (PANOSSIAN, 1993):



A corrosão dos aços inoxidáveis apresenta-se de diversas formas. Delas, a manifestação mais freqüente é a corrosão localizada em forma de pites. Em armaduras inoxidáveis têm-se estudado até hoje somente a corrosão por pites, tanto no caso de armaduras de concretos estruturais como em barras de conexão de juntas de concretagem (FLINT e COX, 1988; NÜRNBERGER et al., 1996). Recentemente PEDEFERRI (1998) apresentou os resultados de uma investigação que, pela primeira vez, avalia a corrosão galvânica pelo contato com barras de aço carbono.

Aparentemente a corrosão intergranular e a corrosão sob tensão²⁴ não tem grande interesse prático para as armaduras inoxidáveis. Contudo, a indústria deve fornecer um material resistente a estes tipos de ataques, verificável em ensaios prévios como requisito inicial de utilização do produto.

1.2.1. Passivação

Os mecanismos de formação e a natureza da passivação ainda não são bem conhecidos (TANAKA et al., 1991). Uma das teorias mais bem aceita é a teoria de camada protetora formada por óxidos hidratados de cromo. Esta camada, conhecida como película de passivação, forma-se em presença de oxidantes, normalmente o oxigênio. É aderente e impermeável, conferindo com isto a ação protetora contra a corrosão do metal. Se a ruptura local desta camada ocorrer por qualquer razão, por exemplo, ação mecânica, em presença de oxigênio e, na ausência de espécies agressivas como o íon cloreto, o restabelecimento da mesma se produz rapidamente (repassivação). Quando a camada de passivação é destruída localmente e as condições do meio não permitem a repassivação, as densidades de corrente de corrosão podem elevar-se a valores inclusive, maiores do que as do aço carbono (PANOSSIAN, 1993).

PEDEFERRI et al., 1991 confirmaram o estado de passivação de vários aços austeníticos e o duplex (ASTM S31803) em potenciais muito próximos uns do outro, a +400 mV (eletrodo de referência de Ti ativado).

²⁴ Opinião manifestada pelo pesquisador italiano Pietro Pedeferrri, pronunciada no LATINCORR'98 onde apresentou seu trabalho "Behavior of Stainless Steel in the Rehabilitation of Corrosion Damaged Infrastructures and Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel"

1.2.2. Tipos de Corrosão

A corrosão dos aços inoxidáveis apresenta-se de diversas formas. Delas, as manifestações mais freqüentes são: a corrosão por pite, por frestas, galvânica, intergranular e sob tensão. Em barras de aço inoxidável têm-se observado até hoje unicamente a corrosão por pite (NÜRNBERGER et al., 1996), não somente em barras no concreto, mas também em juntas de concretagem (FLINT e COX, 1988) onde caberia a possibilidade de se manifestar a corrosão em frestas.

Teoricamente também podem acontecer casos de corrosão intergranular, corrosão sob tensão, e corrosão em frestas.

Corrosão intergranular

Este tipo de corrosão manifesta-se nos contornos dos grãos. A principal causa da corrosão intergranular é a sensitização²⁵ provocada pelo empobrecimento do teor de cromo numa faixa adjacente ao contorno do grão onde se produz a precipitação de carbonetos de cromo, questão esta relacionada com a história metalúrgica e a composição química do metal. Às vezes, este tipo de corrosão pode estar associada à corrosão sob tensão (PANOSSIAN, 1993).

Para conseguir aços com elevada resistência à corrosão intergranular a indústria deve evitar a precipitação dos carbonetos de cromo nas regiões intergranulares e, caso necessário proceder à solubilização²⁶ através de tratamentos térmicos adequados (TANAKA et al., 1991).

Corrosão sob tensão

Ação simultânea do meio agressivo (presença de cloretos) e tensões de tração, gerando rupturas sobre a superfície do metal. A constatação de um aumento da velocidade de corrosão normal em barras tracionadas não necessariamente significa um processo de

²⁵ Formação de microcélulas de corrosão nas vizinhanças dos contornos de grão. Uma faixa estreita ao longo dos contornos de grão é corroída preferencialmente.

corrosão sob tensão. A constatação de um processo de corrosão sob tensão exige a detecção de falhas ao microscópio e comprovação de ruptura frágil sem estricção da barra corroída.

A probabilidade de aparição de tal fenômeno seria a resultante de uma combinação de concreto carbonatado, atacado por elevados teores de cloretos e elevadas temperaturas, condições que não são nada freqüentes na prática. Esse tipo de corrosão aparece com freqüência em cilos e marquises de concreto armado com aço carbono, mas segundo o critério dos especialistas do Comitê europeu designado para o tema das armaduras inoxidáveis, a corrosão sob tensão não deve representar uma preocupação na utilização destas armaduras (WALKER et al., 1998).

Corrosão em frestas

Rompimento localizado da camada de passivação com presença do íon cloreto em locais de difícil acesso do oxigênio. A corrosão desenvolve-se através de um mecanismo parecido à corrosão por pite, localizado e intenso, por aeração diferencial. É o caso típico de corrosão de armaduras revestidas com epóxi (SAGUES, 1990)

As frestas são, em utilizações comuns de aços inoxidáveis, resultados da união de dois metais ou da presença de depósitos. A existência de frestas na interface concreto/armadura se deve às heterogeneidades do próprio concreto. Nestas frestas, baixa o pH e mesmo com pouco acesso de oxigênio as densidades de corrente de corrosão são elevadas. Nos pontos de contato entre barras (contato da barra principal com o estribo, ou de duas barras principais na região de traspasse) e nas regiões de solda existem possibilidades de se criarem condições para a aparição de frestas. Apesar da probabilidade teórica da aparição de frestas no concreto e em juntas de concretagem e fissuras até agora não têm sido descrito nenhum caso que justifique preocupação com este tipo de corrosão (GONZALEZ et al., 1990).

²⁶ Solubilização: aquecimento do aço a temperatura adequada, manter esta temperatura o tempo suficiente para que os carbeto precipitados no contorno dos grãos entrem em solução sólida e depois, resfriar rapidamente para manter estes em solução (ARAUJO, 1997).

Em 1988 FLINT e COX concluíram uma pesquisa de 12½ anos objetivando o estudo da resistência à corrosão em frestas de barras de aço inoxidável do tipo ASTM 316 (ABNT 316). A análise química do material da interface concreto/armadura determinou em média 2,1% de cloretos em relação ao cimento, que penetrou desde o exterior através dos 18 mm de cobrimento de concreto. A densidade de corrente de corrosão medida no aço inoxidável foi desprezível, no aço carbono atingiu o valor de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, concluindo-se que o aço ASTM 316 apresenta baixa susceptibilidade à corrosão em frestas na interface concreto/barra/água de mar e que, a resistência à corrosão do ASTM 316 com parte embebida no concreto é maior que quando este aço é colocado isoladamente no mesmo meio.

Corrosão por pite

Rompimento localizado da camada de passivação, sendo o íon cloreto presente nos poros do concreto, o principal responsável por este fenômeno. Produz-se um ataque localizado que forma cavidades de geometria preferentemente hemisférica²⁷.

Os íons hidroxila são benéficos e dependendo de sua concentração podem até diminuir a ocorrência da corrosão por pite (PANOSSIAN, 1993). Enquanto o íon férrico, proveniente da própria corrosão já em desenvolvimento, constitui um agente agressivo que contribui para a formação e desenvolvimento do pite.

A velocidade crescente de formação e desenvolvimento dos pites é um fenômeno de natureza autocatalítica, por duas razões principais: 1^o - a célula de corrosão formada é constituída por pequenos ânodos (pites) e cátodo de grande área (área adjacente), de modo que os pites atuam nessa célula, como espontâneos ânodos de sacrifício (PANOSSIAN, 1993); 2^o - dentro do pite, o eletrólito possui uma concentração de íons diferente à concentração fora dele: cresce a concentração do íon férrico, produto da corrosão (de caráter agressivo), aumenta a do íon cloreto (de caráter muito agressivo),

²⁷ Os pites observados ao microscópio, nas barras submetidas a corrosão acelerada em solução saturada de NaCl, ficam preenchidos com produtos de corrosão, mas após a limpeza química e remoção dos produtos, apresentam forma definida do tipo hemisférica: vistos por cima apresentam um olho perfeitamente circular, em seção aparentemente meia circunferência. Aprecia-se uma profundidade igual ou da mesma ordem do diâmetro.

cai o pH, e dificulta-se o acesso de oxigênio (elemento passivante). De modo que a composição do eletrólito dentro do pite torna-se um meio muito mais agressivo (conhecido como anólito). Segundo PANOSSIAN (1993) a corrosão por pite é de difícil controle e detecção, comparada com a corrosão de tipo generalizada característica do aço carbono.

BERTOLINI et al. (1996) estudando vários aços inoxidáveis em solução variaram o pH, o teor de cloreto e a temperatura (20⁰C e 40⁰C). Todos os aços austeníticos mostraram-se bons e similares entre si, e em temperatura de 40⁰C seu comportamento foi melhor que o duplex. O aço super austenítico comportou-se melhor aos outros, por isso se recomenda para condições extremas: de inusuais elevados teores de cloretos, concreto carbonatado e elevadas temperaturas.

Resistência à corrosão por pites

A resistência à corrosão por pites vai depender da composição do aço, ela aumenta com: o aumento do teor de Mo; o aumento do teor de Cr; o aumento do teor de Ni e o aumento do teor de N (WALKER et al., 1998).

Parece aceitável como critério comparativo para a corrosão localizada, a expressão empírica (1) (NÜRNBERGER et al., 1996; McDONALD et al., 1995), embora, a simplicidade desta expressão desconsidera outros elementos de liga da composição, que possuem notável influência na resistência à corrosão, como já foi descrito. Por exemplo a Tabela 9, que apresenta o valor calculado de *SE* para vários aços, mostra que *SE* é igual para o aço BS EN 1.4436²⁸ e para o BS EN 1.4429 (≈ ABNT 316L), sendo que se recomenda preferencialmente o segundo para ambiente mais agressivos por mostrar uma maior resistência à corrosão por pites. A expressão (1) não estaria considerando que no aço (BS EN 1.4429) há uma redução proposital nos teores de C e de S e um aumento do Ni.

$$SE = \%Cr + 3,3 \%Mo \quad (1)$$

Onde: *SE* = Soma Efetiva

²⁸ BS EN 10088-1

%Cr = teor de cromo
 %Mo = teor de molibdênio

Tabela 9 Índice *SE* para diferentes tipos de aços inoxidáveis (extraído de NÜRNBERGER et al., 1996 e WALKER et al., 1998).

tipo de aço	ABNT	BS 6744:1986	ASTM	BS EN 10088-1:95	<i>SE</i>
Austenítico	304	≈ 304S31	304	1.4301	18
Austenítico	-	-	-	1.4541	18
Austenítico	316	-	316	1.4401	24
Austenítico	-	-	316Ti	1.4571	24
Austenítico	-	316S33	-	1.4436	26
Austenítico High proof	≈ 316L	Não	-	1.4429	26
Duplex	-	Não	S31 803	1.4462	38
Super austenítico	-	Não	-	1.4529	45

Resistência ao ataque de íons cloreto

A penetração de íons cloreto no concreto ou argamassa não provoca as mudanças no pH da solução dos poros do concreto como acontece com a carbonatação (WALKER et al., 1998). A despassivação do aço então acontece somente quando um teor determinado (suficiente para provocar a despassivação) tenha atingido a barra no interior do concreto, em presença de água.

Existem vários trabalhos publicados objetivando determinar o teor chamado de “crítico” de cloreto que pode despassivar as barras de aços inoxidáveis austeníticos dentro do concreto. Entre eles destaca-se o trabalho de SORENSEN et al. (1990) que utilizam ensaios potencioestáticos. Aplicam um mesmo potencial (0 mV_{SCE}) aos diferentes tipos de aço estudados, incluído o aço carbono (método questionável). A pesquisa conclui indicando valores limites do teor de cloreto da ordem dos valores determinados nos trabalhos de FLINT e COX (1988) com exposição natural durante 12½ anos, o de COX e OLDFIELD (1996), e o de COCHRANE (1993) de 22 anos de exposição - entre 2,0% e 3,2% em relação à massa de cimento para barras de aço inoxidável austenítico, enquanto que no caso de barras soldadas estes valores caem para 0,7% a 2,0%.

O grupo do Politécnico de Milão em ensaios em solução realizou as seguintes observações (WALKER et al., 1998): a diminuição da alcalinidade afeta a resistência ao cloreto; em pH acima de 13,9 o teor limite de cloretos é 10% tanto a 20⁰C como a 40⁰C;

em pH próximos a 7,5 a tolerância ao cloreto cai, especialmente em aços inoxidáveis com baixo teor de Cr; com o incremento da temperatura a 40°C ocorre uma redução da resistência à corrosão observada em todos os aços (incluindo o duplex), menos no super austenítico BS EN 1.4529.

NÜRBERGER et al. (1993) realizaram ensaios de campo e de laboratório em barras soldadas e não-soldadas, chegando para o aço duplex à conclusão que este resiste pelo menos 2,5% de cloreto em relação à massa de cimento sem apresentar sintomas de corrosão²⁹.

1.2.3. Resistência à corrosão em argamassa e concreto carbonatado

Como consequência da carbonatação do concreto ou argamassa tem-se um decréscimo do pH que pode ficar em torno de 8,5 e 9. Com isto o aço carbono, em presença de água (suficiente umidade) e oxigênio, pode corroer. O aço inoxidável mesmo em ambientes levemente ácidos mantém a camada de passivação estável. Em presença de íons cloreto, o decréscimo do pH constitui uma agravante na perda da resistência à corrosão (NÜRBERGER et al., 1993; BERTOLINI et al., 1996; WALKER et al., 1998). A carbonatação também provoca certas variações do potencial de pite (NÜRBERGER et al., 1993).

Tabela 10. Resultados das medições de i_{corr} em [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]. Smith et al. (1992) apud McDONALD et al. (1995). Ensaio em solução.

Tipo de aço	pH = 7	pH = 13,3
Aço carbono	45,000	3,517
Ti	0,003	0,026
ASTM 304	0,021	0,028
ASTM 304N	0,048	
ASTM 316	0,043	0,054
ASTM 317L	0,019	
Nitronic 33	0,055	0,020
XM - 19	0,016	

Apesar da existência de um critério quase generalizado de que a carbonatação diminui a resistência à corrosão, não é um fenômeno tão notável no aço inoxidável quanto no aço

²⁹ Este foi o máximo teor de cloreto utilizado no trabalho.

carbono. Em ocasiões leituras isoladas da densidade de corrente de corrosão não conseguem detectar estas alterações (ver Tabela 10).

1.2.4. Corrosão galvânica e resistência à corrosão galvânica

Por razões do elevado custo das barras inoxidáveis, não seria aconselhável empregá-las como único material da armadura do componente estrutural. Nos pilares da ponte “Shaffausen” na Suíça³⁰ (projetada para uma vida útil de 120 anos) foram utilizados diferentes tipos de aço para as armaduras, colocando-se barras mais nobres nas regiões sujeitas ao ataque mais severo. Com isto, conseguiu-se homogeneizar a durabilidade do componente e reduzir os custos totais iniciais que resultaram apenas 0,5% maiores do que os da variante em aço carbono. Em componentes estruturais como estes, provavelmente armaduras de diferentes aços fazem contato elétrico, o que teoricamente conduziria ao risco de corrosão galvânica. Enquanto ambos metais encontrarem-se passivos, as diferenças entre seus potenciais será mínima. Qualquer alteração desta situação conduz à polarização de ambos, situação que só atinge equilíbrio com o desenvolvimento do processo eletroquímico que conduz à corrosão do ânodo.



Separador plástico isolante entre barras de aço inoxidável e de aço carbono, armaduras de um mesmo componente estrutural. Pode se observar as barras de aço carbono prematuramente corroídas, possivelmente pela contaminação atmosférica sofrida antes da concretagem. (Foto da www.stainless-rebar.org).

Figura 4. Utilização combinada de armaduras inoxidáveis e de aço carbono no mesmo componente estrutural.

Foram desenvolvidas pesquisas por especialistas de EUA, Dinamarca e Itália que demonstram que, em geral, o contato do aço carbono com o aço inoxidável não conduz a incrementos significativos da densidade de corrente de corrosão do aço carbono, comparado à condição quando o aço inoxidável não está presente (WALKER et al., 1998). Segundo PEDEFERRI (1998) quando ambos aços estão passivos o par galvânico não produz um efeito apreciável, isto porque os potenciais livres são relativamente próximos. Ambos aços permanecerão passivos depois da conexão, até que existam condições de corrosão, tipo: contaminação por cloreto e diferentes condições de aeração

(por exemplo, quando a região do aço inoxidável fica saturada de água com pouco acesso de oxigênio e a do aço carbono continua areada).

Nas pesquisas de SORENSEN et al. (1990) e PEDEFERRI et al. (1998) demonstra-se que o aço inoxidável é pior cátodo que o aço carbono passivo, o que o torna mais adequado para ser empregado nos reparos localizados das estruturas de concreto onde, geralmente, o aço carbono novo, colocado para substituir o corroído, cria problemas nas regiões vizinhas, que após o reparo passam a se comportarem como ânodo. Deste modo se explica que em reparos, o aço inoxidável minimiza este problema.

As pesquisas em corrosão galvânica das armaduras inoxidáveis estão sendo de muita importância, isto porque existe uma tendência marcante em utilizar este tipo de armadura combinada convenientemente com armaduras de aço carbono tanto em peças novas como em reparos localizados da peças deterioradas (COCHRANE, 1993).

1.2.5. Soldabilidade e seu efeito na resistência à corrosão

A soldabilidade dos aços inoxidáveis vai depender de sua composição química, por exemplo, é melhorada com a diminuição do teor de C e aumento do Ni (WALKER et al., 1998). Basicamente, os aços inoxidáveis podem ser soldados por qualquer processo de solda. É necessário, contudo, fazer algumas restrições e observar certas cautelas. Os eletrodos devem ser da mesma composição química do material de base. Entretanto, usam-se freqüentemente eletrodos com composições enriquecidas dos elementos de liga, para compensar eventuais perdas nas proporções destes elementos durante o processo³¹.

O assunto mais discutido em relação à solda é o efeito na resistência à corrosão. Em geral, comenta-se que há uma diminuição da resistência à corrosão e que os valores de potencial de pite (E_p) são menores em barras inoxidáveis soldadas (NÜRNBERGER et al., 1993). Segundo SORENSEN et al. (1990) as barras inoxidáveis soldadas têm uma

³⁰ Estudio del Ciclo de Vida en el Puente de Shaffausen; *Inoxidable*, 2, 1997, pp 7-9.

³¹ Aços Inoxidáveis. Edição da VILLARES SA., sd

tolerância aos cloretos de 1/3 a 2/3 da quantidade tolerada pelas barras não soldadas, entre 0,7% e 2,0% em relação à massa de cimento.

É importante a limpeza cuidadosa com remoção dos produtos da solda. A contaminação com graxas e óleos na área da solda pioram a redução da resistência à corrosão, por isso é importante também a limpeza antes da solda. A remoção dos produtos da solda não deverá ser feita com escova de aço carbono, pois partículas de aço podem ficar grudadas à superfície do aço inoxidável contaminando-o (WALKER et al., 1998). Recomendam-se outros métodos de limpeza tais como jateamento com areia e limpeza química com ácidos (solução 50% de ácido nítrico ASTM G1-88:1989). É pouco provável que se tenham todos esses cuidados em obra. Recomenda-se reduzir a um mínimo os pontos de solda da armadura.

1.2.6. Expansibilidade dos produtos de corrosão

Estudos sobre caracterização dos produtos de corrosão das armaduras inoxidáveis assim como a ação expansiva deles, não tem sido reportados na literatura consultada. No próprio âmbito desta pesquisa foi realizado um estudo preliminar de fissuração e expansibilidade das armaduras de aço inoxidável 316L de 10 mm de diâmetro (TICIANELLI e TULA, 1998). O estudo foi comparativo com barras de aço carbono de igual diâmetro.

A expansibilidade foi estudada, monitorando a variação de diâmetro de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa armada, contaminada com diferentes teores de cloreto ($Cl_{cc} = 0\%; 0,4\%; 1\%; 5\%$). Deste estudo não foi possível tirar conclusões de interesse à pesquisa.

Já para o estudo da fissuração utilizou-se um método empregado em outras pesquisas (ALONSO et al., 1994; CASCUDO et al., 1996), monitoramento de fissuras na superfície de corpos-de-prova de concreto, armados com barras que são submetidas a corrente impressa (no caso foi empregado $100 \mu A/cm^2$). Durante os ensaios apresentaram-se algumas dificuldades descritas no Relatório de TICIANELLI e TULA (1998). Entre elas a mais importante foi, haver utilizado em boa parte dos ensaios, um

nível de água de imersão parcial muito próximo às armaduras dos corpos-de-prova, causa de um excesso de umidade interna do concreto, que facilitou a saída dos produtos de corrosão

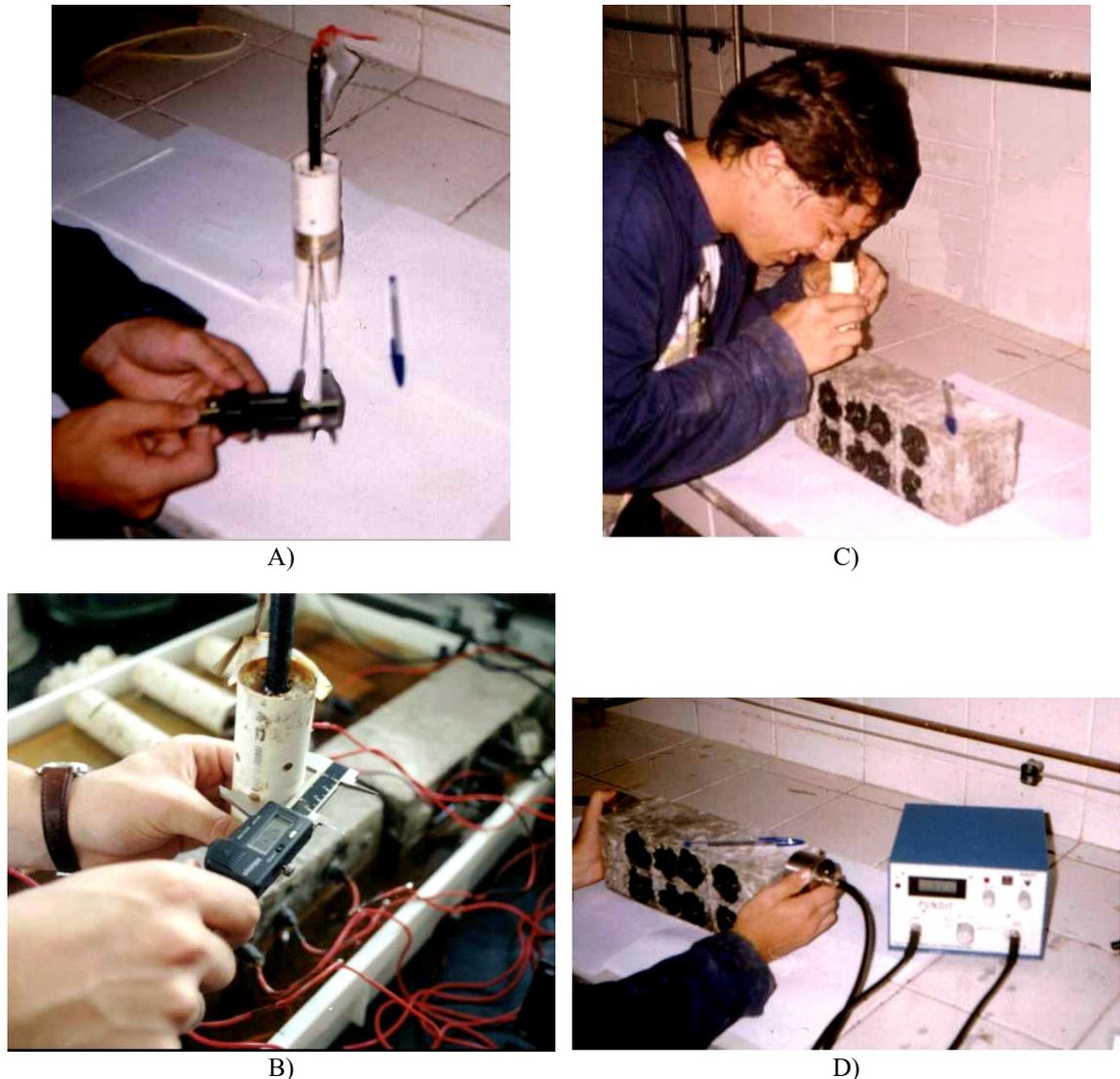


Figura 5. Medições de expansibilidade e fissuração (TICIANELLI e TULA, 1998). A) Medida indireta de variação de diâmetro com agulha de Le Chatelier especialmente construída para o corpo-de-prova de 40 mm de diâmetro (ensaio de expansibilidade). B) Medida direta de variação de diâmetro (ensaio de expansibilidade). C) Estudo de fissuras com fissurômetro. D) Estudo indireto de evolução de fissuras com ultrassom.

na superfície do concreto (cobrimento de 1 cm). Porém, as observações principais realizadas e comentadas a seguir, são de muita utilidade, e podem servir em caráter preliminar, na estimativa de vida útil de estruturas com aço inoxidável:

- Para igual quantidade de carga eletroquímica transferida a fissuração do revestimento acontece primeiro nas barras de aço inoxidável, possivelmente pelo fato de estarem os produtos de corrosão muito localizados somente na região do pite, o que dificulta a sua alocação nos poros do concreto. No aço carbono a área anódica apresenta uma maior extensão por isso os produtos de corrosão formados encontram espaço com maior facilidade nos poros do concreto da interface.
- Produzida a fissuração sobre ambas armaduras, a abertura de fissura sobre o aço inoxidável é maior. As fissuras sobre o aço carbono apresentam maior extensão.
- A fissuração foi atingida nas armaduras de aço inoxidável aproximadamente com uma quantidade de carga eletroquímica transferida (c_{corr}^{lim}) de $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$, quanto que nas armaduras de aço carbono de $0,38 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$.

A fissuração vai depender:

- a) Dos tipos de produtos de corrosão formados (não estudados neste trabalho);
- b) Da mobilidade dos produtos de corrosão pelos poros do concreto, que por sua vez é dependente do grau de umidade³² (GU), da microestrutura e das propriedades mecânicas do concreto (resistência à tração e módulo de deformação);
- c) Da espessura de revestimento;
- d) Da taxa de armaduras. Pela contribuição da corrosão em armaduras vizinhas na redução do efeito de confinamento do concreto, e no aumento da probabilidade da ruptura do revestimento.

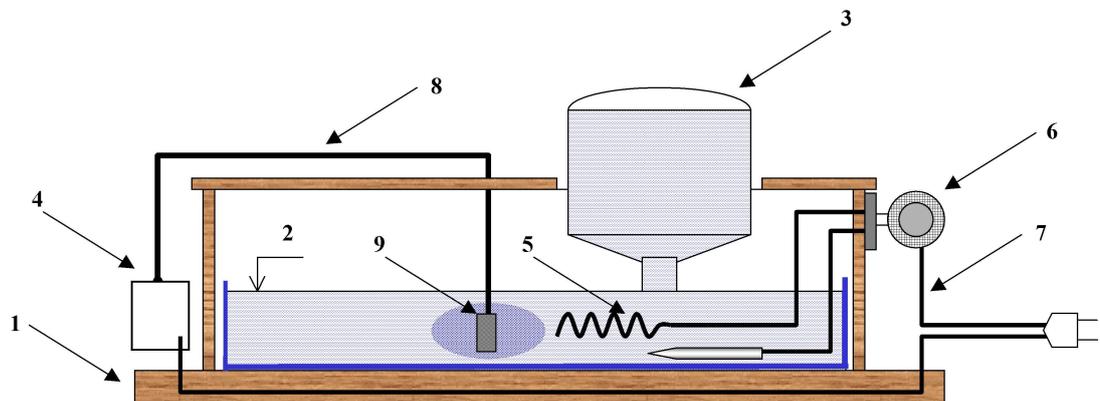
Outra observação importante que pode explicar a expansibilidade maior dos produtos de corrosão do aço inoxidável foi realizada por LAMARCA e TULA (1998) num outro estudo, também realizado durante a pesquisa desta tese. Barras de aço carbono e de aço

³² Aos efeitos desta pesquisa o grau de umidade (GU) do concreto é a relação entre o teor de água (em massa) do concreto e o teor de água (em massa) do concreto em estado saturado.

inoxidável foram submetidas a corrosão acelerada em solução de cloreto a 45⁰C (ver Figura 6 e Figura 7).



Figura 6. Estudo de barras em solução saturada de NaCl a 45⁰C, as barras de aço inoxidável colocadas na região não aerada (LAMARCA e TULA, 1998).



- | | | |
|--|---------------------------|---------------------|
| 1 - Corpo da Câmara | 4 - Compressor de ar | 7 - Fios elétricos |
| 2 - Nível da solução saturada de NaCl na bandeja | 5 - Aquecedores elétricos | 8 - Mangueira de ar |
| 3 - Reservatório de solução | 6 - Termostato | 9 - Burbulhador |

Figura 7. Câmara de corrosão acelerada de barras em solução (LAMARCA e TULA, 1998).

Levadas ao microscópio periodicamente constatou-se que nesta solução os produtos de corrosão do aço carbono eram perfeitamente solúveis, quanto que os do aço inoxidável permanecem cobrindo os pites sem se dissolver. Isto explicaria a tendência à “saturação” dos pites do aço inoxidável pelos próprios produtos de corrosão formados.

1.3. Custo

Em muitas obras, pode-se garantir uma elevada durabilidade com mínimos incrementos dos custos iniciais, substituindo total ou parcialmente as armaduras convencionais por armaduras inoxidáveis, apenas nos elementos considerados de críticos do ponto de vista da corrosão. Contudo, qualquer incremento nos custos iniciais de construção, por mínimo que seja, constitui a principal barreira para a utilização de armaduras inoxidáveis em novos projetos e trabalhos de recuperação. Mas se considerar o custo total de ciclo de vida (*CTCV*) a perspectiva deste novo material muda totalmente.

No cálculo dos *CTCV* são desenvolvidas técnicas para a identificação e quantificação de todos os custos possíveis de se incorrer durante a vida de serviço da obra, considerando inclusive, o fato de que os gastos são realizados em diferentes períodos, e se precisa de fatores de conversão financeiros, que estabeleçam um padrão de comparação, permitindo uma avaliação real das variantes de projeto. Garantem uma boa estimativa o conhecimento da economia nacional e das previsões de desenvolvimento, especificamente de aquele vinculado à valorização da obra, além de uma correta estimativa dos custos de manutenção e de possíveis intervenções com o propósito de prolongar a vida útil da estrutura.

Os custos das armaduras inoxidáveis oscilam atualmente entre 4 e 13 vezes³³ o das armaduras convencionais de aço carbono (ver Tabela 11), dependendo do tipo de aço. Os custos de transporte e manuseio são os mesmos para qualquer tipo de armadura.

A seguir apresentam-se alguns estudos de casos selecionados da bibliografia que ilustram a viabilidade de aplicação da variante de armaduras inoxidáveis.

³³ Segundo o Prof. P. Monteiro em palestra ministrada na EPUSP em agosto/99 o preço das armaduras de aço inoxidável nos EUA tinham caído durante o primeiro semestre de 1999 para entre 3 e 4 vezes o preço das armaduras convencionais.

Tabela 11 Relação dos custos de armaduras inoxidáveis em relação aos das de aço carbono (NÜRNBERGER et al., 1996; NiDI, 1997).

Tipo de aço	Designação			Custos			
	DIN	ASTM	Wnr	Reino Unido	Alemanha	Países escandinavos	média
Aço carbono				1	1	1	1
Ferrítico	X6Cr 17	430	1.4016	4,3	--	4,3	4,3
Ferrítico	X2CrNi 12	--	1.4003	--	7	4,9	6
Austenítico	X5CrNi 18-10	304	1.4301	5,5	--	5,5	5,5
Austenítico	X5CrNiMo 17-12-2	316	1.4401	7,7	11,7 - 12,8	8 - 11	9,8
Duplex	X2CrNiMoN 22-5-3	S31 803	1.4462	--	11,8 - 13	12	12,2

1.4. Casos de aplicação

Aparentemente a primeira utilização do aço inoxidável como reforço estrutural foi a recuperação em Londres da Catedral de Saint Paul, entre 1925 e 1930 (COCHRANE, 1993), pouco mais de uma década depois da início da comercialização deste material. Foram reforçados pilares, que até hoje, conservam-se sem sinais de corrosão. Contudo, essa obra não teve para o desenvolvimento das armaduras inoxidáveis uma relevância comparável à próxima aplicação citada na literatura: a construção, entre 1967 e 1968, em Noruega, de uma série de edifícios altos para o poder público (CEDINOX, 1997). Posteriormente, o campo de aplicação das armaduras inoxidáveis foi estendido a vários tipos de estruturas marinhas tais como cais, plataformas *offshore*, pontes e túneis, e outras estruturas que submetidas a ambientes agressivos, lhes são exigida elevada durabilidade. É o caso de obras de arte, reparos em prédios históricos, juntas de concretagem em importantes obras de engenharia, elementos de ancoragem em solos, e outros (CEDINOX, 1997). A seguir, apresentam-se alguns exemplos que ilustram como, em determinados casos de obras novas e reparos, resultou viável a utilização de armadura total ou parcial com barras inoxidáveis.

Caso 1: Ponte “Shaffausen” sobre o rio Rin na Suíça (CEDINOX, 1997)

Data: Executada entre 1993 e 1995

Vida útil de projeto: 80 anos

Variantes de armadura analisadas: Barras de aço carbono, barras de aço revestido com epóxi, e variante combinada de barras de aço inoxidável³⁴ e de aço carbono.



Figura 8. Fotografia da execução da ponte de “Shaffausen”, Suíça (CEDINOX, 1997).

Análise: Estimou-se que as variantes de aço carbono e aço revestido atingiriam um máximo de vida útil de serviço de 25 anos. Três reparações, a cada 25 anos, entre 30% e 50% da área construída devolveriam à obra às condições normais de funcionamento. Haveria interrupção do tráfego na ponte durante os 90 dias que duraria cada manutenção. As conseqüências pela corrosão seriam menores na variante de aço revestido com resina epóxi durante a primeira manutenção, nas manutenções posteriores os danos seriam semelhantes em ambas variantes.

Estimou-se que a terceira variante garantiria 80 anos de serviço sem necessidade de manutenção.

Custos: A partir dos dados obtidos, calculam-se os “*CTCV*” para cada variante (ver Tabela 12).

³⁴ Não se especifica o tipo de aço.

Note-se que apesar da variante do aço inoxidável apresentar um custo total inicial superior (0,5%), é esta a variante que resulta com menores custos totais de ciclo de vida (“*CTCV*”), representando uma economia de 42% com relação à variante de aço carbono.

Conclusão: Optou-se pela variante de reforço parcial com armaduras inoxidáveis na seguinte composição: 3t de 1.4462 (duplex), diâmetro 10 mm e 12 mm para as barras mais externas, na zona de respingo; 11t de 1.4301 (austenítico ABNT 304) de diâmetro 12 mm para as barras do fundo de viga do elementos longitudinais e para as barras mais externas dos pilares, acima da zona de respingo; completam a armadura - barras de aço carbono.

Tabela 12. Cálculo *CTCV* [Francos Suíços] das diferentes variantes propostas de armadura da ponte de Shaffausen.

Parâmetro	Variante 1	Variante 2	Variante 3
	Aço carbono	Aço revestido	Aço inoxidável
Vida útil da solução [anos]	25	25	80
Número de intervenções da obra para manutenção	3	3	0
Parada por manutenção em 80 anos [dias]	270	270	0
Custo da parada [SFr]	10.000	10.000	10.000
Custo atual estimado por manutenção [SFr]	603.353	305.995	0
Custo inicial da construção [SFr]	15.619.551	15.642.774	15.700.000
Custo total das paradas [SFr]	2.700.000	2.700.000	0
Custo da 1era manutenção [SFr]	1.263.287	640.686	0
Custo da 2da manutenção [SFr]	2.645.043	2.645.043	0
Custo da 3era manutenção [SFr]	5.538.132	5.538.132	0
Custo real da 1era manutenção em 80 anos [SFr]	1.070.867	543.099	0
Custo real da 2da manutenção em 80 anos [SFr]	2.417.060	2.417.060	0
Custo real da 3era manutenção em 80 anos [SFr]	5.455.557	5.455.557	0
Custo total da manutenção em 80 anos [SFr]	8.943.484	8.415.716	0
Custos totais em 80 anos [SFr]	27.263.035	26.758.490	15.700.000
Custo da variante relativo à Variante 1	1	0,98	0,58

Considera-se:

Inflação anual: mantida em 3%	A
Custo de capital: 8,5%	B
Interesses do investimento acima da inflação: 5,8%	C
Custo real do investimento: -0,3%	B-(A+C)
Mesmo custo para a 2da e 3era manutenção das Variantes 1 e 2	

SFr – Franco Suíço.

Caso 2: Projetos de três pontes similares da mesma rodovia³⁵ (McDONALD et al., 1995).

Variantes de armadura analisadas: Barras de aço carbono, barras de aço revestido, barras de aço inoxidável ASTM 316 e, barras de titânio.

Custos: Desta vez somente se citam os custos totais iniciais que apresentam-se na Tabela 13. Na Tabela 14 os mesmos custos em relação à variante com aço carbono.

Note-se que o incremento nos custos iniciais das variantes de aço inoxidável estão entre 6% e 16%, valores não muito altos considerando que a substituição proposta neste projeto foi total. Tratando-se de uma via de comunicação de elevada importância, a execução de uma recuperação será complicada e cara, principalmente em caso de reparos com interrupção do tráfego.

Conclusão: A decisão final dos projetistas foi a favor da variante de reforço com aço inoxidável.

Tabela 13. Apresentação dos custos totais iniciais das diferentes variantes. McDONALD et al. (1995).

Custo das barras (US\$)				
Projeto	Aço carbono	Aço revestido	Aço inoxidável	Ti
A	21.644	30.302	129.864	649.320
B	22.544	31.561	135.264	676.320
C	13.614	19.059	81.684	408.420
Custo inicial da estrutura (US\$)				
A	690.000	698.658	798.220	1.317.676
B	880.000	899.017	992.720	1.533.776
C	1.122.000	1.127.445	1.119.070	1.516.806

Tabela 14. Custos das variantes em relação ao custo da variante com aço carbono de cada projeto. McDONALD et al. (1995).

	Custos das armaduras	Custo total do projeto		
		Projeto A	Projeto B	Projeto C
Aço carbono	1,00	1,00	1,00	1,00
Aço revestido	1,40	1,01	1,02	1,00
Aço inoxidável	6,00	1,16	1,13	1,06
Ti	30,0	1,91	1,74	1,35

³⁵ A similitude destas obras litorâneas é tanto do ponto de vista da estrutura como da execução.

Caso 3: Recuperação de um viaduto de 25 anos de idade - Reino Unido (COCHRANE, 1993).

Manifestações patológicas: Deterioração severa da armadura dos pilares provocada pela ação dos sais de degelo. Os teores de cloreto detectados junto à armadura dos pilares foram: no topo do pilar 3,1% em relação à massa de cimento, na altura meia do pilar 1,8% e na base 2,4%. O tabuleiro não foi afetado pois estava corretamente impermeabilizado.

Vida de serviço esperada: 120 anos (descontados os anos em obra - 95 anos).

Variantes de armadura analisadas: Barras de aço carbono; barras de aço revestido; barras de aço inoxidável³⁶.

Análise: As variantes de armadura com barras de aço carbono ou de revestimento epóxi teriam uma expectativa de vida igual a 30 anos, o que gerariam outras duas intervenções durante a vida útil de projeto. O tempo de parada dos serviços (pelo menos interrupção parcial) da ponte em cada intervenção seria de 51 dias.

Custos: O custo inicial da recuperação totalizou £264 000³⁷. O custo inicial da variante com aço inoxidável incrementou o custo total inicial em 7,9% com relação à variante de aço carbono. O cálculo dos “CTCV” mostraram que a variante com aço carbono custaria £345029/pilar, quanto que com aço inoxidável £143837/pilar, isto é, aproximadamente 60% mais barata. No cálculo dos “CTCV” considerou-se o número e intensidade das intervenções estimadas para cada variante durante a vida útil de projeto; o tempo de duração das intervenções³⁸; a taxa de inflação considerada constante igual a 3%; o custo de capital igual a 8,75% e a taxa real de interesses da obra de 5,58%.

Conclusão: A decisão foi a favor da variante com barras de aço inoxidável.

³⁶ Não se especifica o tipo de aço.

³⁷ COCHRANE (1993) comenta do exemplo infortunado dos viadutos da rodovia *Midlands Link* no Reino Unido, construídos em 1972 com um custo total inicial de £28 milhões. Apresentaram os primeiros sintomas de deterioração após dois anos de construção. Em 1989 (17 anos depois) os gastos em manutenção somavam £45 milhões. Estima-se que mais £120 milhões seriam necessários para a manutenção durante os próximos 15 anos.

³⁸ Segundo COCHRANE (1993) os custos adicionais, induzidos principalmente pelos transtornos ocasionados na circulação veicular, oscilam na Inglaterra entre £20000/dia, para situações com paralisação parcial do tráfico, e £1000000/dia, com paralisação total.

Caso 4: Cais em Progreso, México (ARMINOX, 1999).

Data: Executada entre 1937 e 1941.

Caraterísticas: Cais de concreto de 2100 m. São 175 trechos de 12 m formados por peças premoldadas de concreto não armado em forma de semi-arco (ver Figura 9 A). Barras de aço inoxidável foram utilizadas para armar as juntas entre as peças premoldadas.

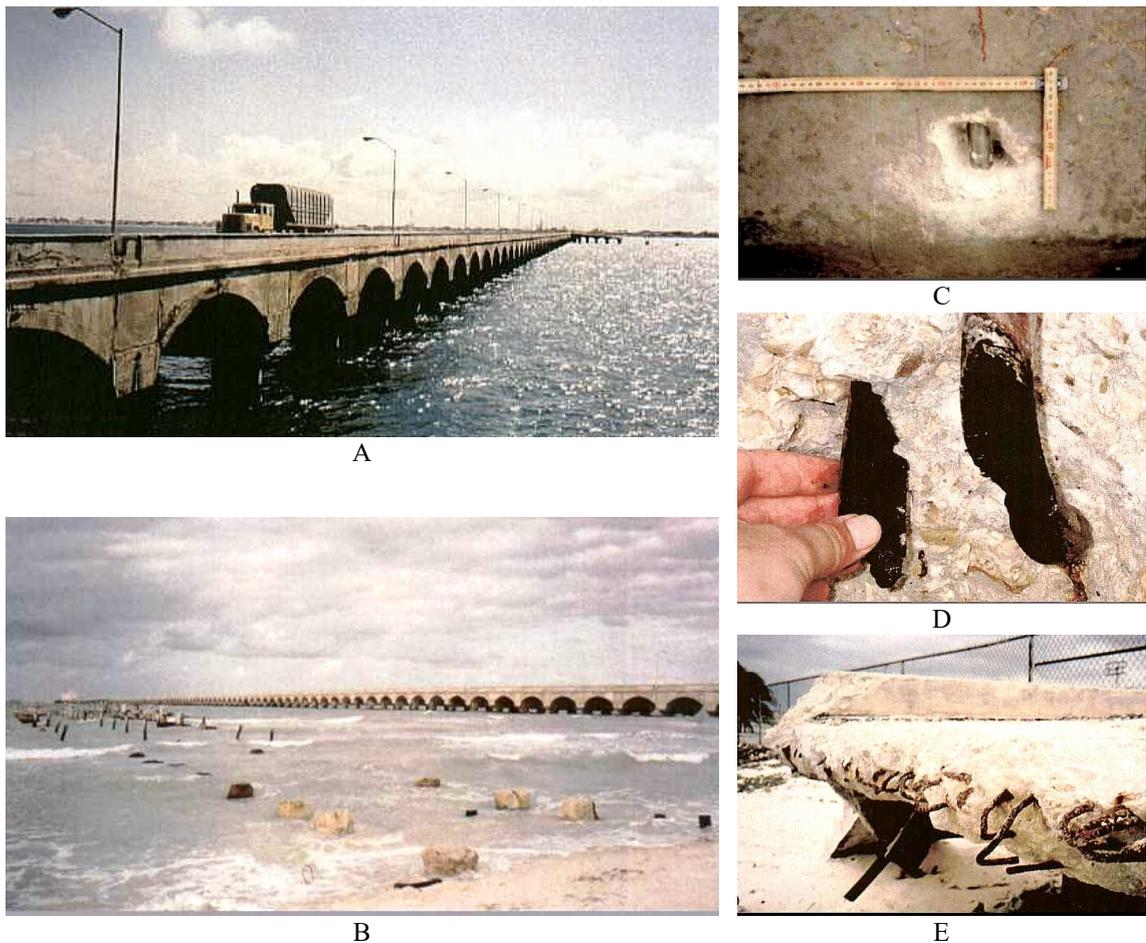


Figura 9. Cais em Progreso, Yucatán, México. A) Cais antigo construído entre 1937 e 1941. As juntas entre as peças premoldadas de concreto não armado, reforçadas com barras de aço inoxidável. B) Em primeiro plano o cais construído em 1970, demolido em 1987 após o colapso parcial. C) Barras de aço inoxidável sem corrosão, depois de 60 anos no concreto. D) Barra de aço inoxidável corroída severamente na dobra exposta durante 60 anos a corrosão atmosférica. E) Trecho do cais novo (de 1970) colapsado. Armaduras de aço carbono severamente corroídas. (Fotos de ARMINOX, 1999).

Manifestações patológicas: Algumas barras expostas de aço inoxidável apresentaram corrosão localizada (corrosão atmosférica).

Caso comparativo: Um cais de concreto armado situado a 200 m, paralelo ao cais em questão, foi construído aproximadamente em 1970. Dezesete anos depois ele já estava inutilizado e logo disso entrou em colapso (ver Figura 9 B).

Comentário: Os projetistas e construtores do segundo cais, possivelmente desconhecendo da utilização do aço inoxidável como única armadura do cais antigo, estariam inconscientemente realizando um teste comparativo em condições de exposição natural e produzindo uma prova contundente da eficácia da solução pioneira adotada 30 anos antes.

Capítulo 2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

2.1. Avaliação de desempenho de barras de aço para armadura

A procura de métodos de ensaio, de modelos acelerados e critérios de avaliação de desempenho de materiais e sistemas utilizados na indústria da construção civil, para prever o comportamento a longo prazo, tem crescido muito nos últimos anos. Dentro desse esforço, destacam-se os resultados positivos que vêm sendo obtidos nos últimos dez a quinze anos no campo da prevenção da corrosão das armaduras. Sendo este um dos problemas de maior incidência e maior gravidade, tanto do ponto de vista da segurança, quanto dos custos envolvidos e dos prejuízos às características estéticas das obras, torna-se cada vez mais importante a sua prevenção e avaliação, *a priori*, na fase de especificação e seleção dos materiais e sistemas.

O número de trabalhos que analisam a participação da variável “tipo de aço” na corrosão ainda é reduzido, notando-se a carência de uma metodologia de caráter geral que permita avaliar a qualidade das barras de aço para armaduras. Neste capítulo apresenta-se uma metodologia de avaliação de armaduras inoxidáveis elaborada a partir de requisitos de desempenho, com ênfase especial nos aspectos de durabilidade.

Os requisitos de desempenho das barras como material componente do concreto armado são definidos primeiramente pelas necessidades dos usuários da estrutura (ISSO DP6241 apud CIB, 1983). Estas necessidades expressam-se através dos requisitos de segurança estrutural, de conforto visual, de durabilidade e de economia. Na Tabela 15 resume-se os aspectos a serem considerados na avaliação do desempenho de barras de aço para armadura das estruturas de concreto armado (TULA, et al., 1996).

A rigor a avaliação da adequação das barras para armadura passa por ensaios mecânicos, físicos e químicos do aço. Em caráter especial pode-se necessitar de exames metalográficos, para conhecer melhor a microestrutura do material. O estudo de composição química dos aços é relevante na medida em que indica suas relações

ferro/carbono, além de identificar eventuais impurezas, e nas armaduras inoxidáveis o conteúdo dos elementos da liga que influenciam na resistência à corrosão, já comentado no item 1.1.1. Os estudos de composição química e metalográfico caracterizam cientificamente o material e explicam em grande parte o comportamento macroestrutural.

Entendendo as propriedades mecânicas como aquelas associadas à capacidade do material resistir a esforços mecânicos, tem-se normalizada a determinação das propriedades mecânicas à tração (NBR 6152:1987), que permite o controle de algumas propriedades de grande importância para os fios e barras de aço, tais como limite de escoamento, limites de resistência, alongamento, etc. Os requisitos mecânicos exigíveis para barras e fios de aço destinados ao concreto armado constam da especificação NBR 7480:1985.

A metodologia de avaliação proposta na Figura 10 espera poder contribuir para superar as dificuldades que hoje existem pela falta de métodos de ensaio consagrados para estudar de maneira sistêmica a corrosão do aço no concreto, baseando-se nas manifestações eletroquímicas e físico-mecânicas da corrosão. Através desta metodologia laboratorial poderá ser estimada a vida útil de componentes estruturais, aportando a informação necessária para a estimativa dos custos totais de variantes analisadas na fase de planejamento e projeto das obras.

2.1.1. Materiais e métodos empregados em pesquisas anteriores

Para a definição da metodologia experimental a ser empregada nesta pesquisa avaliou-se as experiências de trabalhos anteriores consultados em 29 publicações. Esta revisão levantou a frequência com que foram tratados determinados aspectos de interesse e os materiais e métodos mais utilizados.

Materiais

Em todos os casos são avaliadas comparativamente barras de diferentes aços inoxidáveis e barras de referência. Na Figura 11 e na Figura 12 apresentam-se os distintos

Tabela 15. Aspectos relacionados com os requisitos de desempenho das barras de aço para armadura (TULA et al., 1996).

Requisitos de Desempenho		Aspectos relacionados com os requerimentos iniciais de utilização	Aspectos relacionados com os requerimentos ao longo da vida útil (Durabilidade)
Necessidades do usuário final <i>Requisitos de projeto</i>	Requisitos de segurança estrutural	⇒ Compatibilidade dos materiais Propriedades mecânicas do aço Aderência concreto/armadura Características microestruturais ↗ Resistência à corrosão intergranular ↗ Resistência à corrosão sob tensão	Fluência e relaxação do aço Resistência à fadiga do aço Resistência ao fogo Resistência do aço à corrosão atmosférica Resistência à corrosão do aço no concreto Conseqüências do avanço da corrosão : ↗ Alteração das propriedades mecânicas das barras ↗ ↓ Resistência à fadiga do componente estrutural ↗ ↓ Aderência concreto/armadura
	Requisitos de conforto visual	⇒ Facilidades de desenho de seções delgadas ↗ Cobrimento mínimo Densidade de armadura máxima	Integridade do revestimento (não fissuras não manchas) ↗ Tipos de produtos de corrosão formados ↗ Expansibilidade dos produtos de corrosão ↗ Solubilidade dos produtos de corrosão
	Requisitos de economia	⇒ Adequação ao capital inicial disponível Disponibilidade tecnológica do mercado	Relação custo/benefício global Facilidade de manutenção e recuperação ↗ Frequência e tempo de interrupção dos serviços
Necessidade do usuário intermediário	Requisitos de manuseio	⇒ Tratamento superficial das barras Cuidados durante o transporte Cuidados durante o armazenamento Cuidados durante a colocação	
<i>Requisitos construtivos</i>	Requisitos de transformação	⇒ Facilidade de corte Facilidade de dobra Facilidade de solda	

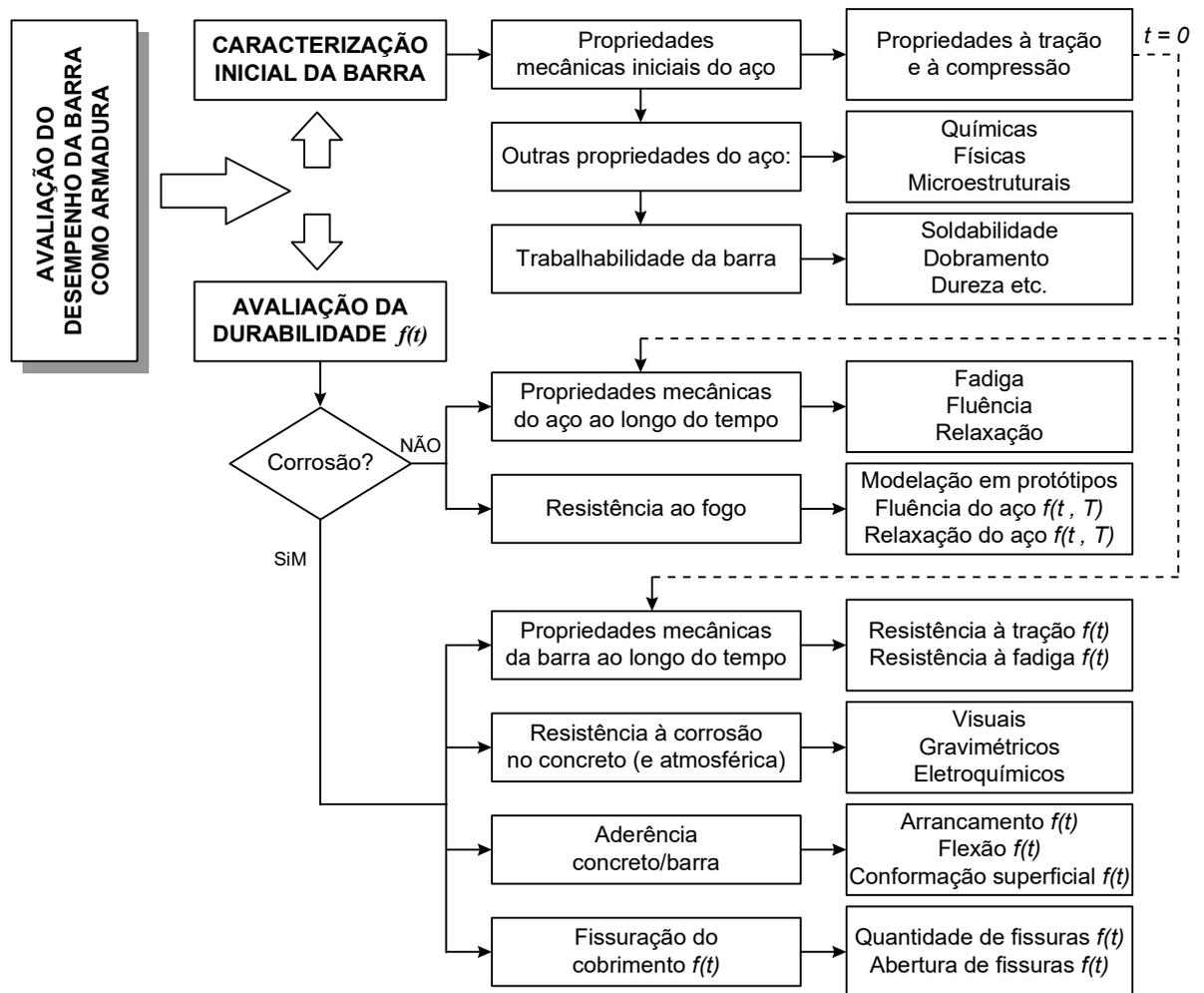


Figura 10. Fluxograma da metodologia de avaliação de barras de aço para armadura. $f(t)$ - função do tempo. $f(t, T)$ - função do tempo e da temperatura (TULA et al., 1996).

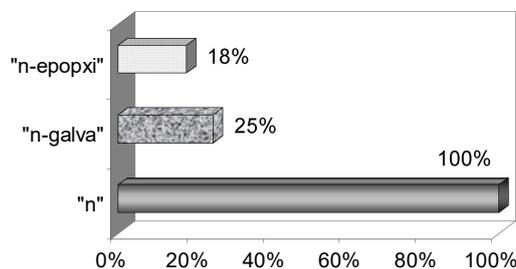


Figura 11. Percentual de pesquisas em que foram utilizadas como referência barras do tipo: "n" - de aço carbono; "n-galva" - de aço galvanizado; "n-epóxi" - de aço revestido com epóxi.

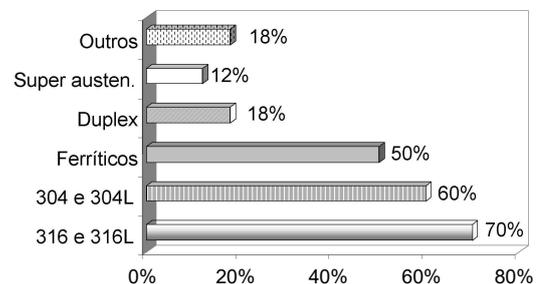


Figura 12. Percentual de pesquisas em que foram estudadas barras dos diferentes tipos de aços.

tipos de armaduras que têm tomado parte das pesquisas como barras de estudo ou de referência. As armaduras de aço inoxidável ABNT 316L foram das mais estudadas (70% das pesquisas) e a barra de aço carbono foi utilizada como referência em todas as pesquisas anteriores.

Recomendações para a escolha do concreto e materiais componentes a serem utilizados na pesquisa

É importante, em ensaios acelerados de corrosão de armaduras, adotar-se modelos que, sem se distanciarem muito das condições reais, facilitem a atuação dos agentes contaminantes. É conveniente empregar concretos pouco duráveis:

- de elevada relação água/cimento, para aumentar a porosidade da pasta;
- de elevada relação pasta/agregado, para aumentar a quantidade total de poros no concreto e com isto a disponibilidade de eletrólito;
- usando-se cimento sem adições minerais, para evitar a tortuosidade da estrutura capilar da pasta (HORNAIN et al., 1995; HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR, 1994);
- evitando-se o emprego de aditivos introdutores de ar, para evitar a quebra da capilaridade;
- adotando-se um revestimento mínimo para as armaduras, de forma a reduzir o tempo de penetração dos agentes agressivos.

Métodos

Vários têm sido os métodos experimentais utilizados em pesquisas anteriores. Diferentes condições de exposição (ver Figura 13) e diferentes parâmetros de avaliação (ver Figura 14). Cabe ressaltar que em todas as pesquisas avaliou-se o efeito da contaminação por cloreto. O levantamento de curvas de polarização foi muito pouco empregado, e somente para barras em solução³⁹. Apenas uma pesquisa (FLINT e COX, 1988) utilizou ensaios de tração para avaliar a corrosão, mas com resultados pouco expressivos por causa do ataque nas barras, quase desprezível após 12 anos de exposição natural. Nenhuma pesquisa avaliou fissuração ou aderência.

³⁹ O modelo mais empregado é a solução saturada de Ca(OH)_2 . McDONALD et al. (1995) utilizaram a solução (0,3N KOH + 0,05N NaOH).

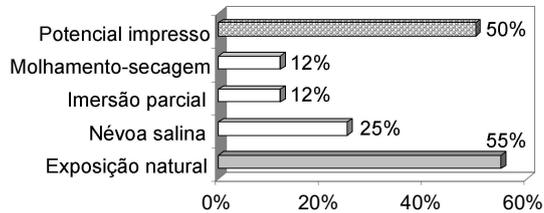


Figura 13. Percentual em que são utilizadas diferentes condições de exposição em pesquisas anteriores.

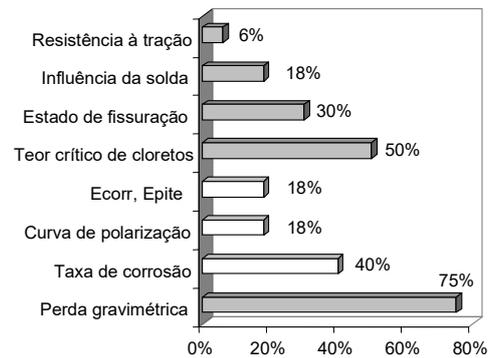


Figura 14. Percentual em que são utilizadas diferentes determinações (as mais frequentes) em pesquisas anteriores.

Recomendações para a escolha dos métodos de corrosão acelerada a serem utilizados na pesquisa

Podem ser utilizados métodos passivos (cíclicos e não cíclicos) e métodos ativos. Entre ensaios cíclicos mais utilizados nos ensaios de corrosão de armaduras estão o ensaio de molhagem-secagem, os ciclos utilizando câmara úmida ou câmara de névoa salina, entre outros. Entre os ensaios não cíclicos os mais utilizados para corrosão de armaduras são os de imersão total ou parcial em água ou em solução corrosiva (pode ser solução salina). Os métodos passivos podem também ser acelerados com agentes agressivos incorporados ao concreto durante a sua elaboração. Neste caso pode ser utilizada, inclusive, a exposição natural dos corpos-de-prova a ciclos naturais de variação de umidade e temperatura.

Entre os ensaios acelerados ativos, os mais comuns são os ensaios de imposição de potencial ou de corrente. São métodos muito discutidos porque alteram o processo eletroquímico, influenciando não apenas na cinética da corrosão como nas condições potenciodinâmicas. Os mais aceites para avaliação do comportamento físico-mecânico de armaduras corroídas são os ensaios de corrente impressa, mais amplamente comentados a seguir.

Corrosão acelerada por corrente impressa

Um dos métodos mais discutidos dentre os ensaios acelerados de corrosão é a corrente impressa. Apontam-se algumas vantagens e desvantagens. A vantagem desta forma acelerada de corrosão é que consegue-se, em poucos dias, levar o estado de corrosão a

graus equivalentes aos que aparecem em barras expostas durante vários anos a ambientes de cloreto. Essa degradação, especificamente no aço inoxidável, acontece somente após muitos anos nestas condições. A desvantagem do ensaio de corrente impressa é provocar uma perturbação muito grande no sistema eletroquímico que não corresponde com o processo natural. Uma das conseqüências é a ocorrência de reações anódicas de efeitos inconvenientes, como a reação de evolução de oxigênio que, acredita-se, possa trazer mudanças nas condições de contorno da zona da interface concreto/armadura. Outra desvantagem é a saturação prematura dos pites e, com isto, a diminuição da sua profundidade máxima.

Segundo RODRIGUEZ et al. (1993), as investigações realizadas anteriormente utilizaram densidades de corrente entre 50 e 1000 vezes as máximas intensidades de corrosão medidas em estruturas de concreto altamente contaminadas por cloretos. Nos últimos anos são várias as pesquisas que utilizaram valores de corrente impressa da ordem da utilizada por RODRIGUEZ et al. (1993). A Tabela 16 mostra algumas dessas pesquisas.

Tabela 16. Valores de densidade de corrente impressa utilizada em diferentes ensaios que avaliaram resistência à aderência e fissuração do cobrimento.

Referência	Ensaio	Corrente impressa
LIN (1980)	Flexão	10.000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Tachibama (1990) apud RODRIGUEZ et al. (1993)	Arrancamento (<i>pull-out</i>)	500 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
AL-SULAIMANI et al. (1990)	Arrancamento (<i>pull-out</i>)	2000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Cabrera (1992) apud RODRIGUEZ et al. (1993)	Arrancamento (<i>pull-out</i>)	2000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
RODRIGUEZ et al. (1993)	Arrancamento	100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
ALONSO e ANDRADE (1994)	Fissuração	10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
CASCUDO et al. (1996)	Fissuração	$\approx 120 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
ISA (1997)	Arrancamento (<i>pull-out</i>) e Flexão	1500 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Segundo ALONSO et al. (1994), a velocidade de corrosão influencia a abertura de fissuras no concreto paralelas à armadura (similares às de fendilhamento). Obtêm-se aberturas maiores com velocidades menores para o mesmo nível de corrosão atingido. Desta maneira, a aderência vai depender não só do nível de corrosão da barra, mas também da velocidade de corrosão aplicada.

Uma outra questão levantada por RODRIGUEZ et al. (1993) é o fato de em pesquisas anteriores ter-se utilizado como referência do nível de corrosão a perda de massa teórica

deduzida a partir da expressão de Faraday, e não ter-se auxiliado da perda gravimétrica real.

2.2. Avaliação do comportamento eletroquímico das armaduras

A avaliação da corrosão pode ser feita mediante vários métodos. Entre eles, os mais empregados são os visuais, gravimétricos e eletroquímicos. Os métodos visuais são basicamente qualitativos, a determinação da densidade de corrente de corrosão gravimétrica é uma técnica quantitativa de muita precisão, e as técnicas eletroquímicas podem ser qualitativas e quantitativas. Dentre as técnicas eletroquímicas, vale destacar a medida de potencial de corrosão, que oferece informações sobre o estado termodinâmico do metal, e a polarização potenciodinâmica, que oferece informações sobre a cinética do processo de corrosão.

O ensaio de polarização potenciodinâmica para obtenção das curvas de polarização permite verificar o comportamento eletroquímico do aço em diferentes potenciais. É uma técnica destrutiva, própria de ensaios laboratoriais.

2.2.1. Ensaio relacionados com a termodinâmica da corrosão

A medição do potencial de corrosão é a técnica eletroquímica mais freqüentemente utilizada. É empregada para estabelecer as diferenças de potencial entre um eletrodo de referência e a armadura e, a partir de critérios como os estabelecidos pela ASTM C876:1990 (ver Tabela 17), pode-se julgar sobre o estado das armaduras, se passivas ou em corrosão. Estes critérios devem ser levados em conta de forma restrita, aplicando-se em especial para o caso da corrosão induzida por cloretos, caso de corrosão que gerou inicialmente parâmetros para a normalização (ACI 222, 1990).

Tabela 17. Interpretação do E_{corr} para armaduras convencionais de aço carbono em concretos contaminados por cloreto, segundo ASTM C876:1990.

E_{corr} [mV] em relação ao eletrodo de:		Probabilidade de corrosão [%]
Cu/CuSO ₄	Calomelano saturado (SCE) ⁴⁰	
$E_{corr} < -350$	$E_{corr} < -290$	95
$-350 < E_{corr} < -200$	$-290 < E_{corr} < -140$	50
$-200 < E_{corr}$	$-140 < E_{corr}$	5

⁴⁰ Pelas siglas em inglês: Saturated Calomel Electrode.

Não existem registros na literatura consultada, de valores de potenciais de armaduras inoxidáveis (TULA e HELENE, 1998), muito menos de valores recomendados para avaliar a condição termodinâmica destas armaduras: se passivas ou ativas.

2.2.2. Ensaios relacionados com a cinética da corrosão

Os ensaios que caracterizam a cinética da corrosão são todos aqueles que, de forma quantitativa ou qualitativa, permitem avaliar a velocidade com que corrói o aço. Vão desde os métodos visuais que permitem julgar sobre a intensidade do ataque e os procedimentos gravimétricos que permitam calcular as perdas de massa durante um tempo de exposição dado, até as técnicas eletroquímicas, que são as determinações mais rápidas.

Uma destas técnicas eletroquímicas é o levantamento das curvas de polarização, obtidas dos ensaios potenciodinâmicos. Estas curvas são o registro da relação corrente-potencial do sistema eletroquímico metal/meio, alterado de maneira forçada sob condições controladas. O potenciostato é o equipamento que permite realizar estes ensaios. Através do potenciostato a barra é polarizada de um potencial a outro com uma determinada velocidade de varredura. O intervalo de polarização, o potencial de início do ensaio e a velocidade de varredura são convenientemente preestabelecidos. As curvas levantadas podem ser levadas à escala $E \times \log i$ (E - potencial, i - densidade de corrente). Para o cálculo da densidade de corrente é considerada a área superficial de barra exposta.

A técnica potenciodinâmica, utilizada para o levantamento das curvas de polarização, permite fazer uma previsão de comportamento do aço no meio em que está sendo ensaiado, quanto a densidades de corrente de corrosão, passividade, tendência a corrosão por pite, potenciais de pite etc. As curvas de polarização são sensíveis a muitos fatores como: a composição do metal, o tratamento térmico ou mecânico da superfície do metal, o estado de tensão do metal, o pH do meio, a concentração de oxigênio no meio, a ação de agentes contaminantes, a temperatura, etc. Desta forma, as curvas de polarização são uma ferramenta muito eficaz nos estudos de durabilidade avaliando, por exemplo: tipos de aço, tipos de cimento, de aditivos, etc. Contudo, é um ensaio destrutivo e acelerado. A polarização altera o estado livre do eletrodo de trabalho (no

caso, a barra em questão), variando o potencial eletroquímico e a densidade de corrente de corrosão iniciais. Pode ser recomendado mais como uma técnica de avaliação de comportamento que de determinação da densidade de corrente de corrosão. A análise das curvas de polarização se vale dos diagramas de Evans e de Pourbaix para a sua interpretação.

Observação visual

Os métodos visuais lançam mão de dispositivos como lupas e microscópios, dando informações qualitativas sobre o tipo de corrosão (se generalizada, uniforme, por pites etc.), além de, em última instância, fornecer indícios (de forma subjetiva) sobre a intensidade do ataque e sobre os produtos de corrosão formados. A análise visual é muito importante, mas é limitada por ser um método qualitativo.

2.3. Avaliação do comportamento físico-mecânico das armaduras

Especificamente no caso de corrosão por pites, a observação da alteração das propriedades mecânicas como a resistência à tração e a resistência à fadiga com o avanço da corrosão, constituem meios de verificar a intensidade dos danos provocados.

Outra situação não menos duvidosa é a influência que teria a corrosão localizada dos aços inoxidáveis na aderência concreto/armadura, comparada à que acontece na armadura convencional de aço carbono, onde por efeito da ação expansiva dos produtos de corrosão formados, altera-se a interface da armadura com o concreto provocando uma microfissuração que afeta a aderência.

Para as armaduras de aço carbono é conhecida a relação entre determinadas densidades de corrente de corrosão e o grau de deterioração da estrutura: diminuição da capacidade de carga e a fissuração do revestimento em estados avançados do processo corrosivo. A diminuição da capacidade de carga com o avanço da corrosão se deve à perda de seção da barra e à perda da aderência concreto/armadura (RODRÍGUEZ et al., 1993). Para as armaduras inoxidáveis, esta relação não tem sido ainda definida.

Ao estimar a durabilidade das armaduras inoxidáveis comparando apenas as densidades de corrente de corrosão com as das armaduras de aço carbono (CALLAGHAN, 1993; McDONALD et al., 1995; PASTORE e PEDEFERRI, 1991; SORENSEN et al., 1990)

desconsidera-se que a correspondência entre a densidade de corrente de corrosão e o grau de deterioração da estrutura para um e outro tipo de armadura pode não ser a mesma. Assim, quando se afirma que as densidades de corrente de corrosão das armaduras inoxidáveis despassivadas são de 3 a 10 vezes menor que a da armadura convencional de aço carbono despassivada (TULA e HELENE, 1998), em termos de vida útil, estes valores podem ser maiores ou menores que 3 e 10.

2.3.1. Redução da aderência concreto/armadura

O concreto armado é um material composto que requer aderência suficiente entre a armadura e o concreto para seu funcionamento. A aderência garante o trabalho conjunto dos dois materiais, formando uma ligação solidária entre eles que permite às peças de concreto armado enfrentar em todo tipo de solicitações com deformações unitárias da armadura e do concreto circundante.

Uma diminuição da aderência nos extremos das barras afeta sua ancoragem no concreto. Por outro lado a diminuição em trechos intermediários determina uma mudança no comportamento estrutural do elemento de concreto armado⁴¹.

A tese de ISA de 1997 constitui um importante documento de referência neste tema. Serviu de base para a elaboração desta parte da pesquisa, transmitindo experiência prática experimental e resumindo os principais conceitos e mecanismos teóricos que permitiram a compreensão do fenômeno da aderência, tratado aqui. Para questões de maior profundidade, deverá ser consultado diretamente esse material.

A curva típica da resistência de aderência obtida nos ensaios de arrancamento ou de flexão é apresentada na Figura 15.

⁴¹ Uma viga com armadura não-aderente, ancorada nos extremos, comporta-se como um arco atirantado. Este comportamento diminui a capacidade resistente da viga, especialmente quando trata-se de vigas super armadas, aumentando as deformações e a abertura das fissuras (RODRÍGUEZ et al., 1993).

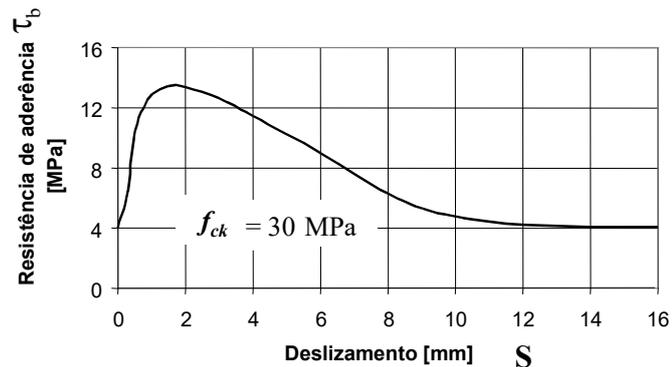


Figura 15. Curva típica representativa da resistência de aderência e o deslizamento (Eligehausen et al. apud ISA (1997))

Para explicar o mecanismo de aderência, ISA (1997) utiliza o modelo teórico de Tassios de 1979. Esse modelo relaciona a resistência de aderência com as manifestações físicas que aparecem durante os ensaios (deslizamentos e fissuras), definindo que ela é decorrente de três parcelas caracterizadas pelo fator predominante: a adesão química, o atrito e a aderência mecânica (ver Tabela 18).

Tabela 18. A aderência concreto/armadura é devido à três fatores (ACI 408, 1991; ISA, 1997).

Fator predominante	Descrição
Aderência por adesão	Processo físico-químico que se estabelece na interface aço/concreto durante as reações de hidratação do cimento. Depende da limpeza e da rugosidade da superfície da barra.
Aderência por atrito	Decorrente das forças de atrito entre os dois materiais. Essas forças são função da superfície da barra e da pressão transversal exercida pelo concreto sobre a barra ⁴² .
Aderência mecânica	Decorrente da formação de consoles de concreto devido às nervuras. É a parcela que mais contribui na aderência da armadura de conformação superficial nervurada.

A Figura 16 detalha o gráfico da Figura 15 de **resistência de aderência versus deslizamento**, dividindo-o convenientemente em trechos retos para facilitar a compreensão do modelo de Tassios apud ISA (1997).

Partindo da hipótese de que ambos os materiais encontram-se, no início, em regime elástico, e que neste regime ambos apresentariam diferentes deformações quando submetidos às mesmas tensões, a reta “OA” (não se produz deslizamentos) só é possível pela parcela de aderência por adesão química. Até a resistência atingir o valor τ_{bA} , não ocorrem deslizamentos. Segundo Tassios apud ISA (1997) a resistência de aderência

suportada pela adesão química varia entre 0,5 MPa e 1,5 MPa (o ACI 408, 1991 define valores bem parecidos, entre 0,48 MPa e 1,03 MPa).

A partir do ponto “A” a resistência de aderência cresce junto com os primeiros deslizamentos. Quando atinge o valor τ_{bB} no ponto “B” da curva aparecem as primeiras fissuras internas, que são de tipo transversais à armadura, as quais modificam o comportamento do concreto à sollicitação. A resistência de aderência τ_{bB} pode ser estimada, para um concreto com $f_{c28} = 30$ MPa, entre 2 MPa a 3 MPa. A partir do ponto “B” temos um concreto microfissurado com a aderência diminuída, o que se observa pela inclinação menor da reta “BC”. É neste momento que começam a aparecer as fissuras de fendilhamento, longitudinais à armadura. Assim que as tensões continuam a crescer, essas fissuras vão se comunicando até se manifestarem claramente quando a tensão atingir o valor τ_{bC} . Quando isso ocorre, as barras lisas, por exemplo, são perfeitamente arrancadas deixando um orifício praticamente intacto (reta “CF”). Ao contrário, as nervuradas continuam a adquirir carga (reta “CD”) pela ação mecânica dos consoles de concreto que se formam frente às nervuras. Até os valores de τ_{bC} a aderência é principalmente por atrito.

Para os valores de resistência entre τ_{bC} e τ_{bD} as barras nervuradas apresentam aceleração crescente do deslizamento decorrente da diminuição do confinamento e do esmagamento do concreto pelas nervuras. Finalmente, quando a resistência atinge o ponto D, τ_{bD} , ocorre o arrancamento das barras de alta aderência por ralamento do concreto pelas nervuras que explodem o concreto por fendilhamento (reta “DG”). O ralamento total pode ser impedido pelo atrito concreto/concreto que estabiliza a curva em tensões chamadas de resistência residual τ_{br} , mais facilmente verificável em ensaios de flexão por causa do maior comprimento das barras.

⁴² A contribuição das nervuras é em função do aumento da superfície de atrito e da melhora na distribuição de tensões na massa de concreto circundante.

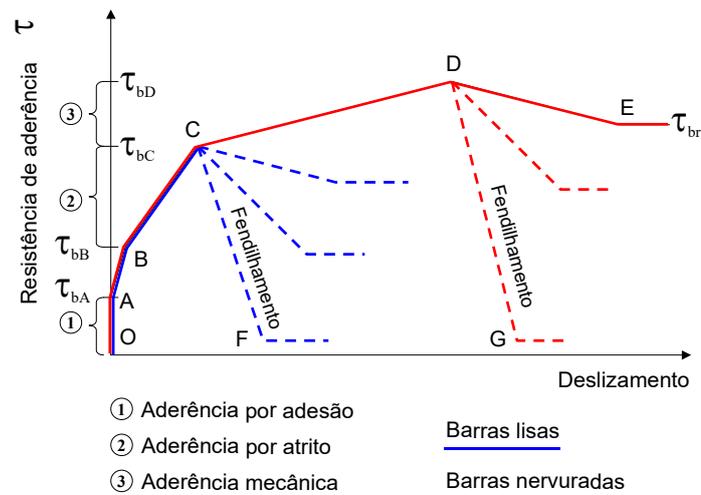


Figura 16. Representação simplificada da relação entre a resistência de aderência e o deslizamento (Tassios apud ISA, 1997).

A resistência τ_{bD} é geralmente denominada de resistência última de aderência τ_{bU} e representa a parcela de aderência mecânica. Segundo ISA (1997), de acordo com a literatura os valores de aderência para carregamentos monotônicos variam entre 10 MPa e 20 MPa.

HELENE (1993) cita a redução e eventual perda da aderência como um dos maiores efeitos degenerativos da corrosão da armadura. A ação expansiva dos produtos da corrosão da armadura produz uma pressão contra o concreto circundante à armadura, provocando, em muitos casos, a fissuração e descolamento do cobrimento (RODRÍGUEZ et al., 1993). No início da corrosão, até níveis de corrosão de menos de 1% em relação à massa inicial da barra, verifica-se um aumento da aderência que, segundo AL-SULAIMANI et al. (1990), corresponde a um aumento da rugosidade da barra antes de que se produza a microfissuração do concreto adjacente. Após esta etapa, o avanço da corrosão traz a diminuição da aderência (AL-SULAIMANI et al., 1990; ISA, 1997; RODRÍGUEZ et al., 1993). Segundo RODRÍGUEZ et al. (1993) as causas apontadas neste processo são: diminuição do confinamento da barra, pela fissuração do concreto circundante; mudanças na interface concreto/armadura como consequência de um certo efeito lubrificante dos produtos de corrosão formados e da deterioração da configuração superficial da barra (diminuição das nervuras).

Segundo ISA (1997) e RODRÍGUEZ et al. (1993) existe carência de trabalhos sobre aderência quando associados à corrosão e reparo de estruturas de concreto armado. Um

trabalho de muita abrangência e profundidade foi o financiado pela Comunidade Européia entre 1992-1995 dentro do projeto BRITE/EURAM BE-4062 "*The residual life of reinforced concrete structures*" apud RODRÍGUEZ et al. (1993).

Outros trabalhos recentes de destaque internacional são o realizado por CAIRNS e JONES em 1995 sobre a influência da geometria das barras na aderência, de muita importância para a definição dos requerimentos iniciais de utilização, e o trabalho de AL-SULAIMANI et al., de 1990, tratando especificamente da influência da corrosão e da fissuração nas perdas de aderência, além dos trabalhos de RODRÍGUEZ et al. (1993) dentro do projeto europeu já mencionado.

Existem vários trabalhos consultados que analisam o comportamento da aderência concreto/armadura com o avanço da corrosão em armaduras de aço carbono (LIN, 1980; MASLEHUDDIN et al., 1990; AL-SULAIMANI et al., 1990; RODRÍGUEZ et al., 1993). No entanto, no caso das armaduras inoxidáveis, não se tem conhecimento de estudos similares.

A variação da seção das armaduras com o avanço da corrosão, assim como a aparição dos produtos de corrosão na zona de interface concreto/armadura (que provoca a redução da parcela de adesão, pela separação dos dois materiais, e afeta as propriedades mecânicas do concreto de cobrimento pela ação expansiva dos produtos de corrosão) são responsáveis por uma possível perda na aderência concreto/armadura. Esta perda é diferente nas barras de aço inoxidável, em relação às de aço carbono, por apresentarem diferentes tipos de corrosão e diferentes características dos produtos de corrosão formados.

Ensaio de Arrancamento. Metodologia

Os ensaios de arrancamento e os de flexão são muito utilizados internacionalmente para avaliar a aderência existem. Entre os ensaios de arrancamento recomenda-se o proposto pela RILEM/CEB/FIP RC 6 /1978, conhecido como "*pull-out*". Segundo RODRÍGUEZ et al. (1993) nem os ensaios de arrancamento nem os de flexão reproduzem de forma realista as condições da armadura na estrutura e devem ser utilizados somente em estudos comparativos ou em ensaios de controle.

Embora o ensaio de arrancamento seja considerado o mais tradicional dos ensaios de aderência (ISA, 1997), os valores de resistência à aderência assim obtidos não são aplicáveis diretamente ao projeto. Apontam-se algumas vantagens deste ensaio sobre o de flexão (ACI 408: 1991): visualização objetiva do conceito de comprimento de ancoragem; introdução da idéia básica de ancoragem por simples aderência como o comprimento que deve exceder o ponto de resistência máxima, ainda que em zonas sem esforço de corte ou momento fletor⁴³. Segundo ISA (1997) em pesquisas de avaliação qualitativa, recomenda-se o ensaio de arrancamento “*pull-out*”, por ser mais simples. Embora quantitativamente apresente diferenças em relação ao ensaio de flexão, conhecido como “*beam test*”, qualitativamente ambos mostram iguais tendências, fato que é suficiente para o estudo comparativo que se apresenta neste trabalho.

A tensão de aderência é calculada segundo a expressão (2).

$$\tau_b = 0,637 \frac{P}{\phi^2} \frac{30}{f_{cj}} = 9,11 \frac{P}{\phi^2 \cdot f_{cj}} \quad (2)$$

Onde: τ_b = tensão de aderência [MPa]

P = força de tração [kgf]

f_{cj} = resistência do concreto à compressão a idade de j dias (obtidos através de corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm por 30 cm)⁴⁴

ϕ = diâmetro nominal da armadura [mm]

Segundo ISA (1997) existe consenso entre os pesquisadores que o ensaio de flexão é mais fiel às condições reais a que está sujeita a armadura no concreto. Contudo, estudos apresentados na recomendação RILEM/CEB/FIP RC5:1978 mostram que tal deficiência pode ser contornada. A análise de curvas características de resistência de aderência realizadas em ensaios de arrancamento (EA) e de flexão (EF), permite concluir que :

- a) os valores da resistência de aderência para ambos os ensaios são equivalentes, quando os deslizamentos são da ordem de 100 μm ;
- b) para deslizamentos superiores a 100 μm , os valores de aderência obtidos do ensaio de flexão são inferiores aos do ensaio de arrancamento;

⁴³ Utiliza-se a tradução realizada por ISA, 1997 sobre esse aspecto do documento.

⁴⁴ Nesta pesquisa foi determinada a f_{cj} com corpos-de-prova de (10x20) cm.

- c) para deslizamentos inferiores a 100 μm , a situação inverte-se em relação à anterior, isto é, as maiores resistências são obtidas através do ensaio de flexão.

Segundo ISA (1997) outros ensaios comparativos foram realizados por Soretz et al. em 1972 e 1975. Neles foram comparados os valores de τ_{b10} – resistência de aderência a 10 μm , τ_{bm} – valor médio das resistências de aderência τ_{b10} , τ_{b100} e τ_{b1000} , e τ_{bu} – valor de resistência última de aderência obtidos nos ensaios de arrancamento (EA) e de flexão (EF). Os resultados desta comparação aparecem na Figura 17. Pode-se observar que os resultados da τ_{bm} apresentam os valores mais próximos quando se comparam os dois ensaios, sendo aproximadamente igual a 1 a relação EA/EF ⁴⁵. Para o caso específico do diâmetro de 10 mm das barras estudadas, os valores de τ_{bm} podem ficar aproximadamente 10% abaixo dos valores de aderência pelo ensaio de flexão, enquanto que a τ_{bu} seria maior aproximadamente 20% que os resultados deste ensaio.

A tensão de aderência média é calculada segundo a expressão (3).

$$\tau_{bm} = \frac{\tau_{b10} + \tau_{b100} + \tau_{b1000}}{3} \quad (3)$$

Onde: τ_{bm} - tensão de aderência média

τ_{b10} - tensão em deslizamento de 10 μm

τ_{b100} - tensão em deslizamento de 100 μm

τ_{b1000} - tensão em deslizamento de 1000 $\mu\text{m} = 1 \text{ mm}$

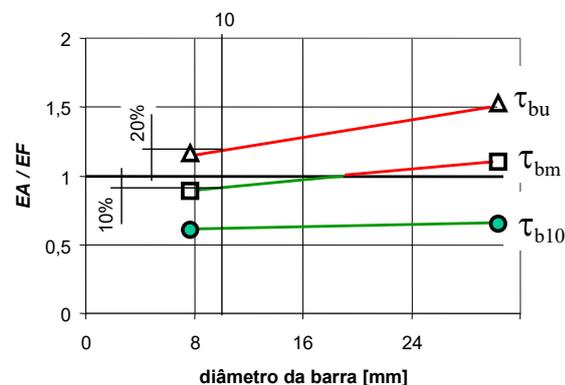


Figura 17. Comparação de τ_{b10} , τ_{bm} e τ_{bu} pela relação (EA/EF) de resultados obtidos dos ensaios de arrancamento (EA) e de flexão (EF).

⁴⁵ Relação dos resultados dos ensaios de arrancamento (EA) e de flexão (EF) para um mesmo tipo de barra.

Com relação aos valores dos coeficientes de variação de ambos ensaios a média para o ensaio de arrancamento é de 13% e, para o ensaio de flexão, de aproximadamente 9,5%. Portanto, aponta ISA (1997), não há uma diferença importante.

A medida de τ_{bu} não possui grande interesse prático, pois os deslizamentos na ruptura, principalmente das barras corroídas, são maiores que 1 mm, inadmissíveis do ponto de vista do comportamento estrutural do concreto armado. Por outro lado, a medida de τ_{bm} é sim um parâmetro de utilidade prática para o cálculo estrutural, porque descreve o comportamento da interface concreto/armadura nas faixas de deslizamento prováveis e admissíveis entre estes dois materiais componentes das peças estruturais solicitadas.

A perda de aderência, mesmo localizada, é fatal para as regiões de ancoragem das armaduras tracionadas. Mas, a mesma situação em trechos médios de componentes estruturais não é de tanto perigo. Principalmente em componentes em compressão como pilares por exemplo, e mesmo em aqueles que solicitados a flexão não tenham afetado o comportamento estrutural pela perda localizada de aderência. Nestes casos, não será esta a manifestação patológica que defina o fim da vida útil de serviço. Somente em casos de vigas e lajes submetidas a ambiente muito agressivo, com ataque generalizado em toda a sua superfície tracionada (por exemplo as lajes de cobertura de reservatórios industriais), a perda da aderência em armaduras tracionadas pode conduzir ao colapso da estrutura.

Execução dos ensaios de arrancamento

A velocidade de carregamento, segundo a Norma RILEM/CEB/FIP RC6:1979 de 500 kgf/min, foi controlada. A cada 30 ensaios aproximadamente a prensa é calibrada para checar se é mantida a mesma relação de carga em toneladas com a tensão de saída lida pelo aparelho de aquisição de dados. Outros cuidados foram tomados quanto ao posicionamento do LVDT. Mesmo assim, alguns corpos-de-prova não apresentaram gráficos característicos e foram rejeitados.

O corpo-de-prova deve ser colocado verticalmente sobre o prato de apoio da prensa, aplicando-se a força P na extremidade inferior e medindo-se o deslizamento S por meio de um extensômetro mecânico analógico (LVDT) fixado na extremidade superior,

conforme Figura 18. Um equipamento de aquisição automática de dados, acoplado a um microcomputador, permite armazenar (1,5 dados por segundos) os registros correspondentes à alteração do potencial de saída do LVDT e da prensa. Os valores registrados numa tabela são convertidos em deslizamento em mm e a carga em kgf através de equações de correlação previamente determinadas para o LVDT e a prensa. Com isto desenham-se os gráficos de **carga versus deslizamento** esperados.

A velocidade de carregamento do ensaio é $5\phi^2$ (ϕ - diâmetro da barra em cm), o que para barras de 10 mm de diâmetro significa um carregamento de 500 kgf/min.

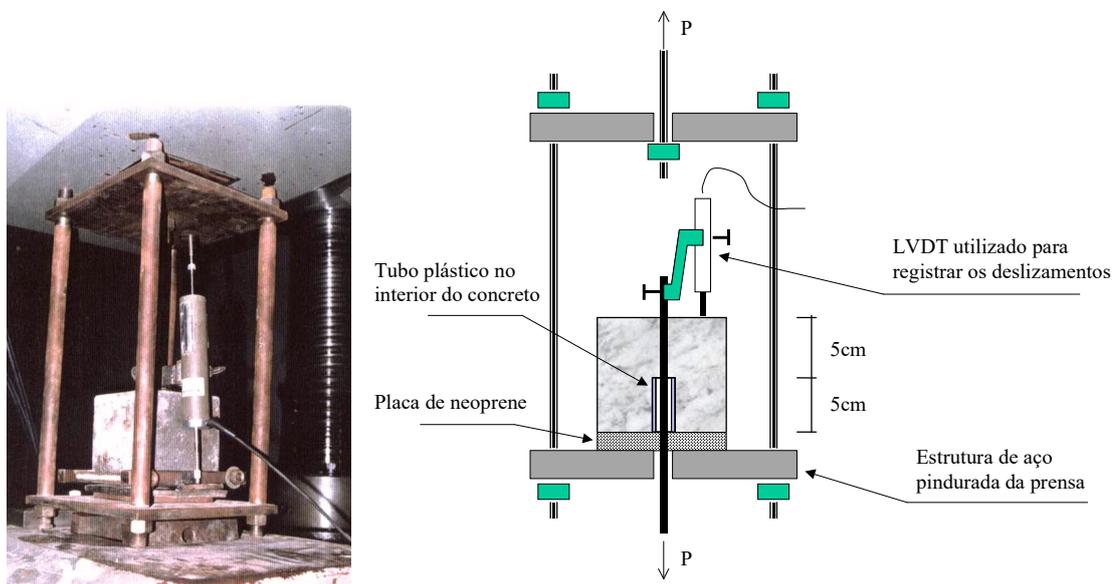


Figura 18. Ensaio de arrancamento.

2.3.2. Redução da resistência à tração das armaduras

Os estudos de resistência à tração são recomendados como determinação complementar no estudo de patologias de estruturas com problemas de corrosão (HELENE, 1993). Em pesquisas de laboratório foram empregados por KOSA e NAAMAN (1990) com resultados um tanto contraditórios.

Em barras de aço inoxidáveis, FLINT e COX (1988) fizeram uma pesquisa que envolveu ensaios de resistência à tração. As barras de aço ASTM 316 (ABNT 316) foram especialmente preparadas para o ensaio. Em 12½ anos de exposição em água de mar verificou-se que a corrosão do aço inoxidável era mínima e as perdas de resistência

à tração desprezíveis. Não se reportam ensaios a tração com barras inoxidáveis em estados avançados de corrosão.

Ensaio de resistência à tração. Metodologia

Os ensaios de resistência à tração são ensaios muito empregados nos laboratórios de materiais. A norma brasileira NBR 6152:1987 para materiais metálicos em geral e as NBR 6207:1986 e NBR 6349:1987 especificamente para armaduras, especificam a metodologia do ensaio.

Execução dos ensaios de tração

A velocidade de carregamento segundo a norma NBR 6152:1987 de 300 kgf/min é controlada.

2.4. Estimativa de vida útil – Abordagem laboratorial

As duas últimas décadas têm-se caracterizado por um interesse crescente no desenvolvimento teórico das previsões de vida útil⁴⁶. As abordagens mais recentes de cálculo da vida útil consideram os mecanismos de deterioração mais importantes: a corrosão das amaduras, a reação alkali-agregado, os ataques químicos (por exemplo sulfatos) e o efeito de gelo-degelo (ROSTAM, 1993). No caso da corrosão os métodos de cálculo da vida útil podem se basear no modelo simples e descritivo de TUUTTI (1982), que considera um período de iniciação e outro de propagação. O modelo utilizado neste trabalho é o modelo de HELENE (1993) apresentado na Figura 19, baseado no próprio modelo clássico de Tuutti. O modelo de HELENE (1993) deixa claro que a manifestação patológica que limita a vida útil de serviço é variável, dependendo em cada caso de qual é o requisito de desempenho que define a durabilidade da estrutura.

⁴⁶ Das bibliografias consultadas destacam-se os trabalhos de SOMERVILLE (1992); CLIFTON (1993) e ANDRADE e ALONSO (1994).

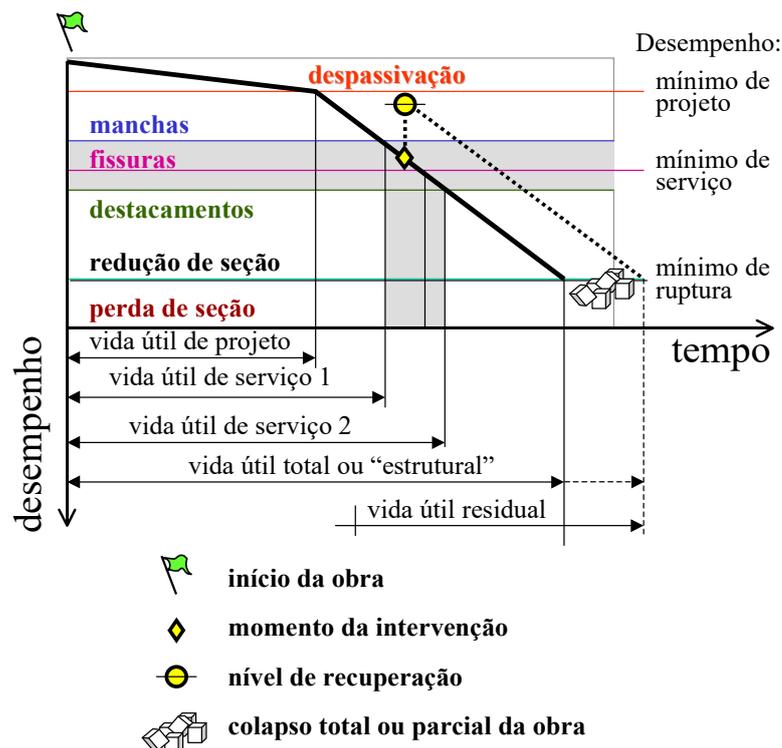


Figura 19. Modelo de vida útil, **desempenho versus tempo**, de HELENE (1993).

A *vida útil de projeto* pode ser associada ao período de tempo que vai até a despassivação da armadura, denominado também período de iniciação. A *vida útil de serviço* ou *de utilização* é denominado o período de tempo total contado a partir do término da construção até o aparecimento de uma manifestação patológica considerada grave ou inadmissível. A *vida útil total ou estrutural* é o período de tempo que vai até o colapso parcial ou total da estrutura.

A definição de *vida útil residual* está associada ao prognóstico após uma vistoria, realizada a qualquer momento durante a vida útil da estrutura. Após um correto diagnóstico conta-se com elementos que podem tornar mais objetiva uma nova estimativa da vida útil de serviço. A vida útil residual seria esta nova estimativa descontando a idade que já possui a estrutura.

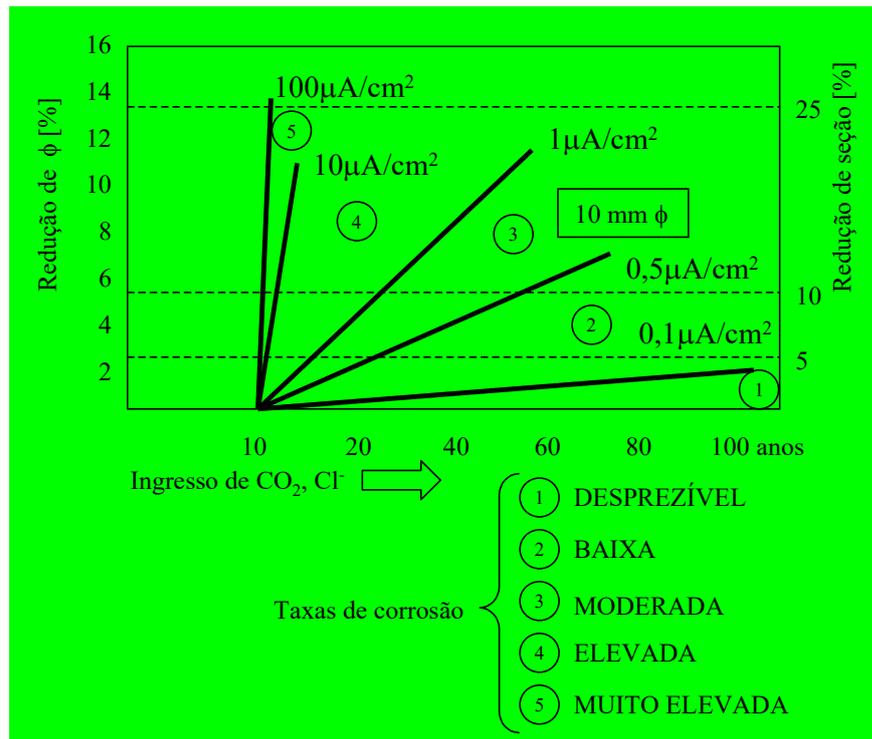


Figura 20. Vida útil residual em função da densidades de corrente de corrosão para o diâmetro de 10 mm, antes e após eventual fissuração e destacamento do concreto de cobertura segundo ANDRADE e ALONSO, 1994.

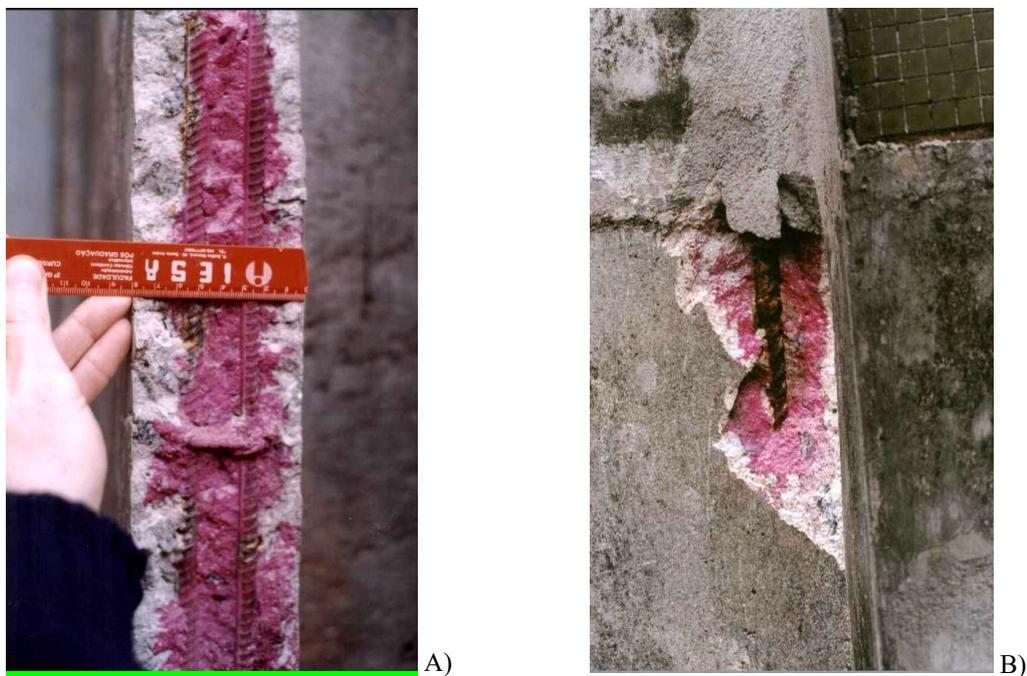


Figura 21. Fim da vida útil de projeto - Perda da passivação das armaduras de aço carbono. A) Corrosão por carbonatação, detectada no teste de aspersão de fenolftaleína. B) Corrosão por cloreto, causa detectada em ensaio de determinação de cloretos, corroborada pela observação visual e a ausência de carbonatação à profundidade da barra.



Figura 22. Fim da vida útil de serviço - Perda da capacidade resistente. A) Perda geral da capacidade resistente em pilares de obra litorânea (“Marina Hemingway” Havana, Cuba). B) Perda local da capacidade de carga de armadura de aço inoxidável⁴⁷ (Cais de Progreso, Yucatán, México. ARMINOX, 1999)



Figura 23. Fim da vida estrutural – Colapso. (Praia de Santa Maria, Havana, Cuba)

⁴⁷ Equivalente à ABNT 304.

Capítulo 3. EXPERIMENTO

3.1. Programa experimental da pesquisa

O programa experimental, representado na Figura 24, deu início com os ensaios de caracterização dos materiais utilizados. Os ensaios de avaliação de comportamento, encaminhados à realização do objetivo principal da pesquisa, foram divididos em 2 partes:

Parte 1. Avaliação do comportamento eletroquímico.

Parte 2. Avaliação do comportamento físico-mecânico.

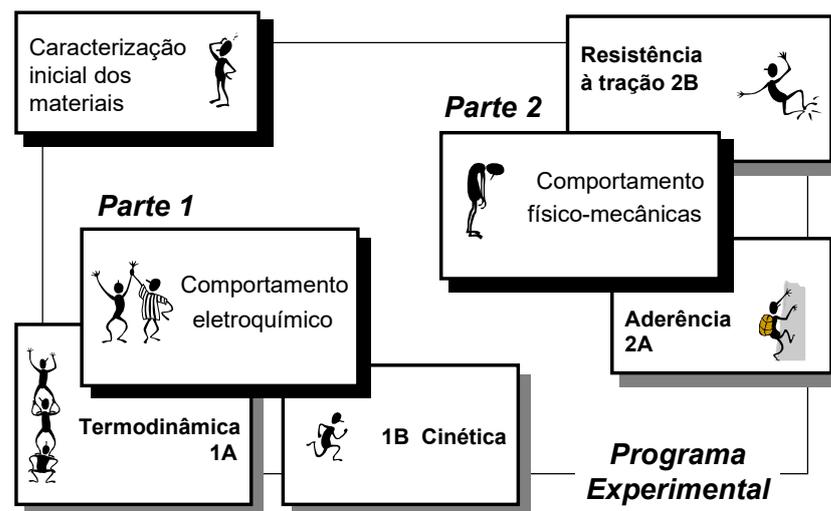


Figura 24. Programa experimental (TULA e HELENE, 1998).

3.1.1. Parte 1. Avaliação do comportamento eletroquímico.

Conjunto de ensaios que permitem avaliar a resistência à corrosão do ponto de vista das manifestações eletroquímicas, de armaduras em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto. Foram divididos em ensaios de caracterização termodinâmica e cinética.

1A. Ensaio de caracterização termodinâmica.

Determina-se o potencial eletroquímico (E_{corr}) de corpos-de-prova em imersão parcial ao longo de 65 semanas.

1B. Ensaio de caracterização cinética.

Traçam-se curvas de polarização com os mesmos corpos-de-prova de *1A*.

3.1.2. Parte 2. Avaliação do comportamento físico-mecânico.

Conjunto de ensaios que permitem analisar a resistência à corrosão do ponto de vista das manifestações físico-mecânicas de armaduras corroídas em ensaio acelerado com corrente impressa. Foram divididos em ensaios de caracterização da deterioração da aderência e de deterioração da resistência à tração.

2A. Ensaio de avaliação da aderência com o avanço da corrosão.

Determina-se a aderência pelo ensaio de arrancamento (RILEM/CEB/FIP RC 6:1978) e relaciona-se esta aderência com a densidade de corrente de corrosão gravimétrica (ASTM G 1-88:1989) de barras submetidas a corrente impressa.

2B. Ensaio de avaliação da resistência à tração com o avanço da corrosão.

Determina-se a resistência à tração pela NBR 6152:1987 e relaciona-se esta resistência com a densidade de corrente de corrosão gravimétrica (ASTM G 1-88:1989) de barras submetidas a corrente impressa.

3.2. Condições de exposição utilizadas nos ensaios da Parte 1 e 2

Na *Parte 1* da pesquisa emprega-se a imersão parcial em condições de laboratório durante 65 semanas. Ensaio complementares são executados com corpos-de-prova em câmara úmida.

Na *Parte 2* emprega-se corrente impressa de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para acelerar a corrosão das armaduras de corpos-de-prova em imersão parcial.

Os métodos acelerados de corrosão que foram empregados nos ensaios de avaliação da aderência concreto/armadura e da resistência à tração com o avanço da corrosão seguem as recomendações da ASTM E 632-88.

3.2.1. Condições de exposição dos corpos-de-prova das avaliações eletroquímicas

Após a cura de 28 dias em câmara úmida os corpos-de-prova permaneceram dentro do laboratório em condições de imersão parcial (ver Figura 25).

A umidade interna dos corpos-de-prova em imersão parcial variou entre 84% e 90% (ver Tabela B. 9 do Anexo B), com valor médio de 86%.

Não se teve o cuidado de colocar em bandejas separadas corpos-de-prova do mesmo tipo de concreto. Como conseqüência, os corpos-de-prova sem cloreto poderiam ter sido levemente contaminados através da água de imersão. Com isto os resultados dos ensaios eletroquímicos dos corpos-de-prova com menores teores de cloreto (0% e 0,4%) podem ter sido afetados, não conseguindo-se detectar a passivação dos aços estudados (taxas de corrosão eletroquímicas bem baixas, características do estado de passivação).

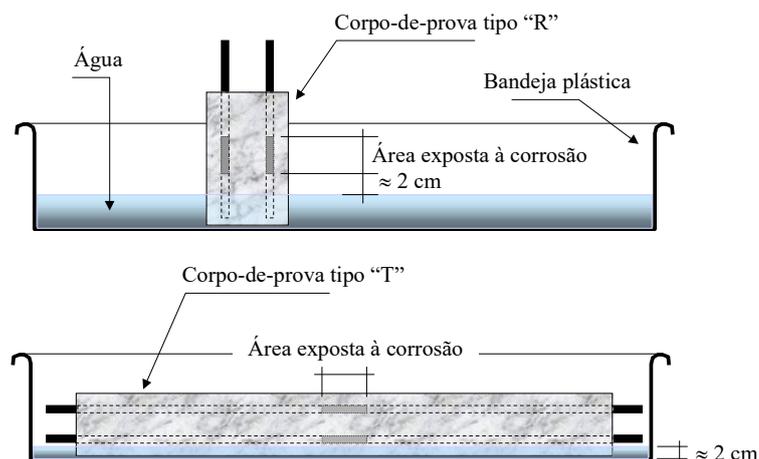


Figura 25. Corpos-de-prova tipo "R" e "T" em condições de imersão parcial em água.

Condições de exposição dos corpos-de-prova dos ensaios complementares.

Os corpos-de-prova tipo "D" e "S" foram colocados nas mesmas condições de imersão parcial que os tipo "R" e "T". Também para ensaios complementares, corpos-de-prova

tipo "R" e tipo "T" foram colocados em câmara úmida após 23 semanas em imersão parcial. Na câmara úmida atingiram em média GU de 97%. A nomenclatura de identificação destes corpos-de-prova é a mesma dos tipo "R" e "T", seguida da denominação "c.u." (por exemplo T04x-1/1 c.u.).

3.2.2. Condições de exposição dos corpos-de-prova das avaliações físico-mecânicas

No caso dos ensaios de arrancamento os corpos-de-prova sem corrosão foram ensaiados logo após 28 dias de cura na câmara úmida. Os corpos-de-prova ensaiados com corrosão, tanto os corpos des ensaios de arrancamento como os de resistência à tração, foram curados durante 28 dias nas mesmas condições e depois mantidos secos em condições de laboratório. Duas semanas antes da corrosão acelerada foram colocados por 7 dias na estufa a 50°C para secagem. Após secagem na estufa, foram colocados em água (imersão total) durante 6 dias, para a sua total saturação. Um dia antes do ensaio foram tirados da água e colocados em ambiente de laboratório. Durante os ensaios de corrosão acelerada os corpos-de-prova foram mantidos em imersão parcial.

Foram determinadas as massas dos corpos-de-prova secos da estufa, na câmara úmida ou após a imersão em água e antes e depois do ensaio acelerado que transcorreu em condições de imersão parcial. Desta maneira foi possível observar que durante os ensaios de corrente impressa os corpos-de-prova mantiveram em média 86% de umidade interna.

Corrosão acelerada por corrente impressa:

Foi empregada uma densidade de corrente de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Segundo RODRÍGUEZ et al. (1993) esta é equivalente a uma i_{corr} entre 5 e 10 vezes a medida em estruturas muito contaminadas por cloreto. Após 3, 6 e 20 dias de corrosão obtiveram-se barras com grau de corrosão teórico da ordem de 0,5%; 0,8% e 2,6% respectivamente. O grau de corrosão real foi determinado gravimetricamente. A perda de massa real foi sempre menor que a teoricamente calculada, coincidente com pesquisas anteriores (ALONSO e ANDRADE, 1994). Esta situação foi menos evidente nas barras dos concretos mais contaminados com cloreto.

Foi utilizada uma instalação elétrica empregando uma fonte de corrente baixa, aparelho que fornece exatamente a mesma corrente, de maneira independente, a 12 saídas, permitindo a realização do ensaio em 12 corpos-de-prova de por vez (ver Figura 26).

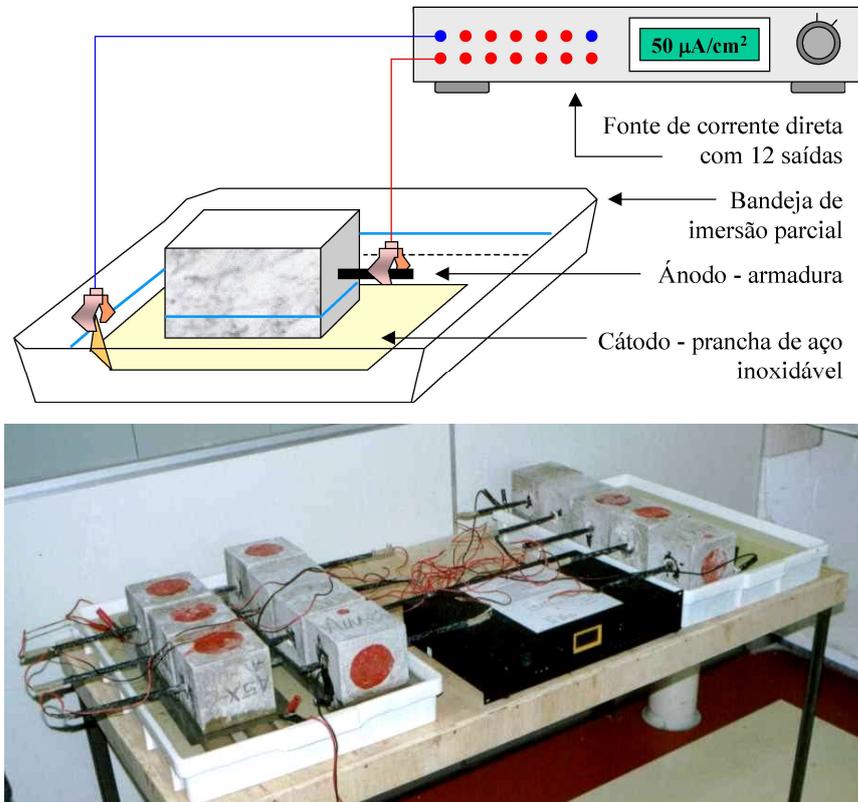


Figura 26. Corrosão acelerada por corrente impressa de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (na Foto, corpos-de-prova tipo “A”).

3.3. Variáveis da pesquisa

A seguir são descritas as variáveis independentes, dependentes e intervenientes das partes experimentais da pesquisa (*Parte 1 e 2*).

3.3.1. Variáveis independentes

Na Tabela 19 apresentam-se as principais variáveis independentes envolvidas na pesquisa. Na *Parte 1* as variáveis são o tipo de aço, o teor de cloreto no concreto em relação à massa de cimento (Cl_{cc}), e o estado de tensão das armaduras. Ainda nesta parte são executados ensaios complementares variando-se a condição de exposição que passa de imersão parcial para exposição em câmara úmida, e outros estados das armaduras: dobradas e soldadas. Na *Parte 2* da pesquisa todas as barras são estudadas relaxadas e, independentemente do teor de cloreto, todas são submetidas à mesma corrente impressa.

Portanto, nos ensaios desta etapa têm-se somente duas variáveis independentes: tipo de aço e tempo de corrente impressa. Nesta parte da pesquisa o teor de cloreto foi considerado uma variável interveniente.

Tabela 19. Variáveis independentes da pesquisa.

Parte	Variável independente	Valor da variável	
Parte 1. Avaliação do comportamento eletroquímico	Tipo de aço	Aço carbono [n]	
		Aço inoxidável [x]	
	Teor de cloreto em relação à massa de cimento Cl_{cc}	0%	[0]
		0,4%	[04]
		1%	[1]
		5%	[5]
	Condições de tensão	Barra relaxada	[R]
		Barra tracionadas	[T]
		Barra dobradas *	[D]
		Barra soldadas *	[S]
	Condições de exposição	Imersão parcial em água	
		Câmara úmida *	
Parte 2. Avaliação do comportamento físico-mecânico	Tipo de aço	Aço carbono [n]	
		Aço inoxidável [x]	
	Tempo de corrente impressa	0 dias	
		3 dias	
		6 dias	
		12 dias	
		20 dias	

* variáveis utilizadas en los ensaios complementares.

Os ensaios complementares da **Parte 1** da pesquisa são:

- 1- Curvas de polarização em corpos-de-prova de barras relaxadas e tracionadas expostos em câmara úmida (maior grau de umidade⁴⁸ que durante a exposição em imersão parcial).
- 2- Curvas de polarização em corpos-de-prova de barras soldadas e barras dobradas.

3.3.2. Variáveis dependentes

Na Tabela 20 resumem-se as diferentes variáveis dependentes para cada parte da pesquisa:

⁴⁸ Aos efeitos desta pesquisa o grau de umidade (GU) do concreto é a relação entre o teor de água (em massa) do concreto e o teor de água (em massa) do concreto em estado saturado.

Tabela 20. Variáveis dependentes.

Parte	Sub-parte	Variável dependente
<i>Parte 1.</i> Avaliação do comportamento eletroquímico	<i>2A.</i> Avaliações relacionadas com a termodinâmicas da corrosão	Potencial eletroquímico [E_{corr}]
		Potencial de pite das barras "x" [E_p]
	<i>2B.</i> Avaliações relacionadas com a cinéticas da corrosão	Curva de polarização
		Corrente de corrosão [i_{corr}]
		Perda gravimétrica dos corpos-de-prova da <i>Parte 1</i> [Δm]
<i>Parte 2.</i> Avaliação do comportamento físico-mecânico	<i>3A.</i> Avaliação da aderência concreto/armadura com o avanço da corrosão	Curva tensão de aderência versus deslizamento
		Tensão de ruptura [τ_{bu}]
		Aderência média [τ_{bm}]
	<i>3B.</i> Avaliação da resistência à tração das barras com o avanço da corrosão	Curva tensão versus alongamento
		Limite de ruptura [f_{st}]
		Resistência de escoamento [f_{yk}]

3.3.3. Variáveis intervenientes

O controle de alguns parâmetros com o objetivo de minimizar a sua variação durante o experimento, permitiu que pudessem ser considerados como constantes e suas pequenas variações como variáveis intervenientes no experimento. A seguir são comentadas todas elas.

A consistência do concreto fresco

Por causa das adições diferentes de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ aos concretos empregados, variaram os tempos de pega. Não foi controlado o tempo de pega, mas esse fato teve uma manifestação clara na consistência das misturas, que foram mais afetadas quanto maior for o teor de cloreto adicionado.

As fissuras nos corpos-de-prova de barras tracionadas

Asas determinações eletroquímicas nestes corpos-de-prova foram relacionadas apenas com a presença da tensão de tração. Observou-se que nos corpos-de-prova flexionados apareciam fissuras no concreto de cobrimento, muitas vezes na região das medições. Considerou-se que esta condição é muito próxima à condição real das armaduras tracionadas em componentes estruturais não protendidos, submetidos à flexão. As fissuras foram desconsideradas na análise. Porém, uma pesquisa anterior (WOLF et al., 1996) chama a atenção para a influência das fissuras na cinética das reações

eletroquímicas, pelo que se recomenda para pesquisas futuras isolar ambas estas variáveis: tração e fissuração.

As geometrias diferentes dos corpos-de-prova

Corpos-de-prova utilizados para a análise das mesmas propriedades eletroquímicas foram concebidos com geometrias diferentes. É o caso dos corpos-de-prova de barras relaxadas, de barras tracionadas e de barras dobradas, todos diferentes. Manteve-se a mesma espessura de revestimento, mas a posição das barras em relação ao nível de água das bandejas de imersão não foi a mesma em todos os casos. A posição das barras relativa à direção de colocação do concreto durante a moldagem, também não foi a mesma em todos os casos. Os efeitos desta variável estão relacionados com o grau de umidade (GU) e as características da microestrutura do concreto de revestimento.

A geometria irregular das barras nervuradas

As barras nervuradas apresentam uma variabilidade maior da área superficial em relação às barras lisas. O controle do diâmetro de cada barra, da geometria das nervuras e do comprimento da área exposta da barra, permitiu o cálculo mais aproximado da área superficial exposta à corrosão. Maior variabilidade foi constatada nas barras de aço carbono.

Os parâmetros ligados às diferenças da estrutura porosa dos concretos

Apesar de se manter a mesma relação a/c , a adição de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ pode trazer pequenas diferenças na microestrutura das pastas. Esse fato, além de modificar a compactação dos diferentes concretos como consequência das variações ocorridas na trabalhabilidade das misturas, explica a variabilidade nas leituras de parâmetros como a resistividade elétrica superficial (R_s). Esta variável é aproveitada positivamente nos ensaios da **Parte 2** da pesquisa: corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto são submetidos ao mesmo tempo de corrente impressa e, com isto, conseguem-se diferentes graus de corrosão para um mesmo grupo de barras ensaiadas.

A resistência à compressão do concreto

Parâmetro controlado a cada betonada. Variou pouco pois a relação a/c manteve-se sempre constante. Mesmo assim, as mudanças na consistência das misturas, e com isto

na trabalhabilidade do concreto, provocou determinadas variações de resistência à compressão, de massa específica e de teor de ar incorporado do concreto. A tendência observada foi que com o aumento da quantidade de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ adicionado, a compacidade e a resistência à compressão do concreto diminuíram.

A temperatura ambiente (T) e o grau de umidade (GU)

Ambos têm uma influência notável no valor que assume o potencial eletroquímico ou de corrosão (E_{corr}). A influência da temperatura é considerada na equação (4), conhecida como Equação de Nernst (PANOSSIAN, 1993). O teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova de concreto significa maior ou menor disponibilidade de eletrólito, indispensável para o desenvolvimento das reações eletroquímicas. Foram tomadas providências no sentido de diminuir as perdas de umidade interna do corpo-de-prova e de manter a mesma temperatura durante os ensaios de polarização potenciodinâmica. O corpo-de-prova foi colocado na sala climatizada do ensaio pelo menos desde 1 hora antes e foi mantido totalmente coberto com pano úmido. As curvas de polarização não foram começadas até se conseguir a estabilização do potencial de circuito aberto (E_{ca})⁴⁹.

$$\text{Equação de Nernst.} \quad E_e = E_e^0 + \frac{RT}{zF} \ln a_{M_e^{z+}} \quad (4)$$

Onde: E_e – Potencial de equilíbrio

E_e^0 - Potencial de equilíbrio em estados padrões

R – Constante universal dos gases = 8,314 Joules/(mol·grau)

T – Temperatura em graus Kelvin;

z – valência do íon metálico (para Fe^{++} $z = 2$)

F – constante de Faraday = 96 500 C

$a_{M_e^{z+}}$ - atividade do metal (ou concentração do metal em solução [M_e])

A variação da idade dos corpos-de-prova

Os ensaios potenciodinâmicos foram executados em três etapas. Em cada etapa os corpos-de-prova foram agrupados de acordo com as datas de moldagem, sendo os ensaios programados com vistas a reduzir as possíveis diferenças de idade. Mesmo assim, agruparam-se corpos de idades diferentes numa mesma etapa de estudo, que foram analisados como sendo de uma mesma idade. Foi verificada a influência desta variável em idades entre 35 e 65 semanas, comprovando-se que não existiu nenhuma

⁴⁹ Refere-se ao potencial de corrosão E_{corr} medido pelo potenciostato antes de começar a polarização

tendência definida dentro destes limites, nem nos gráficos nem nos parâmetros calculados das curvas de polarização.

3.4. Caracterização dos materiais utilizados.

São caracterizados todos os materiais utilizados: as armaduras, o concreto e seus materiais componentes. A caracterização das armaduras abrangeu avaliações do aço como material, e das barras para armaduras: caracterizações da microestrutura, composição química, dureza, propriedades à tração, capacidade ao dobramento e aderência.

3.4.1. Concreto

O traço do concreto e as características dos materiais constituintes utilizados respondem aos critérios listados no item anterior. Assim, a relação a/c selecionada foi de 0,65, a consistência medida pelo abatimento do troco de cone variou entre 14 cm e 17,5 cm, o consumo de cimento médio foi de 310 kg/m³, e adicionou-se cloreto nas proporções 0%; 0,4%; 1%; e 5% da massa de cimento⁵⁰. Os traços e os valores médios das propriedades em estado fresco e endurecido que caracterizam os concretos utilizados na pesquisa são apresentados no Anexo B.

Ensaio de caracterização do concreto fresco e endurecido

O concreto de cada betonada foi caracterizado nos estados fresco e endurecido. As médias dos resultados são apresentadas nas tabelas do Anexo B.

Cimento

O cimento empregado foi do tipo CP V ARI. A escolha deste cimento permite a redução do efeito de variáveis intervenientes tais como: grau de hidratação, efeito de adições e retenção de cloretos na pasta endurecida. A rápida hidratação garante uma maior homogeneidade da pasta em toda a massa de concreto e uma menor influência da idade e da cura nas características da microestrutura. A adição de até 8% de *filler* calcário tem pouca influência nas características da microestrutura da pasta (HORNAIN et al., 1995). O baixo conteúdo de C₃A garante uma menor retenção de íons cloreto que formam o

⁵⁰ Emprega-se CaCl₂(H₂O)₂, acelerador de pega utilizado com determinada frequência em obras.

cloro-aluminato e, com isto, o teor de cloretos livres na água de poro é mais próximo do teor de cloretos incorporados.

Agregados

Agregado miúdo

Areia média. As propriedades físicas apresentam-se na Tabela B. 3 e a análise granulométrica na Tabela B. 5 (Anexo B).

Agregado graúdo

Brita N° 1. As propriedades físicas apresentam-se na Tabela B. 3, a análise granulométrica na Tabela B. 5 (Anexo B).

3.4.2. Armaduras

Esta etapa da pesquisa avalia aspectos relacionados com os requisitos iniciais de utilização das barras em estudo para armadura (ver Tabela 15). Por razões de organização do trabalho, os detalhes dos ensaios relacionados aos aspectos eletroquímicos iniciais, à aderência inicial e às propriedades iniciais à tração, são apresentado nos itens 3.5 e 3.6 junto ao grupo de ensaios que compõem a *Parte 1* e *Parte 2* da pesquisa, que avaliam estes mesmos aspectos em concretos contaminados. Os resultados dos ensaios de caracterização geométrica, composição química e exame metalográfico podem ser consultados no Anexo A.

Barras utilizadas

As barras utilizadas na pesquisa são barras nervuradas de 10 mm de diâmetro. O aço de estudo é o aço inoxidável tipo ABNT 316L (NBR 5601:1981) identificado para a nomenclatura dos corpos-de-prova como tipo "x". O aço de referência é o aço carbono de tipo CA50 (NBR 7480:1985), identificado como tipo "n". As características geométricas das barras, as propriedades à tração e outras caracterizações apresentam-se no Anexo A.

Características geométricas das barras

Na Tabela A. 1, na Figura A. 1 e na Figura A. 2 do Anexo A apresentam-se as dimensões médias determinadas para as barras da pesquisa. Notou-se uma maior

variabilidade dimensional nas barras de aço carbono. Foi determinada a área superficial média das barras de aço inoxidável e de aço carbono. Para determinar a área exposta à corrosão de cada barra ensaiada utilizou-se a expressão (5).

$$A_{real\ exposta} = A_{sup.média} \cdot l \cdot \frac{\phi}{\phi_{médio}} \quad (5)$$

onde: $A_{real\ exposta}$ = área real exposta à corrosão
 $A_{sup\ média}$ = área superficial média da barra
 l = comprimento de barra exposto
 ϕ = diâmetro real da barra
 $\phi_{médio}$ = diâmetro médio das barras

Composição química, propriedades físicas e mecânicas dos aços

No Anexo A encontram-se também os resultados dos ensaios de composição química do aço, as determinações metalográficas, assim como os resultados de dureza Brinell e os ensaios mecânicos à tração e de dobramento à 180°.

Propriedades iniciais à tração das barras

Para a caracterização inicial das propriedades à tração utilizaram-se as determinações em barras não corroídas. A Tabela 21 apresenta os valores médios de resistência de escoamento e limite de resistência determinados⁵¹ para as barras não corroídas considerando o diâmetro nominal 10 mm. Ensaio de contraprova foram realizados pelo laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da VILLARES METALS SA. e pelo CETEC Engenharia S/C LTDA (resumidos na Tabela A. 4 do Anexo A). Já para o estudo da **Parte 2** da pesquisa em que se determinam as perdas de resistência à tração em barras corroídas, é necessário considerar o diâmetro real das barras ensaiadas e não o nominal. Os resultados considerando o diâmetro real apresentam-se na Tabela 34. A Figura 47 e a Figura 53 mostram os diagramas médios de **tensão versus alongamento**, determinados para as barras sem corrosão. Informações mais detalhadas dos resultados dos ensaios encontram-se na Tabela E. 1 do Anexo E.

Tabela 21. Propriedades à tração. (considerando o diâmetro nominal de 1 cm)

Tipo de aço	f_{ym} [MPa]	f_{st} [MPa]	Alongamento [%]
Aço carbono	633,9	722,2	11,0
Aço inoxidável	778,4	879,3	25,0

⁵¹ Respeito ao diâmetro nominal de 10 mm

3.4.3. Preparação dos corpos-de-prova de concreto simples e armado

As combinações dos materiais principais da pesquisa (concreto e armadura) apresentam-se na Tabela 22. Quatro tipos de concreto ("c0"; "c04"; "c1"; "c5") e dois tipos de aço ("x"; "n") formam os oito concretos armados dos diferentes corpos-de-prova utilizados na pesquisa (ver Figura 27).

Tabela 22. Possíveis combinações dos materiais que formam os corpos-de-prova de concreto utilizados na pesquisa. A mesma simbologia é utilizada na denominação dos corpos-de-prova da pesquisa.

Teor de Cl em relação à massa de cimento na massa do concreto →	0%	0,4%	1%	5%
↙ Tipo de aço				
Aço inoxidável – “x”	0x	04x	1x	5x
Aço carbono – “n”	0n	04n	1n	5n

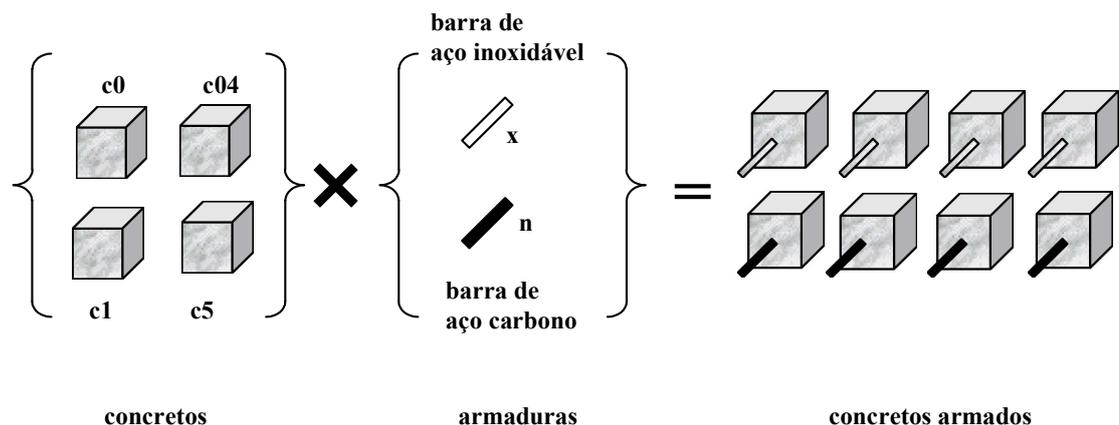


Figura 27. Oito concretos armados formam os corpos-de-prova de concreto utilizados nos diferentes ensaios da pesquisa.

Dosagem do concreto

O estudo do traço foi feito segundo a metodologia proposta por HELENE e TERZIAN, 1992. Foram empregados agregados em condições estáveis de umidade, armazenados previamente dentro do laboratório. Como resultado obteve-se para 160 mm de abatimento do concreto sem aditivo o traço em massa de 1:2,5:3,5; $a/c=0,65$, com consumo de cimento de 310 kg/m^3 .

Durante a moldagem dos corpos-de-prova comprovou-se que o emprego do aditivo acelerador de endurecimento $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ também provoca, entre 10 e 15 minutos, após

da mistura, o enrijecimento da massa de concreto fresco, afetando as medições do abatimento (ver Anexo B).

Preparação das barras

As barras foram decapadas seguindo os procedimentos de limpeza química da ASTM G1-88:1989. Logo após foram pesadas. Posteriormente procedeu-se à preparação das barras até a pintura. O revestimento parcial com tinta bicomponente⁵², consiste em isolar a barra, limitando a área exposta. A tinta bicomponente utilizada é misturada imediatamente antes da aplicação. Depois de secas, as barras foram novamente pesadas. Por último elas foram marcadas com uma etiqueta com a denominação que define cada corpo-de-prova e o número de cada barra. Na Figura 28 mostra-se a seqüência de preparação das barras até a pintura.

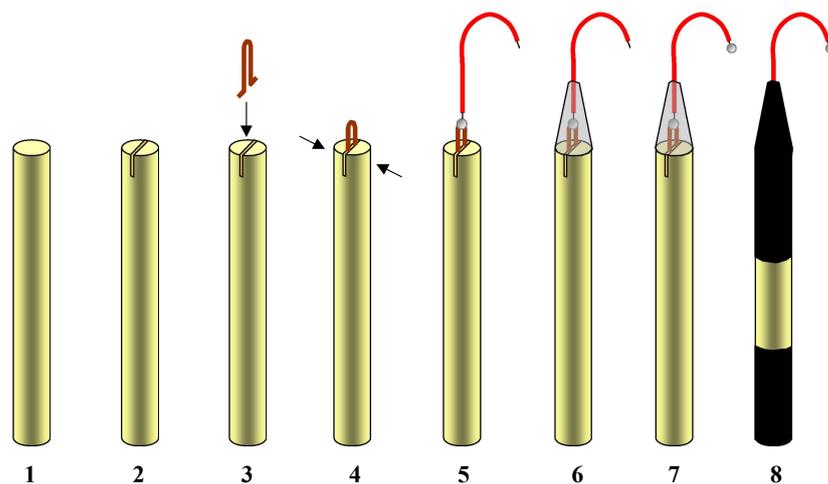


Figura 28. Preparação das barras: 1 – barra. 2 – abertura de fenda no extremo da barra. 3 – colocação do grampo de cobre em forma de “U” invertido. 4 – fixação do grampo a pressão. 5 – solda do fio elétrico. 6 – proteção do conexão elétrica com silicone sólido aplicado à quente. 7 – ponta do fio elétrico estanhada. 8 – a barra é pintada com tinta bicomponente definindo a área exposta à corrosão.

Moldagem dos corpos-de-prova de concreto simples e armado

Utilizaram-se fôrmas metálicas, especialmente desenhadas para cada corpo-de-prova, de fácil desmontagem e que garantissem a fixação correta das barras (ver Figura 29).

O concreto foi compactado com vibrador de imersão, tendo sua superfície acabada com colher de pedreiro. Após a moldagem os corpos-de-prova foram cobertos com manta de

⁵² Tinta SUMASTIC 14 da Sumaré. Tinta bicomponente, epóxi alcatrão de hulha alta espessura.

polietileno por 24 horas. Em cada betonada foram também moldados corpos-de-prova de concreto simples para a determinação da resistência à compressão aos 28 dias.

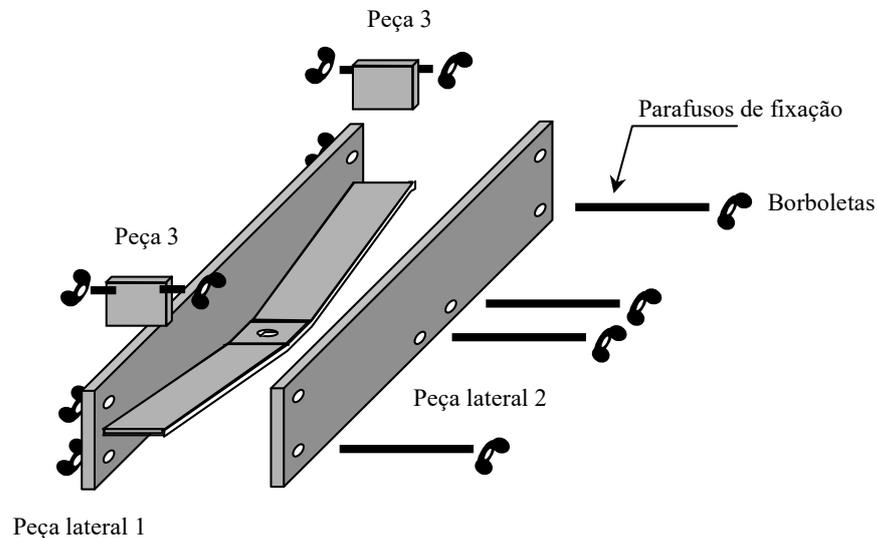


Figura 29. Fôrma metálica de uma das vigas dos corpos-de-prova tipo “T” de barras tracionadas.

Cura dos corpos-de-prova de concreto simples e armado

Os corpos-de-prova recém-moldados permaneceram nas fôrmas, cobertos com manta de polietileno durante as primeiras 24 horas. Logo depois foram colocados por 27 dias na câmara úmida ($UR = (95 \pm 5)\%$, $T = 27^{\circ}C$), completando 28 dias de cura.

Seleção dos corpos-de-prova de concreto armado

A quantidade total de corpos-de-prova produzidos foi superior à prevista no planejamento experimental. Isto permitiu selecionar os corpos-de-prova que participariam da pesquisa. Os corpos-de-prova não selecionados poderão ser utilizados em ensaios de longa duração. O critério de seleção escolhido foi, em ordem de importância: proximidade da resistência à compressão da moldagem à média calculada de todas as moldagens; ausência de defeitos no corpo-de-prova (fissuras ou ruptura do concreto durante a desforma, danos na barra ou perda do fio elétrico, riscos na pintura da barra, etc.).

3.4.4. Características dos corpos-de-prova utilizados nas avaliações eletroquímicas

Os corpos-de-prova da *Parte 1* da pesquisa correspondem às variáveis independentes para esta parte do trabalho, predefinidas no item 3.3.1 e representadas na Tabela 19.

Estuda-se o comportamento eletroquímico de barras relaxadas e barras tracionadas. Os corpos-de-prova das barras relaxadas são de tipo "R", e os das barras tracionadas de tipo "T". Corpos-de-prova de ensaios complementares são descritos a seguir. Os corpos-de-prova tipo "T" na realidade encontram-se submetidos a flexão e, por isso, o concreto de cobrimento das barras tracionadas pode apresentar fissuras próprias deste tipo de solicitação.

A nomenclatura dos corpos-de-prova da pesquisa reúne tanto as características dos materiais, como já foi mostrado na Tabela 22, como as condições de tensão das barras. Assim, a Tabela 23 mostra como foi elaborada a denominação utilizada para identificar os corpos-de-prova da pesquisa.

Corpos-de-prova tipo "R"

Corpo-de-prova prismático de dimensões 15x10x10 cm, armado longitudinalmente com 4 barras relaxadas. A conexão de um fio elétrico no extremo das barras permitiu as medições elétricas (ver Figura 30). Cada barra foi protegida com tinta incluindo a região da conexão do fio elétrico, deixando-se apenas 5 cm de barra expostos à corrosão.

Corpos-de-prova tipo "T"

Trata-se de duas vigas submetidas a flexão, cada uma armada com duas barras. As vigas são de seção variável, os apoios estão afastados 55 cm entre si. O esquema estrutural é de vigas isostáticas simplesmente apoiadas, com vão central de 55 cm. A seção variável de cada viga é de 5 cm de altura no apoio e 10 cm no meio, com comprimento total de 60 cm e largura constante de 10 cm. Estas vigas estão submetidas a uma carga pontual no centro do vão com ajuda de um parafuso. As tensões são praticamente constantes ao longo das barras (ver Figura 31), questão monitorada durante o carregamento com a ajuda de extensômetros elétricos de resistência, colados no meio e nos extremos das armaduras.

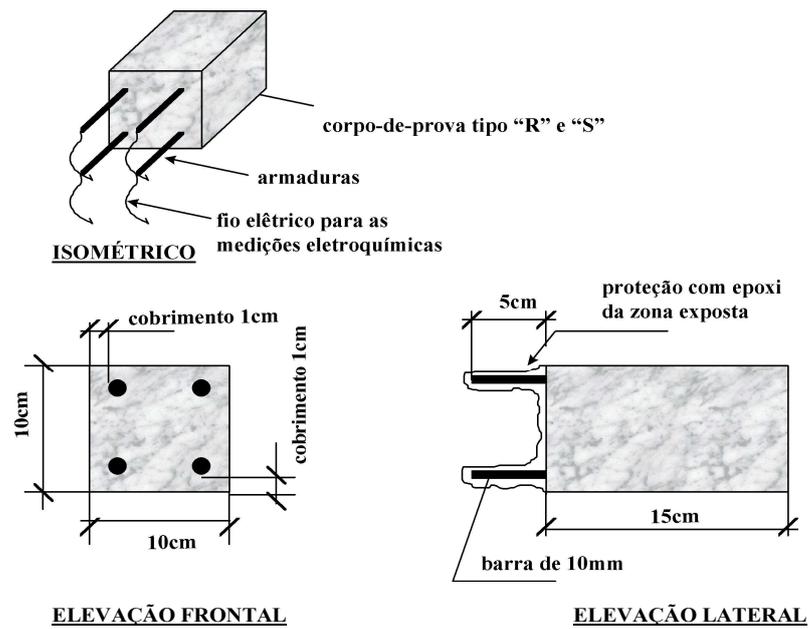


Figura 30. Detalhe do corpo-de-prova tipo "R"⁵³.

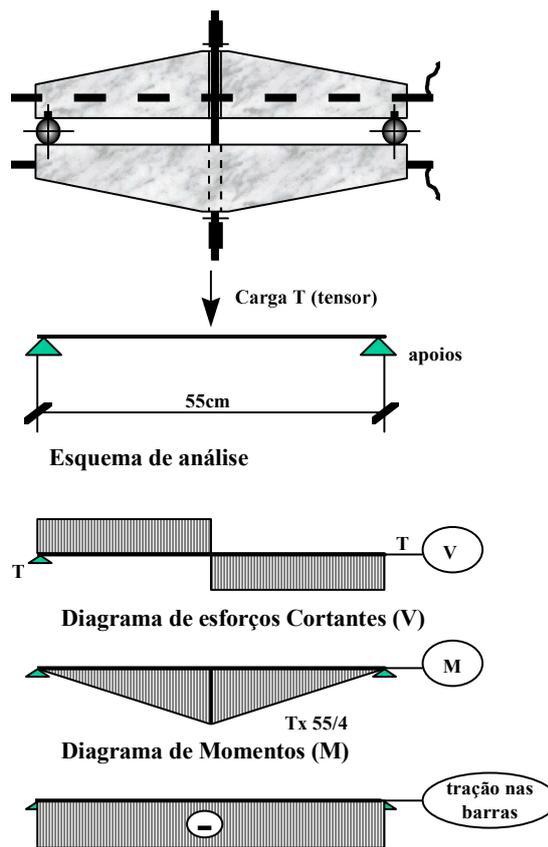


Figura 31. Esquema de análise do carregamento do corpo-de-prova tipo "T"

⁵³ Os corpos-de-prova tipo "S" são utilizados nos ensaios complementares. Ver item 0.

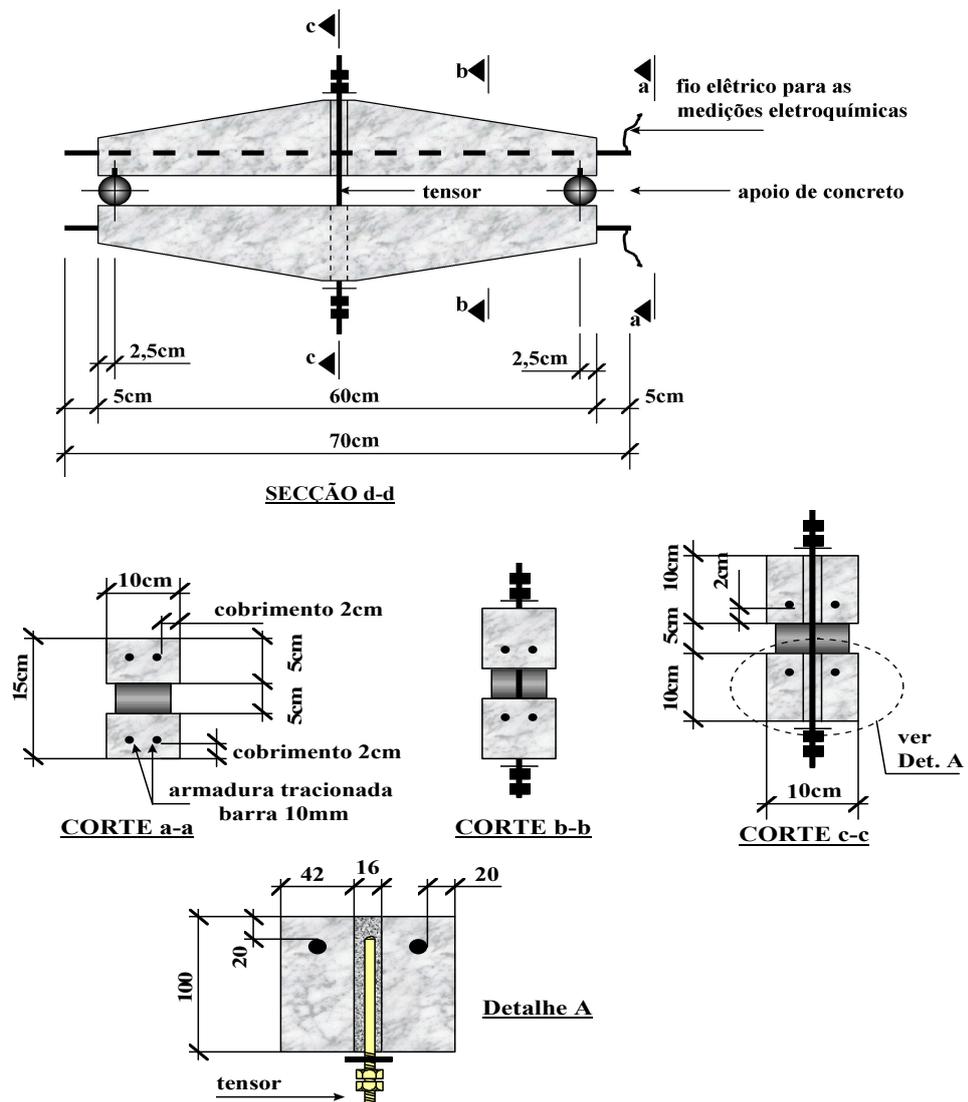


Figura 32. Seções e detalhes do corpo-de-prova tipo “T”.

O carregamento foi cuidadosamente controlado, levando-se as barras a uma condição de tensão entre 30% e 40% da resistência de escoamento determinada nos ensaios de caracterização⁵⁴. Em ensaios prévios na prensa foram determinadas as deformações equivalentes à condição de tensão procurada, tanto para as barras dos dois tipos de aço como para o parafuso-tensor, correlacionando-se estas deformações com as resistências medidas pelos extensômetros elétricos utilizados no monitoramento. No aperto do parafuso-tensor utilizou-se um torquímetro que agilizou as operações de carregamento.

A conexão de um fio elétrico nos extremos de cada barra permitiu as medições eletroquímicas (ver Figura 32). As barras foram protegidas com tinta, incluindo a região

⁵⁴ As resistência característica considerada são: 630 MPa para o 316L, e 750 MPa para CA50.

da conexão do fio elétrico, deixando-se apenas os 5 cm centrais da barra expostos à corrosão.

Corpos-de-prova dos ensaios potenciodinâmicos complementares

Corpos-de-prova tipo “D”

Corpo-de-prova prismático de dimensões 10x10x5 cm, armado no plano 10x10 cm com uma barra dobrada a 90° simulando um dos cantos de um estribo. A conexão de um fio elétrico nos extremos da barra permitiu as medições elétricas. O comprimento exposto da barra foi de 5 cm, o resto da barra foi protegida com a tinta de isolamento utilizada.

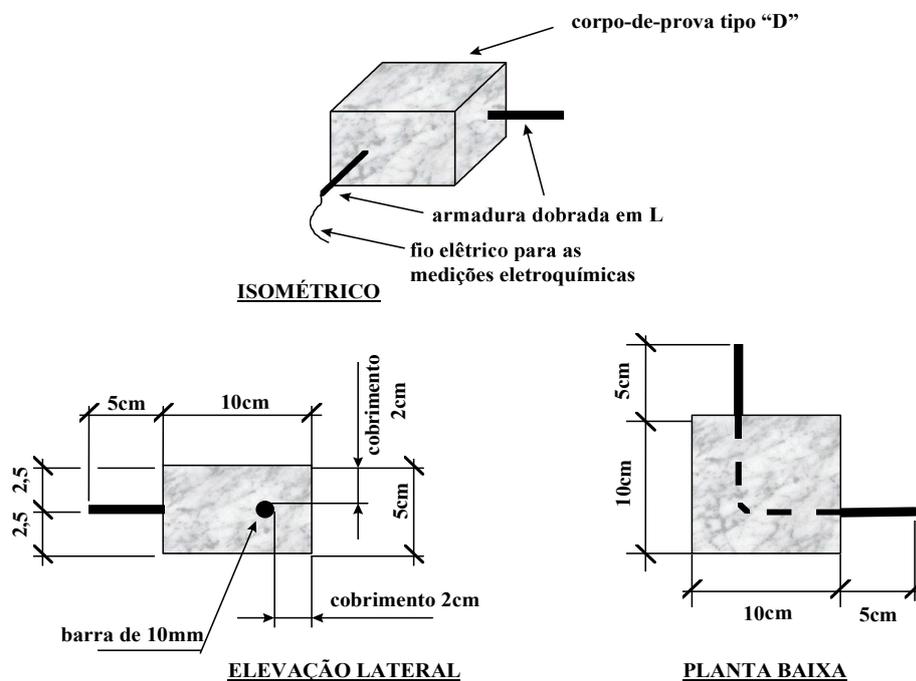


Figura 33. Corpo-de-prova tipo “D”.

Corpos-de-prova tipo “S”

Trata-se do mesmo corpo-de-prova tipo “R”, com barras que na sua área exposta possuem um ponto de solda. As barras de aço carbono foram soldadas com eletrodos convencionais e as barras de aço inoxidável soldadas com eletrodos especiais AWS E 316L-15⁵⁵.

⁵⁵ Eletrodo ALL-STATES® 316L-15 é um eletrodo a base de CrNiMo com baixo teor de carbono.

A Tabela 23 mostra a nomenclatura adotada para os corpos-de-prova dos ensaios potenciodinâmicos complementares, análoga a utilizada para os corpos-de-prova tipo "R" e "T".

Tabela 23. Nomenclatura dos corpos-de-prova da *Parte 1*. Corpos-de-prova principais e complementares.

Condição de tensão da barra Concreto e aço, segundo Tabela 22 ⇓	Relaxada	Tracionada	Dobrada	Soldada
0x	R0x	T0x	D0x	S0x
0n	R0n	T0n	D0n	S0n
04x	R04x	T04x	D04x	S04x
04n	R04n	T04n	D04n	--
1x	R1x	T1x	D1x	S1x
1n	R1n	T1n	D1n	S1n
5x	R5x	T5x	D5x	S5x
5n	R5n	T5n	D5n	--

3.4.5. Características dos corpos-de-prova utilizados nas avaliações físico-mecânicas

Corpo-de-prova tipo "A", dos ensaios de arrancamento

Cubo de dimensões 10x10x10 mm armado em seu eixo. O comprimento aderente da barra corresponde a metade do corpo-de-prova. A outra metade é isolada por meio de um tubo plástico com o objetivo de eliminar o efeito parasita decorrente da influência da zona perturbadora que se forma na região de apoio na máquina de ensaio (ver Figura 34).

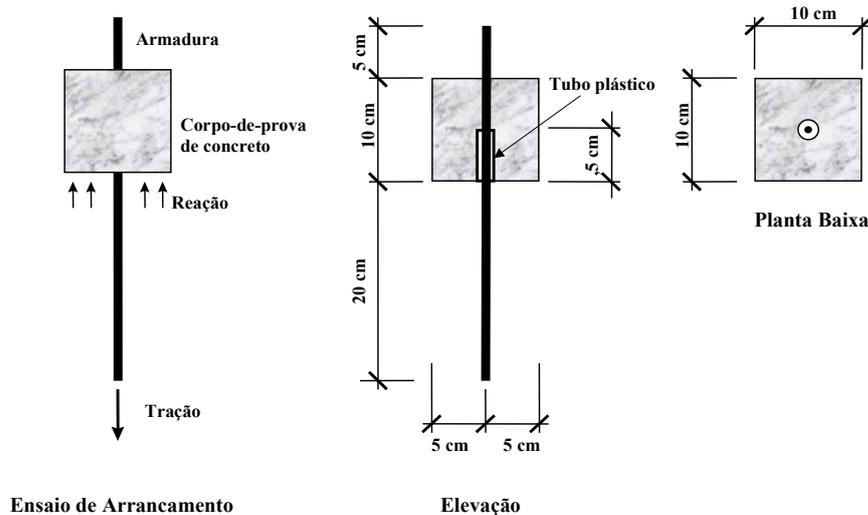


Figura 34. Corpos-de-prova tipo "A" do ensaio de arrancamento.

Um fio elétrico fixado ao extremo da barra serve de contato elétrico durante o ensaio de corrosão acelerada por corrente impressa.

Cada barra foi protegida com a tinta descrita (incluindo a região da conexão do fio elétrico), deixando somente 5 cm de barra expostos à corrosão na região em contato com o concreto.

Segundo os casos pesquisados (tipo de aço e de concreto) a denominação segue a Tabela 24. A denominação de cada corpo-de-prova em particular vai acompanhada de seu número. Por exemplo: A04n-3.

A caracterização do concreto fresco e endurecido dos corpos-de-prova tipo "A" são apresentadas também nas tabelas do Anexo B.

Corpo-de-prova tipo “B”, dos ensaios de resistência à tração

Prisma de concreto de 10 x 20 x 4 cm, armado com duas barras de 50 cm de comprimento, com cobertura de concreto de 1,5 cm. As barras foram pintadas com a tinta descrita no item 0 deixando somente 10 cm centrais expostos em contato com o concreto. Um fio elétrico fixado ao extremo da barra, servirá de contato elétrico durante o ensaio de corrosão acelerada por corrente impressa.

Segundo os casos pesquisados (tipo de aço e de concreto) a denominação segue a Tabela 24.

A caracterização do concreto fresco e endurecido dos corpos-de-prova tipo "B" apresenta-se também no Anexo B.

Tabela 24. Denominação dos tipos de corpos-de-prova "A" do ensaio de arrancamento e "B" do ensaio de resistência à tração.

Tipo de aço	Concreto	Denominação	
Aço inoxidável	c0	A0x	B0x
	c04	A04x	B04x
	c1	A1x	B1x
	c5	A5x	B5x
Aço carbono	c0	A0n	B0n
	c04	A04n	B04n
	c1	A1n	B1n
	c5	A5n	B5n

3.5. Ensaios de avaliação do comportamento eletroquímico

3.5.1. Ensaios relacionados com a termodinâmica da corrosão

Para avaliar as variáveis dependentes: Potencial eletroquímico (E_{corr}) e Potencial de pite (E_p) foram utilizadas as medições realizadas com o eletrodo simples de Cu/CuSO₄ e com eletrodo de calomelano saturado (SCE) conetado ao potenciostato. Foi avaliada também a umidade interna do concreto através da determinação do grau de umidade (GU).

3.5.2. Ensaios relacionados com a cinética da corrosão

Ensaios potenciodinâmicos

Nesta pesquisa os trabalhos de levantamento de curvas de polarização foram conduzidos em três etapas segundo se apresentam na Tabela 25. A mudança dos potenciostatos empregados na primeira etapa, em relação à segunda e terceira etapas, deveu-se à modernização do laboratório de corrosão, o que por um lado permitiu contar com aparelhos mais sofisticados e por outro permitiu reduzir os prazos de execução dos ensaios, que puderam ser realizados em paralelo em dois potenciostatos ao mesmo tempo.

Tabela 25. Condições de ensaio adotadas nas diferentes etapas da realização dos ensaios potenciodinâmicos

	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Idade dos corpos-de-prova	29-48 semanas	48-60 semanas	58-60 semanas
Condição de exposição	Imersão parcial	Imersão parcial	Câmara úmida
Grau de umidade	86%	86%	97%
Temperatura do ensaio	20° a 22°	20° a 22°	20° a 22°
Potenciostato utilizado	263A	273 e 283	273 e 283
Velocidade de varredura	0,5 mV/s	0,25 mV/s	0,25 mV/s
Potencial de início da curva	-250 mV em relação à E_{ca}	-0 mV em relação à E_{ca}	-0 mV em relação à E_{ca}
Potencial de fim da curva	+800 mV	+800 mV	+800 mV
Eletrodo de referência	SCE	SCE	SCE
Estabilização prévia do E_{ca}	sim	sim	sim

E_{ca} - Potencial de circuito aberto. Potencial eletroquímico da barra ao ser ligada no potenciostato

Da experiência adquirida na primeira etapa, adotou-se para as duas seguintes uma velocidade de varredura menor e a polarização exclusivamente anódica (levantamento só da rama anódica). As curvas de polarização levantadas na terceira etapa, em corpos-de-prova com GU de 97%, formaram parte dos ensaios potenciodinâmicos complementares, comentados no item 3.2.1.

Em todas as etapas adotou-se como condição de início do ensaio a estabilização do potencial de circuito aberto (E_{ca}). O grau de umidade (GU) foi mantido cobrindo-se com panos úmidos os corpos-de-prova. Antes da conexão ao potenciostato os corpos-de-prova foram mantidos durante uma hora expostos ao ambiente do local dos ensaios ($T = 22^{\circ}\text{C}$, $UR = 85\%$), para estabilização da temperatura, muitas vezes diferente à temperatura de exposição em imersão parcial ou câmara úmida. Seguindo este procedimento, conseguiu-se reduzir o tempo necessário para a estabilização de E_{ca} já com o potenciostato ligado.

As curvas levantadas na primeira etapa iniciando em -250 mV abaixo do potencial estabilizado E_{ca} polarizaram catodicamente as barras testadas⁵⁶, resultando em valores maiores de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) (ver Figura 35). Este fato é aproveitado no sentido de que impõe um estado de corrosão pior aos corpos-de-prova. As curvas da primeira etapa foram de muita utilidade para a obtenção das curvas de polarização média porque permitem avaliar potenciais eletroquímicos menores do que a média calculada entre os E_{ca} das barras testadas nesta etapa. Para o cálculo da curva média não foram consideradas as ramas catódicas obtidas nos ensaios da primeira etapa.

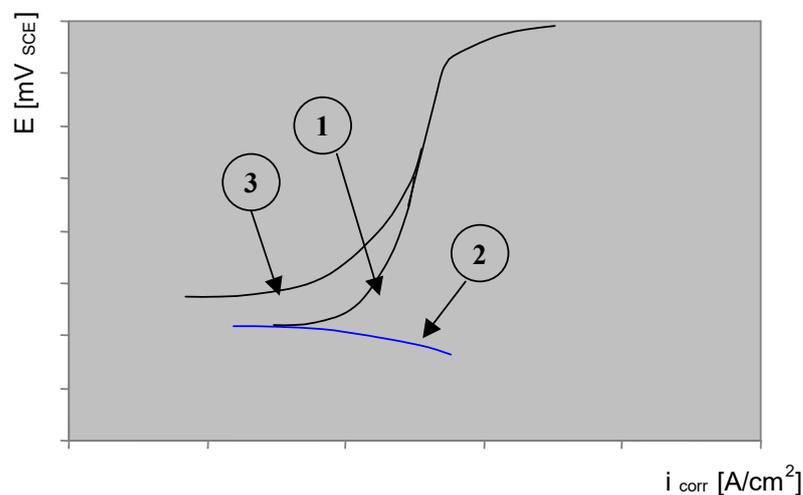


Figura 35. Polarização catódica ao iniciar o ensaio em -250 mV em relação ao E_{ca} . 1- Curva de polarização com rama catódica (levantada na primeira etapa); 2 – Em azul, rama catódica da curva; 3 – Possível curva de polarização da mesma barra quando o início for em 0 mV em relação ao E_{ca} (curva da segunda etapa).

Nas segunda e terceira etapas com início em E_{ca} procurou-se determinar o valor de i_{corr} , correspondente à condição dos ensaios acelerados (imersão parcial ou exposição em

⁵⁶ O potencial de viragem da rama catódica em anódica (potencial de corrente zero $E(I=0)$) é menor que E_{ca}

câmara úmida). De qualquer modo este valor está afetado pelo próprio ensaio potenciodinâmico, que é um ensaio acelerado, e pode resultar em valores de i_{corr} um tanto maiores do que o real.

Para se tentar esclarecer o mecanismo de controle da velocidade de corrosão durante os ensaios da primeira etapa se por concentração de produtos de corrosão na região anódica (caso de corrosão ativa) ou por problemas de acesso de oxigênio para a formação da película de passivação (caso de passivação) escolheu-se para as segunda e terceira etapas uma velocidade de varredura duas vezes menor.

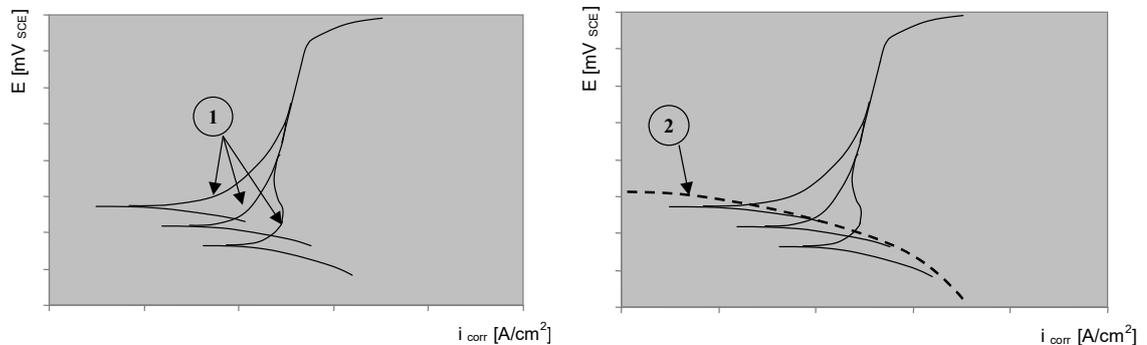
Na terceira etapa, com uma maior saturação dos poros do concreto, pretendeu-se verificar a influência da falta de oxigênio para o desenvolvimento das reações catódicas em barras ativas, reações necessariamente em equilíbrio com as anódicas. Menos oxigênio significa para o aço carbono maiores dificuldades para o desenvolvimento das reações catódicas. Com isto, a densidade de corrente de corrosão diminui se comparada a igual polarização em condições mais oxigenadas. Por sua vez, o aço inoxidável precisa de uma quantidade mínima de oxigênio para formar, manter e repor a película de passivação de óxido de cromo. Em condições de maior grau de umidade (GU) a densidade de corrente de corrosão do aço inoxidável pode aumentar pela perda da proteção desta película, comportando-se a partir deste momento da mesma forma que o aço carbono (controle pela velocidade da reação catódica de redução de oxigênio).

Determinação da perda gravimétrica

Os procedimentos gravimétricos são quantitativos e permitem a obtenção da densidade de corrente de corrosão. O método é normalizado pela ASTM G 1-88:1989 e utiliza para a limpeza do aço carbono, entre outras opções, uma solução à base de ácido clorídrico diluído e hexametileno tetramina para remover os produtos da superfície metálica do aço carbono e uma solução de ácido nítrico a 60⁰C para o aço inoxidável.

Todas as barras utilizadas na pesquisa foram pesadas antes e depois de serem pintadas. A perda de massa foi uma determinação muito importante para estabelecer o grau de corrosão real dos corpos-de-prova submetidos a corrente impressa, utilizados nos ensaios da **Parte 2** da pesquisa. No caso dos ensaios de longa duração que poderão ser continuados com os corpos-de-prova não selecionados para o presente estudo, o registro

das massas iniciais é de grande importância para estabelecer-se as densidades de corrente de corrosão gravimétricas.



Observação visual

No presente trabalho foi realizada a observação visual para todas as barras, com observações ao microscópio principalmente das barras dos ensaios potenciodinâmicos que apresentaram curvas típicas de formação de pites. Nas barras corroídas por corrente impressa, a observação da intensidade do ataque, pior nos corpos-de-prova com maior conteúdo de cloreto, permitiu validar as determinações gravimétricas.

3.6. Ensaios de avaliação do comportamento físico-mecânico

Utilizou-se um aparelho de aquisição de dados, ligado a um micro computador. O aparelho permitiu coletar 1,5 leitura por segundo. A cada 30-40 ensaios é calibrado o LVDT, determinado o trecho de leituras em que se obtém a correlação lineal com a tensão de saída, e definindo-se a função de ajuste para converter os sinais de tensão para deslocamento em milímetros. No mesmo momento é calibrada a prensa para checar que se mantém a mesma relação de carga em toneladas com a tensão de saída lida pelo aparelho de aquisição de dados. Outros cuidados foram tomados quanto o posicionamento do LVDT. Mesmo assim, alguns corpos-de-prova não apresentaram gráficos característicos, e foram rejeitados.

3.6.1. Ensaios de arrancamento

Os corpos-de-prova foram ensaiados depois de pelo menos 28 dias de secagem natural em condições de laboratório ($T = 22^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} > 70\%$).

Durante os ensaios foram registrados:

- As curvas **resistência de aderência versus deslizamento**. A tensão de aderência é calculada pela expressão (2).
- Os valores de τ_{b10} , τ_{b100} , τ_{b1000} , para o cálculo de τ_{bm} utilizando a expressão (3).
- Os valores de τ_{bu} (tensão última), S_u (deslizamento em τ_{bu}).

3.6.2. Ensaio de resistência à tração

Os ensaios foram realizados em barras sem e com corrosão. As barras foram corroídas em ensaios acelerados por corrente impressa, iguais aos empregados para avaliar a aderência com a corrosão (ver Anexo D).

Com ajuda de um aparelho de aquisição de dados foram levantadas as curvas de **carga versus alongamento**. Das curvas foram extraídos os valores da carga no escoamento e na ruptura para cálculo das tensões que foram utilizadas na análise.

Capítulo 4. RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios das *Partes 1 e 2* da pesquisa.

4.1. Parte 1. Comportamento eletroquímico.

4.1.1. Medições de potencial eletroquímico

Pela idade do concreto dos corpos-de-prova da pesquisa, que não superou 65 semanas, pode-se considerá-lo jovem não carbonatado. Porém, a contaminação com cloreto adicionado à massa em diferentes teores e o grau de umidade (GU) de 86% acelerou o envelhecimento, modelando um ambiente severo com presença de cloretos. O comportamento do potencial eletroquímico (E_{corr}) nas primeiras idades é mostrado na Figura 36 e na Figura 37 no exemplo das barras relaxadas de aço carbono e aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto. No caso das barras relaxadas, estudadas desde as primeiras 7 semanas, pode-se observar com maior clareza o comportamento do potencial nas primeiras idades. Suspeita-se que os corpos-de-prova sem cloreto dos tipos “R0” e “T0” possam ter sofrido alguma contaminação ao longo do tempo de imersão parcial na mesma água dos corpos-de-prova de concretos com cloreto.

Da Tabela C. 1 a Tabela C. 4 do Anexo C apresentam-se todas as medições de E_{corr} realizadas em barras relaxadas e tracionadas.

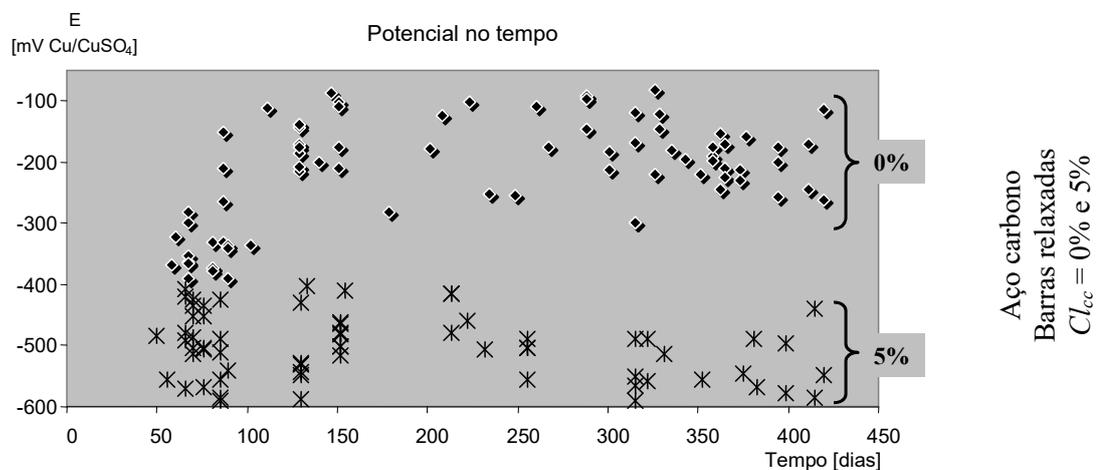


Figura 36. E_{corr} versus tempo no exemplo das barras relaxadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.

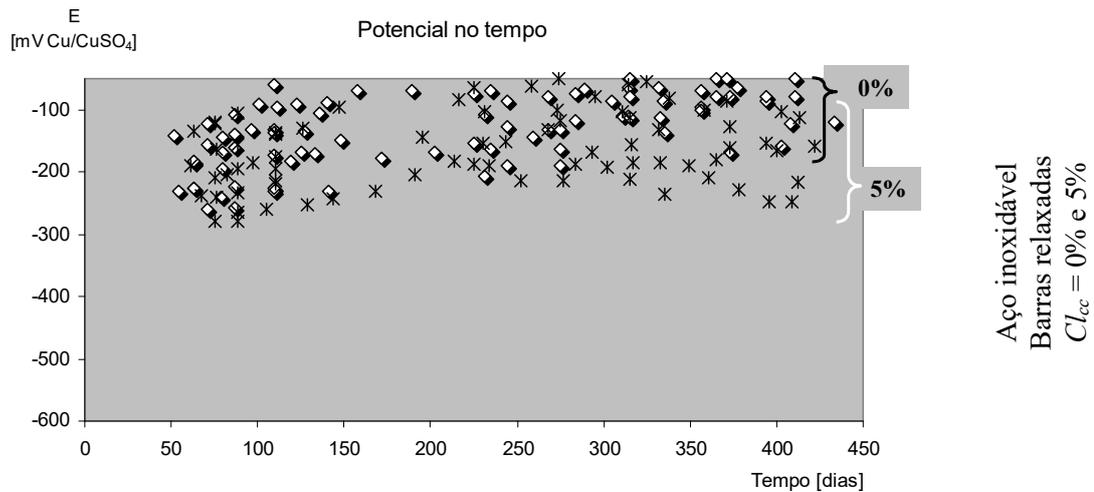


Figura 37. E_{corr} versus tempo no exemplo das barras relaxadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.

A Tabela 26 mostra a idade média em que foram realizadas as medições de E_{corr} nos corpos-de-prova principais de barras relaxadas e tracionadas. Para a medida do E_{corr} empregou-se principalmente o eletrodo de Cu/CuSO₄, mas também aproveitaram-se as medidas com eletrodo de calomelano saturado (SCE), realizadas antes de iniciar cada curva de polarização⁵⁷.

A relação de conversão utilizada foi: $E_{Cu/CuSO_4} = E_{SCE} - 59,5 \text{ mV}$.

Tabela 26. Idade e quantidade de medições de E_{corr} .

Tipo de aço	Corpo-de-prova	Idade [semanas]	medições por cada teor de cloreto
Aço carbono	R	8 - 60	80
	T	17 - 67	45
Aço inoxidável	R	8 - 62	90
	T	13 - 52	55

A Tabela 27 apresenta os valores médios de potencial de corrosão (E_{corr}^m). No cálculo de E_{corr}^m das barras relaxadas foram consideradas apenas as medidas a partir da semana 32, quando observou-se uma certa estabilização do potencial.

Tabela 27. Potenciais de corrosão médios E_{corr}^m [mV_{SCE}] (desvio padrão médio de 73 mV).

Tipo de aço	Estado da barra	Cl_{cc} [%]			
		0	0,4	1	5
Aço carbono	Relaxada	-183	-226	-385	-564
	Tracionada	-227	-275	-355	-415
Aço inoxidável	Relaxada	-98	-90	-102	-140
	Tracionada	-140	-165	-167	-208

⁵⁷ Indica-se sempre em subscripto o eletrodo de referência.

Ainda nas barras de aço inoxidável com leituras mais baixas de potencial eletroquímico (-370 mV_{SCE}) não foram observados pites, o que indica que o potencial de formação de pite poderá ser menor que esse valor.

4.1.2. Ensaios potenciodinâmicos

A Tabela 28 apresenta a idade média dos corpos-de-prova utilizados e a quantidade de curvas levantadas para cada caso de estudo durante a primeira e a segunda etapa, com corpos-de-prova em imersão parcial ($GU = 86\%$). No Anexo C (Tabela C. 6) apresentam-se os resultados obtidos do programa *ParCalc* que acompanha o potenciostato e que permitiu processar quantitativamente as curvas levantadas nas três etapas programadas para os ensaios potenciodinâmicos. Todas as curvas foram processadas pelo programa.

Tabela 28. Idade média dos corpos-de-prova utilizados e quantidade de ensaios potenciodinâmicos.

Tipo de aço	Estado da barra	Idade [semanas]		Quantidade de ensaios	
		do total das curvas	das curvas calculadas	do total das curvas	das curvas calculadas
Aço carbono	Relaxada	35 - 60	37 - 60	12	9
	Tracionada	40 - 60	41 - 60	12	10
Aço inoxidável	Relaxada	35 - 60	37 - 60	12	9
	Tracionada	38 - 55	38 - 54	12	9

A Figura 38 e a Figura 39 apresentam os resultados das densidades de corrente de corrosão calculadas (pelo programa) das curvas de polarização individuais. As linhas traçadas no gráfico unem os valores médios calculados (i_{corr}^{mc}) para cada caso de estudo, valores apresentados na Tabela 29.

Tabela 29. Densidades de corrente de corrosão médias calculadas pelo programa *ParCalc* - i_{corr}^{mc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Tipo de aço	Estado da barra	Cl_{cc} [%]			
		0	0,4	1	5
Aço carbono	Relaxada	0,041	0,047	0,511	14,512
	Tracionada	0,803	0,907	2,066	5,189
Aço inoxidável	Relaxada	0,015	0,031	0,020	0,010
	Tracionada	0,179	0,083	0,219	0,085

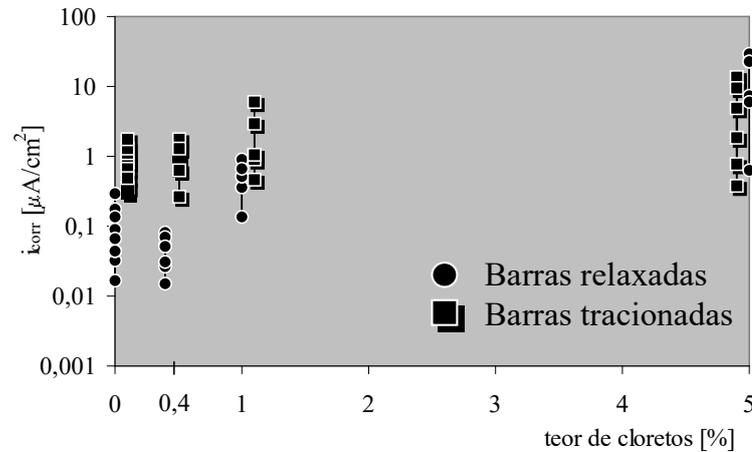


Figura 38. i_{corr} das barras de aço carbono calculadas pelo programa *ParCalc*. Estão representados os valores obtidos em barras relaxadas e em tracionadas.

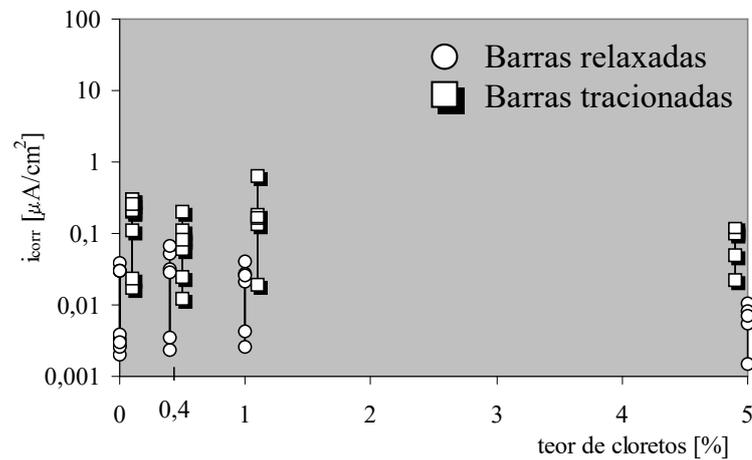


Figura 39. i_{corr} das barras de aço inoxidável calculadas pelo programa *ParCalc*. Estão representados os valores obtidos em barras relaxadas e em tracionadas.

Ensaio potenciodinâmicos complementares

Da Figura 40 à Figura 43 apresentam-se de forma resumida os resultados dos ensaios potenciodinâmicos complementares, com os corpos-de-prova colocados na câmara úmida ($GU = 97\%$) e os corpos-de-prova de armaduras dobradas e soldadas descritos no item 3.4.4.

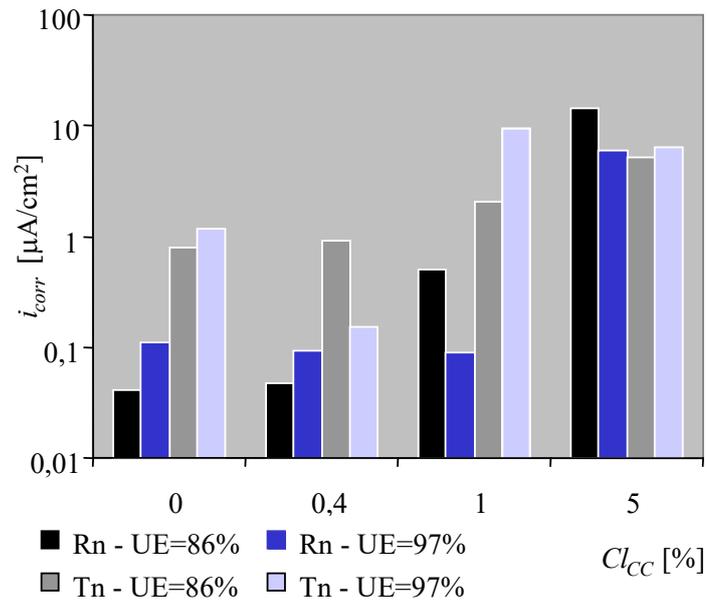


Figura 40. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloretos em relação à massa de cimento com $GU = 86\%$ (imersão parcial) e 97% (câmara úmida).

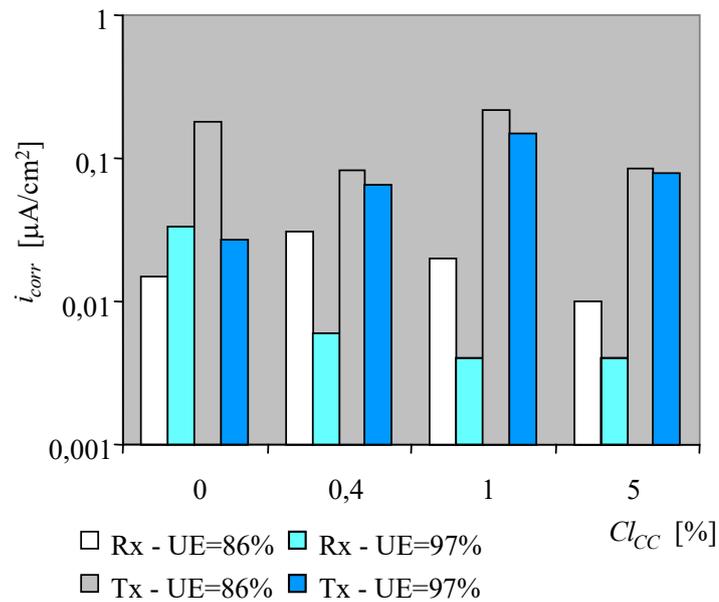


Figura 41. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloretos em relação à massa de cimento com $GU = 86\%$ (imersão parcial) e 97% (câmara úmida).

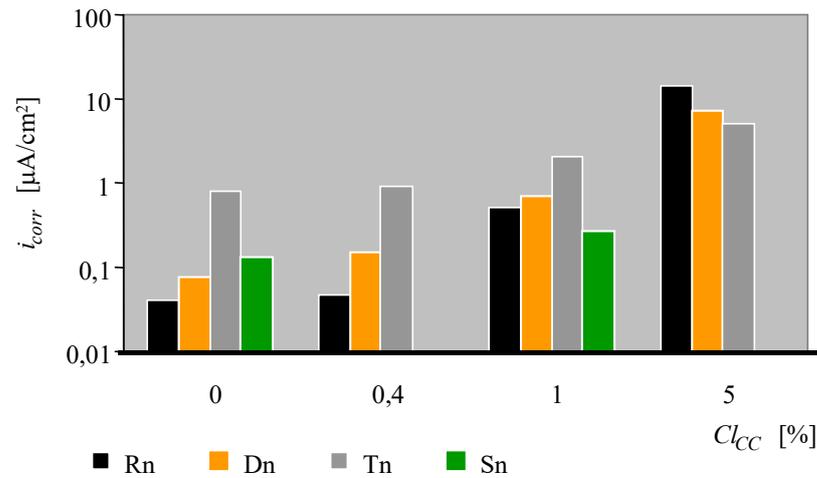


Figura 42. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloretos. Barras relaxadas (Rn), barras dobradas (Dn), barras tracionadas (Tn) e barras soldadas (Sn).

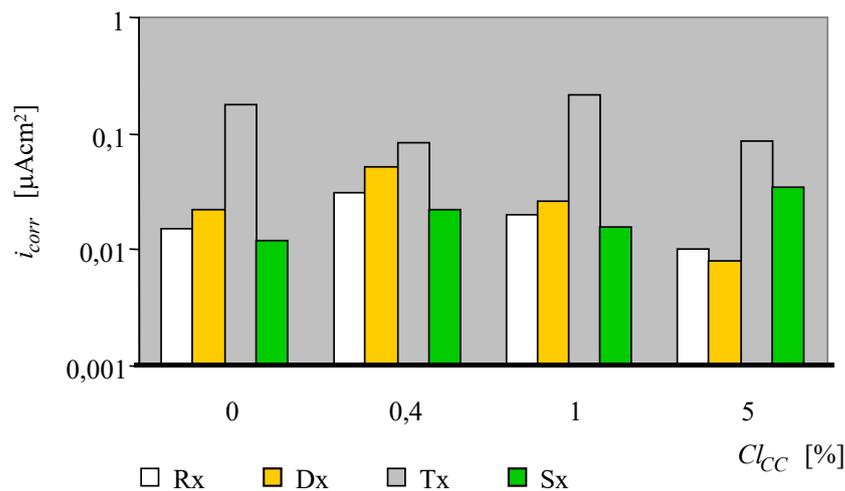


Figura 43. Diagrama comparativo das i_{corr}^{mc} de barras de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloretos. Barras relaxadas (Rx), barras dobradas (Dx), barras tracionadas (Tx) e barras soldadas (Sx).

4.2. Parte 2. Comportamento físico-mecânico

4.2.1. Ensaios de Arrancamento

Na Tabela D. 1 e na Tabela D. 3 do Anexo D apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento. Na Tabela 30 apresenta-se a quantidade de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de arrancamento. Alguns corpos-de-prova apresentaram problemas durante os ensaios provocando a ruptura do concreto, ou em menor escala, a ruptura da barra (FARIELLO e TULA, 1998). Para a caracterização inicial da aderência concreto/armadura utilizaram-se as determinações em corpos-de-prova de concreto

jovem com barras não corroídas. A Tabela 31 apresenta os valores médios determinados pelo ensaio de arrancamento e na Figura 44 mostram-se os diagramas médios de **tensão de aderência versus deslizamento** das barras estudadas não corroídas de aço carbono e de aço inoxidável. Informações mais detalhadas dos resultados dos ensaios encontram-se nas tabelas: Tabela D. 1, Tabela D. 2 e Tabela D. 3 do Anexo D.

Tabela 30. Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios de arrancamento utilizados para a determinação do comportamento da aderência com a corrosão.

Tipo de aço	Tempo de corrente impressa de 50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				
	0 dias	3 dias	6 dias	12 dias	20 dias
Aço carbono	8	10	12	--	6
Aço inoxidável	9	10	12	--	5

Tabela 31. Aderência pelo ensaio de arrancamento de barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável. τ_{br} - resistência de aderência à ruptura; τ_{bm} - resistência de aderência média; Δr - deslizamento médio à ruptura; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.

Tipo de aço	τ_{br} [MPa]	$Sd(\tau_{br})$	τ_{bm} [MPa]	$Sd(\tau_{bm})$	Δr [mm]	$Sd(\Delta r)$
Aço carbono	20,62	4,22	13,20	2,03	1,00	0,15
Aço inoxidável	17,45	4,24	8,45	1,82	1,75	0,30

Diagramas médios dos ensaios de arrancamento.
Barras sem corrosão

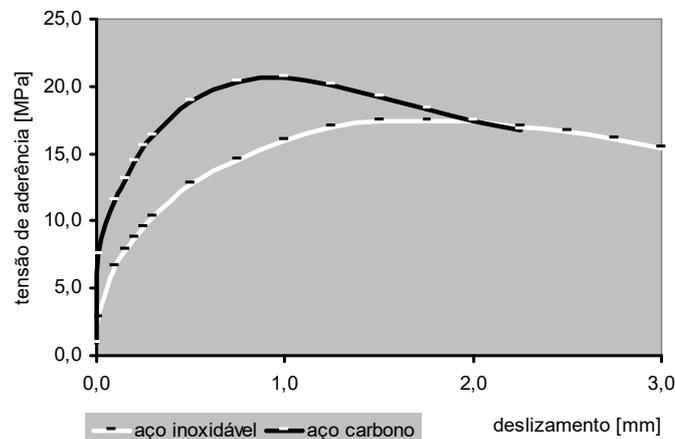


Figura 44. Diagramas médios **tensão de aderência versus deslizamento** das barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável.

Na Figura 45 e na Figura 46 mostram-se os diagramas médios de **tensão de aderência versus deslizamento** que caracterizam os graus de corrosão (perda de massa) para cada tempo de corrente impressa utilizada no experimento.

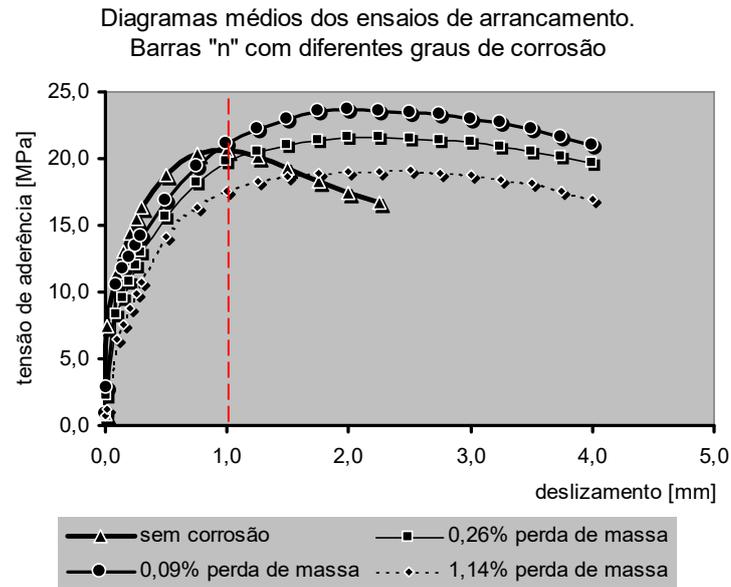


Figura 45. Diagramas médios de **tensão de aderência versus deslizamento** do ensaio de arrancamento das barras de aço carbono com o avanço da corrosão.

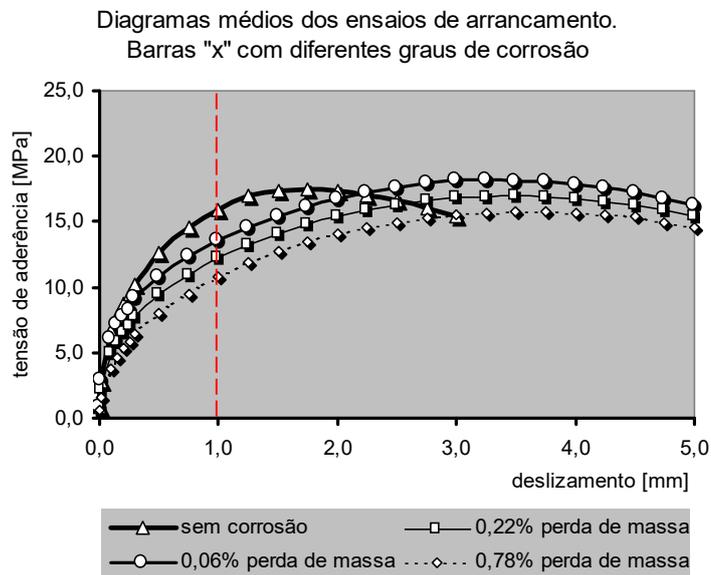


Figura 46. Diagramas médios de **tensão de aderência versus deslizamento** do ensaio de arrancamento das barras de aço inoxidável com o avanço da corrosão.

Tabela 32. Aderência pelo ensaio de arrancamento de barras corroídas de aço carbono e aço inoxidável. C.I. - corrente impressa; α - perda de massa real; τ_{br} - resistência de aderência à ruptura; τ_{bm} - resistência de aderência média; Δr - deslizamento médio à ruptura; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.

Tipo de aço	Tempo de C.I. [dias]	α [%]	τ_{br} [MPa]	$Sd(\tau_{br})$ [MPa]	τ_{bm} [MPa]	$Sd(\tau_{bm})$ [MPa]	Δr [mm]	$Sd(\Delta r)$ [mm]
Aço carbono	3	0,09	23,62	3,61	11,76	1,51	2,00	0,37
	6	0,26	21,59	4,54	11,3	2,24	2,25	0,43
	20	1,14	19,11	2,99	10,06	1,4	2,5	0,26
Aço inoxidável	3	0,06	18,0	2,73	7,53	1,77	3,25	0,30
	6	0,22	16,5	2,8	5,94	0,78	3,70	0,19
	20	0,78	15,3	1,16	5,88	0,89	3,71	0,25

4.2.2. Ensaios de resistência à tração

Na Tabela E. 2 do Anexo E apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de tração. Na Tabela 33 apresenta-se a quantidade de corpos-de-prova utilizados nas determinações gráficas e quantitativas do comportamento da resistência à tração com o avanço da corrosão. Não foi possível a obtenção do gráfico de tensão deformação de todos os corpos-de-prova ensaiados. Nestes casos foi aproveitado apenas o valor da carga de ruptura (LAMARCA e TULA, 1998).

Tabela 33. Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios de tração utilizados para a determinação do comportamento da resistência à tração com a corrosão.

Tipo de aço	Tempo de corrente impressa de 50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				
	0 dias	3 dias	6 dias	12 dias	20 dias
Aço carbono	9	12	16	16	16
Aço inoxidável	10	--	16	16	14

Para a caracterização inicial da resistência à tração das armaduras (conforme o diâmetro real) utilizaram-se as determinações com barras não corroídas. A Tabela 33 apresenta os valores médios determinados e na Figura 47 mostram-se os diagramas médios de **tensão versus alongamento** das barras estudadas não corroídas de aço carbono e de aço inoxidável.

Tabela 34. Resistência à tração de barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável. f_{st} - limite médio de resistência; f_{ym} - resistência média de escoamento; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas. (considerando o diâmetro real da barra)

Tipo de aço	f_{ym} [MPa]	$Sd(f_{st})$	f_{st} [MPa]	$Sd(f_y)$
Aço carbono	658,80	52,26	749,14	14,50
Aço inoxidável	740,34	25,84	858,71	20,98

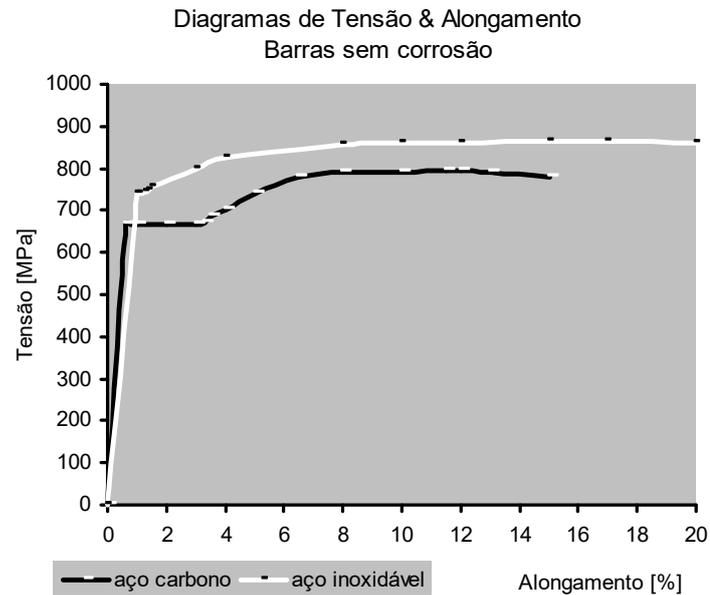


Figura 47. Diagramas médios "tensão x alongamento" das barras não corroídas de aço carbono e aço inoxidável.

Os valores médios de resistência à tração e o desvio padrão calculados para cada condição de corrente impressa relacionados com a perda de massa média mostram-se na Tabela 35. A resistência de escoamento foi determinada graficamente a partir de cada diagrama obtido. Na Figura 48 e Figura 49 mostram-se os diagramas médios de **tensão de tração versus alongamento** que caracterizam os graus de corrosão (perda de massa) de cada condição de corrente impressa utilizada no experimento.

Tabela 35. Resistência à tração de barras corroídas de aço carbono e aço inoxidável. C.I. - corrente impressa; α - perda de massa real; f_{st} - limite de resistência médio; f_{ym} - resistência de escoamento média; $Sd(_)$ - desvio padrão das médias calculadas.

Tipo de aço	Tempo de C.I. [dias]	α [%]	f_{st} [MPa]	$Sd(f_{st})$	f_{ym} [MPa]	$Sd(f_y)$
Aço carbono	3	0,11	748,89	23,18	612,41	18,63
	6	0,29	663,89	50,29	573,96	31,40
	12	0,54	627,67	50,59	537,36	23,62
	20	1,19	607,48	22,86	529,26	31,17
Aço inoxidável	6	0,24	839,80	14,83	726,45	15,37
	12	0,38	820,44	20,38	708,20	20,78
	20	0,80	806,84	15,79	691,86	14,61

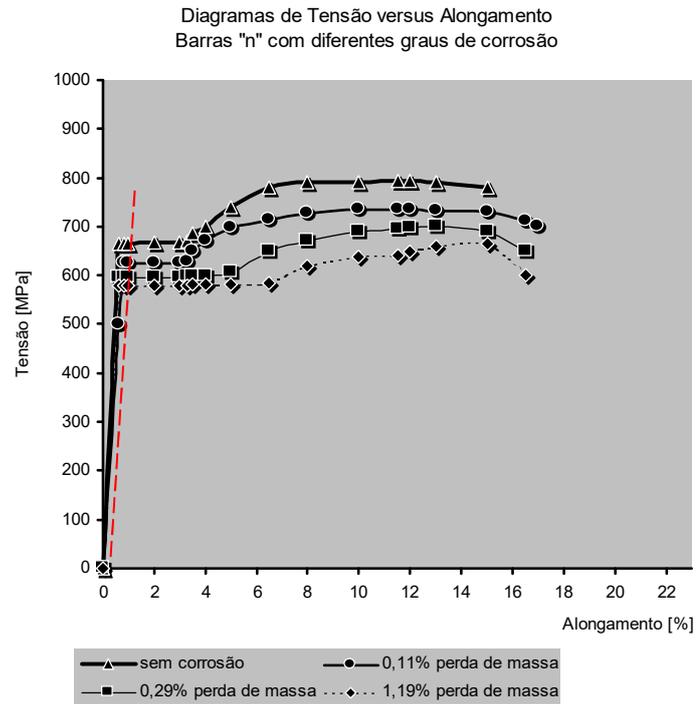


Figura 48. Diagramas médios de **tensão versus alongamento** das barras de aço carbono com o avanço da corrosão.

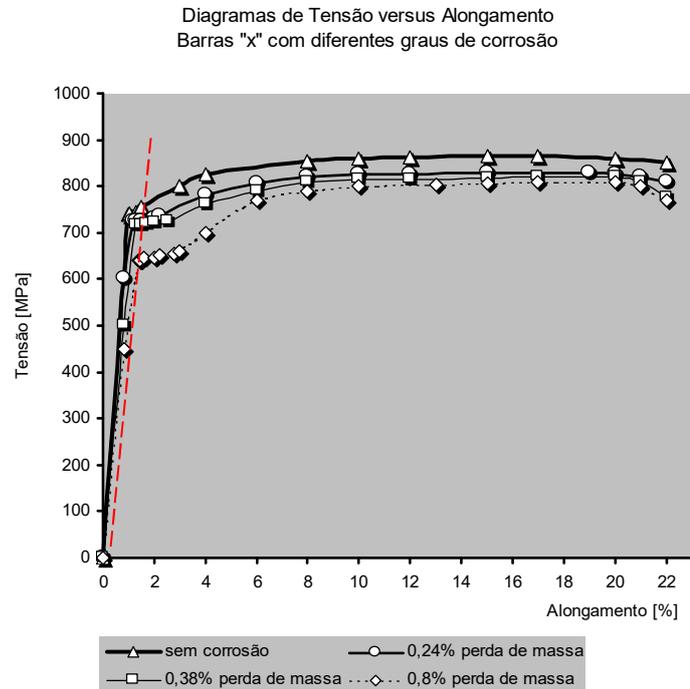


Figura 49. Diagramas médios de **tensão versus alongamento** das barras de aço inoxidável com o avanço da corrosão.

4.3. Resultados da observação visual e da perda de massa sobre as barras da pesquisa

A observação visual e a perda de massa foram utilizadas ao longo de toda a pesquisa como ferramentas indispensáveis na interpretação dos resultados dos diferentes ensaios executados. De certa forma, os resultados já comentados correspondentes às partes *1*, *2* e *3* da pesquisa estão baseados ou justificados nas observações visuais e na perda de massa. Algumas questões mais específicas são comentadas a seguir.

4.3.1. Observação visual

- Não observou-se formação de pite de maneira espontânea nas armaduras inoxidáveis dos corpos-de-prova com até 5% de cloreto (Cl_{cc}) submetidos a imersão parcial por 65 semanas (*Parte 1* da pesquisa). Armaduras de aço carbono com 1% e 5% de cloreto apresentaram ataque em 5% a 10% da sua superfície, sempre maior nas barras tracionadas.
- Observou-se a formação de pite (um pite) em três barras inoxidáveis submetidas a ensaio potenciodinâmico, coincidente com a obtenção de curvas de polarização típicas deste evento. Os casos foram: uma barra do tipo R5x (relaxada em 5% de cloreto), uma barra T1x (tracionada em 1% de cloreto), e uma T5x (tracionada em 5% de cloreto).
- Em barras inoxidáveis submetidas a corrente impressa observou-se a formação de pites, que aumentam em número, profundidade e diâmetro com o aumento da quantidade de carga eletroquímica transferida (c_{corr}). Em barras de aço carbono observa-se, a olho nu, corrosão generalizada em locais cuja área aumenta com o aumento da quantidade de carga eletroquímica transferida. No microscópio observa-se a irregularidade da superfície corroída do aço carbono com pontos de ataque mais profundos parecidos com pites.
- Os pites formados por corrente impressa nas barras de aço inoxidável são hemisféricos (PANOSSIAN, 1993), com uma relação diâmetro/profundidade entre 1 e 2. Os pites observados nas barras de aço carbono são irregulares ou fechados

(PANOSSIAN, 1993) com aproximadamente a mesma relação diâmetro/profundidade (ver Figura 84 da página 138).

- Os pites formados por corrente impressa no aço inoxidável são maiores do que os que aparecem no aço carbono. No aço carbono os pites e micropites, muito próximos uns dos outros, ao crescerem vão conformando o panorama típico da corrosão generalizada.

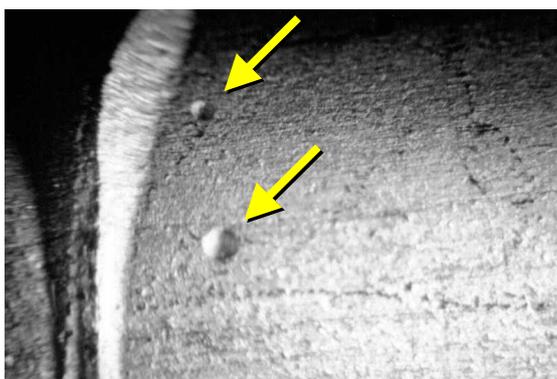


Figura 50. Fotografia ao microscópio (20x). Superfície de barra de aço inoxidável com pites.

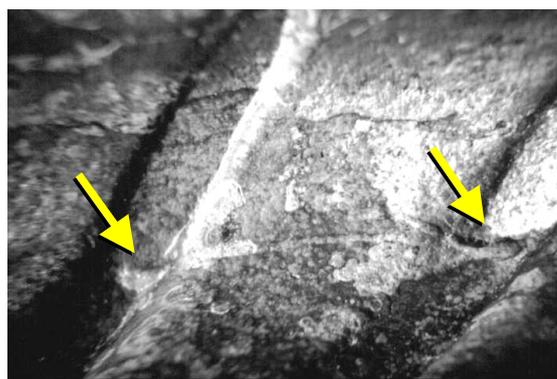


Figura 51. Fotografia ao microscópio (20x). Superfície de barra de aço carbono com ataque localizado e alguns pites.

- A ruptura das barras no ensaio de resistência à tração acontece sempre em seções corroídas do aço carbono ou nos pites do aço inoxidável.

4.3.2. Perda de massa

A perda de massa foi utilizada nos ensaios acelerados por corrente impressa. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as perdas teóricas e as reais. Nestes ensaios esta diferença mostrou-se dependente do tipo de aço, do teor de cloretos e da espessura de revestimento. Possivelmente dependa também de outros fatores que modificam a resistividade do meio, tais como a absorção e a resistividade do concreto. Na Tabela 36, a seguir, resumem-se as diferenças registradas nos ensaios das *Partes 1 e 2* da pesquisa. Informações mais detalhadas encontram-se nas tabelas dos Anexos D e E.

Na Figura 52 observa-se como as diferenças entre a perda de massa teórica (Δm_t) e a real (Δm_r) diminuem com o aumento do teor de cloreto no concreto e com a redução do

cobrimento de concreto. As diferenças são maiores para as barras de aço inoxidável, possivelmente pela resistividade da película de passivação de óxidos de Cr.

Tabela 36. Diferencias em [%] entre a perda de massa real (Δm_r) e a teórica (Δm_t) nos ensaios de corrente impressa da *Parte 1 e 2* da pesquisa.

Corpos-de-prova da pesquisa:	Cobrimento [mm]	Tipo de aço	Cl_{cc} [%]			
			0	0,4	1	5
Parte 1	45	Aço carbono	53%	45%	47%	41%
		Aço inoxidável	59%	53%	56%	51%
Parte 2	15	Aço carbono	44%	42%	41%	32%
		Aço inoxidável	50%	48%	49%	46%

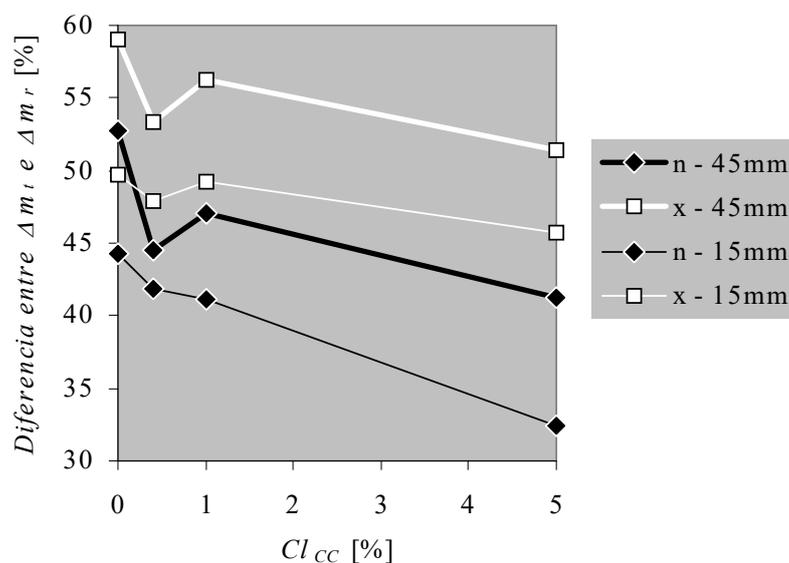


Figura 52. Diferencias entre a perda de massa real (Δm_r) e a teórica (Δm_t) no ensaio de corrente impressa, dependentes do teor de cloretos e do cobrimento de concreto.

Capítulo 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Parte 1. Comportamento eletroquímico

5.1.1. Potencial eletroquímico

A seguir discutem-se as principais observações realizadas na análise das medições do potencial eletroquímico:

- O E_{corr} de barras relaxadas mostrou uma certa dependência com a idade dos corpos-de-prova, relacionado muito provavelmente com a mudança de pH à medida em que aumenta o grau de hidratação do cimento.

As linhas de tendência logarítmicas representadas da Figura 53 à Figura 56 foram incluídas apenas com o propósito de facilitar a análise visual do comportamento das armaduras em concretos com diferentes teores de cloreto. Esta e outras equações testadas não se mostraram correlacionáveis. A tendência logarítmica foi preferida às outras por se achar que o potencial estaria tendendo a um certo valor estável, dadas as condições de umidade, temperatura, pH e teor de cloreto praticamente invariáveis.

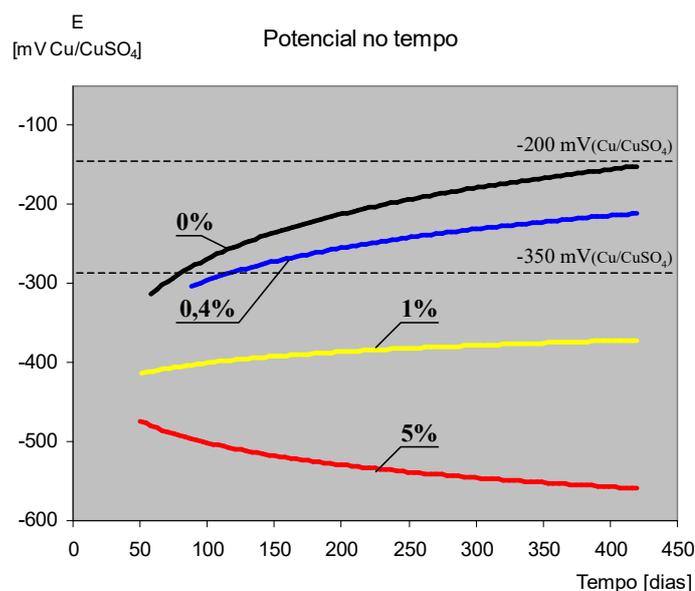


Figura 53. E_{corr} de barras relaxadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).

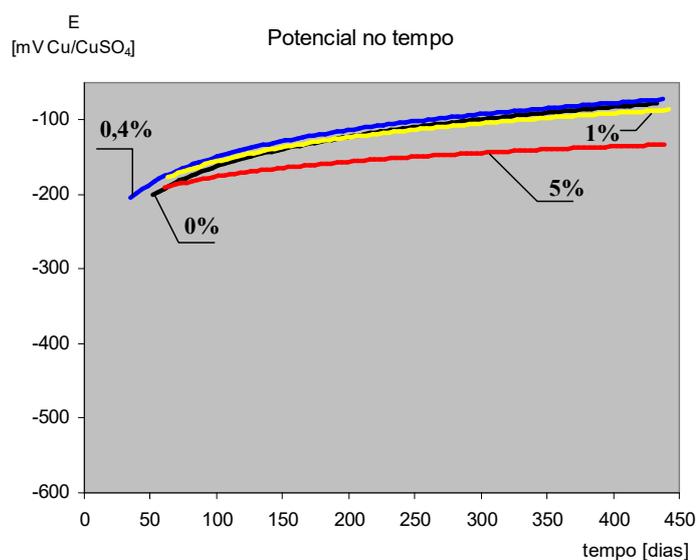


Figura 54. E_{corr} de barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).

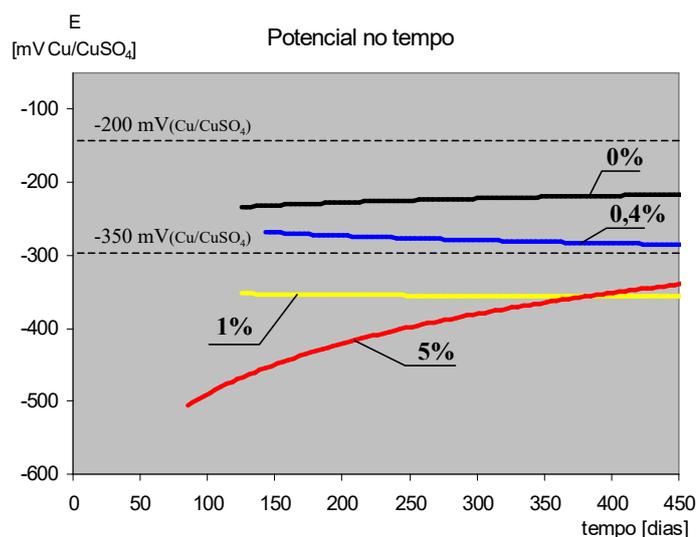


Figura 55. E_{corr} de barras tracionadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).

O cimento CP V ARI utilizado caracteriza-se pelo rápido desenvolvimento das reações de hidratação, atingindo elevados graus de hidratação nas primeiras idades. Isto poderia explicar a estabilização do potencial dos corpos-de-prova sem cloreto, após certa idade, em condições aproximadamente estáveis de umidade e temperatura. Em teores elevados de cloreto, quando a passivação do aço carbono não é atingida, o potencial mantém-se instável, mesmo a idades avançadas.

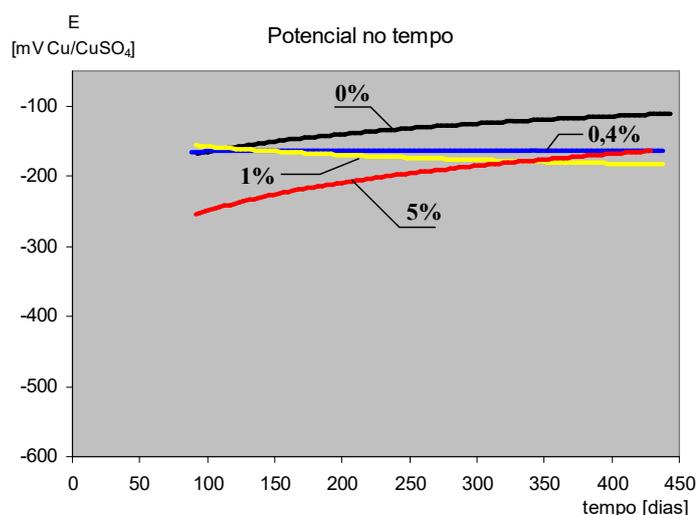


Figura 56. E_{corr} de barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto, medidos ao longo da pesquisa (linhas de tendência logarítmicas).

- O E_{corr} aumenta em barras relaxadas de aço carbono em concretos com até 0,4% de cloreto (ver Figura 53), com tendência a se estabilizar em determinados potenciais. As barras em corpos-de-prova com 0% de cloreto o potencial estabiliza próximo dos $-200 \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$. Em 0,4% de cloreto se estabiliza entre $(-200 \text{ e } -350) \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$.
- O E_{corr} das barras relaxadas de aço carbono em corpos-de-prova com 1% e 5% de cloreto (ver Figura 53) diminuem no tempo, ficando cada vez mais negativos. Isto significa que, apesar do aumento do pH, o aço está em corrosão ativa. O potencial eletroquímico mais negativo nos corpos-de-prova com 5% de cloreto indica que as condições termodinâmicas são mais favoráveis à corrosão.
- O E_{corr} das barras relaxadas de aço inoxidável cresce com o tempo, ou seja fica mais positivo (ver Figura 54), comprovando-se que o fator pH influencia as condições termodinâmicas da corrosão do aço inoxidável, inclusive para teores de cloreto de 5% em relação à massa de cimento, o que concorda com as observações de WALKER et al. realizadas em 1998.
- Existe uma certa tendência do E_{corr} das barras relaxadas de aço inoxidável em 0%, 0,4% e 1% de cloreto se estabilizar entre $(-50 \text{ e } -100) \text{ mV}_{\text{SCE}}$, enquanto as barras em 5% de cloretos apresentam potenciais mais baixos com certa tendência a se estabilizarem entre $(-100 \text{ e } -150) \text{ mV}_{\text{SCE}}$. Esta diferença indica que pode estar

havendo uma perda da estabilidade eletroquímica a medida que os teores de cloreto crescem.

- Em barras tracionadas de um e outro tipo de aço (ver Figura 55 e Figura 56) não é possível destacar tão claramente qualquer tendência do E_{corr} no tempo.
- As barras tracionadas de aço inoxidável apresentam, em média, E_{corr} menores que os das relaxadas (ver Figura 57). Aproximadamente 50% das medições de E_{corr} em barras relaxadas foram superiores a todos os medidos em barras tracionadas. Por outro lado cerca de 50% dos E_{corr} medidos em barras tracionadas foram inferiores a todos os medidos em barras relaxadas.
- Para as barras de aço carbono o teor de cloreto exerce uma influência mais forte no E_{corr} que a condição de tração (Figura 58). Apenas para teores de cloreto menores ou iguais a 0,4% percebe-se a influência da tensão diminuindo a média dos E_{corr} registrados. A dispersão das leituras de E_{corr} em barras tracionadas é maior que em barras relaxadas, o que pode ser interpretado como uma situação de maior instabilidade e conseqüentemente, uma menor confiabilidade da avaliação através do E_{corr} do estado termodinâmico de armaduras tracionadas de aço carbono.
- A média do E_{corr} das armaduras de aço inoxidável (Figura 57), tanto das armaduras relaxadas como tracionadas, varia pouco com o aumento do teor de cloreto. A diminuição do E_{corr} entre 0% e 5% de cloreto foi muito pequena, em torno de 50 mV. Os valores de E_{corr} das armaduras tracionadas foram sempre menores que o das armaduras relaxadas, em torno de 50 mV menor.

A relação entre o potencial eletroquímico e a densidade de corrente de corrosão será analisada no item 5.1.2.

Potencial de pite das armaduras de aço inoxidável

Não foi localizado o potencial de pite. A condição de pite foi detectada apenas em três barras durante o ensaio potenciodinâmico, curva que é analisada no Anexo C.4.3. O potencial de circuito aberto (E_{ca}) destas barras oscilou entre -180 mV_{SCE} e -200 mV_{SCE}

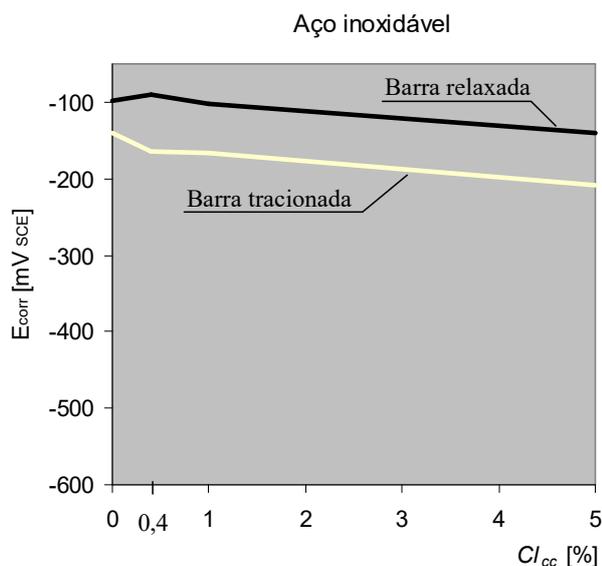


Figura 57. E_{corr}^m em barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com diferentes teores de cloreto com mais de 8 meses.

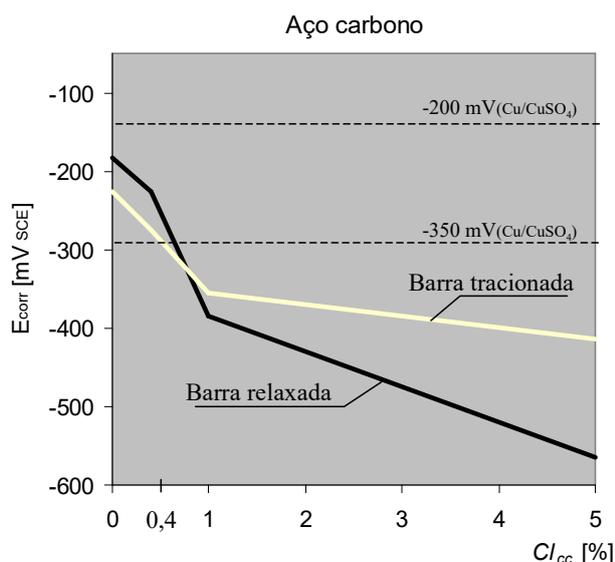


Figura 58. E_{corr}^m em barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com diferentes teores de cloreto com mais de 8 meses.

mas, nestes mesmos potenciais e ainda em potenciais mais baixos, outras barras testadas não apresentaram pites visíveis e nem as suas taxas de corrosão corresponderam com as de formação de pites. A análise da curva de pite do Anexo C.4.3. conclui que o pite aparece em potenciais muito abaixo do potencial de estabilização de -180 mV_{SCE} . O potencial pula para estes valores mais elevados por causa da acidificação do anólito. Por um lado, a partir da análise teórica dos diagramas de Evans e, por outro, a partir das observações dos corpos-de-prova da pesquisa que não apresentaram pites, inclusive em

potenciais de $-370 \text{ mV}_{\text{SCE}}$. Conclui-se que muito provavelmente o potencial de pite E_p encontra-se abaixo de $-400 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ (ou como se menciona no Anexo C.4.3 entre $-400 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ e $-700 \text{ mV}_{\text{SCE}}$).

Após o aparecimento do pite o potencial pode crescer, inclusive acima dos potenciais detectados na tese $E_{ca} = (-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ e $-200 \text{ mV}_{\text{SCE}}$), provavelmente até os valores reportados por PEDEFERRI et al. (1991), próximos a $+400 \text{ mV}$ usando eletrodo de referência de Ti ativado.

5.1.2. Densidades de corrente de corrosão e previsão de comportamento

Metodologia empregada para o processamento e análise das curvas de polarização

Critérios de aceitação utilizados para a determinação das curvas de polarização média

- a) Foi considerada somente a rama anódica.
- b) As ramas catódicas das curvas levantadas na primeira etapa devem tender a uma mesma curva (curva de redução do oxigênio), como é mostrado na Figura 59.
- c) Foram rejeitadas as curvas que se afastaram visivelmente do padrão gráfico do conjunto de curvas do mesmo caso de estudo, por exemplo o caso das curvas típicas de pite detectadas no aço inoxidável.
- d) Foram consideradas como mínimo três curvas de polarização em qualquer trecho para a determinação da curva média.

Procedimento adotado na avaliação das curvas médias para a determinação das densidades de corrente de corrosão médias gráficas ($i_{\text{corr}}^{\text{mg}}$)

- a) Os potenciais avaliados são os potenciais médios (E_{corr}^m) calculados das medições realizadas segundo o item 3.5.1.
- b) Determina-se um ponto sobre a curva média a $+100 \text{ mV}$ respeito a E_{corr}^m .
- c) A partir deste ponto desenha-se a possível curva anódica que corresponde ao potencial E_{corr}^m (seguindo o padrão geral das curvas individuais para o mesmo caso).

d) Determina-se graficamente a i_{corr}^{mg} segundo os procedimentos estabelecidos a seguir.

Procedimento adotado para a determinação gráfica da i_{corr} nas curvas de polarização

- Determina-se a tangente da curva em +30 mV, respeito ao potencial de corrente zero $E(I=0)$ (potencial de viragem da rama catódica em rama anódica) da curva de polarização em questão.
- Lê-se o valor da densidade de corrente na interseção da tangente e a linha horizontal $E(I=0)$.

Na Figura 59 e na Figura 60 exemplificam-se os procedimentos antes definidos para a avaliação das curvas médias.

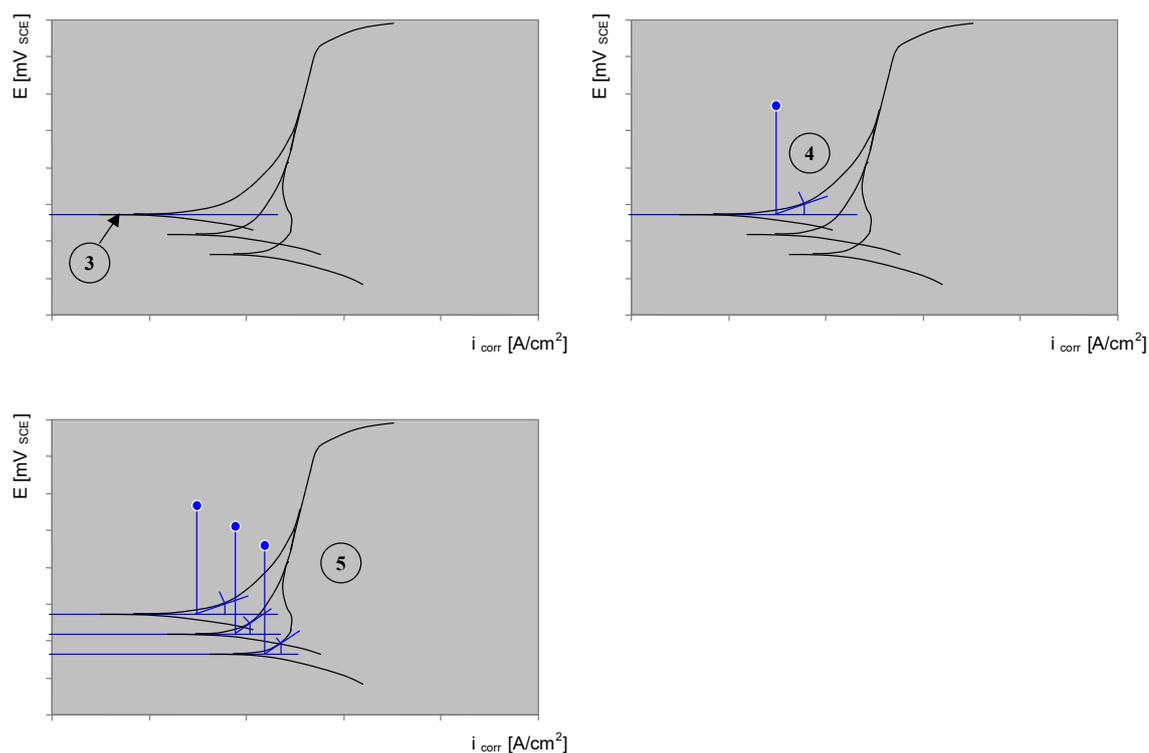


Figura 59. Determinação da i_{corr} das curvas de polarização de um mesmo caso de estudo. 1 - Curvas de polarização de um mesmo caso. 2 - Possível curva catódica de redução de oxigênio, para a qual tendem as ramos catódicas das curvas do mesmo caso. 3 - Potencial $E(I=0)$ de uma das curvas. 4 - Determinação de i_{corr} da mesma curva. 5 - i_{corr} de cada uma das três curvas do exemplo. Quanto menor $E(I=0)$, maior i_{corr} .

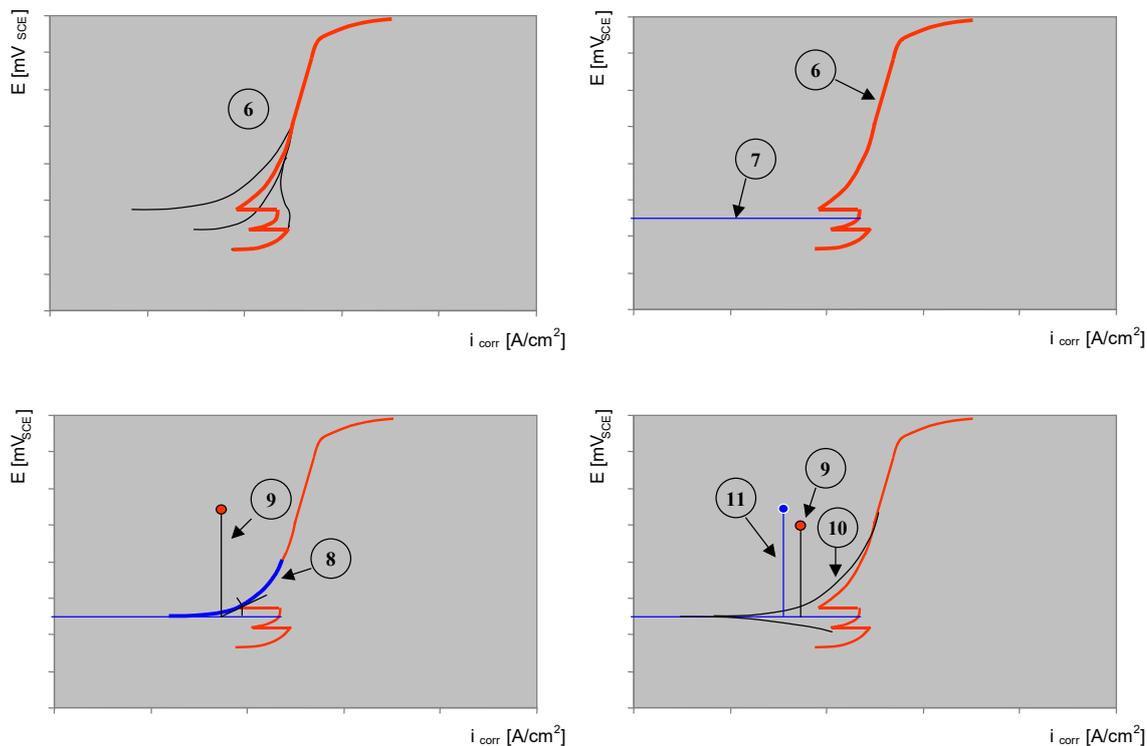


Figura 60. Determinação da i_{corr}^{mg} da curva de polarização média. 6 - Curva de polarização média. 7 - Potencial eletroquímico médio E_{corr}^m das barras do mesmo caso. Neste potencial avalia-se a curva média. 8 - Desenho da prolongação da curva média a partir de +100 mV em relação a E_{corr}^m . 9- Determinação da i_{corr} média gráfica (i_{corr}^{mg}). 10 - Possível curva de polarização real no potencial $E_{corr} = E_{corr}^m$. 11 - i_{corr} real correspondente a $E_{corr} = E_{corr}^m$. O valor de i_{corr} real é sempre maior que a i_{corr}^{mg} avaliada no mesmo potencial.

Da Figura 61 à Figura 64 são apresentadas as curvas médias calculadas no exemplo das barras em concreto sem cloreto e com 5% de cloreto. Todas as curvas e alguns casos particulares de interesse são apresentados e analisados no Anexo C.4. No Anexo C da Figura C. 15 à Figura C. 37 apresentam-se as curvas de polarização levantadas para cada caso de estudo, comparadas às curvas médias. Estas representações não incluem as curvas de maior ruído e as rejeitadas na determinação da curva média.

Na Tabela 37 apresentam-se as densidades de corrente de corrosão médias determinadas graficamente (i_{corr}^{mg}) sobre as curvas de polarização médias, seguindo a metodologia apresentada. As densidades de corrente de corrosão médias correspondem aos valores de potencial médio da Tabela 27.

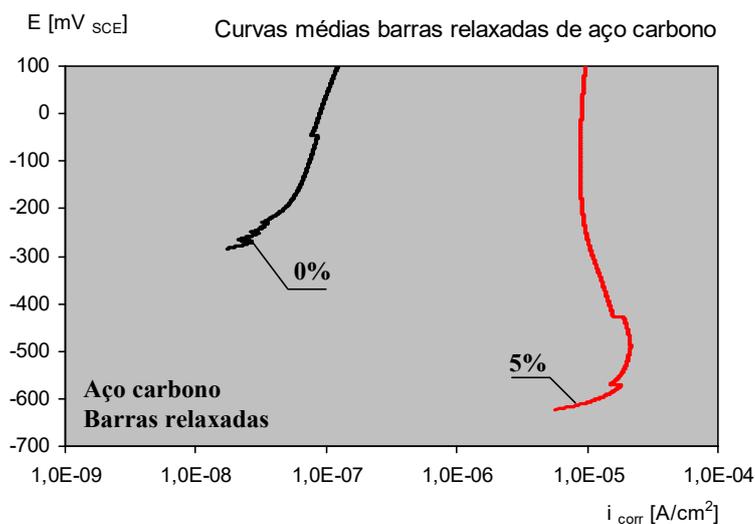


Figura 61. Curvas de polarização médias no exemplo de barras relaxadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.

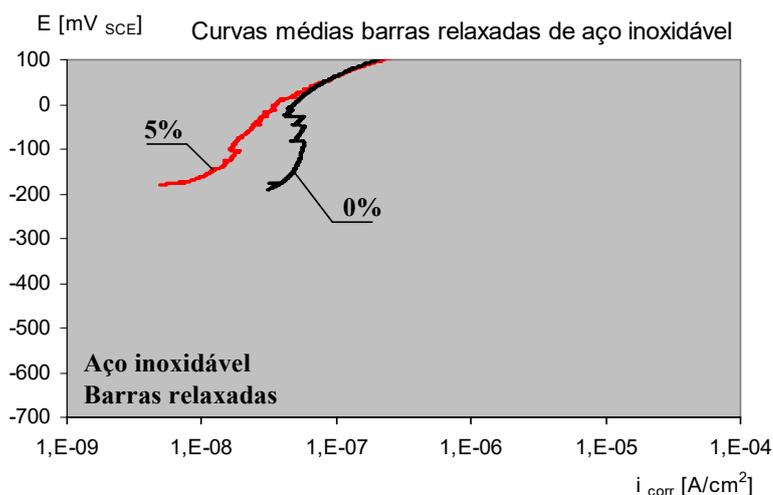


Figura 62. Curvas de polarização médias no exemplo de barras relaxadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.

Tabela 37. Densidades de corrente de corrosão médias determinadas graficamente - i_{corr}^{mg} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Tipo de aço	Estado da barra	Cl_{cc} [%]			
		0	0,4	1	5
Aço carbono	Relaxada	0,023	0,025	0,300	8,300
	Tracionada	0,800	1,400	2,500	6,000
Aço inoxidável	Relaxada	0,047	0,043	0,053	0,014
	Tracionada	0,300	0,224	0,320	0,125

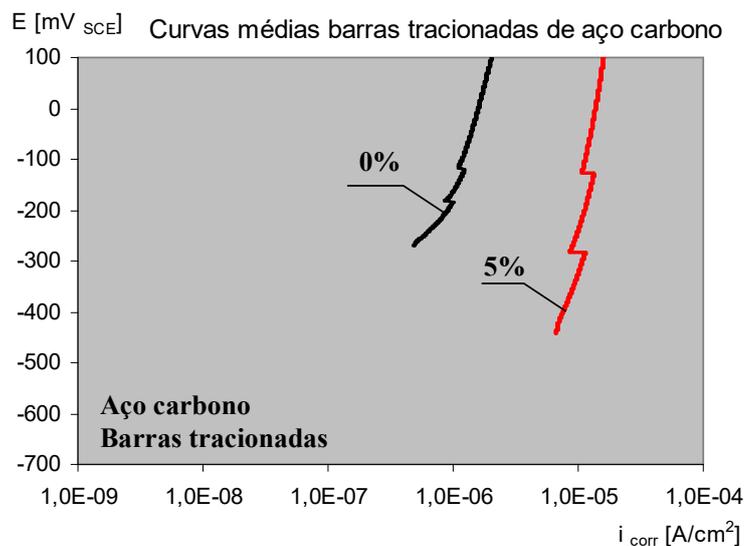


Figura 63. Curvas de polarização médias no exemplo de barras tracionadas de aço carbono em 0% e 5% de cloreto.

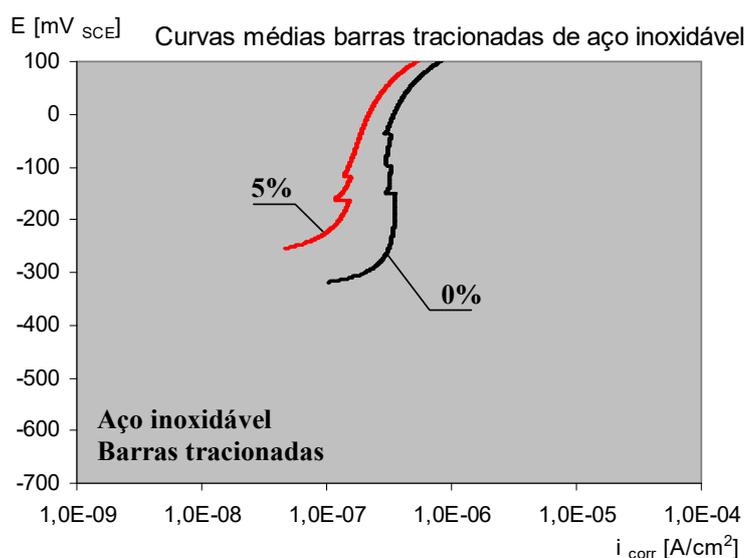


Figura 64. Curvas de polarização médias no exemplo de barras tracionadas de aço inoxidável em 0% e 5% de cloreto.

Na Figura 65 e Figura 66 são comparados os valores de i_{corr}^{mc} e i_{corr}^{mg} .

A análise, tanto das densidades de corrente de corrosão médias calculadas, determinadas pelo programa *ParCalc*, como das médias gráficas, avaliadas nas curvas de polarização médias, permitem julgar sobre a influência do teor de cloreto e da condição de tração sobre a cinética das armaduras de aço carbono e de aço inoxidável (ver Tabela 29 e Tabela 37).

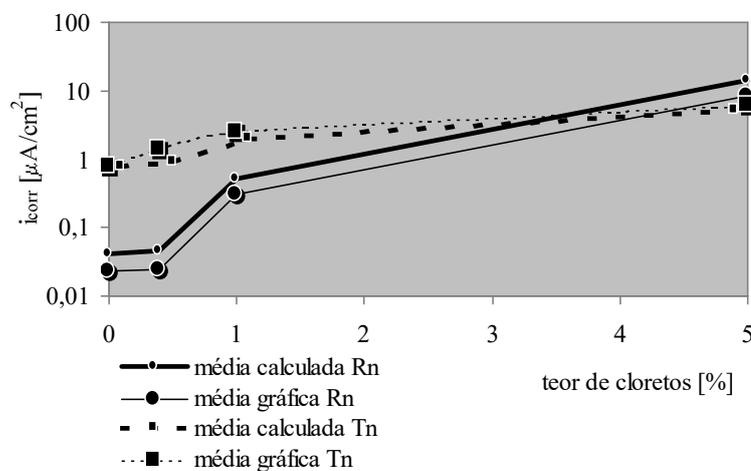


Figura 65. Comparação gráfica entre i_{corr}^{mc} e i_{corr}^{mg} das barras de aço carbono.

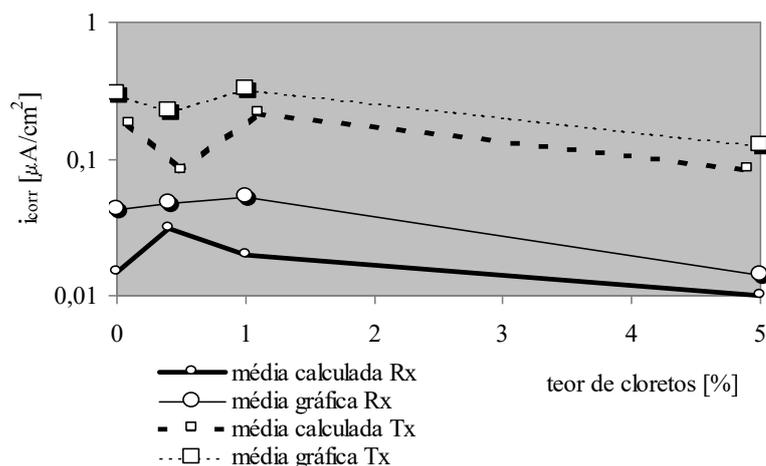


Figura 66. Comparação gráfica entre i_{corr}^{mc} e i_{corr}^{mg} das barras de aço inoxidável.

As densidades de corrente de corrosão determinadas graficamente sobre as curvas médias (i_{corr}^{mg}) podem ser superiores às médias calculadas (i_{corr}^{mc}) - ($i_{corr}^{mc} < i_{corr}^{mg}$). Isto acontecerá sempre que o potencial avaliado (neste caso $E_{corr} = E_{corr}^m$) for igual ou inferior à média dos potenciais de corrente zero⁵⁸ $E(I=0)$ das curvas individuais que originaram a curva média em questão. Nesta pesquisa, apenas as barras relaxadas de aço carbono apresentaram i_{corr}^{mc} levemente maior ou igual à i_{corr}^{mg} .

As curvas de polarização levantadas durante a primeira etapa (ver Tabela 25) resultaram em $E(I=0)$ entre (80 e 150) mV abaixo do E_{ca} em barras de aço carbono, e entre (50 e

⁵⁸ **Potencial de corrente zero** é o potencial de viragem da curva de polarização catódica em anódica.

100) mV abaixo do E_{ca} em barras de aço inoxidável. Isto permite obter curvas médias começando em potenciais menores aos potenciais médios (E_{corr}^m) da Tabela 27.

A análise das densidades de corrente de corrosão é baseada nos valores máximos (i_{corr}^{max}) da Tabela 38, selecionados entre os valores de i_{corr}^{mg} e i_{corr}^{mc} . A Figura 67 representa estes valores máximos para cada caso de estudo.

Os valores i_{corr} determinados para os corpos-de-prova sem cloreto podem estar afetados pelo efeito da polarização do ensaio potenciodinâmico (que é um ensaio acelerado). É através da análise dos diagramas de Evans que podem ser identificados comportamentos típicos da passivação e, neste caso, os resultados de i_{corr} podem ser considerados desprezíveis.

Tabela 38. Densidades de corrente de corrosão máximas - i_{corr}^{max} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Tipo de aço	Estado da barra	Cl_{cc} [%]			
		0	0,4	1	5
Aço carbono	Relaxada	0,041	0,047	0,511	14,512
	Tracionada	0,803	1,400	2,500	6,000
Aço inoxidável	Relaxada	0,047	0,043	0,053	0,020
	Tracionada	0,300	0,224	0,320	0,125

A seguir comentam-se os resultados i_{corr}^{max} representados na Figura 67, partindo da classificação de ANDRADE e ALONSO (1994) da Figura 20.

- Apresentaram densidade de corrente de corrosão desprezível ($i_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$): as barras relaxadas de aço inoxidável em até 5% de cloreto em relação à massa de cimento, e as barras relaxadas de aço carbono em até 0,4% de cloreto.
- Apresentaram densidade de corrente de corrosão baixa ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 < i_{corr} < 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$): as barras tracionadas de aço inoxidável em até 5% de cloreto.
- Apresentaram densidade de corrente de corrosão moderada ($0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 < i_{corr} < 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$): as barras relaxadas de aço carbono em 1% de cloreto e as tracionadas em concreto não contaminado.
- Apresentaram densidade de corrente de corrosão muito elevada ($i_{corr} > 10,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$): as barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em 5% de cloreto.

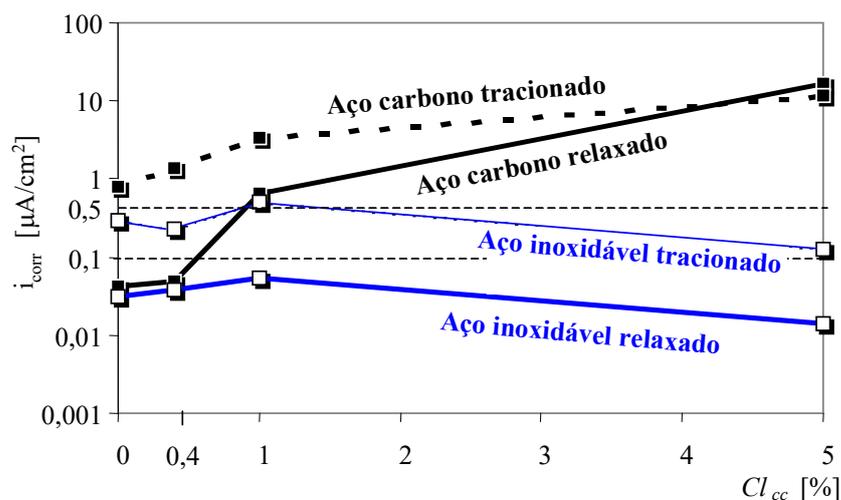


Figura 67. Valores de i_{corr}^{max} determinados nos ensaios acelerados para cada caso de estudo.

A Figura 67 permite ainda julgar sobre o efeito do teor de cloreto e sobre a tração na i_{corr} , observando-se que:

- Em barras de aço carbono a cinética da corrosão é fortemente dependente do teor de cloreto. O limite tolerável de 0,4% de $Cl_{cc, lim}$ somente foi comprovado em barras relaxadas. Teores superiores a este em barras relaxadas e qualquer teor de cloreto em barras tracionadas provocam o aumento da i_{corr} de valores de moderados a muito elevados.
- Nas barras de aço inoxidável não foi achada uma dependência tão forte entre i_{corr} e o aumento do teor de cloreto no concreto. Apreciou-se uma leve diminuição de i_{corr} em 5% de cloreto.
- A condição de tração provoca o aumento de i_{corr} , tanto nas barras de aço carbono como nas de aço inoxidável.
- Em barras de aço carbono para teores de cloreto acima de 0,4% a influência preponderante é do teor de cloreto. Para teores abaixo de 0,4% a influência preponderante é da tração, que conduz ao aumento da i_{corr} do aço carbono em torno de 20 vezes.
- A contribuição da tração para o aumento da corrosão das barras de aço inoxidável foi praticamente a mesma em todos os teores de cloreto estudados, em torno de 10 vezes.

- Comparando as duas condições, imersão parcial (86% de umidade interna) e câmara úmida (97% de umidade interna), observou-se que, de modo geral, as i_{corr} das barras de aço inoxidável diminuem com o aumento da umidade (ver Figura 41)⁵⁹. As barras de aço carbono não mostraram uma tendência significativa. As barras relaxadas de aço carbono em câmara úmida apresentaram i_{corr} similares entre si (0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).
- As barras dobradas de armaduras de ambos os tipos de aço mostraram i_{corr} levemente maior que o das barras relaxadas e menor que o das barras tracionadas.
- As barras soldadas não mostraram um comportamento diferenciado em relação ao das barras relaxadas.

5.1.3. Relação entre o potencial eletroquímico e a densidade de corrente de corrosão

A Figura 68 mostra as relações entre o potencial eletroquímico e a densidade de corrente de corrosão determinados para as barras de aço carbono. As tendências analisadas resultaram nas expressões: $i_{corr} = 0,15e^{-0,006 E}$ para o aço tracionado e $i_{corr} = 0,01e^{-0,01 E}$ para o aço relaxado, com coeficientes de correlação (R^2) iguais a 0,62 e 0,73 respectivamente.

A Figura 69 mostra as relações entre o E_{corr} e i_{corr} determinados para as barras de aço inoxidável. As equações matemáticas determinadas para o conjunto de pontos não mostram uma boa correlação, sugerindo que existe uma tendência diferente, como a representada na própria figura .

Em linhas gerais, podem-se fazer os seguintes comentários:

Em barras de aço carbono as tendências obtidas de aumento da i_{corr} com a diminuição do E_{corr} estão de acordo com as recomendações da ASTM C876:1990, referentes à probabilidade da corrosão, e com as experiências de medições *in situ* (ANDRADE e GONZÁLEZ, 1988 ; HELENE, 1993; HELENE et al., 1999).

⁵⁹ Os E_{corr} das barras de aço inoxidável em câmara úmida são mais altos e ficam, assim, mais próximos do potencial de dissolução da película de passivação.

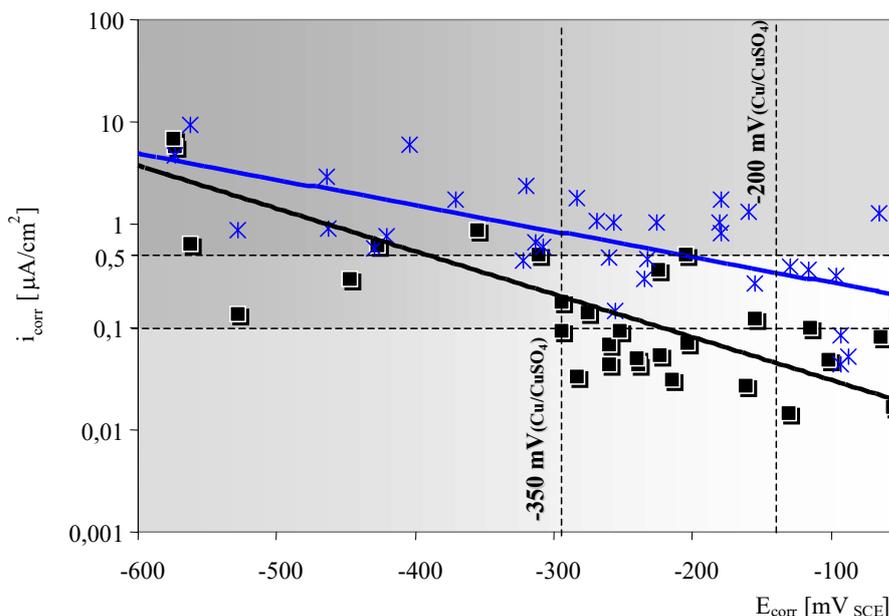


Figura 68. Relação **potencial versus densidade de corrente de corrosão** de barras de aço carbono relaxadas e tracionadas.

- É muito provável que mais do que 50% das barras tracionadas de aço carbono com E_{corr} entre $-350 \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$ e $-200 \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$ encontrem-se com densidades de corrente de corrosão de moderada a muito elevada⁶⁰.
- A Figura 69 mostra que para as barras de aço inoxidável, tanto as relaxadas como as tracionadas, não é possível determinar uma expressão matemática satisfatória e a tendência aparente pode ser determinada apenas graficamente, apresentando quatro trechos de comportamento:
 1. o primeiro, para potenciais acima do potencial de dissolução da película de passivação, igual a $0 \text{ mV}_{\text{SCE}}$;
 2. o segundo, para potenciais entre $0 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ e $-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, onde a densidade de corrente de corrosão se mantém praticamente constante em valores muito baixos, que pode ser considerado um trecho de passivação perfeita;

⁶⁰ Isto em condições de umidade interna próximas à do experimento (86%).

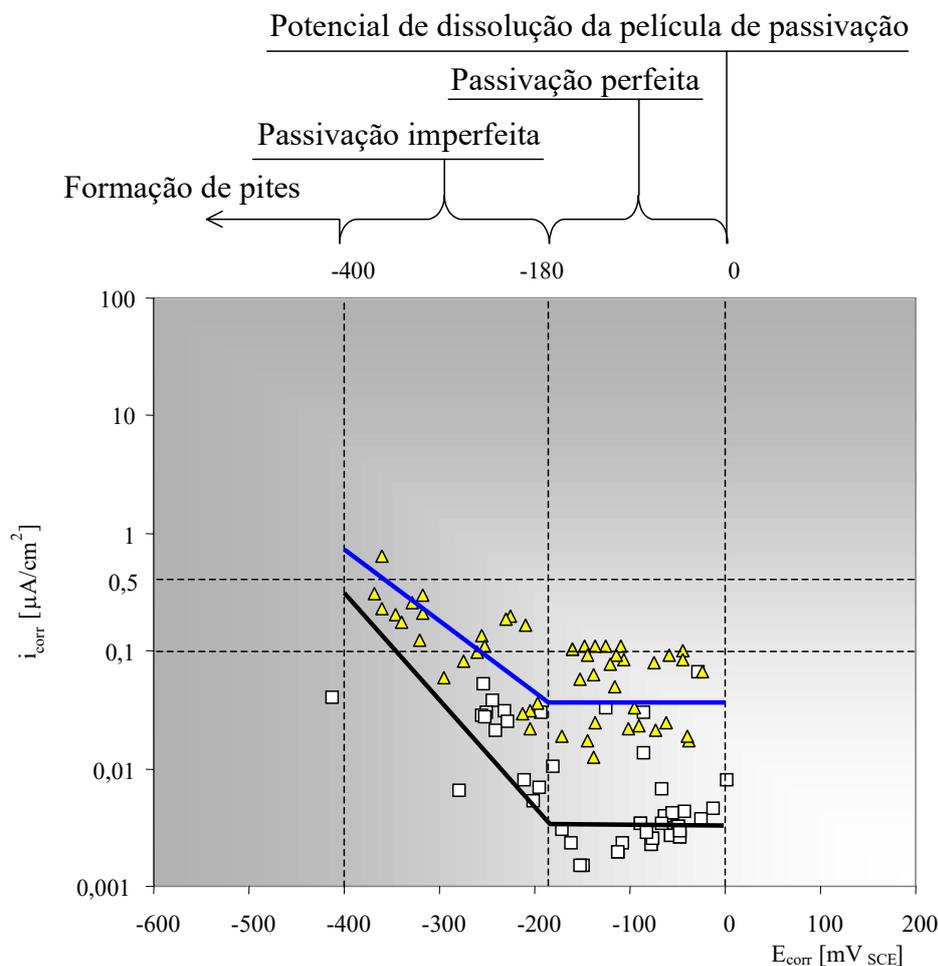


Figura 69. Relação **potencial versus densidade de corrente de corrosão** de barras de aço inoxidável relaxadas e tracionadas. As linhas contínuas não respondem a tendências matemáticas, tratam-se de tendências aparentes.

3. um terceiro, para potenciais entre $-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ e $-400 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, em que a densidade de corrente de corrosão aumenta com a diminuição do potencial, trecho de instabilidade eletroquímica ou passivação imperfeita;
4. um último trecho, para potenciais menores que $-400 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, em que a probabilidade de formação de pites é grande.

Tabela 39. Avaliação do estado termodinâmico das armaduras de aço inoxidável pela leitura do potencial eletroquímico

Potencial eletroquímico [mV]		Comportamento
SCE	Cu/CuSO ₄	
> 0	> -60	Dissolução da película de passivação
$-180 \div 0$	$-240 \div -60$	Passivação perfeita
$-400 \div -180$	$-460 \div -240$	Passivação imperfeita
< -400	< -460	Formação de pites
≥ -180	≥ -240	Potencial de estabilização do pite

Uma vez formado o pite, o potencial de leitura pode ser o potencial de estabilização, próximo a $-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$. Não foi constatado na pesquisa, mas acredita-se que o salto de potenciais baixos, como $-400 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, para potenciais altos, como $-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, em barras monitoradas, seja uma evidência de formação do pite. Não se descarta a estabilização do potencial de pite em valores maiores que $-180 \text{ mV}_{\text{SCE}}$.

5.1.4. Análise de comportamento pela interpretação gráfica das curvas de polarização:

A interpretação gráfica das curvas de polarização permite julgar sobre o comportamento eletroquímico das armaduras. Mostra que não só é importante a análise de dados qualitativos, como i_{corr} , $E(I=0)$ e b_a referentes a um trecho muito pequeno de curva, não maior que $\pm 30 \text{ mV}$, em torno de $E(I=0)$, mas também que com esta análise pode-se avaliar o comportamento em faixas mais amplas do gráfico, detectando, por exemplo, tendências em potenciais mais elevados.

Como ponto de partida para a análise foram selecionadas as curvas médias. A análise de curvas individuais permitem julgar sobre os prováveis mecanismos de corrosão predominantes em uma ou outra condição estudada. Uma ferramenta muito importante na interpretação dos resultados é a análise dos diagramas de Evans, desenvolvida no Anexo C.

Discutem-se, a seguir, as observações levantadas na análise:

Entre as curvas de polarização da primeira etapa foi verificada a mesma tendência de apresentarem ramas catódicas coincidentes com a curva catódica de redução de oxigênio (ver Figura 70), e a tendência das ramas anódicas de se aproximarem, em potenciais elevados (entre 600 e 800 mV_{SCE}), da curva anódica de evolução de oxigênio.

- A redução da velocidade de varredura na segunda e terceira etapa não conduz a resultados convincentes quanto ao mecanismo de controle da corrosão. Algumas curvas mostraram aumento da inclinação da rama anódica em relação ao eixo horizontal (tornando-se mais ativas⁶¹), o que poderia significar que, em velocidades

⁶¹ Se pelo contrario em velocidades de varredura menores, a inclinação respeito à horizontal tornara-se maior, estaria se evidenciando que há tendência à passivação, e que em ensaios rápidos há dificuldade para o acesso de suficiente oxigênio na formação da película de passivação.

de varredura maiores o controle da corrosão ocorre por concentração de hidróxidos de Fe no meio. Isto dificulta a formação de novos produtos de corrosão no ritmo que a velocidade da polarização impõe. Esta situação poderia explicar as diferenças da ordem de 30% entre a perda de massa teórica e a real nos ensaios de corrente impressa (itens 4.2.1 e 4.2.2), e a diminuição desta diferença quanto maior a umidade interna do corpo-de-prova de concreto testado (TICIANELLI e TULA, 1998).

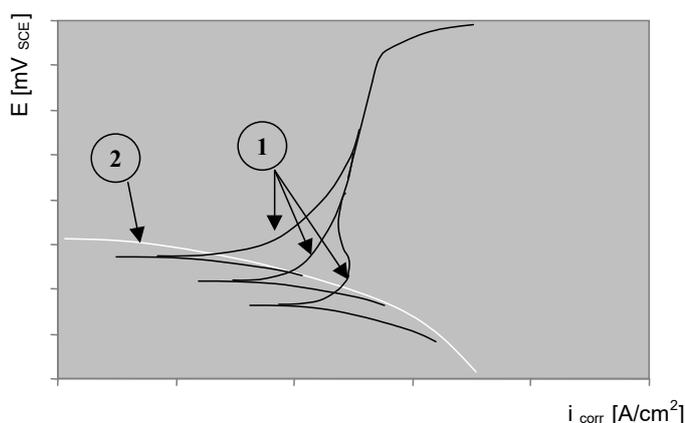


Figura 70. Ramas catódicas todas tendentes à mesma curva redução do oxigênio.

- As curvas de polarização dos corpos-de-prova de barras de aço inoxidável em câmara úmida mostram mais claramente a instabilidade da película de passivação, aproximando-se da configuração típica da curva em 5% de cloreto, aparentemente com dissolução da película passivante de óxido de Cr. A redução de concentração de oxigênio em concretos com cloreto provoca uma maior instabilidade eletroquímica e o restabelecimento da película de passivação de óxido de Cr (repassivação) fica comprometido. As densidades de corrente de corrosão assumem valores semelhantes aos das barras de aço carbono não contaminadas com cloreto em elevados graus de umidade (*GU*). Existe maior probabilidade de formação de pites. Nos diagramas de Evans analisados no Anexo C.4.3 demonstra-se que, embora as densidades de corrente de corrosão lidas em barras inoxidáveis em 5% de cloreto ou em concretos com maior grau de umidade sejam menores, a instabilidade eletroquímica é maior. Sendo assim, não se recomenda o emprego destas armaduras em estruturas marinhas submersas.

- As curvas de polarização das barras de aço inoxidável apresentaram, em todos os casos de estudo, um certo patamar de corrente em 0 mV_{SCE}, interpretado como potencial de dissolução da película de passivação na região de transpassivação. O fato de encontrar-se este patamar acima dos potenciais de corrosão de circuito aberto medidos (E_{ca}) significa que nos corpos-de-prova da pesquisa não aconteceu este fenômeno, ou seja, que a película de passivação esteve presente, seja de maneira perfeita ou imperfeita (ver item 5.1.1).
- As curvas das barras de aço inoxidável em 5% de cloreto, embora com menores densidades de corrente de corrosão, apresentaram uma configuração característica da dissolução da película passivante, mostrando que se encontram mais próximas da instabilidade.

A curvas de polarização da barra com pite da Figura C. 6 (Anexo C), é analisada no item C.4.3 do próprio anexo, observando-se que o potencial de pite assume o valor de estabilização igual a -180 mV_{SCE}. A análise dos diagramas de Evans considera que este potencial de estabilização do pite se deve à acidificação do anólito, que provoca o aumento do potencial de redução de oxigênio. Na realidade o pite surge em potenciais muito mais baixos, não registrados nos corpos-de-prova da pesquisa. Como os menores potenciais lidos em barras sem pites foram de -370 mV_{SCE}, recomenda-se assumir o limite de -400 mV_{SCE}. Potenciais abaixo de -400 mV_{SCE} representam probabilidade elevada de aparecimento de pites.

Na avaliação da influência do grau de contaminação e da presença de trações na barra utilizaram-se a análise teórica dos diagramas de Evans e as comparações das curvas médias das figuras da Figura C. 1 à Figura C. 14 do Anexo C.

- As curvas de polarização de barras relaxadas de aço carbono em 0% e 0,4% de cloreto apresentam-se praticamente sem variação. Isto indica que até 0,4% de cloreto existem grandes probabilidades das barras relaxadas de aço carbono se encontrarem na condição passiva, com densidades de corrente de corrosão desprezíveis.

- As curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em 1% de cloreto avançam uma casa decimal para valores maiores de corrente, em relação às curvas de barras em 0% e 0,4% de cloreto⁶². As curvas de barras em 5% de cloreto avançam mais 1½ casa decimal em relação às curvas de barras em 1% de cloreto. A relação aproximada entre as densidades de corrente de corrosão de barras relaxadas de aço carbono é a seguinte: (i_{corr} de R0n \approx i_{corr} de R04n $<$ 10 i_{corr} de R1n); (i_{corr} de R1n $<$ 30 i_{corr} de R5n).
- Uma análise análoga feita para as barras tracionadas de aço carbono conclui que a relação aproximada entre as densidades de corrente de corrosão é a seguinte: (i_{corr} de T0n $<$ i_{corr} de T04n); (i_{corr} de T04n $<$ 2 i_{corr} de T1n); (i_{corr} de T1n $<$ 2 i_{corr} de T5n). A perda da passivação acontece entre 0% e 0,4 % de cloreto. Sugere-se adotar, como teor limite de cloreto que provoca a despassivação do aço carbono tracionado, valores entre 0,15% e 0,2%, coincidentes com os ACI Committee 201, 222 e 318.
- As curvas de polarização das barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável mostram que a relação entre as densidades de corrente de corrosão em dependência do teor de cloreto para iguais potenciais é a seguinte: (i_{corr} de R0x \approx i_{corr} de R04x \approx i_{corr} de R1x $>$ 3 i_{corr} de R5x); (i_{corr} de T0x \approx i_{corr} de T04x \approx i_{corr} de T1x $>$ 3 i_{corr} de T5x). A análise do teor limite de cloreto no concreto para o aço inoxidável integrou os resultados das densidades de corrente de corrosão e os potenciais de corrosão, assim como a interpretação das curvas de polarização com ajuda dos diagramas de Evans. De maneira conservadora, sugere-se considerar a perda da passivação em teores de cloreto (Cl_{cc}) maiores que 1% nas barras relaxadas, e maiores que 0,4% nas barras tracionadas.
- Com relação à influência da condição de tração, as curvas das barras tracionadas de aço carbono em 0%, 0,4% e 1% avançam uma casa decimal em relação às curvas das barras relaxadas nestes mesmos teores de cloreto. Em 5% de cloreto não se apreciam diferenças quantitativas significativas. Isto significa que para teores de cloreto de até 1% em relação à massa de cimento a tração aumenta as densidades de

⁶² A faixa de potenciais eletroquímicos analisada nas curvas das barras de aço carbono é entre -500 mV_{Cu/CuSO4} e +300 mV_{Cu/CuSO4}

corrente de corrosão das barras de aço carbono em pelo menos 10 vezes, lidos os mesmos potenciais eletroquímicos.

- As curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável avançam menos de uma casa decimal em relação às das barras relaxadas em iguais teores de cloreto. A tendência é de que aumentem estas diferenças com o aumento do teor de cloreto no concreto. Isto significa que para qualquer teor de cloreto a i_{corr} das barras tracionadas de aço inoxidável é cerca de 10 vezes maior que a das barras relaxadas, lidos os mesmos potenciais eletroquímicos.

As curvas de polarização das barras de aço inoxidável em concretos em até 1% de cloreto apresentam estabilização da densidade de corrente de corrosão entre certos potenciais. Esta manifestação acontece nos aços passivos, em potenciais entre o potencial de circuito aberto e o potencial de dissolução da película de passivação de óxido de Cr, na região de passivação. Esta corrente pode ser identificada como densidade de corrente de estabilização da corrosão (i_{corr}^{estabe}).

- A densidade de corrente de estabilização das barras relaxadas de aço inoxidável em até 5% de cloreto é igual a $0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a das barras tracionadas em até 1% de cloreto entre $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, e a das barras tracionadas com mais de 1% de cloreto $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.
- Através da análise dos diagramas de Evans e a observação visual, foi possível determinar a densidade de corrente de corrosão de formação de um pite no aço inoxidável. Considerando toda a área exposta, a densidade de corrente de corrosão foi de $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, taxa cinco vezes menor que a aplicada nos ensaios de corrente impressa.
- Para graus de contaminação onde foi comprovada a passivação das armaduras de aço carbono e aço inoxidável, a densidade de corrente de corrosão podem ser estimada como “desprezível”. Os teores de cloreto limite ($Cl_{cc, lim}$) recomendados para cada caso apresentam-se na Tabela 41.

- Para as armaduras de aço carbono, onde não foram detectadas correntes de estabilização, as densidades de corrente de corrosão máximas em estado ativo são as da Tabela 38.
- A i_{corr} de pite (para barras tracionadas de aço inoxidável em 5% de cloreto) pode ser considerada igual a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, como demonstrado no Anexo G.6.

Tabela 40. Densidades de corrente de corrosão recomendadas na estimativa de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas ao ataque de cloretos - i_{corr}' ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Tipo de aço	Estado da barra	Cl_{cc} [%]			
		0 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 1	1 ÷ 5
Aço carbono	Relaxada	Desprezível**		0,025 ÷ 0,30	0,30 ÷ 10,0
	Tracionada*	Desprezível**	0,80 ÷ 1,40	1,40 ÷ 2,50	2,50 ÷ 10,0
Aço inoxidável	Relaxada	Desprezível**			0,05 ÷ 0,30
	Tracionada*	Desprezível**		0,20 ÷ 0,30	0,30 ÷ 10,0

* tensões entre 30% e 40% do limite de escoamento da barra

** aço passivo

Tabela 41. Teor de cloreto limite que provoca a despassivação das armaduras.

Tipo de aço	Estado da barra	$Cl_{cc, lim}$ [%]	
		Encontrado na pesquisa	Recomendado para estimativa de vida útil
Aço carbono	Relaxada	0,4	0,4
	Tracionada*	Entre 0 e 0,4	0,2
Aço inoxidável	Relaxada	Entre 1,0 e 5,0**	1,0
	Tracionada*	Entre 0,4 e 1,0**	0,4

* tensões entre 30% e 40% do limite de escoamento da barra

** aparentemente próximo ao limite superior

- Os parâmetros b_a e b_c , obtidos do programa *ParCalc*, não permitem estabelecer nenhuma correlação com possíveis mecanismos de reação, o que indica que as curvas levantadas não obedecem à equação de Butler-Volmer (TULA et al., 1998). Este desvio pode estar acontecendo por se haver adotado velocidades de varredura ainda altas (0,5 mV/s e 0,25 mV/s), o que impede a formação natural dos produtos de corrosão tipo hidróxidos, afetando o gráfico das curvas por concentração.

As densidades de corrente de corrosão recomendadas na Tabela 40 são levadas a gráficos de i_{corr}' versus Cl_{cc} para determinarem-se as possíveis correlações matemáticas. Os gráficos estão representados na Figura 71. Na Tabela 42 resumem-se todas as correlações matemáticas determinadas. As equações correspondentes às barras de aço inoxidável apresentam menor correlação, mas como esta situação está relacionada aos valores obtidos para teores elevados de cloreto, que superam os resultados experimentais, isto significa que a estimativa é conservadora.

As correlações da Tabela 40 são admissíveis apenas para o concreto ensaiado. Obviamente, concretos com outras características deverão ser também estudados.

- A utilização das equações da Tabela 42 no cálculo da vida útil de serviço representa uma grande vantagem, pois permite avaliar a corrosão para qualquer nível de contaminação.

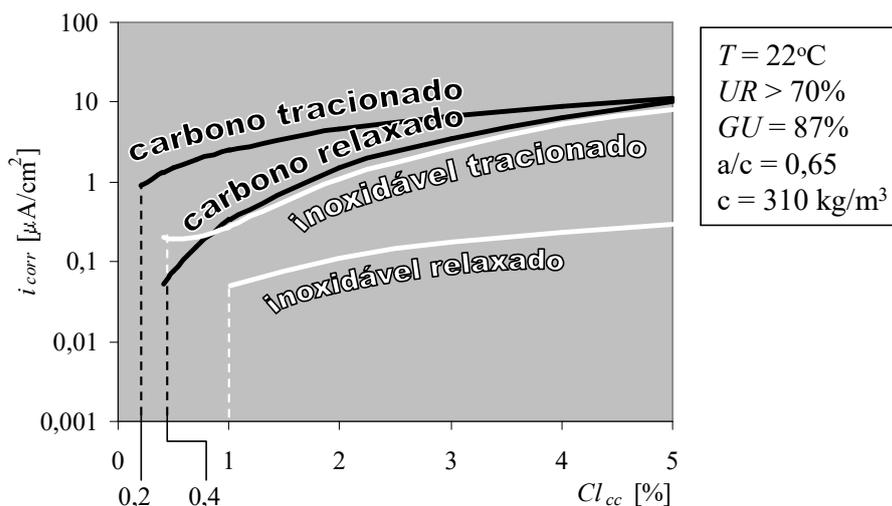


Figura 71. Gráfico de i_{corr}' versus Cl_{cc} das barras de aço carbono e aço inoxidável para as condições ensaiadas (T – temperatura ambiente, UR – umidade relativa, GU – grau de umidade, a/c – relação água/cimento, c – consumo de cimento). As curvas de comportamento do aço inoxidável tracionado e o aço carbono relaxado são coincidentes acima de 1% de cloreto.

Tabela 42. Equações recomendadas para a determinação da possível densidade de corrente de corrosão dada uma certa contaminação por cloreto.

Aço	Estado da barra	Para: Cl_{cc}	Equação	Observações
carbono	Relaxada	$> 0,4\%$	$i_{corr}' = 0,432 Cl_{cc}^2 - 0,1324 Cl_{cc} + 0,0354$	Os valores máximos se aproximam ou ficam abaixo da linha de tendência
	Tracionada	$> 0,2\%$	$i_{corr}' = 0,0106 Cl_{cc}^2 + 2,0533 Cl_{cc} + 0,4676$	
inoxidável	Relaxada	$> 1\%$	$i_{corr}' = 0,0625 Cl_{cc} - 0,0125$	
	Tracionada	$> 0,4\%$	$i_{corr}' = 0,4909 Cl_{cc}^2 - 0,5207 Cl_{cc} + 0,3297$	

5.2. Análise dos resultados dos ensaios de avaliação das manifestações físico-mecânicas da corrosão

5.2.1. Redução da aderência concreto/armadura com o avanço da corrosão

A seguir comentam-se os aspectos mais importantes dos ensaios de aderência:

- A resistência de aderência das barras de aço carbono foi superior à das barras de aço inoxidável em todos os casos. Os valores iniciais de aderência de ruptura τ_{bu} (barras sem corrosão) foram 15% menores nas barras de aço inoxidável, em relação às barras de aço carbono (ver Tabela 31). Em barras sem corrosão, a aderência média τ_{bm} foi 36% menor nas barras inoxidáveis, em relação às de aço carbono. As diferenças da τ_{bm} são maiores devido ao fato de que o deslizamento é maior nas armaduras de aço inoxidável.

Segundo a norma espanhola EHE:1999, para diâmetros de armaduras (barras nervuradas) entre 8 mm e 32 mm, $\tau_{bm} \geq (7,84 - 0,12\phi)$, τ_{bm} em MPa e ϕ em mm (para $\phi = 10$ mm, $\tau_{bm} \geq 6,64$ MPa). Mesmo desconsiderando a diferença de -10% dos resultados do ensaio de arrancamento em relação aos de flexão (ver item 3.6.1), ambas as armaduras apresentam aderência média superior à requerida (ver Tabela 31).

Os valores médios de aderência relacionados com a perda de massa média são representados nas Figura 72 à Figura 74.

- Achou-se uma mesma tendência em ambos os aços: a aderência cresce no início da corrosão, etapa que AL SULAIMANI et al. (1990) define como de “pré-fissuração” (referindo-se à microfissuração do concreto da região da interface, provocada pela ação expansiva dos produtos de corrosão).
- Logo após, com o avanço da corrosão, a aderência volta a cair, o que indica que a ação expansiva dos produtos de corrosão provocou a microfissuração do concreto em volta da barra, e que as tensões que contribuíam para um melhor confinamento foram aliviadas (RODRÍGUEZ et al., 1993).

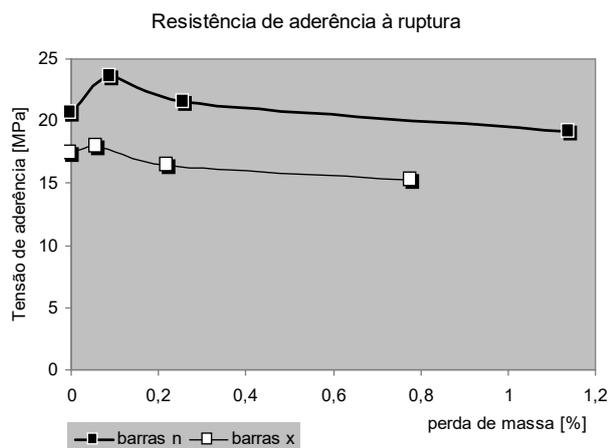


Figura 72. Representação gráfica do comportamento da resistência de aderência à ruptura (τ_{br}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).

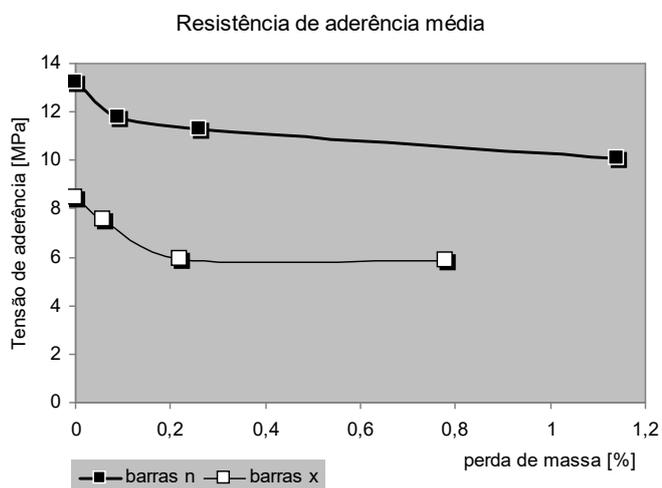


Figura 73. Representação gráfica do comportamento da resistência de aderência média (τ_{bm}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).

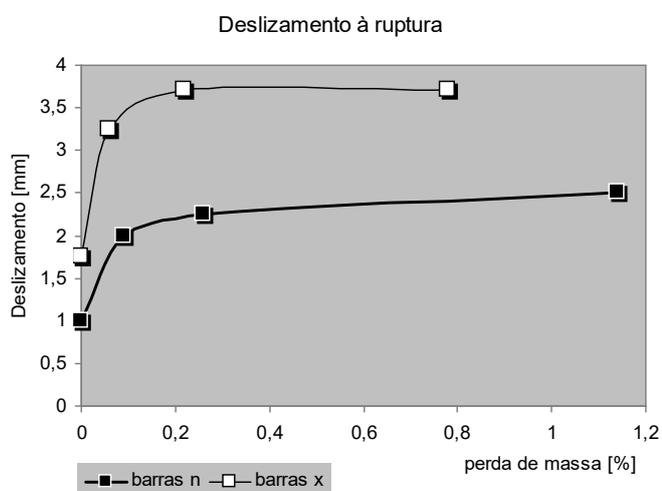


Figura 74. Representação gráfica do comportamento do deslizamento à ruptura com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).

O ganho de resistência de aderência pode, então, estar associado a um aumento do confinamento do concreto pela ação expansiva dos produtos de corrosão, antes que a tensão de expansão supere a resistência à tração do concreto em volta da barra. Esse fenômeno foi mais evidente nas barras de aço carbono, possivelmente porque nelas a superfície corroída ocupa uma área maior que nas barras de aço inoxidável, onde a ação expansiva dos produtos de corrosão concentra-se somente nos pites.

- O aumento do deslizamento até a ruptura, com o avanço da corrosão (ver da Figura 74 à Figura 46), pode ser devido à ação localizada da corrosão e à heterogeneidade do concreto. Com o avanço da corrosão manifesta-se com maior intensidade o efeito lubrificante dos produtos de corrosão formados (RODRÍGUEZ et al., 1993). No ensaio acelerado os produtos de corrosão do aço inoxidável mostraram um efeito lubrificante maior que os do aço carbono devido, possivelmente, à sua menor mobilidade e solubilidade, o que faz com que eles permaneçam por mais tempo na região da interface. Por sua vez, os produtos de corrosão do aço carbono tendem a preencher os poros do concreto, e com isto, contribuem menos para a lubrificação da interface concreto/armadura.
- A comparação dos valores de resistência de aderência média τ_{bm} da Figura 73 apresenta-se muito interessante. A τ_{bm} , ao ser calculada para valores fixos de deslizamento ($\Delta = 10 \mu\text{m}$; $100 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$), leva em consideração o “alongamento” da curva (maiores valores de deslizamento em iguais tensões de aderência, à medida em que avança a corrosão). A redução da aderência média segue praticamente o mesmo comportamento nos dois aços (ver Figura 73).

Não foi possível determinar uma equação matemática satisfatória para as relações **aderência versus grau de corrosão** ou **deslizamento versus grau de corrosão**. Linhas de tendência desenhadas graficamente sobre o conjunto de pontos (resultados dos ensaios) permitem diferenciar trechos de diferentes comportamento (ver da Figura 75 à Figura 77).

A τ_{bu} determinada no ponto de ruptura (ponto D da Figura 16, página 53) leva em consideração, com maior ou menor predominância, um ou outro mecanismo de aderência (ver descrição no item 2.3.1).

O grau de corrosão da armadura é que determina o mecanismo de aderência predominante na ruptura (ver Figura 75). As armaduras não corroídas manifestam a presença de todos os mecanismos descritos, inclusive da adesão química. Com o início da corrosão a adesão desaparece pelo menos nas regiões anódicas; em estados mais avançados a superfície corroída é maior e as fissuras começam a reduzir o aporte da aderência de atrito; quando o aumento do deslizamento antes da ruptura é uma característica significativa do ensaio, a aderência mecânica é o mecanismo predominante.

- Ao aumentar o grau de corrosão das armaduras podem ser descritas três etapas, definidas pelas manifestações predominantes: etapa da pré-fissuração, etapa da microfissuração e etapa da lubrificação.

O comportamento da aderência com o avanço da corrosão, expresso em densidade de corrente de corrosão, é independente do diâmetro da armadura em questão⁶³ (ver Anexo G.2).

- A “pré-fissuração” prevalece para ambos os aços com diâmetro nominal igual a 10 mm, com graus de corrosão em torno de 0,1% de perda de massa, equivalente a uma quantidade de carga eletroquímica transferida de 0,18 $\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$.
- A “lubrificação” acontece para ambas as armaduras pesquisadas, a partir de graus de corrosão em torno de 0,3% de perda de massa, equivalente a uma quantidade de carga eletroquímica transferida de 0,53 $\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$. Nesta etapa há uma microfissuração bem definida e os produtos de corrosão vão preenchendo as microfissuras formadas.

⁶³ Se a taxa de corrosão é expressa em perda de massa [%], deve-se levar em conta que esta depende do diâmetro da armadura.

Os valores antes definidos dependem de vários fatores cuja influência não foi objeto desta pesquisa, mas que devem ser levados em consideração principalmente com objetivo da previsão da vida útil das estruturas de concreto armado: a resistência à tração do concreto, a porosidade e a influência do modelo acelerado do ensaio de corrente impressa. Um dos inconvenientes deste ensaio é que os produtos de corrosão formados não conseguem se alojar nos poros do concreto ao ritmo acelerado imposto, ocasionando, antes do que ocorreria de maneira natural, a fissuração da interface.

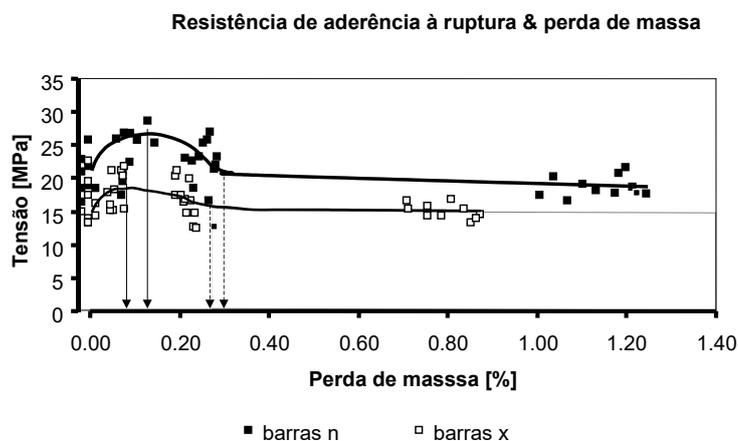


Figura 75. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de **resistência de aderência à ruptura versus perda de massa**.

A resistência de aderência média (τ_{bm}) é calculada com valores de tensão que se encontram geralmente na região de aderência por atrito (abaixo do ponto “C” da Figura 16). É uma propriedade muito influenciada pelo aumento dos deslizamentos das barras corroídas, daí as diferenças entre a Figura 76 e a Figura 75. Entre 0,2% e 0,3% de perda de massa, a diminuição de τ_{bm} inicia uma certa estabilização (equivalente a uma quantidade de carga eletroquímica transferida de entre 0,36 e 0,53 $\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$), o que indica que em graus de corrosão maiores o aumento dos deslizamentos não afeta o trecho de até 1 mm de deslizamento do gráfico **tensão de aderência versus deslizamento**.

Para as barras de aço carbono não corroídas, o cálculo de τ_{bm} considerou os trechos de desenvolvimento tanto do mecanismo de aderência por atrito como do de aderência mecânica. Em barras corroídas de aço carbono a aderência mecânica foi considerada parcialmente ($1 \text{ mm} < \Delta_r < 2,5 \text{ mm}$).

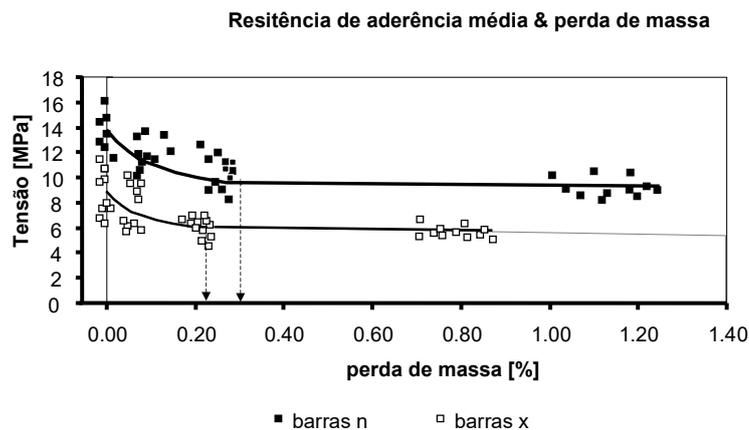


Figura 76. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de **resistência de aderência média** *versus* **perda de massa**.

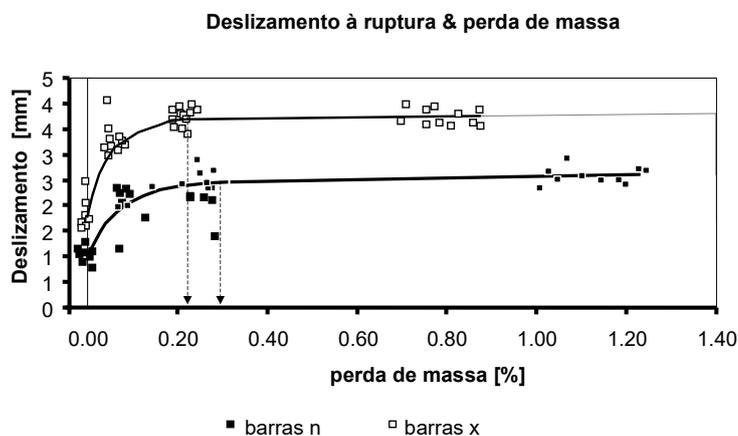


Figura 77. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados de **deslizamento à ruptura** *versus* **perda de massa**.

Para as barras de aço inoxidável não corroídas o valor da τ_{bm} leva em conta as tensões desenvolvidas pelo mecanismo de atrito e parcialmente as do mecanismo de aderência mecânica, enquanto que, nas barras corroídas de aço inoxidável, que apresentam $\Delta_r > 3$ mm, a τ_{bm} não leva em consideração praticamente as tensões desenvolvidas pela aderência mecânica das nervuras.

A aderência de atrito das barras de aço inoxidável é baixa e piora com o avanço da corrosão, ao contrário do que acontece com o aço carbono. O aumento das irregularidades na conformação superficial das armaduras inoxidáveis (mais a redução do espaçamento entre nervuras do que o aumento da altura das nervuras) pode contribuir para o aumento do atrito.

- Prevê-se uma redução máxima da resistência de aderência média com o avanço da corrosão, de 30% para as armaduras de aço inoxidável e 25% para as de aço carbono, enquanto que para a resistência de aderência à ruptura as perdas são de 12% para o aço inoxidável e 7% para o aço carbono. Isto independentemente do diâmetro das armaduras.
- Esta deterioração da resistência de aderência média ocorre com uma quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,41 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ para o aço carbono e $0,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ para o aço inoxidável que, expressada em perda de massa, depende do diâmetro da armadura. Assim, para as armaduras inoxidáveis $\Delta m_l = (0,023/\phi)$, e para as armaduras de aço carbono $\Delta m_l = (0,03/\phi)$.

As linhas de tendência representadas na Figura 77 vêm a confirmar que o efeito lubrificante dos produtos de corrosão sobre os deslizamentos concreto/armadura, em ambos os aços, torna-se significativo em graus de corrosão iguais a 0,3% da perda de massa (quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$).

Os menores deslizamentos das barras de aço carbono podem dever-se à sua rugosidade superficial inicial, maior que a do aço inoxidável. Esta diferença torna-se mais significativa com o avanço da corrosão. No aço carbono corroído a superfície torna-se mais irregular, ao passo que as modificações na superfície do aço inoxidável corroído são de caráter pontual, apenas nos pites, não contribuindo para o aumento do atrito.

5.2.2. Redução da resistência à tração com o avanço da corrosão

A seguir comentam-se as observações realizadas na análise dos resultados dos ensaios de resistência à tração:

- Os diagramas de **tensão versus alongamento** das barras de aço carbono mostram claramente o patamar de escoamento (ver Figura 48). No caso das barras de aço inoxidável um aparente patamar começa a aparecer em barras corroídas (ver Figura 49).
- Os gráficos que relacionam o limite de resistência e o limite de escoamento com a perda de massa seguem aproximadamente a mesma tendência, igual em ambos aços

(ver Figura 78 e Figura 79), constituindo possivelmente uma evidência da corrosão por pites.

Os valores médios de resistência à tração relacionados com a perda de massa média são representados na Figura 78 e na Figura 79.

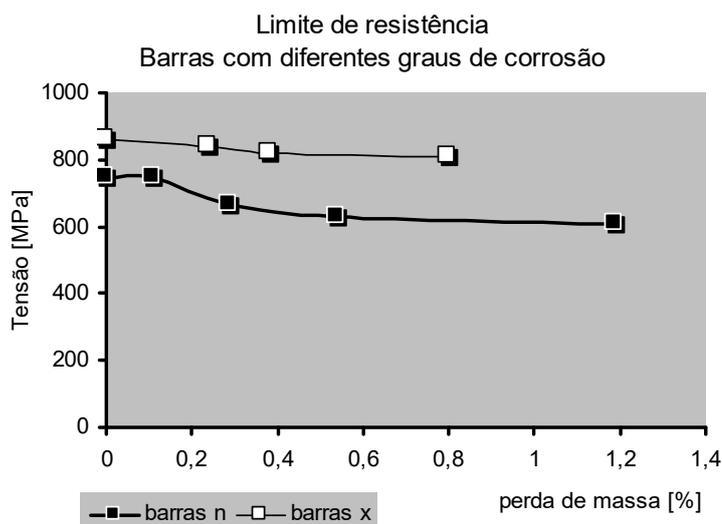


Figura 78. Representação gráfica do comportamento do limite de resistência (f_{st}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).

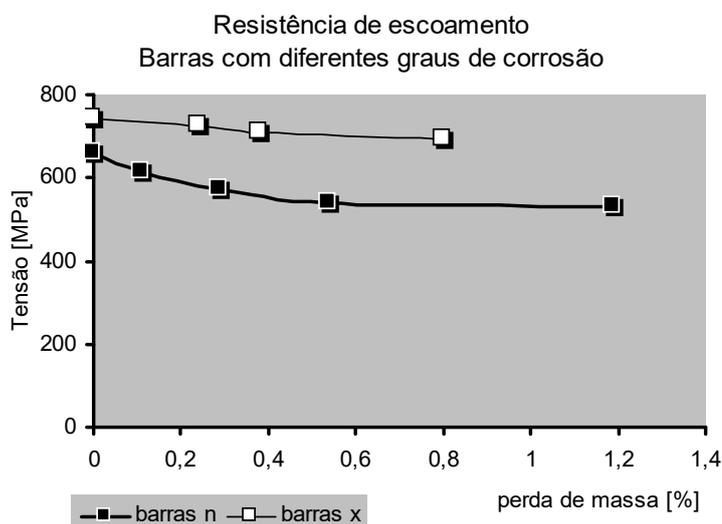


Figura 79. Representação gráfica do comportamento da resistência de escoamento (f_{yt}) com o avanço da corrosão de armaduras de aço carbono e aço inoxidável (valores médios).

Não foi possível determinar qualquer equação matemática que expresse satisfatoriamente as relações **resistência à tração versus grau de corrosão**. Linhas de tendência desenhadas graficamente sobre o conjunto de pontos (resultados dos ensaios) permitem destacar trechos de diferentes comportamento (ver Figura 80 e Figura 81).

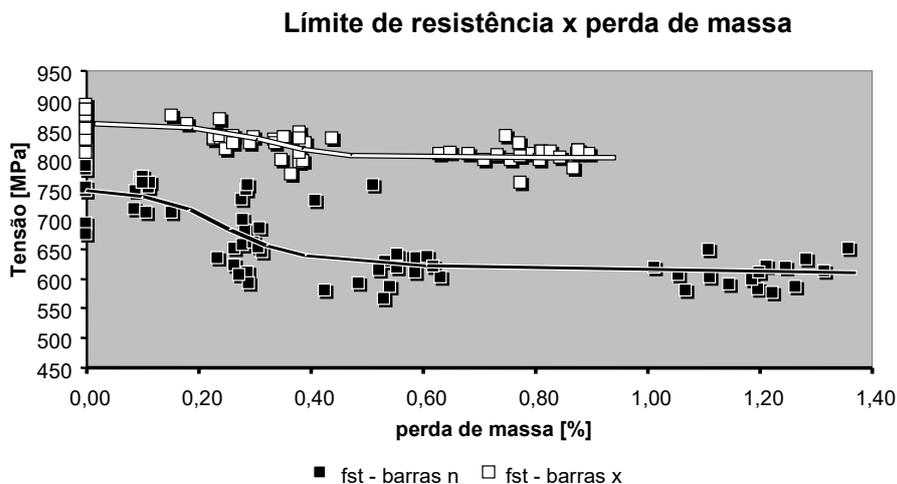


Figura 80. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados do **limite de resistência à tração versus perda de massa**.

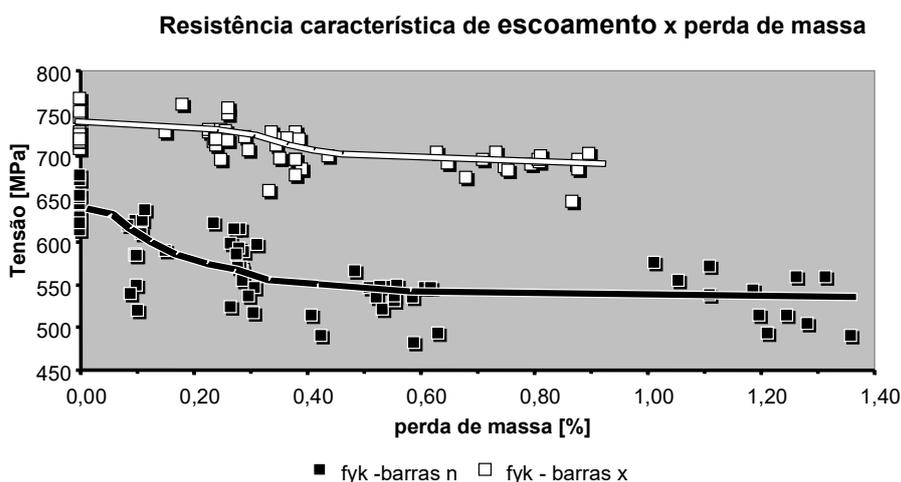


Figura 81. Linhas de tendência aproximadas (não calculadas) levantadas graficamente sobre os resultados da **resistência de escoamento versus perda de massa**. Verifica-se a mesma tendência descrita para o limite de resistência.

- Na relação entre a resistência à tração e a corrosão por cloreto descrevem-se três etapas: etapa de aparição dos pites, etapa de desenvolvimento e etapa de saturação dos pites, similares em ambos os aços. Estas etapas se manifestam mais intensamente nos resultados da resistência de escoamento.

Na Figura 82 representa-se a tendência de comportamento da resistência à tração com a corrosão por cloreto, válida para ambos os aços. A reta AF representa a relação entre a perda de massa teórica, com redução geral da seção diametral da barra, e a resistência à tração. A etapa de aparição dos pontos anódicos e surgimento dos pites (trecho AB) caracteriza-se por uma pequena perda da resistência - etapa de "aparição" dos pites. Na

etapa seguinte (trecho BC) os pites desenvolvem-se em profundidade, provocando uma perda brusca da resistência - etapa de "desenvolvimento" dos pites. Depois desta etapa, a partir do ponto C, sucedem-se ciclos de "aparição" e "desenvolvimento" dos pites, acontecendo uma certa estabilização na redução da resistência, tendência semelhante à da reta teórica AF (mais evidente no trecho DE próximo e paralelo à reta AF). Trata-se da etapa de "saturação" dos pites. Por momentos os produtos de corrosão dentro do pite controlam o avanço do processo por saturação e por isso, os pites param de crescer em profundidade. Novos pites começam a aparecer, enquanto os já existentes podem aumentar o diâmetro da abertura ("olho do pite").

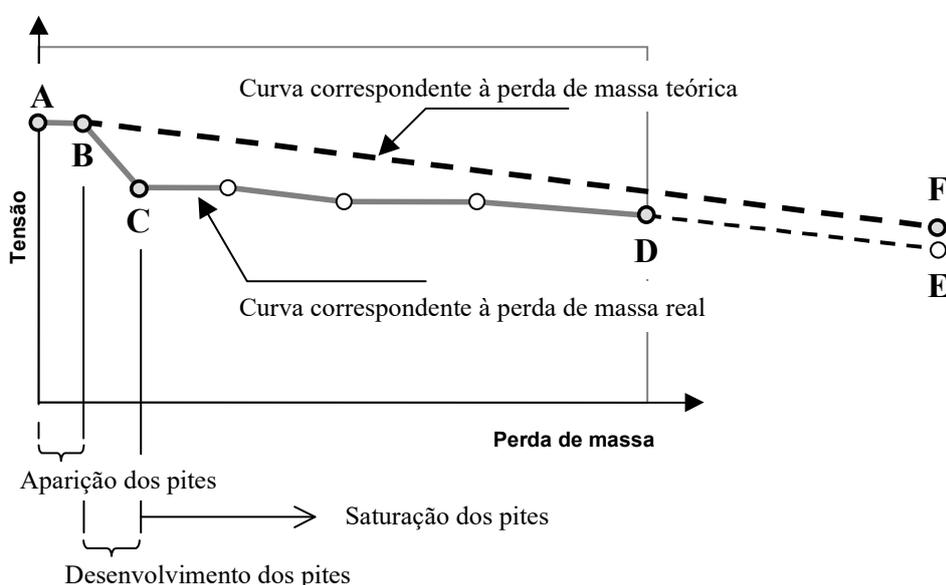


Figura 82. Tendência de comportamento da resistência à tração com o avanço da corrosão em presença de íons cloreto.

Aparentemente, no ponto C da Figura 82 os pites terão atingido uma determinada profundidade, que pode ser chamada de saturação⁶⁴ (P_p). A partir deste ponto, no aço carbono a corrosão se desenvolve preponderantemente como corrosão generalizada, que caracteriza a etapa de saturação dos pites, se aproximando da reta de perda teórica da resistência à tração. O aço inoxidável, na etapa de saturação dos pites, apresenta uma perda muito pequena da resistência à tração; os pites aprofundam pouco, mas o incremento de sua quantidade sobre a superfície da barra aumenta o número de seções de provável ruptura.

⁶⁴ Isto por causa da mudança de comportamento. Não poderia ser chamada de máxima, porque os pites poderiam continuar a se aprofundar.

- A aparição dos pites nas barras da pesquisa se estende até graus de corrosão de 0,1% de perda de massa no aço carbono (quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,18 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$) e 0,25% de perda de massa no aço inoxidável (quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,45 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$).
- A "saturação" acontece nas barras de aço inoxidável da pesquisa com perdas de massa da ordem de 0,4% (quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,677 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$) e nas barras de aço carbono da pesquisa com perdas de massa da ordem de 0,5% (quantidade de carga eletroquímica transferida de $0,87 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$). Nestes graus de corrosão, as barras de aço carbono apresentam uma redução de 18% da resistência de escoamento, enquanto que as de aço inoxidável perdem pouco mais de 4% de sua resistência de escoamento inicial (ver Figura 83).
- As perdas da resistência à tração⁶⁵ obtidas para iguais graus de corrosão são menores em armaduras de aço inoxidável (entre 3 e 4 vezes) em relação às ocorridas nas armaduras de aço carbono. Este comportamento tende a diminuir em estados muito avançados da corrosão.

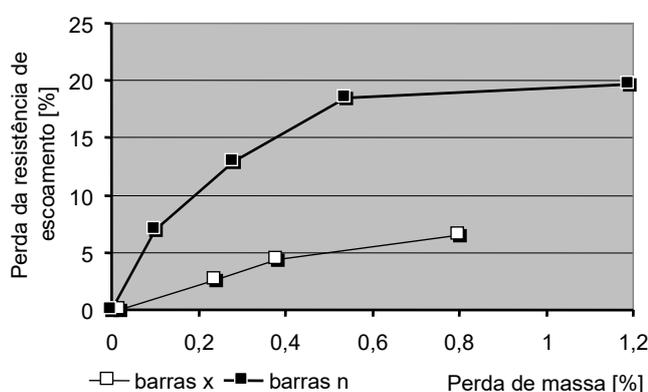


Figura 83. Perda da resistência de escoamento, em porcentagem, com o avanço da corrosão medido em perda de massa.

Propõe-se, para a análise, a avaliação do fator R' . Este fator relaciona as reduções de resistência à tração real e teórica, análogo ao fator $R = P_{\text{med}}/P_{\text{max}}$ utilizado por GONZÁLEZ et al. (1995) para avaliar a relação entre a penetração média da corrosão (P_{med}) e a máxima profundidade dos pites (P_{max})⁶⁶.

⁶⁵ A perda de resistência à tração é com relação à resistência à tração inicial de barras não corroídas.

⁶⁶ Segundo GONZÁLEZ et al. (1995), a relação R assume valores entre 4 e 8.

$$R' = \Delta f'_{real} / \Delta f'_{teor}$$

onde: $\Delta f'_{real}$ - redução da resistência à tração real por perda de massa real [%].

$\Delta f'_{teor}$ - redução teórica da resistência à tração devida à perda de massa teórica [%].

- O fator R' é entre 2 e 3 vezes maior em barras de aço carbono (ver Tabela 43) devido, possivelmente, ao fato de que em barras de aço carbono a corrosão se desenvolve, geralmente, em todo o perímetro da seção da região preponderantemente anódica, com pites mais irregulares e agudos (ver Figura 84)⁶⁷.
- Pressupõe-se que nas barras de aço carbono com corrosão a área da seção transversal resultante seja menor que nas barras de aço inoxidável corroídas com igual perda de massa (ver Figura 85). Com isto, nas barras de aço carbono piora a distribuição de tensões internas, com maior concentração em torno das cavidades agudas, onde é menor a energia de fratura necessária para a formação de novas superfícies.

Tabela 43. Cálculo de R' para as barras dos dois tipos de aço em 12 dias de ensaio (momento de início da etapa de "saturação" dos pites) e em 20 dias (fim do ensaio).

Tempo de corrente impressa	Tipo de aço	$\Delta f'_{teor}$ [%]	$\Delta f'_{real}$ [%]	R' [%/-%]
12 dias – “Saturação”	carbono	0,55	17,5	28
	inoxidável	0,40	4,5	11
20 dias - Fim do ensaio	carbono	1,20	19,5	16
	inoxidável	0,80	6,5	8

- Ambos os fatores R e R' caracterizam a corrosão por pites, o primeiro do ponto de vista geométrico, o segundo considerando a resistência do material.

Uma vez que a profundidade de saturação dos pites (P_p) não depende do diâmetro da armadura (ver Anexo G.1), pode-se afirmar que o fator R' e os gráficos da Figura 80 e da Figura 81 podem sofrer modificações, dependendo da bitola da armadura. O comportamento genérico da **resistência à tração versus perda de massa** representado na Figura 82 depende do diâmetro da armadura, como se mostra na Figura 86.

⁶⁷ Esta situação não deve acontecer em estruturas reais em que a frente de cloreto atinge primeiro o lado da barra mais perto da superfície do concreto, desenvolvendo-se preponderantemente ali a corrosão.

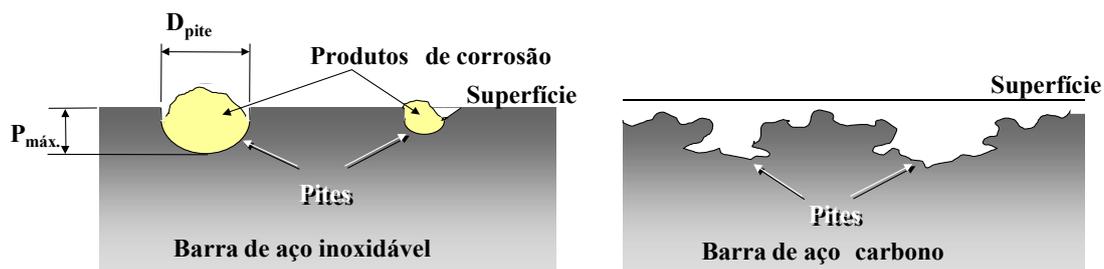


Figura 84. Formação de pites sobre a superfície das armaduras de aço inoxidável e de aço carbono.

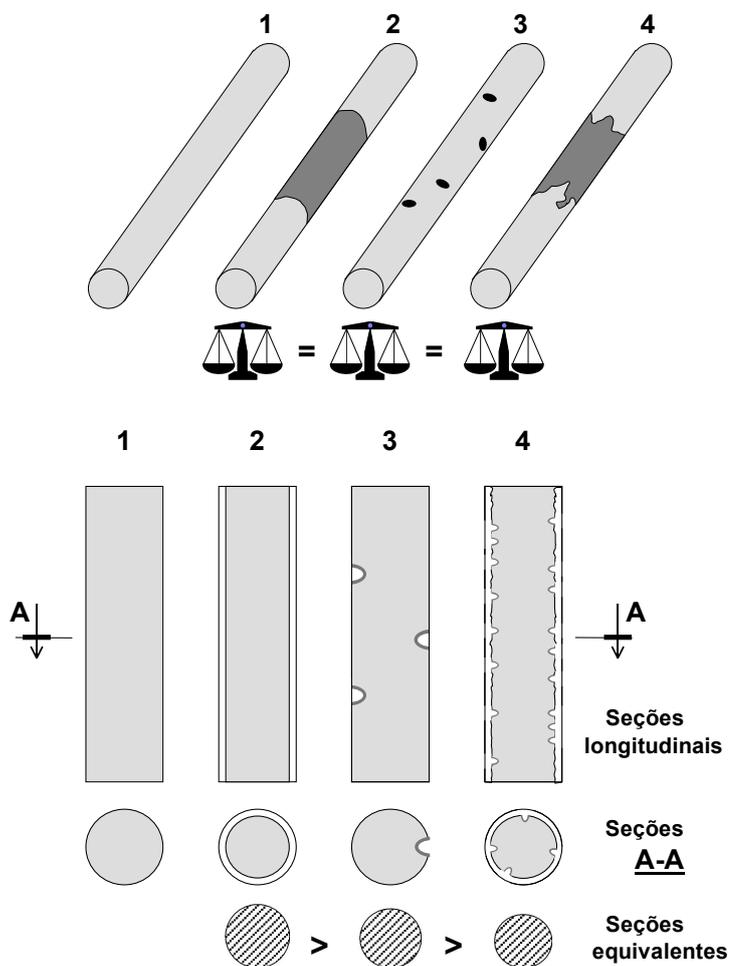


Figura 85. Comparação quanto a seção equivalente da barra não corroída (1) e barras corroídas com as mesmas perdas de massa: a barra desgastada de maneira regular igual ao caso da corrosão generalizada (2); a corroída por pites como no caso do aço inoxidável (3); e a corroída por pites generalizados como no caso da corrosão por cloreto do aço carbono (4). Estas últimas (4) resultam as de menor seção transversal equivalente.

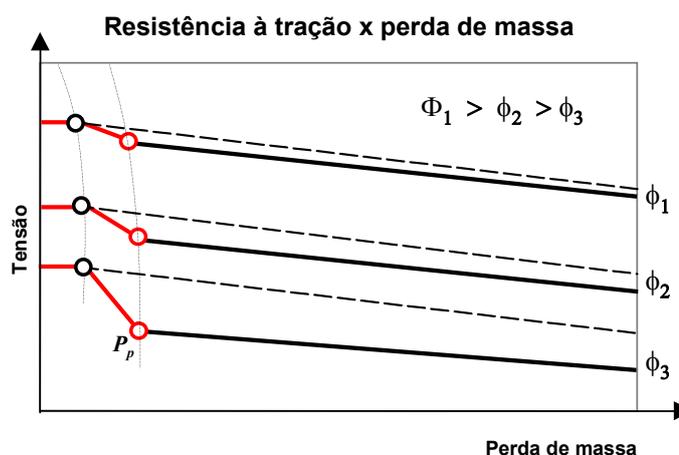


Figura 86. Previsão da redução da resistência à tração com a corrosão de barras de diferentes diâmetros (ϕ).

Determinação da profundidade de saturação dos pites P_p das barras estudadas.

No Anexo G foi desenvolvido o cálculo das dimensões características dos pites formados no início da etapa de “saturação” em ambos os tipos de armaduras. Algumas considerações foram feitas da avaliação visual das armaduras corroídas por corrente impressa. Estas considerações podem estar influenciadas pelas próprias condições aceleradas do ensaio e não corresponderem estritamente às condições naturais da corrosão, embora as relações geométricas (R) observadas estejam de acordo com as publicadas por GONZÁLEZ et al. (1995). As profundidades de pite, calculadas como o espaçamento provável entre pites no aço inoxidável, foram da mesma ordem de grandeza das observadas. Na Tabela 44 resumem-se os resultados dos cálculos apresentados no Anexo G.

Tabela 44. Características do ataque por cloreto nas barras de aço inoxidável e aço carbono no início da etapa de “saturação” dos pites.

Características ↓	Tipo de aço ⇒	
	Aço inoxidável	Aço carbono
Profundidade de saturação dos pite P_p	1,46 mm	(1,0 ÷ 1,3) mm
Número provável de pites formados na seção de ruptura ⁶⁸	1	3 ÷ 4
Profundidade do ataque generalizado P_{med}	--	0,20 ÷ 0,26
Espaçamento provável entre pites S_p	29,4 mm	--
Relação entre o diâmetro da armadura (ϕ) e a perda de resistência à tração (Δf)	$\Delta f = 4 \cdot \phi^{-2}$	$\Delta f = 8,3 \cdot \phi^{-1,7}$

Os resultados teóricos do Anexo G foram confirmados pela observação visual. Porém, estas deduções estão baseadas nos resultados do experimento e dependem das

⁶⁸ A formação de pites no aço carbono evolui para uma corrosão do tipo generalizada.

características do concreto empregado e das condições dos ensaios. Acredita-se que, mantendo constantes as condições do ensaio e as propriedades do concreto, as deduções do Anexo G referentes à profundidade e espaçamento dos pites não dependam do diâmetro das armaduras.

- No próprio Anexo G (Figura G. 2 e Figura G. 5) ficou demonstrado matematicamente que as armaduras com resistência à corrosão mais afetada pela corrosão são as de menor diâmetro, precisamente as mais expostas, geralmente, ao ataque dos agentes agressivos.

5.3. Estimativa de vida útil.

Integram-se os resultados das *Partes 1 e 2* da pesquisa numa metodologia sistêmica de cálculo de vida útil, baseada nos conceitos definidos em HELENE (1993). A metodologia proposta, avaliada apenas nos resultados laboratoriais desta pesquisa, poderá ser futuramente enriquecida com novos dados experimentais e comprovações práticas, tornando o seu prognóstico cada vez mais acertado e podendo-se estabelecer probabilisticamente o grau de veracidade do mesmo.

Esta estimativa permite comparar qualitativamente o desempenho, quanto à durabilidade, das armaduras de aço inoxidável e de aço carbono. Superando as distorções próprias do modelo acelerado utilizado, o prognóstico pode ser validado quantitativamente para estruturas reais que utilizarem os mesmos materiais e estejam submetidas a condições de exposição semelhantes ($GU = 86\%$; $r.u. = 100\%$ e $Cl_{cc} =$ até 5%). Mas, também, as previsões podem se estender para estruturas com concreto de qualidade diferente, armaduras de diferentes diâmetros e submetidas a regime de umidade menor.

Os cálculos de vida útil são desenvolvidos em duas etapas, segundo se apresenta na Tabela 45. Uma primeira onde aplicam-se e integram-se diretamente os resultados obtidos da pesquisa, usando como exemplo uma estrutura de um cais marinho, constituída de pilares e vigas dos mesmos materiais empregados nos corpos-de-prova da tese, e submetida às mesmas condições de agressividade dos ensaios. Uma segunda etapa, em que extrapolam-se os resultados para o exemplo de um reservatório industrial

de material líquido de elevada concentração de cloreto. A estrutura é formada por paredes cilíndricas e uma laje plana, utiliza um concreto mais durável ao empregado nos corpos-de-prova da tese, armaduras de diferentes bitolas à estudada, e é submetida a condições ambientais de maior agressividade às das modeladas na pesquisa. A informação detalhada deverá ser consultada no Anexo H.

Tabela 45. Etapas do cálculo e previsão de vida útil dirigido para o fenômeno da corrosão das armaduras (adaptado de HELENE, 1993).

Etapas	Parâmetros	Estimativa	Confiabilidade
1 – Estrutura real de materiais e condições de exposição iguais aos utilizados na pesquisa			
<i>Cl_{cc} = até 2,5%</i>			
Vida útil de projeto (t ₀)	Conhecidos	Objetiva	Grande
Vida útil de serviço (t ₀ + t ₁)	Sugeridos *	Subjetiva	Razoável
Vida útil total (t _i)	Sugeridos *	Subjetiva	Razoável
2 - Estrutura real de materiais e condições de exposição diferentes aos utilizados na pesquisa			
<i>concreto durável, r.u. = 50%, Cl_{cc} = até 2,5%</i>			
Vida útil de projeto (t ₀)	Desconhecidos	Subjetiva	Razoável
Vida útil de serviço (t ₀ + t ₁)	Extrapolados *	Subjetiva	Reduzida
Vida útil total (t _i)	Extrapolados *	Subjetiva	Reduzida

* a partir dos resultados da pesquisa.

r.u. – regime de umidade

5.3.1. Considerações para o período de iniciação

Determina-se, avaliando a Segunda lei de Fick, a relação **tempo versus Cl_{cc}** na profundidade da armadura (cobrimento). As equações de cálculo estão desenvolvidas no Anexo H. O período de iniciação estende-se até o instante de tempo em que a frente de cloreto limite, que provoca a desp passivação do aço, atinja a armadura. O período de iniciação define a vida útil de projeto. A vida útil de projeto depende da agressividade do meio, das propriedades do concreto, do valor do cobrimento e da resistência à corrosão das armaduras.

5.3.2. Considerações para a estimativa do período de propagação

Deve-se considerar que o período de propagação começa com a ativação da corrosão, manifestando-se mesmo que localizadamente. As primeiras manifestações, tais como manchas e fissuras, podem afetar o conforto visual. No período de propagação definem-se a vida útil de serviço e a vida útil total.

No exercício desenvolvido no Anexo H, a vida útil de serviço foi limitada por qualquer das seguintes condições ou manifestações patológicas inadmissíveis:

- a) pelo aparecimento, com um determinado grau de incidência, de fissuras no cobrimento de concreto;
- b) pela perda, com um determinado grau de incidência, de uma determinada parcela da aderência inicial concreto/armadura, e
- c) pela perda, em qualquer armadura, de uma determinada parcela da resistência à tração.

Os valores limites adotados para cada manifestação patológica foram diferentes para ambos os tipos de armaduras, mais rigorosos na variante com aço inoxidável (ver Anexo H).

Segundo o Boletim 162 do CEB (1983), os graus de deterioração admissíveis escolhidos no exercício de cálculo de vida útil são: para o aço carbono de nível “forte”, com capacidade resistente residual mínima do componente estrutural, de 45%; para o aço inoxidável de nível “intenso”, com capacidade resistente residual mínima do componente estrutural, de 60%.

No caso da limitação por fissuração, são utilizadas as observações resultantes do estudo preliminar desenvolvido por TICIANELLI e TULA (1998) no âmbito desta tese, apresentados no item 1.2.6.

No Anexo H.1 desenvolve-se o roteiro ou algoritmo para o cálculo da vida útil. Esta metodologia poderá ser adotada na estimativa da vida útil de qualquer estrutura. Os passos principais são:

- Primeiramente determina-se o regime de contaminação a que estará submetida a armadura, aplicando a lei de Fick ou outros métodos mais modernos que descrevem a penetração dos íons cloreto no concreto⁶⁹. No exemplo considerou-se o concreto íntegro; em trabalhos futuros deverão ser incluídas as condições de concreto fissurado e a perda do cobrimento sobre a armadura (caso de corrosão atmosférica);

⁶⁹ Os métodos modernos consideram a variação do coeficiente de difusão efetivo “ D_{efe} ” variável no tempo.

- a vida útil de projeto (t_0) corresponde ao instante de tempo em que o nível de contaminação que promove a despassivação do metal atinge a profundidade da armadura;
- conhecido o regime de contaminação, estima-se a quantidade de carga eletroquímica transferida (c_{corr}) em [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]. Aqui leva-se em consideração o tipo de aço, e a condição de tensão. A quantidade de carga eletroquímica transferida é calculada multiplicando a densidade de corrente de corrosão estimada⁷⁰ pelo tempo;
- estimada c_{corr} , calcula-se o regime de deterioração da manifestação patológica em questão. Além do tipo de aço, é importante considerar: a bitola da armadura, quando calcula-se por perda de resistência à tração; a configuração superficial da armadura quando calcula-se por resistência de aderência; o valor do cobrimento e o espaçamento entre barras, quando calcula-se por fissuração;
- a vida útil de serviço (t_0+t_1) corresponde ao instante de tempo em que é atingido o nível de deterioração prefixado como limite tolerável;
- a vida útil total ou estrutural (t_t) corresponde ao instante de tempo em que a deterioração da capacidade resistente atinge o nível máximo que conduz a perda total da segurança estrutural.

É importante diferenciar as estimativas de vida útil obtidas de dados laboratoriais, das obtidas de ensaios in-situ com estruturas reais (AHMAD et al., 1997). É possível extrapolar os resultados laboratoriais para estimar o comportamento dos locais mais afetados pelas manifestações patológicas de uma estrutura e calcular a vida útil local. Para isto, os dados laboratoriais deverão ser modificados por coeficientes de ajuste. Estes coeficientes deverão considerar: os desvios do modelo acelerado de corrosão adotado na pesquisa laboratorial, os desvios dos métodos acelerados de medição adotados, os desvios das diferenças entre as condições reais de exposição e as condições laboratoriais (temperatura - T , grau de umidade do concreto - GU , regime de umidade -

⁷⁰ A correlação entre densidade de corrente de corrosão e grau de contaminação por cloreto deverá ser determinada em ensaios de laboratório. Recomendam-se ensaios rápidos de Rp e ensaios potenciodinâmicos para estudos de comportamento.

r.u., acesso de oxigênio, etc). A expressão a seguir permite estimar a vida útil de serviço dos locais críticos da estrutura:

$$(t_0 + t_1)_{\text{local}} = (t_0 K_0 + t_1 K_1) K_g \quad (6)$$

Onde: t_0, t_1 = prognóstico laboratorial do período de iniciação e do período de propagação respectivamente
 $(t_0 + t_1)_{\text{local}}$ = vida útil de serviço dos locais críticos da estrutura
 K_0 = coeficiente de ajuste do prognóstico laboratorial do período de iniciação
 K_1 = coeficiente de ajuste do prognóstico laboratorial do período de propagação (ou residual no caso de prognóstico com intervenção)
 K_g = coeficiente de ajuste global do prognóstico laboratorial da vida útil de serviço

Ainda, a vida útil de serviço da estrutura depende do grau de incidência admissível para a manifestação patológica dada. Assim, a vida útil de serviço estimada para um determinado componente estrutural será:

$$(t_0 + t_1)_{\text{estimada}} = \varphi (t_0 + t_1)_{\text{local}} \quad (7)$$

Onde: $(t_0 + t_1)_{\text{estimada}}$ = vida útil de serviço estimada para o componente estrutural
 φ = coeficiente que leva em consideração o grau de incidência admissível da manifestação patológica dada

Os coeficientes K e φ merecem estudos específicos como os que são desenvolvidos na Universidade Tecnológica de Chalmers, Göteborg, Suécia (LINDVALL, 1998). No exercício desenvolvido no Anexo H.2, a título de exemplo, são adotados valores para estes coeficientes.

A metodologia apresentada no Anexo H.1 é desenvolvida no exemplo do Anexo H.2 pode se reafirmar como método probabilístico de cálculo de vida útil, na medida em que o acúmulo de informações laboratoriais e de campo permitam estabelecer valores característicos e intervalos de confiança para as funções utilizadas. No caso da corrosão de armaduras, estas funções são:

- a relação **grau de contaminação versus densidade de corrente de corrosão;**
- a relação **quantidade de carga eletroquímica trasferida versus grau de deterioração das propriedades da armadura ou do concreto de cobrimento;**

- a relação de influência das características geométricas das barras, do espaçamento entre barras, das propriedades do concreto, do valor do cobrimento, das condições reais do meio, etc.;
- a relação entre a vida útil estimada para os locais críticos da estrutura e a vida útil estimada para todo o componente estrutural, visando o grau de aparecimento da manifestação patológica dada.

Da análise dos resultados do exercício de estimativa de vida útil desenvolvido no Anexo H pode ser comentado o seguinte:

- a metodologia proposta para o cálculo da vida útil de serviço é válida e aplicável a qualquer manifestação patológica da corrosão que seja definida como limite da vida útil de serviço: fissuração do cobrimento, perda da aderência concreto/armadura ou perda da resistência à tração.
- a metodologia proposta permite integrar de maneira sistêmica: as condições ambientais, a proteção do concreto, o comportamento eletroquímico das armaduras, a resistência à corrosão e suas manifestações físico-mecânicas, a deterioração do desempenho do componente estrutural.
- a realização de ensaios laboratoriais em diferentes condições de exposição permite extrapolar os resultados para diversas condições ambientais. Deverá continuar com o estudo de modelagem de ambientes, variando os elementos mais importantes, tais como: temperatura, grau de umidade (GU), teor de cloretos (Cl_{cc}), regime de umidade ($r.u.$), estado de tensão das armaduras e grau de fissuração do cobrimento.
- é possível aplicar procedimentos teóricos para extrapolar os resultados experimentais de determinados diâmetros para outros diâmetros de armaduras. Desta forma foram obtidas, nos Anexos G.2 e G.5, as expressões que descrevem a interdependência entre a perda da resistência à tração e o diâmetro da barra. Estas expressões deverão ser avaliadas em novos experimentos e reajustadas à realidade.

- a metodologia apresentada pode se afirmar como método probabilístico de cálculo de vida útil, na medida em que o acúmulo de informações laboratoriais e de campo permitam estabelecer os valores característicos das funções nela utilizadas.

5.3.3. Análise das estimativas de vida útil de projeto, vida útil de serviço e vida útil total

Da Figura 87 à Figura 89 apresentam-se os resultados da estimativa de vida útil das estruturas calculadas nas etapas 1 e 2 do exercício desenvolvido no Anexo H.

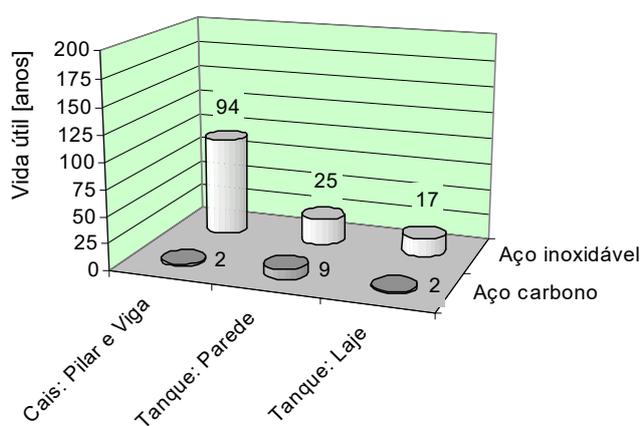


Figura 87. Estimativa de vida útil de projeto das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.

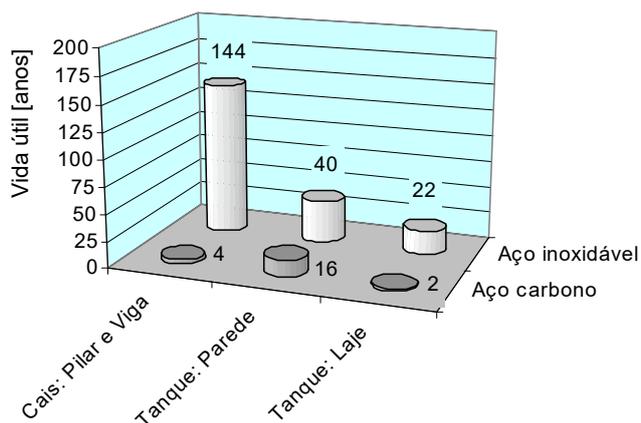


Figura 88. Estimativa de vida útil de serviço das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.

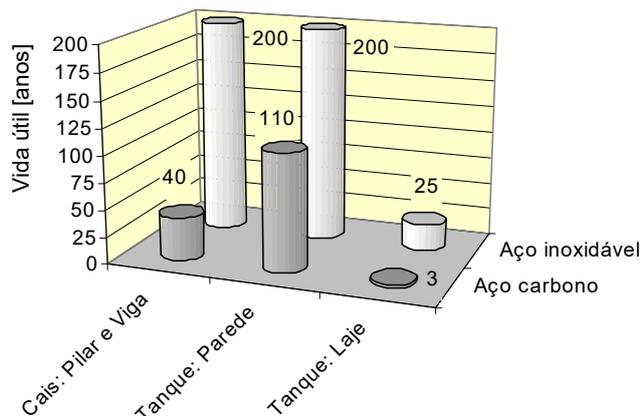


Figura 89. Estimativa de vida útil total das estruturas calculadas na etapa 1 - Cais com pilar e viga e na etapa 2 - Tanque industrial com parede e laje.

Vida útil de projeto

- A vida útil de projeto da variante com aço inoxidável resultou no exemplo da estrutura com concreto normal entre 50 e 100 vezes maior que a da variante com aço carbono. Na estrutura de “concreto durável” esta relação caiu para de 3 a 8 vezes, o que reflete a capacidade de proteção de um bom concreto.

Vida útil de serviço

- O cálculo da vida útil de serviço por fissuração ou perda de aderência, sem a aplicação de coeficientes de ajuste, resultou, em todos os casos, em valores iguais ou muito próximos. Isto se corresponde à análise teórica de que com a aparição das fissuras deve ocorrer uma perda local da aderência concreto/armadura;
- As perdas de resistência à tração acontecem em tempos iguais ou maiores do que os da ocorrência da fissuração e da perda de aderência;
- A vida útil de serviço da variante com aço inoxidável resultou no exemplo da estrutura com concreto normal em torno de 20 vezes maior que a da variante com aço carbono. Na estrutura de “concreto durável” esta relação caiu para aproximadamente 6 vezes.

Vida útil total

- Com exceção do caso da laje do tanque industrial, em todos os outros componentes estruturais calculados a vida útil total da variante com aço inoxidável ultrapassou o limite estabelecido para a estimativa de 200 anos;
- No caso da laje, único que permite comparação das variantes quanto à vida útil total, a variante com aço inoxidável resultou 8 vezes mais durável.

Vantagens da utilização da variante com aço inoxidável

No caso do exemplo desenvolvido no Anexo H, a variante com aço inoxidável apresenta diversas vantagens relacionadas com a sua maior durabilidade, que são comentadas a seguir:

- A eficácia do emprego de armaduras de aço inoxidável é maior em concretos menos duráveis, mas também pode ser utilizada muito satisfatoriamente em concretos de elevado desempenho como proteção adicional às falhas de projeto e execução, principalmente onde há perigo de perda da capacidade resistente por deterioração da resistência à tração⁷¹;
- As armaduras de aço inoxidável podem ser utilizadas em estruturas submetidas a meios extremamente agressivos, onde variantes com aço carbono tornam-se inviáveis do ponto de vista econômico e prático por apresentarem insuficiente durabilidade;
- O emprego de armaduras de aço inoxidável dispensa ou reduz as intervenções por manutenção. Com isto reduzem-se não somente os custos de manutenção, mas também os custos pela paralisação temporária de obras.

⁷¹ Em regiões de falhas de um “concreto durável”, a perda de proteção permite o desenvolvimento de ataques localizados, o que não representa preocupação do ponto de vista da fissuração (que se manifestará apenas localizadamente) ou da perda da aderência (a menos que se trate de um trecho de ancoragem).

CONCLUSÕES

1. Conclusões propriamente ditas

Respondendo ao objetivo principal da tese recomendam-se, com garantias de segurança estrutural e de durabilidade, a barra de aço inoxidável 316L de 10 mm de diâmetro para armadura das estruturas submetidas a intensa umidade e contaminação por cloreto:

- obras marinhas de conotada importância econômica;
- estruturas industriais submetidas a elevada contaminação
- qualquer obra de arte de grande porte, mesmo em ambientes de baixa agressividade, como proteção adicional às falhas de projeto e execução.

A seguir, outras considerações.

1.1. Quanto às manifestações eletroquímicas da corrosão

- A observação visual com auxílio de microscópio ótico não detectou ataque nas armaduras de aço inoxidável dos corpos-de-prova com até 5% de cloreto (em massa de cimento), mantidos durante 65 semanas com grau de umidade de 87% (imersão parcial em água) e temperatura média de 22°C. Nestas mesmas condições, todas as barras de aço carbono dos corpos-de-prova com 1% e 5% de cloreto apresentaram ataque em 5% a 10% da superfície.
- A análise das curvas de polarização potenciodinâmicas permitiu determinar para as armaduras de aço inoxidável: o potencial de dissolução da película de passivação, igual a 0 mV_{SCE}, o aparecimento do pite em potenciais provavelmente abaixo de -400 mV_{SCE}, as densidades de corrente de passivação, iguais a 0,05 µA/cm² para as barras relaxadas e 0,3 µA/cm² para as barras tracionadas de corpos-de-prova em flexão. Através dos diagramas de Evans foi possível explicar o salto do potencial de aparecimento do pite para potenciais maiores, devido à acidificação do anólito.

Comprovou-se uma certa instabilidade eletroquímica em barras relaxadas em 5% de cloreto (em massa de cimento) e em barras tracionadas de corpos-de-prova em flexão em 1% e 5% de cloretos. Comprovou-se que a saturação do concreto (ou para umidades de equilíbrio acima de 95%) piora a instabilidade eletroquímica em teores de cloreto acima da despassivação.

- Propõe-se, de maneira conservadora, o valor limite de cloretos de 1% (em massa de cimento) para barras relaxadas de aço inoxidável, e acima de 0,4% para barras tracionadas. Em teores de cloreto abaixo destes limites as barras podem ser consideradas passivas com densidades de corrente de corrosão desprezíveis.
- Potenciais eletroquímicos acima de 0 mV_{SCE} indicam estado de despassivação geral das armaduras de aço inoxidável.
- Potenciais eletroquímicos entre 0 mV_{SCE} e -180 mV_{SCE} indicam estado de passivação das armaduras de aço inoxidável. Não foi determinado com que probabilidade esta afirmação é verdadeira.
- Potenciais entre -180 mV_{SCE} e -400 mV_{SCE}, medidos em armaduras inoxidáveis, indicam instabilidade eletroquímica com certa probabilidade de perda local da passivação. Não foi determinado com que probabilidade esta afirmação é verdadeira.
- Potenciais abaixo de -400 mV_{SCE}, medidos em armaduras inoxidáveis, representam elevado risco de desenvolvimento de pites. Não foi determinado com que probabilidade esta afirmação é verdadeira.
- Foi comprovado o aumento das densidades de corrente de corrosão de armaduras de aço inoxidável e de aço carbono provocado pelos estados de tensão: de tração⁷², em componentes flexionados, e de dobra⁷³. Este aumento foi de aproximadamente 10 vezes para as armaduras tracionadas e 5 vezes para as dobradas.

⁷² Tração entre 30% e 40% do limite de escoamento da armadura.

⁷³ Dobra a 90° com raio de curvatura de 3 ϕ .

- Os valores máximos de densidade de corrente de corrosão recomendados para o cálculo de vida útil das estruturas com armaduras de aço inoxidável são:
 - de $0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para barras relaxadas em concretos com teores de cloreto entre 1% e 5% (em massa de cimento);
 - de $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para barras tracionadas em concretos com teores de cloreto entre 0,4% e 1% e;
 - de $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para barras tracionadas em concretos com teores de cloreto entre 1% e 5%;
 - para barras relaxadas em concretos com até 1% de cloreto e tracionadas em até 0,4% de cloreto a densidade de corrente de corrosão pode se considerar desprezível.

1.2. Quanto às manifestações físico-mecânicas da corrosão

- Com o avanço da corrosão a resistência de aderência à ruptura cresce no início, para logo cair com a aparição e desenvolvimento das fissuras internas provocadas pela ação expansiva dos produtos de corrosão. Podem ser descritas três etapas deste processo: etapa da “pré-fissuração”, etapa da “microfissuração” e etapa da “lubrificação”. Durante a “pré-fissuração” prevalece o mecanismo de aderência por atrito, com leve aumento da resistência de aderência devido à melhora do confinamento em torno da barra. Os produtos de corrosão que não conseguem se alojar nos poros da matriz cimentícia provocam tensões que não superam a resistência à tração do concreto. Com a “microfissuração” do concreto em volta da barra há uma redução brusca da resistência de aderência à ruptura e se dissipam totalmente as tensões de expansão. A redução da aderência se estabiliza quando em estados mais avançados da corrosão, a aderência é garantida pela ação mecânica, os produtos de corrosão encontram maior espaço nas fissuras e invadem a interface concreto/armadura lubrificando-a. Durante a “lubrificação” prevalece o aumento brusco dos deslizamentos. Em estados muito avançados da corrosão, o desenvolvimento das fissuras (de fendilhamento) conduz à perda total da aderência com arrancamento das barras.

- Os resultados da resistência de aderência média com o avanço da corrosão são mais sensíveis ao aumento dos deslizamentos do que os da resistência de aderência à ruptura. Com o avanço da corrosão a resistência de aderência média apresenta, comparada à resistência inicial, uma queda brusca: 25% no caso das armaduras de aço carbono e 30% no caso das de aço inoxidável (o que em termos de resistência de aderência à ruptura corresponde a perdas de 7% e 12% respectivamente). Os resultados se estabilizam a partir de uma quantidade de carga eletroquímica transferida da ordem de $0,41 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ no aço carbono e $0,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ no aço inoxidável. Teoricamente estes resultados dependem mais das propriedades do concreto e da conformação superficial das armaduras do que do seu diâmetro nominal.
- A menor resistência de aderência média das barras de aço inoxidável em relação às do aço carbono deve-se à menor contribuição da parcela de aderência por atrito, já que o aço inoxidável apresenta menor rugosidade. Esta situação piora com o avanço da corrosão pela ação lubrificante dos produtos de corrosão sobre os pites. As armaduras de aço carbono não experimentam uma redução da aderência por atrito tão significativa por causa do aumento da rugosidade superficial nas regiões corroídas. Melhoras na configuração geométrica das armaduras inoxidáveis com vistas a aumentar a superfície de atrito, podem ser conseguidas através do aumento da altura de nervuras ou da redução do espaçamento entre nervuras, soluções que devem ser estudadas.
- As perdas de resistência à tração obtidas para iguais graus de corrosão são entre 3 e 4 vezes menores em armaduras de aço inoxidável, diferença que tende a diminuir em estados muito avançados da corrosão. As mesmas tendências foram encontradas tanto para o limite de escoamento quanto para o limite de resistência.
- A deterioração da resistência à tração das armaduras com o avanço da corrosão apresenta-se em três etapas distintas: etapa de “aparição” dos pites, etapa de “desenvolvimento” dos pites e etapa de “saturação” dos pites. Durante a etapa de “aparição” dos pites as perdas de resistência à tração coincidem com a previsão teórica por perda de diâmetro da seção. Durante a etapa de “desenvolvimento” dos pites a queda da resistência à tração é brusca, estabilizando-se novamente na etapa

de “saturação” dos pites. Durante a etapa de “saturação” as perdas de resistência à tração seguem aproximadamente a reta teórica (por perda de diâmetro).

- As perdas máximas da resistência à tração, ao finalizar-se a etapa de “desenvolvimento”, dependem do diâmetro nominal das armaduras. Para armaduras de aço carbono $\Delta f_y' = 8,3 \phi^{-1,7}$ ($\Delta f_y'$ – perda de limite de escoamento), para as de aço inoxidável $\Delta f_y' = 4 \phi^{-2}$. A “saturação” dos pites acontece ao se transferir uma quantidade de carga eletroquímica da ordem de $0,87 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ para as armaduras de aço carbono e de $0,766 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$ para as de aço inoxidável. A partir deste instante de tempo as perdas da resistência à tração podem ser calculadas pela expressão: $\Delta f_y = \Delta f_y' + 4,73 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{i_{corr} \cdot t}{\phi}$. Estudos futuros deverão esclarecer sobre a dependência das expressões antes descritas em relação à porosidade, à umidade interna do concreto, etc.
- O estudo acelerado das manifestações físico-mecânicas da corrosão permite concluir que a taxa de formação e desenvolvimento dos pites do aço inoxidável no concreto é limitada aos valores máximos recomendados de densidade de corrente de corrosão. As elevadas densidades de corrente de pite, válidas em corrosão atmosférica e em solução, são no concreto afetadas pela concentração e pela saturação dos pites com produtos de corrosão que não encontram espaço para se deslocar com facilidade pelos poros e fissuras do concreto. Estudos futuros deverão revelar os efeitos negativos do modelo acelerado de corrente impressa utilizado nesta pesquisa, e estenderem-se a outras condições de umidade interna, temperatura e porosidade do concreto.

1.3. Quanto à durabilidade das estruturas com armaduras de aço inoxidável

- O emprego de barras de aço inoxidável garante a maior durabilidade das estruturas de concreto armado situadas em ambiente marinho, mesmo das que utilizam concretos de elevado desempenho, dispensando ou reduzindo os custos de manutenção e de paralisação total ou parcial das obras.

- O emprego de barras de aço inoxidável torna mais econômicas as estruturas de concreto armado desenhadas para ambientes industriais extremamente agressivos com elevado teor de cloretos, reduzindo os custos de proteção adicional e de manutenção.
- O emprego de barras de aço inoxidável garante a maior durabilidade de obras de arte de concreto armado, urbanas ou rurais, constituindo-se num fator de proteção adicional frente a problemas de qualidade do concreto, e falhas de projeto e/ou execução.

Concreto armado de alto desempenho (CAAD)

A combinação de um concreto durável e uma armadura de elevada resistência à corrosão garante maior durabilidade das estruturas de concreto armado nos ambientes muito agressivos. Aos requisitos freqüentemente exigidos para concretos de alto desempenho (CAD) podem ser incorporados limites mínimos de vida útil de projeto e de serviço, dependentes da resistência à corrosão da armadura escolhida. Quando a seleção dos materiais componentes, incluindo a armadura, baseia-se nestes requisitos, pode-se dizer que está sendo definido um Concreto Armado de Alto Desempenho (CAAD).

2. Transferência dos Resultados ao Meio Técnico

Esta investigação nasceu como fruto da integração USP-empresa, como resultado da atividade de divulgação e transferência de resultados ao meio técnico por parte do núcleo de pesquisas em Durabilidade das Estruturas do PCC/USP, liderado pelo Prof. Paulo Helene. A pesquisa atende tanto às necessidades do mercado, que passa a contar com mais uma solução alternativa no combate à corrosão das estruturas, como às possibilidades de produção deste material pela indústria nacional.

A transferência dos resultados à possível indústria produtora foi viabilizada por convênio entre a empresa e a EPUSP, o que durante o desenvolvimento da pesquisa foi garantia de uma relação estreita de mútua colaboração técnica e material.

Com relação à transferência dos resultados à indústria da construção civil, a maior contribuição está por vir, em forma de manuais técnicos e com a incorporação dos resultados aos cursos básicos e de especialização ministrados. De caráter mais acadêmico, foram produzidos oito relatórios à FAPESP, principal órgão financiador do projeto e, durante os últimos três anos, têm-se publicado artigos, apresentados em três eventos técnicos de caráter nacional⁷⁴ e seis eventos internacionais⁷⁵. Preparam-se outros artigos para revistas técnicas nacionais e estrangeiras.

3. Prosseguimento dos Estudos

O aço inoxidável, proposto como material alternativo no combate à corrosão de armaduras desde há duas décadas, tem sido alvo de grande atenção nos últimos anos. Embora pequena, existe já a nível internacional experiência com este material, pesquisado por autores de reconhecido prestígio e aplicado em algumas obras de arte de países desenvolvidos.

A investigação conduzida nesta tese vem a ser a primeira experiência deste tipo na América Latina. Objetivou-se fundamentar, de maneira mais técnica e abrangente, a recomendação para emprego imediato de armaduras de aço inoxidável para obras marinhas e industriais, com garantias de segurança estrutural e durabilidade. Contudo, e como toda pesquisa tecnológica, deixou inúmeras questões em aberto que poderão ser motivo de estudos mais aprofundados, além de outros temas importantes não abordados no programa experimental.

3.1. Prosseguimento do estudo quanto aos aspectos eletroquímicos da corrosão

- a) É necessário determinar com maior exatidão o teor limite de cloreto em diferentes circunstâncias ($Cl_{cc, lim}$), variando: condição de tensão, estado de integridade do revestimento, propriedades do concreto (entre elas a relação a/c, a mais importante), grau de umidade (GU); temperatura ambiente (T), etc.

⁷⁴ Eventos nacionais: 40º REIBRAC (Rio de Janeiro-RJ, 1998), NACE Brasil (São Paulo-SP 1999), I Encontro sobre Corrosão (Santos-SP, 1999).

⁷⁵ Eventos internacionais: IV CONPAT (Porto Alegre-RS, 1996), II LATINCOR (Cancún-Mx, 1998), II Colloquia Int. (São José dos Campos-SP, 1999), II ACI – HPC (Gramado-RS, 1999), V CONPAT (Montevideu, 1999), Workshop fib 5-Commission (São Paulo, SP, 1999).

- b) É necessário fundamentar probabilisticamente a existência de faixas de leitura de potencial eletroquímico correspondentes, por exemplo, a: 95% de probabilidade de aço passivo; 50% de probabilidade de aço ativo; 95% de probabilidade de aço em pite.
- c) É necessário fundamentar probabilisticamente os valores máximos de corrente recomendados para valores ou faixas de grau de contaminação.

3.2. Prosseguimento do estudo quanto aos aspectos físico-mecânicos da corrosão

- a) É necessário estudar de maneira detalhada a fissuração provocada pela corrosão, utilizando modelos acelerados menos agressivos (por exemplo, corrente impressa igual ou menor que $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), variando: relação a/c, espessura de revestimento, grau de umidade do concreto (ou argamassa), diâmetro nominal da barra.
- b) É recomendável estudar a deterioração da resistência com modelos acelerados menos agressivos (por exemplo, corrente impressa igual ou menor que $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), utilizando barras no concreto (ou argamassa) e em solução, variando: quantidade de carga eletroquímica transferida (tempo de aplicação da corrente impressa), relação a/c, grau de umidade do concreto (ou argamassa), diâmetro nominal das barras. Recomenda-se estudar os produtos de corrosão e registrar seu potencial eletroquímico ao longo do tempo.
- c) É recomendável o estudo da influência das mudanças de geometria de barra (como altura e espaçamento de nervura) no comportamento da aderência inicial e com o avanço da corrosão.

3.3. Prosseguimento do estudo quanto à metodologia de cálculo de vida útil

A metodologia utilizada na tese para a estimativa de vida útil poderá tornar método probabilístico de cálculo, na medida em que o acúmulo de informações laboratoriais e de campo permita estabelecer os valores característicos das funções e coeficientes utilizados: das funções que relacionam grau de contaminação e densidade de corrente de corrosão e das que relacionam quantidade de carga eletroquímica transferida e grau de

deterioração, e dos coeficientes de ajuste às condições reais de exposição da estrutura e de nível admissível de aparecimento da manifestação patológica.

3.3. Outros temas de interesse a serem abordados em pesquisas futuras

Recomenda-se trabalhar em temas pouco discutidos em pesquisas anteriores:

- a) Utilização de barras e arames de aço inoxidável em reparos, para substituição de armaduras convencionais de aço carbono, reforço do componente estrutural ou reforço de reparos superficiais, visando problemas de ancoragem, corrosão galvânica e resistência à corrosão da solda.
- b) Estudo de resistência ao fogo de estruturas de concreto armadas com aço inoxidável.
- c) Desempenho comparativo de outros tipos de aços inoxidáveis.
- d) Resistência à corrosão galvânica em concretos ou argamassas.
- e) Avaliação de equipamentos para determinação da densidade de corrente de corrosão de armaduras de aço inoxidável.
- f) Avaliação da viabilidade econômica de estruturas com armadura total ou parcial em barras de aço inoxidável, baseada nos custos totais de ciclo de vida.

ANEXOS

Anexo A. Caracterização das armaduras.

Tabela A. 1. Geometria das barras da pesquisa. Dimensões médias.

Tipo de aço	Diâmetro [mm]	Nervura da barra				Área superficial média [mm ² /cm]
		Altura [mm]	Largura [mm]	Espaçamento [mm]	Ângulo de inclinação	
CA50	9,89	0,58	1,87	4,5	39 ⁰	379,8
316L	10,29	0,43	1,2	7,0	26 ⁰	373,3

Tabela A. 2. Composição química dos aços das barras da pesquisa. Ensaios realizados pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA. (26 / junho / 1998)

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	N
CA50	0,20	0,15	0,55	0,04	0,02	<0,01	0,03	0,032	0,028	--
316L	0,0224	0,33	1,86	16,16	10,12	2,14	0,33	0,033	0,0255	0,089

Tabela A. 3. Dureza Brinell a temperatura de 22⁰, carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm de diâmetro. Ensaios realizados pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA. (26 / junho / 1998).

Tipo de aço	Dureza média
CA50	185
316L	272

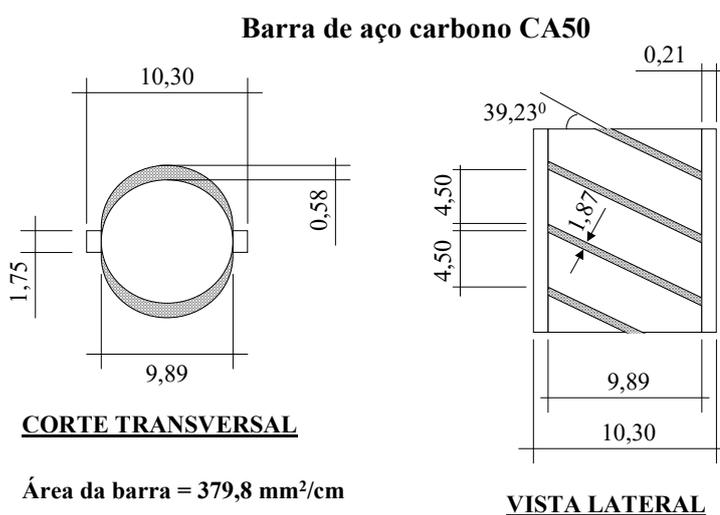


Figura A. 1. Dimensões geométricas características das barras de aço carbono da pesquisa.

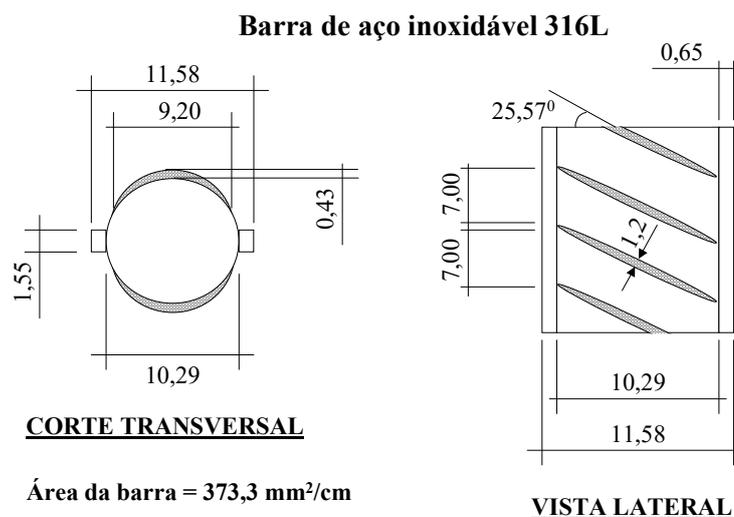


Figura A. 2. Dimensões geométricas características das barras de aço inoxidável da pesquisa.

Exame metalográfica do aço

A análise da microestrutura no sentido longitudinal feito pelo laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da VILLARES METALS SA. O estudo concluiu:

Aço carbono CA50: Microestrutura no meio-raio formada por ferrita, perlita, provavelmente alguma bainita e algumas inclusões não metálicas. Na superfície, bainita, provavelmente alguma perlita e ferrita e algumas inclusões não metálicas.

Aço inoxidável 316L: Microestrutura formada por austenita não recristalizada, carbonetos de cromo e algumas inclusões não metálicas.

Dobramento a 180°.

Todas as amostras ensaiadas no CETEC Engenharia foram aprovadas para o ensaio de dobramento a 180°, sem fendilhamento na zona tracionada.

Não foram registrados valores de alongamento nos ensaios da EPUSP mas o comportamento desta propriedade verificado durante os ensaios de tração foi coincidente com os valores obtidos nos ensaios do CETEC.

Tabela A. 4. Propriedades à tração a temperatura de 22^o. Ensaio realizado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - VILLARES METALS SA., no CPqD/PCC/EPUSP, e no CETEC Engenharia S/C LTDA (considerando o diâmetro nominal de 1cm)

Aço	Laboratório	f_{ym} [MPa]	f_{st} [MPa]	Alongamento [%]
CA50	VILLARES	509,7	629,0	24,7
	EPUSP	633,9	722,2	--
	CETEC	775,7	862,4	11,0
316L	VILLARES	715,5	864,5	25,0
	EPUSP	778,4	879,3	--
	CETEC	702,4	782,2	29,0

Anexo B. Caracterização do concreto e materiais componentes.

B.1. Materiais componentes.

Tabela B. 1. Ensaio de caracterização do cimento.

Perda ao fogo	2,01	Início de pega [min.]	144
MgO [%]	1,20	Fim de Pega [min.]	238
SO ₃ [%]	2,79	Consistência normal [%]	28,3
Resíduo insolúvel	0,39	Resistência à compressão 1 dia [MPa]	23,3
CaO [%]	0,84	Resistência à compressão 3 dias [MPa]	37,1
Massa específica [mg/m ³]	3,13	Resistência à compressão 7 dias [MPa]	42,3
Blaine [m ² /kg]	449	Resistência à compressão 28 dias [MPa]	49,3

Tabela B. 2. Composição química potencial do cimento.

Cimento CP V ARI (Alta Resistência Inicial)			
Componente	%	Requerimentos químicos	%
C ₃ S	53,7	Oxido de Magnésio (MgO)	1,52
C ₂ S	16,1	Sulfate (SO ₃)	3,32
C ₃ A	6,9	Perda ao Fogo	2,65
C ₄ AF	9,5	Resíduo Insolúvel	0,57
CaSO ₄	5,6		

Tabela B. 3. Areia. Propriedades físicas.

Massa específica (Frasco de Chapmann – NBR 9776: 1986)	2,64 kg/dm ³
Massa unitária (NBR 7251: 1982)	1,54 kg/dm ³
Teor de argila em torrões (NBR 7218: 1987)	0,25%
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7219: 1987)	0,5%
Índice de matéria orgânica (NBR 7220: 1987)	100 ppm

Tabela B. 4. Brita. Propriedades físicas.

Massa unitária (NBR 7251: 1982)	1,43 kg/dm ³
Teor de argila em torrões (NBR 7218: 1987)	0,0%
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7219: 1987)	0,2%

Tabela B. 5. Análise granulométrica dos agregados.

Peneira ABNT [mm]	% retida média		% retida média acumulada	
	Brita	Areia	Brita	Areia
25	0	-	0	-
19	1,51	-	1,51	-
12,5	30,77	-	32,28	-
9,5	28,82	-	61,10	-
6,3	24,66	-	85,76	-
4,8	3,50	2,88	89,26	2,88
2,4	-	3,24	-	6,12
1,2	-	7,29	-	13,41
0,6	-	25,67	-	39,08
0,3	-	36,40	-	75,48
0,15	-	21,19	-	96,67
fundo	10,29	3,07	99,55	99,74
Dimensão máxima característica	19 mm	4,8 mm		
Módulo de finura	6,89	2,72		

Tabela B. 6. Composição química do aditivo $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

CaCl_2	NH_3OH	Oxidantes (como NO_3)	Sulfatos	Amônio	Ba	Metais pesados (como Pb)	Fe	Mg	K	Na	Sr
74,0 78,0	0,01	0,003	0,01	0,005	0,005	0,0005	0,001	0,005	0,01	0,02	0,1

B.1. Concreto.

Tabela B. 7. Traço e propriedades reológicas do concreto fresco. Tabela resumo (valores médios).

Concreto	Proporções em relação à massa de cimento					Abatimento [mm] NBR 7223	Massa específica fresca [kg/m ³] NBR 9833	Ar aprisionado [%] NBR 9833
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Cl ⁻			
“c0”	1*	2,5	3,5	0,65	0	161	2367	1,8
“c04”					0,004	174	2353	2,1
“c1”					0,01	132	2335	2,2
”c5”					0,05	140	2337	2,2

* consumo de cimento = 310 kg/m³

Tabela B. 8. Resistência à compressão média determinada durante todas as moldagens dos corpos-de-prova da pesquisa (NBR 5739:1980) – cada valor é a média de dois cilindros por cada betonada.

Cl_{cc} [%] ⇒	0	0,4	1	5	
f_{c28} [MPa]	35,2	34,8	34,5	33,3	
	34,8	35,2	34,7	33,8	
	34,7	34,2	35,5	35,2	
	35,1	34,2	34,5	33,3	
	31,8	34,9	35,5	31,9	
	35,4	33,8	37,5	27,7	
	31,3	34,2	35,5	34,5	
	37,5	34,2	29,8	30,7	
	38	33,9	31,8	34,5	
	32,7	35,6	27,4		
	33,2	36,4	29,8		
	28,1	33,1	31,8		
	32				
	Média	33,8 MPa	34,5 MPa	33,2 MPa	32,8 MPa

Tabela B. 9. Valores médios do teor de vazios e da umidade de equilíbrio (GU) dos concretos em condições de imersão parcial, relacionados aos valores médios de resistência à compressão e de ar aprisionado no concreto fresco.

Cl_{cc} [%]	Ar aprisionado no concreto fresco [%]	Concreto endurecido		
		f_{c28} [MPa]	Vazios [%]	GU [%]
0	1,9	33,8	2,9	84
0,4	1,8	34,5	3,1	84
1	2,2	33,2	3,1	86
5	2,2	32,8	3,4	90

Tabela B. 10. Resistividade média (ρ) dos concretos utilizados na pesquisa em condições de imersão parcial (NBR 9204). Tabela resumo.

C_{lc} [%]	ρ média das superfícies: [k Ω .cm]		ρ média [k Ω .cm]
	seca	molhada	
0	7,02	6,05	6,54
0,4	5,64	5,33	5,48
1	3,49	3,38	3,44
5	1,21	1,05	1,13

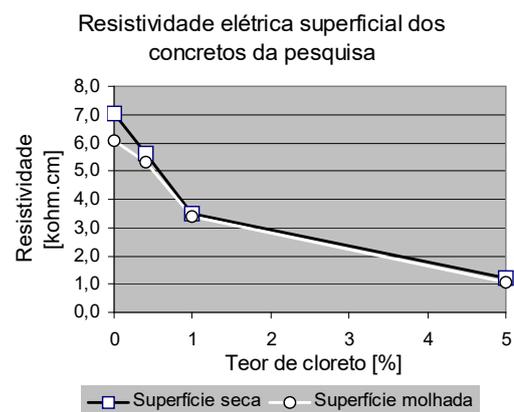
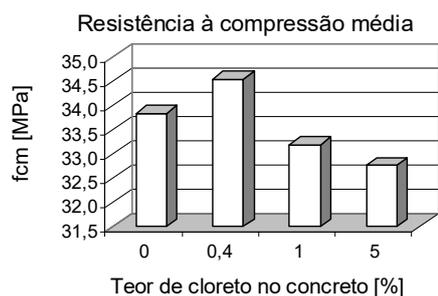


Figura B. 1. Representação gráfica das resistências à compressão médias a 28 dias dos concretos utilizados na pesquisa com diferentes teores de cloreto em relação à massa de cimento.

Figura B. 2. Representação gráfica da ρ das superfícies seca e molhada dos diferentes concretos da pesquisa. Note-se que a adição de cloreto reduz a ρ do concreto.

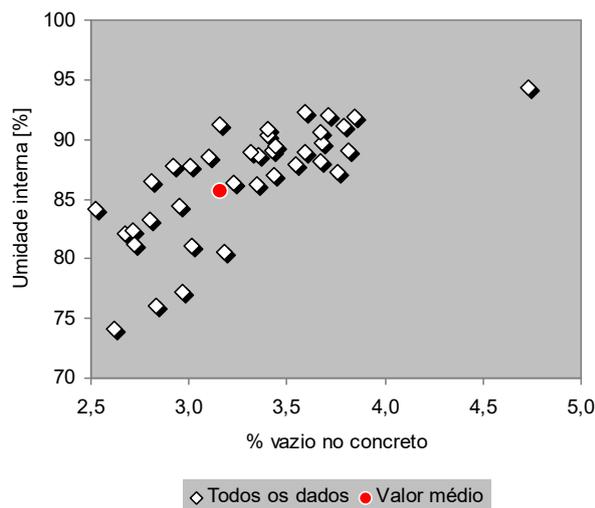


Figura B. 3. Relação entre a umidade interna dos corpos-de-prova de concreto submetidos a imersão parcial e a porcentagem de vazios.

Anexo C. Caracterizações eletroquímicas.

C.1. Medições de potencial eletroquímico.

Tabela C. 1. Medidas de potencial de barras de aço carbono relaxadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.

R0n		R04n		R1n		R5n	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
58	-369	60	-413	51	-506	50	-483
67	-390	69	-340	55	-406	56	-556
67	-363	72	-398	60	-445	66	-571
67	-465	80	-368	70	-420	66	-479
67	-353	88	-425	76	-480	66	-492
67	-298	88	-358	76	-388	66	-408
67	-365	88	-278	76	-393	66	-420
67	-281	88	-378	76	-406	70	-487
81	-372	88	-336	79	-430	70	-505
81	-372	93	-329	79	-550	70	-514
81	-331	101	-351	87	-368	70	-435
81	-377	102	-375	88	-429	70	-425
87	-211	105	-401	97	-378	70	-452
87	-330	110	-279	97	-448	76	-504
87	-152	110	-358	104	-362	76	-452
87	-265	110	-212	112	-377	76	-434
89	-337	110	-272	112	-353	76	-568
89	-390	110	-237	112	-457	76	-506
89	-341	110	-155	112	-419	85	-512
102	-337	112	-388	112	-422	85	-555
111	-112	112	-397	120	-367	85	-488
129	-143	112	-406	126	-412	89	-540
129	-140	122	-341	134	-480	85	-585
129	-172	123	-385	134	-352	85	-424
129	-140	123	-184	134	-344	85	-629
129	-186	131	-144	134	-394	85	-590
129	-177	131	-177	134	-260	130	-530
129	-215	131	-335	134	-270	130	-547
129	-207	137	-203	134	-310	130	-430
140	-200	147	-165	140	-516	130	-544
147	-86	147	-336	142	-420	130	-528
151	-103	151	-220	154	-290	130	-649
151	-108	153	-190	156	-260	130	-608
151	-211	153	-268	156	-407	130	-587
151	-176	153	-148	156	-512	133	-403
179	-283	153	-299	156	-256	152	-501
208	-125	165	-225	156	-457	152	-501
223	-101	184	-254	171	-376	152	-480

Continuação Tabela C. 1

R0n		R04n		R1n		R5n	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
201	-179	202	-130	185	-391	152	-481
		212	-195	193	-210	152	-464
		217	-268	202	-374	152	-517
				218	-320	152	-462
						154	-411
						213	-416
						213	-360
						213	-416
						213	-360
A média dos valores de Potencial é calculada após 225 dias							
234	-253	237	-211	235	-418	232	-507
249	-254	242	-92	246	-361	255	-489
260	-109	266	-102	275	-363	255	-505
267	-175	266	-202	275	-415	255	-556
288	-147	274	-120	284	-364	255	-505
288	-91	274	-225	284	-300	315	-625
288	-97	283	-147	315	-355	315	-488
288	-147	283	-109	315	-279	315	-550
288	-91	283	-250	324	-440	315	-566
288	-97	283	-281	324	-290	315	-589
301	-213	310	-249	324	-479	322	-648
301	-184	310	-109	324	-290	322	-559
315	-298	315	-92	331	-388	322	-489
315	-120	315	-250	309	-421	331	-514
315	-298	315	-287	331	-362	352	-618
315	-168	315	-315	335	-312	352	-555
326	-81	322	-264	335	-374	352	-614
326	-221	322	-256	351	-356	375	-545
329	-121	322	-312	351	-326	375	-609
329	-145	331	-230	374	-381	381	-488
335	-180	352	-261	385	-343	383	-569
343	-196	352	-211	363	-521	399	-579
351	-221	352	-175	363	-389	399	-607
358	-190	375	-288	370	-450	399	-497
358	-199	375	-254	370	-321	412	-654
358	-175	381	-216	370	-475	413	-630
362	-246	383	-333	397	-376	415	-440
362	-154	399	-278	397	-388	415	-586
365	-211	399	-279	385	-405	420	-678
365	-170	399	-301	403	-394	420	-664
365	-225	412	-199	413	-377	420	-548
373	-212	413	-235	416	-421		
373	-231	415	-287	416	-299		
377	-158	415	-185	420	-431		
394	-201	420	-233	420	-562		

Continuação Tabela C. 1

R0n		R04n		R1n		R5n	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
394	-258	420	-253	420	-451		
394	-175	420	-274				
411	-172						
411	-245						
420	-115						
420	-262						
Média	-183		-226		-385		-564
S	58		67		65		61

Tabela C. 2. Medidas de potencial de barras de aço inoxidável relaxadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.

R0x		R04x		R1x		R5x	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
52	-141	35	-210	63	-290	61	-191
54	-230	43	-153	67	-195	63	-135
63	-225	45	-192	67	-169	67	-237
63	-225	45	-136	75	-128	75	-37
63	-185	45	-290	79	-69	75	-122
63	-183	50	-139	79	-127	75	-280
71	-157	57	-176	79	-66	75	-210
71	-259	62	-158	79	-83	75	-119
71	-123	62	-156	80	-215	76	-240
79	-241	62	-118	80	-190	76	-163
80	-169	62	-229	85	-151	82	-205
80	-195	62	-298	85	-260	88	-194
80	-145	73	-160	85	-240	88	-280
87	-109	74	-206	87	-110	88	-264
87	-257	84	-146	91	-195	88	-106
87	-223	84	-143	91	-147	88	-233
87	-160	84	-146	92	-220	88	-155
87	-140	84	-313	95	-87	97	-185
96	-133	91	-154	102	-156	105	-260
101	-90	91	-95	104	-210	110	-194
109	-59	91	-90	107	-235	110	-138
109	-132	91	-110	107	-150	110	-176
109	-172	91	-91	107	-186	110	-140
109	-230	91	-113	107	-91	110	-215
109	-226	91	-150	117	-208	110	-219
109	-138	98	-172	125	-178	126	-129
111	-97	106	-108	126	-102	129	-252
119	-183	106	-107	132	-184	144	-244
123	-91	106	-113	133	-80	147	-96

Continuação Tabela C. 2.

R0x		R04x		R1x		R5x	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
125	-169	106	-139	142	-132	168	-230
127	-135	114	-137	147	-41	191	-205
133	-171	124	-144	149	-104	195	-143
136	-105	133	-137	170	-111	214	-183
140	-89	140	-139	210	-175	215	36
141	-231	155	-171			216	-83
148	-149	158	-165				
158	-69	172	-143				
172	-179	189	-151				
189	-70	202	-135				
202	-167						
A média dos valores de Potencial é calculada após 225 dias							
225	-154	231	-180	225	-151	225	-65
225	-73	233	-140	225	-53	225	-188
231	-109	235	-156	230	-107	230	-153
231	-207	235	-62	231	-180	231	-104
235	-69	244	-80	235	-160	234	-190
235	-163	246	-156	246	-60	243	-152
244	-87	248	-116	248	-89	248	-20
244	-40	252	-164	252	-53	252	-215
244	-190	259	-120	260	-142	258	-63
244	-127	265	-46	262	-217	262	-47
259	-145	268	-151	268	-76	268	-131
268	-131	273	-50	273	-102	273	-100
268	-80	275	-100	274	-72	274	-51
275	-190	275	-156	275	-60	275	-118
275	-131	275	-133	275	-100	277	-215
275	-46	284	-44	284	-102	284	-188
275	-163	292	-100	292	-49	293	-167
284	-118	295	-71	295	-76	295	-80
284	-73	302	-107	302	-107	302	-193
289	-67	310	-58	310	-160	310	15
305	-85	311	-22	311	-53	311	-104
311	-111	314	-129	314	-62	314	-60
311	-37	314	-40	314	-204	315	-211
314	-110	315	-77	315	-76	315	-113
314	-65	315	-89	316	-96	316	-157
315	-49	317	-142	317	-142	317	-184
315	-113	326	-44	325	-51	325	-56
315	-80	332	-31	332	-107	332	-131
326	-48	333	-133	333	-204	333	-184
332	-64	334	-62	334	-20	335	-235
333	-113	335	-100	338	-160	338	-82

Continuação Tabela C. 2.

R0x		R04x		R1x		R5x	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
334	-85	348	-36	348	-20	349	-191
335	-136	356	-71	355	-193	355	-34
356	-69	356	-100	358	-56	358	-100
356	-96	361	-124	361	-100	361	-210
356	-100	365	-31	365	-219	365	-180
365	-49	371	-100	371	-20	371	-87
365	-80	373	-120	373	-40	373	-126
371	-51	373	-27	373	-142	373	-160
373	-80	377	-62	378	-210	378	-228
373	-167	394	-40	394	-138	394	-153
377	-65	398	-125	398	-49	396	-247
394	-37	400	-80	400	-71	400	-166
394	-85	403	-60	403	-49	403	-104
394	-78	408	-75	408	-85	409	-248
403	-159	411	-20	411	-27	412	-216
408	-122	411	-40	413	-123	413	-113
411	-51	425	-121	425	-44	422	-158
411	-80	438	-100	442	-125	439	-210
420	-47						
433	-121						
Média	-98		-90		-102		-140
S	44		44		57		65

Tabela C. 3. Medidas de potencial de barras de aço carbono tracionadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.

T0n		T04n		T1n		T5n	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
125	-244	143	-380	125	-280	85	-470
137	-187	143	-214	142	-394	92	-791
137	-163	143	-210	147	-198	92	-742
137	-222	143	-417	157	-309	99	-510
142	-270	146	-225	157	-259	106	-687
144	-292	146	-263	157	-387	107	-251
144	-330	158	-205	190	-590	107	-357
148	-211	158	-262	190	-378	107	-251
148	-203	158	-173	190	-537	117	-642
152	-162	161	-266	210	-325	200	-268
152	-235	161	-279	210	-245	200	-205
157	-236	170	-229	210	-315	200	-318
157	-295	170	-305	210	-477	200	-244

Tabela C. 4. Medidas de potencial de barras de aço inoxidável tracionadas em corpos-de-prova com diferentes teores de cloreto.

T0x		T04x		T1x		T5x	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
93	-107	88	-110	91	-119	91	-344
93	-111	88	-190	91	-94	91	-141
108	-170	90	-173	92	-161	94	-321
108	-131	90	-110	92	-218	94	-222
108	-124	90	-126	92	-121	135	-336
108	-137	90	-116	92	-143	429	-212
130	-196	98	-153	97	-104	106	-204
130	-140	98	-108	438	-166	106	-253
130	-153	98	-141	97	-154	106	-369
130	-160	98	-178	97	-144	106	-210
135	-186	103	-196	106	-162	151	-270
135	-139	103	-141	106	-159	383	-207
135	-147	103	-183	106	-197	109	-157
135	-263	103	-166	414	-174	109	-146
140	-122	105	-185	107	-162	112	-189
140	-121	105	-187	107	-196	112	-225
140	-137	105	-152	107	-152	334	-192
140	-285	105	-159	107	-191	408	-219
145	-134	113	-133	180	-128	180	-129
145	-160	113	-151	180	-155	220	-310
145	-134	113	-136	200	-308	220	-270
126	-120	438	-131	427	-277	220	-250
428	-133	395	-126	200	-165	220	-321
145	-161	113	-150	200	-246	240	-199
145	-163	413	-157	205	-98	240	-207
145	-275	113	-166	205	-299	240	-268
150	-159	373	-127	235	-79	250	-189
150	-134	115	-117	235	-282	250	-189
278	-142	115	-202	235	-169	250	-241
150	-122	363	-163	250	-246	250	-149
155	-120	210	-250	250	-140	258	-109
443	-121	210	-245	250	-192	264	-88
419	-129	210	-190	256	-151	370	-286
338	-136	210	-157	261	-68	324	-288
301	-132	210	-268	265	-112	270	-261
155	-170	225	-351	265	-129	270	-300
167	-133	225	-233	270	-190	280	-118
370	-164	225	-205	274	-196	342	-102
406	-129	250	-251	359	-39	342	-148
155	-177	250	-369	344	-212	352	-160

Continuação Tabela C. 4.

T0x		T04x		T1x		T5x	
Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)	Idade [dias]	E_{corr} [mV] (Cu/CuSO ₄)
160	-174	250	-241			362	152
190	-145	250	-194			362	-74
200	-171	252	-175				
200	-133	255	-131				
200	-177	255	-217				
200	-189	255	-176				
200	-149	255	-137				
205	-166	260	-28				
205	-119	267	-160				
210	-133	272	-99				
215	-144	341	-109				
220	-125	343	-44				
230	-88	343	-58				
240	-119	373	-62				
240	-102						
240	-98						
240	-108						
250	-121						
250	-103						
250	-153						
250	-113						
260	-163						
260	-119						
260	-113						
260	-147						
289	-152						
298	-175						
300	-121						
308	-130						
312	-201						
325	-100						
347	126						
386	-37						
388	-149						
Média	-140		-165		-167		-208
S	49		64		61		93

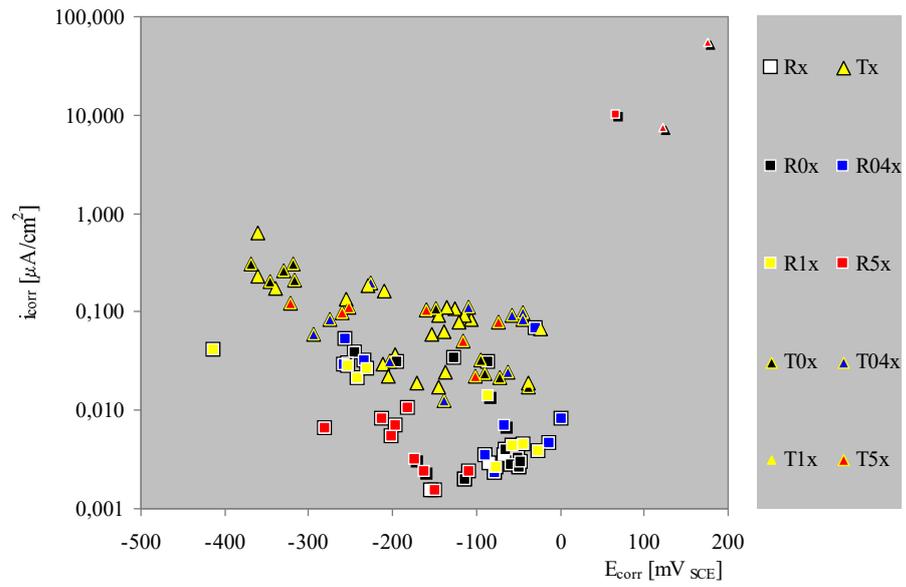


Figura C. 1. Comportamento provável da relação **potencial versus densidade de corrente de corrosão** das barras de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.

C.2. Curvas de polarização potenciodinâmicas.

C.2.1. Curvas de polarização médias.

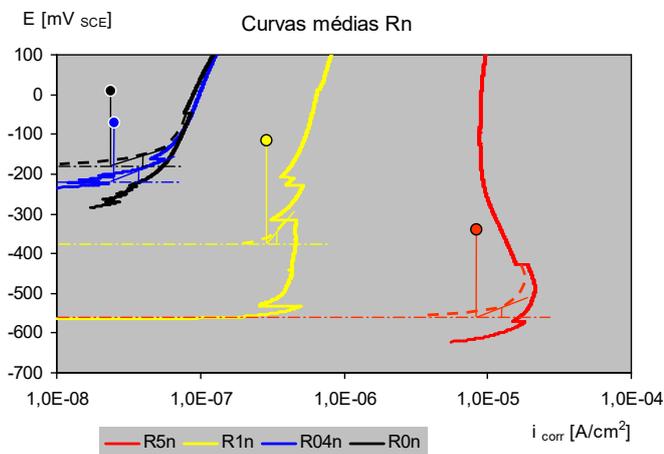


Figura C. 2. Curvas de polarização médias das barras relaxadas de aço carbono em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.

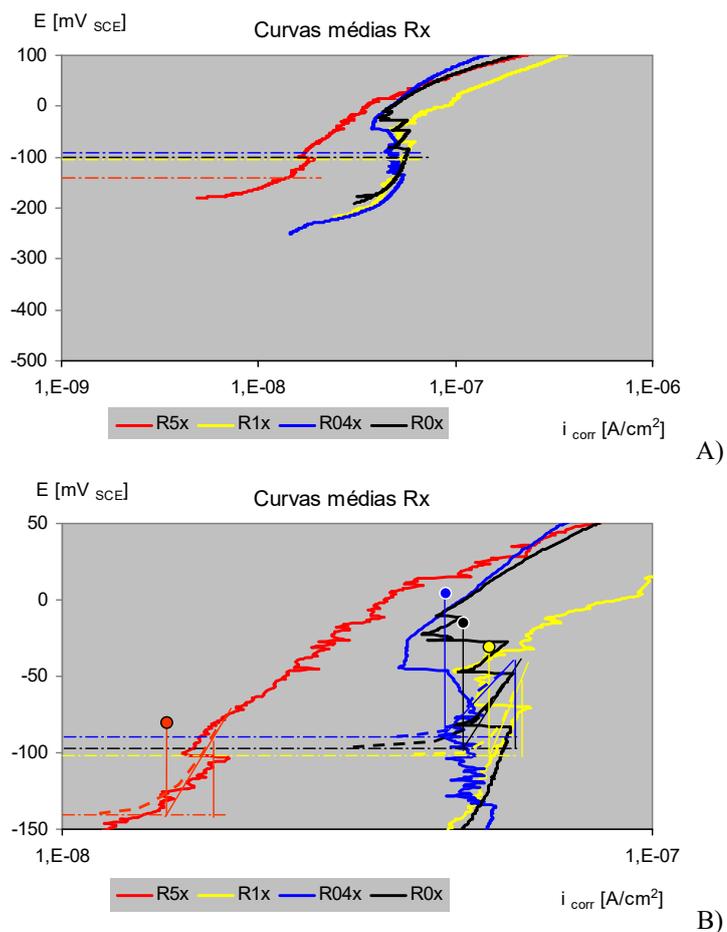


Figura C. 3. Curvas de polarização médias das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto. A) Curvas médias e potenciais médios. B) Detalhe para determinação gráfica da densidade de corrente de corrosão.

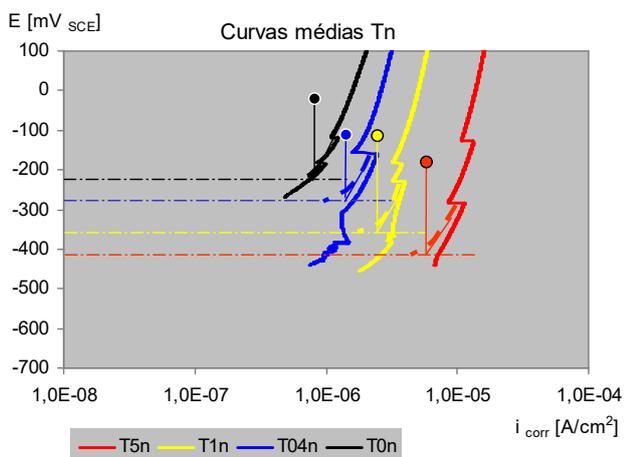
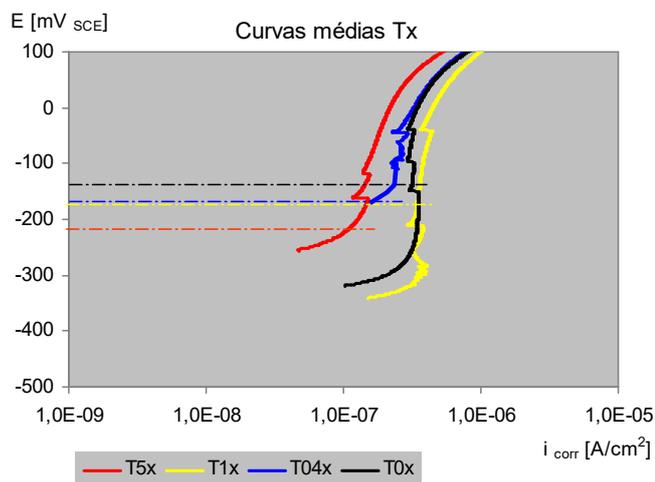
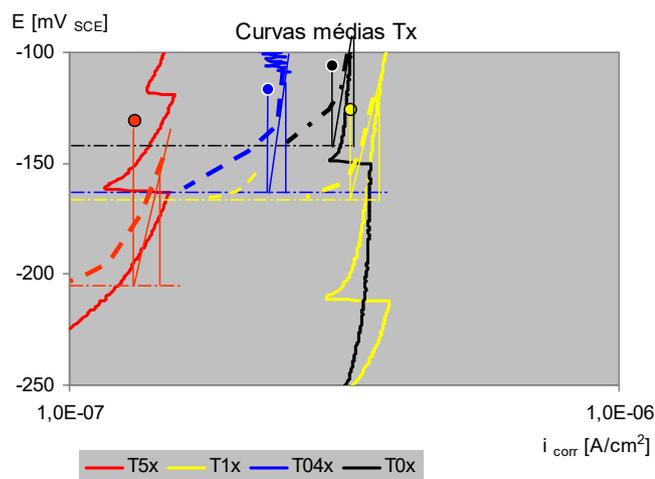


Figura C. 4. Curvas de polarização médias das barras tracionadas de aço carbono em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto.



A)



B)

Figura C. 5. Curvas de polarização médias das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos contaminados com diferentes teores de cloreto. A) Curvas médias e potenciais médios. B) Detalhe para determinação gráfica da densidade de corrente de corrosão.

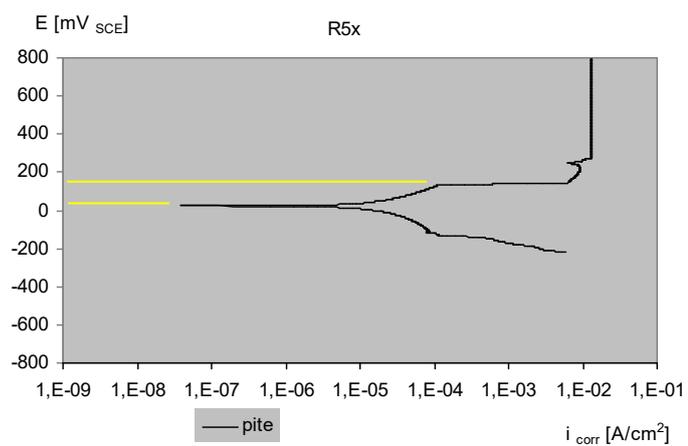


Figura C. 6. Curva de polarização de barra de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto apresentando a configuração típica do pite (cura analisada no Anexo C.4.3)

C.2.1. Comparação das curvas médias de barras relaxadas e tracionadas.

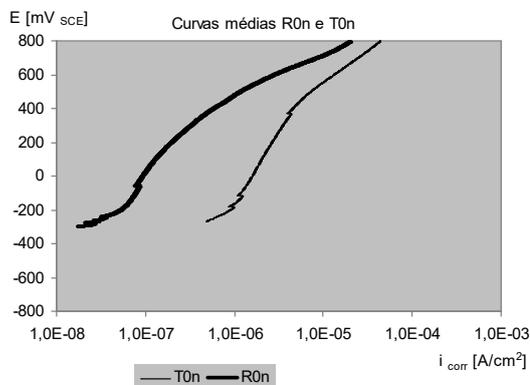


Figura C. 7. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos sem cloreto.

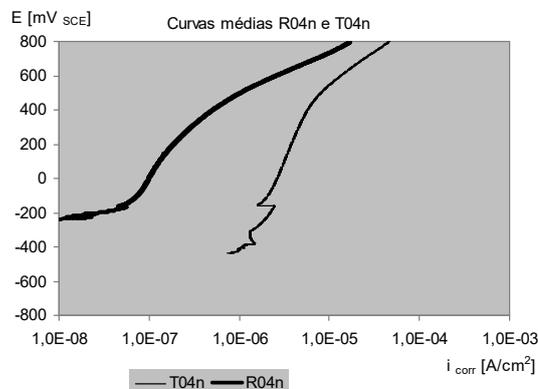


Figura C. 8. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto.

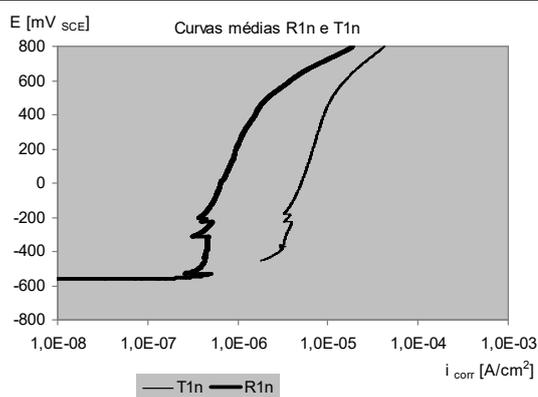


Figura C. 9. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto.

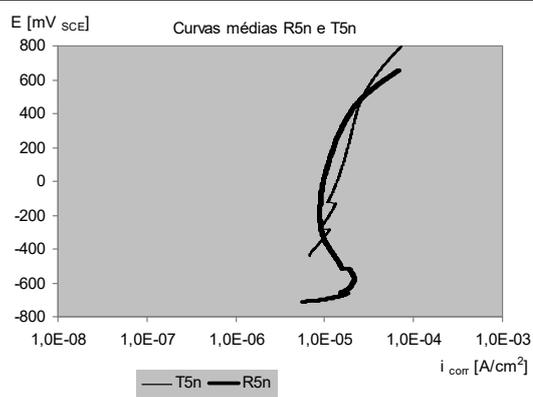


Figura C. 10. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto.

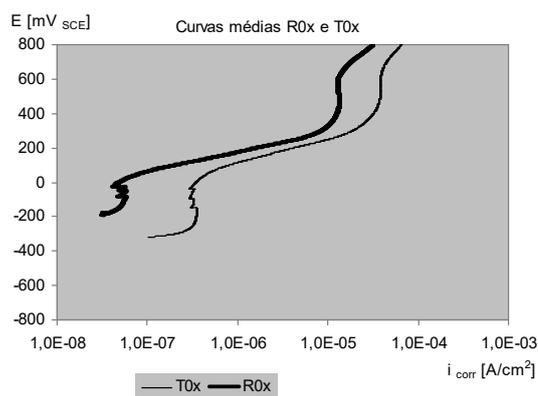


Figura C. 11. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto.

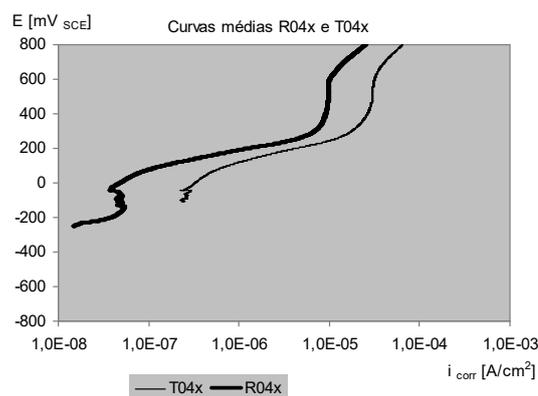


Figura C. 12. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto.

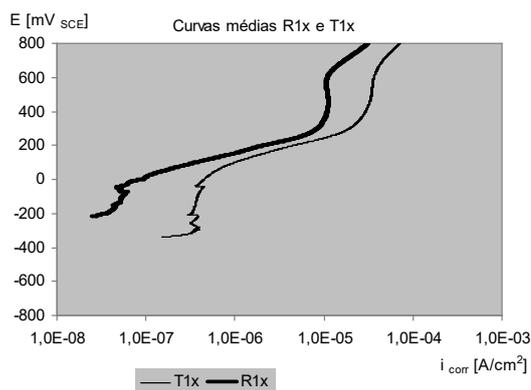


Figura C. 13. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto.

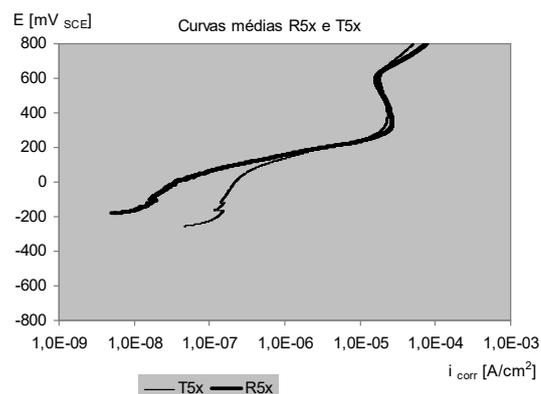


Figura C. 14. Comparação das curvas de polarização média de barras relaxadas e tracionadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto.

C.2.2. Curvas médias e algumas curvas individuais de barras relaxadas.

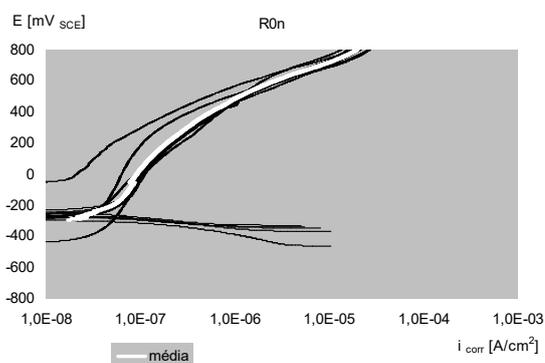


Figura C. 15. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

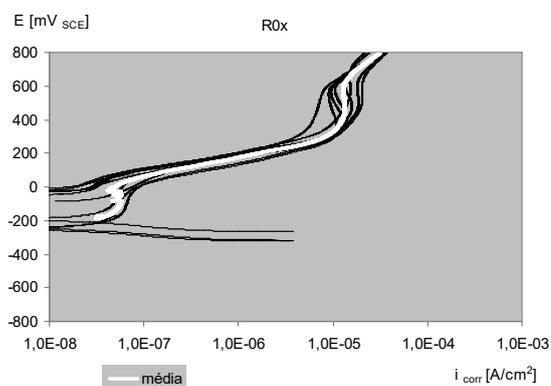


Figura C. 16. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

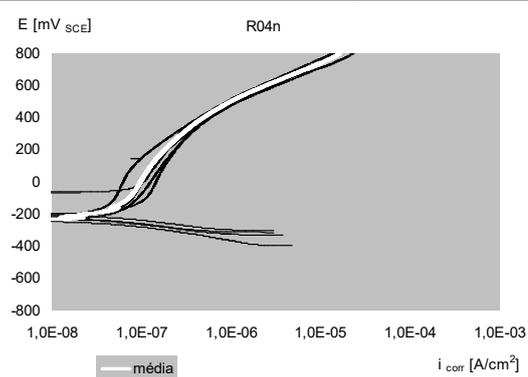


Figura C. 17. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

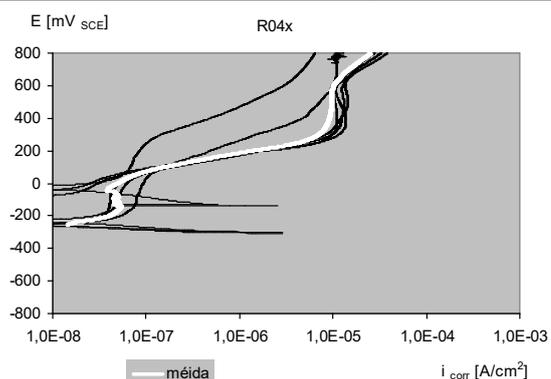


Figura C. 18. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

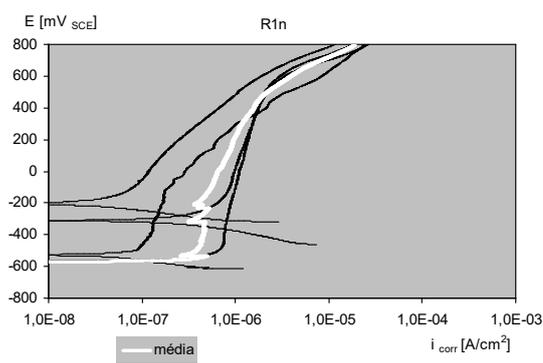


Figura C. 19. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

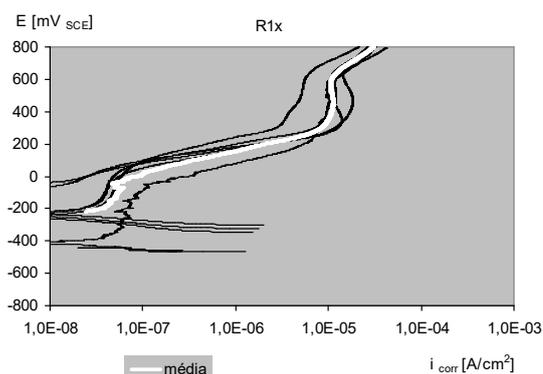


Figura C. 20. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

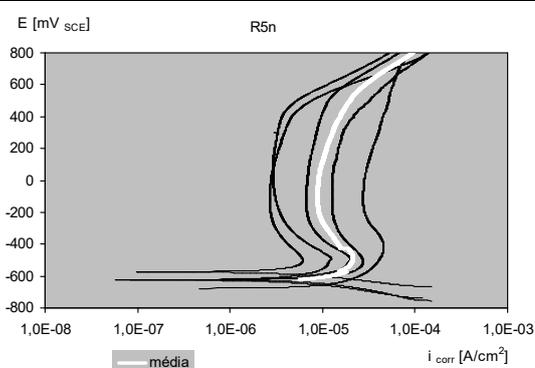


Figura C. 21. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

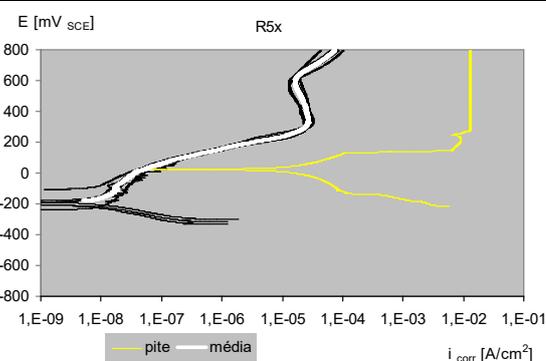


Figura C. 22. Curvas de polarização das barras relaxadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

C.2.3. Curvas médias de barras relaxadas e curvas de barras relaxadas de corpos-de-prova em câmara úmida.

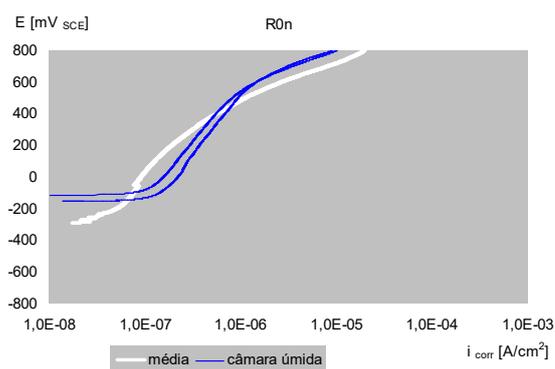


Figura C. 23. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

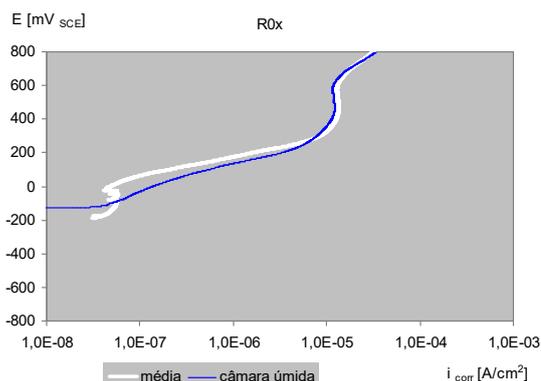


Figura C. 24. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

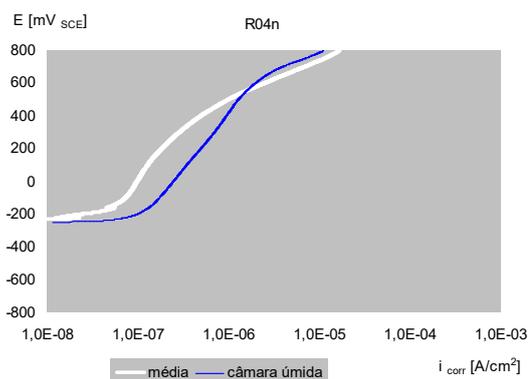


Figura C. 25. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

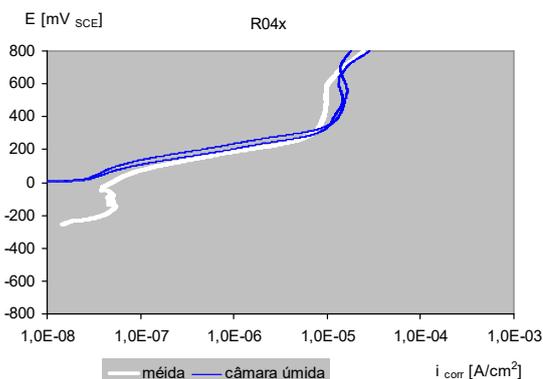


Figura C. 26. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

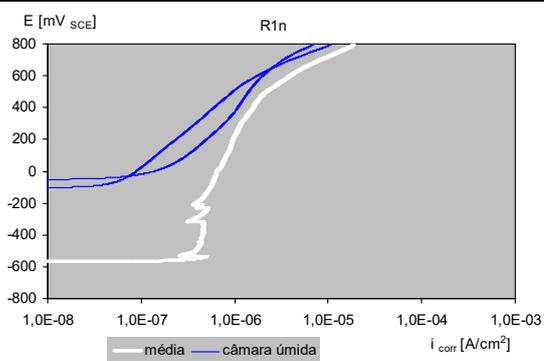


Figura C. 27. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

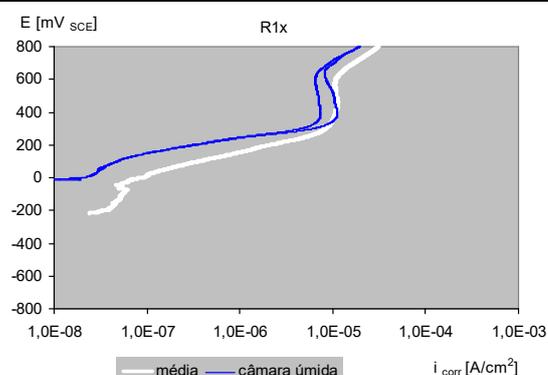


Figura C. 28. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

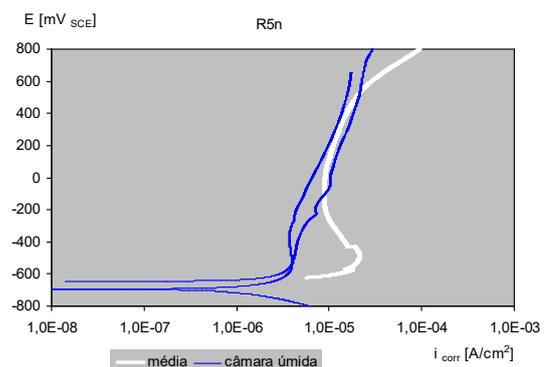


Figura C. 29. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço carbono em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

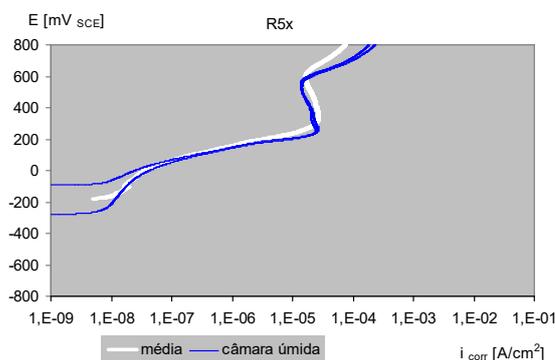


Figura C. 30. Curvas de polarização média das barras relaxadas de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

C.2.4. Curvas médias e algumas curvas individuais de barras tracionadas.

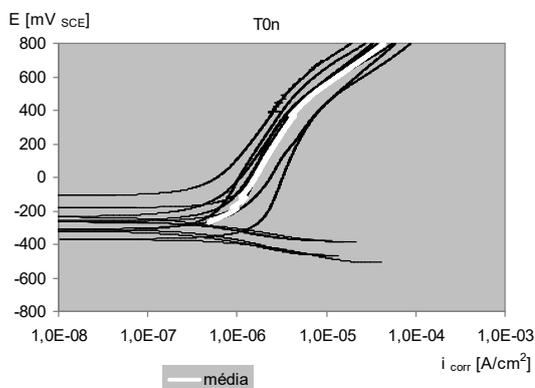


Figura C. 31. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

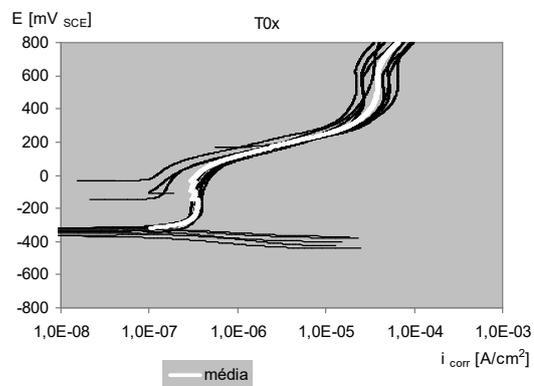


Figura C. 32. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos sem cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

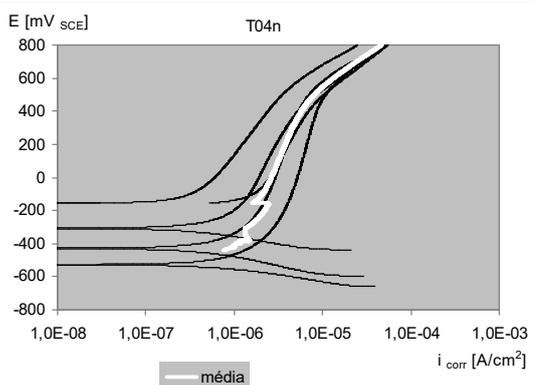


Figura C. 33. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

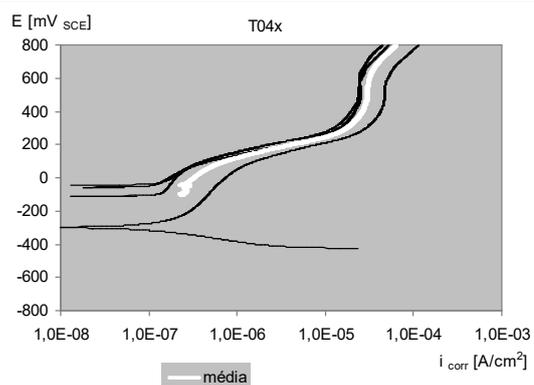


Figura C. 34. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 0,4% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

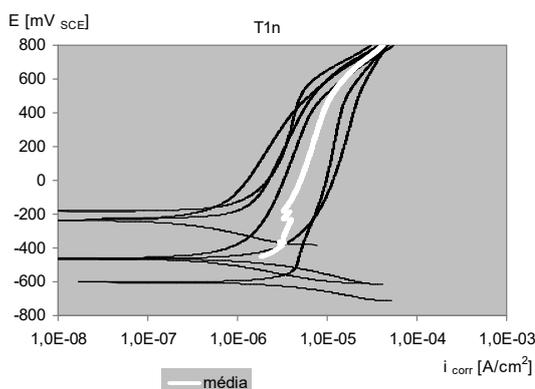


Figura C. 35. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

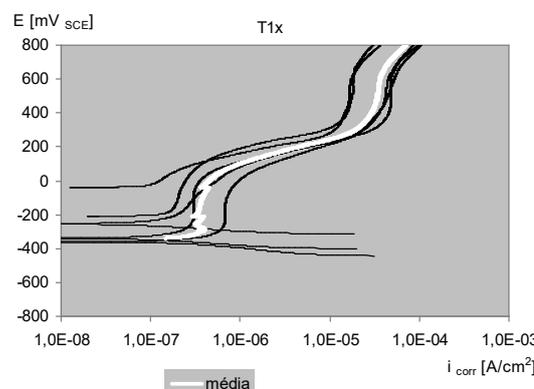


Figura C. 36. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 1% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

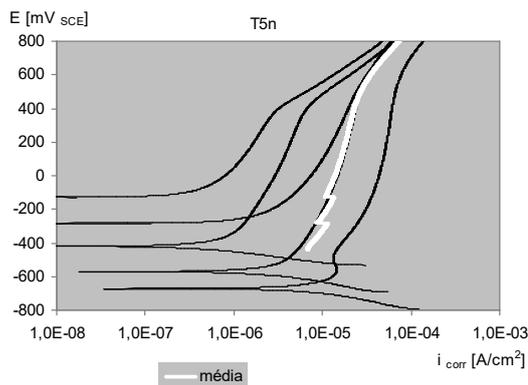


Figura C. 37. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço carbono em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

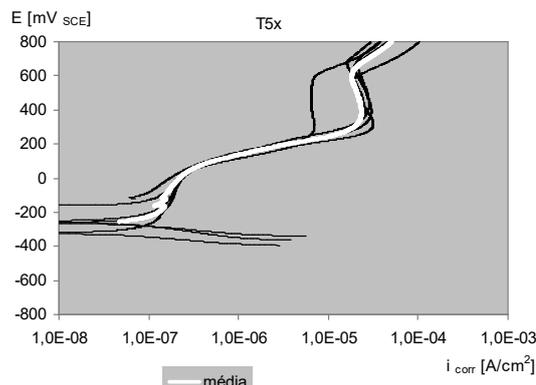


Figura C. 38. Curvas de polarização das barras tracionadas de aço inoxidável em concretos com 5% de cloreto mantidos em condições de imersão parcial.

C.2.5. Curvas médias de barras tracionadas e curvas de barras tracionadas de corpos-de-prova em câmara úmida.

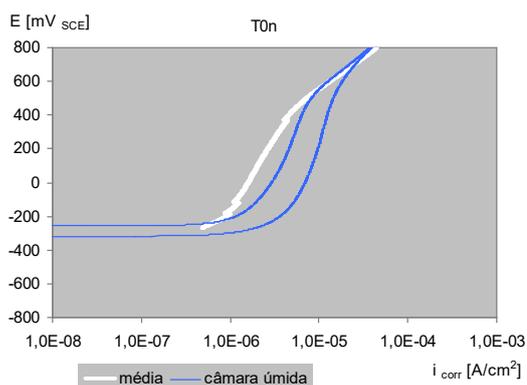


Figura C. 39. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

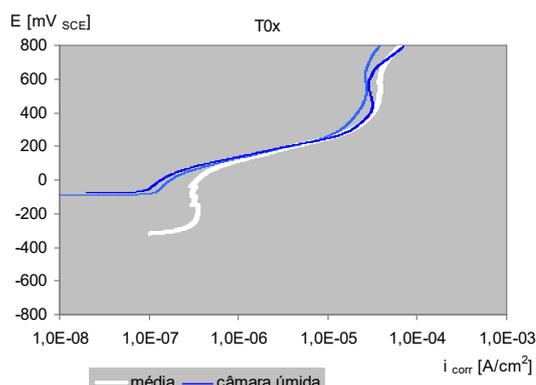


Figura C. 40. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto sem cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

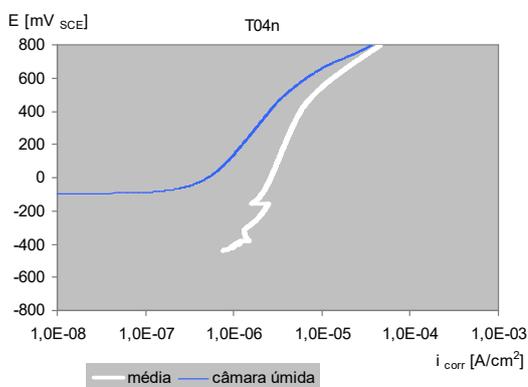


Figura C. 41. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

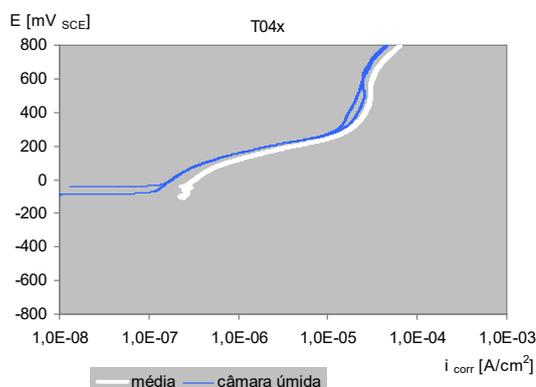


Figura C. 42. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 0,4% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

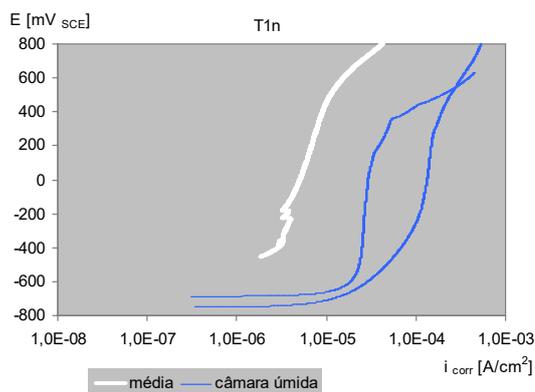


Figura C. 43. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

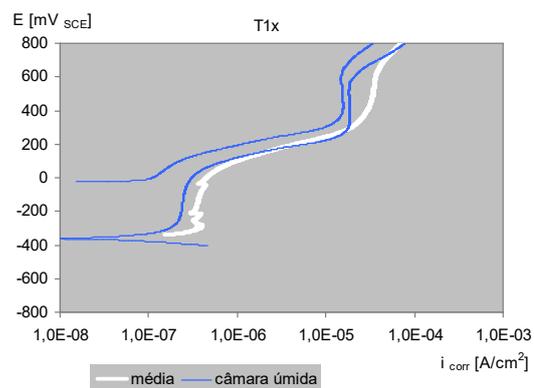


Figura C. 44. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 1% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

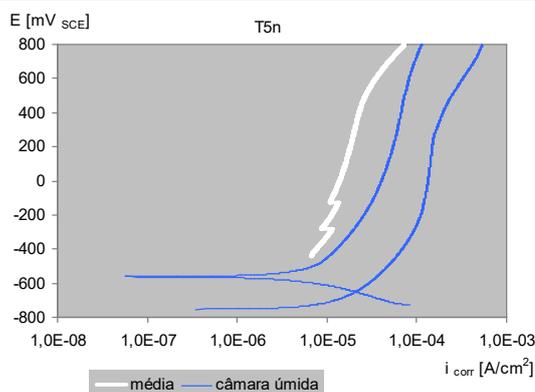


Figura C. 45. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço carbono em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

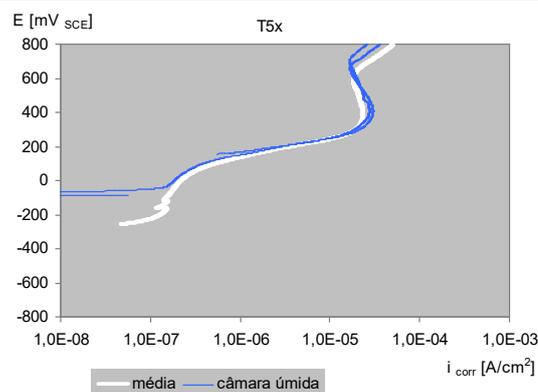


Figura C. 46. Curvas de polarização média das barras tracionadas de aço inoxidável em concreto com 5% de cloreto mantidos em imersão parcial, comparadas as curvas de corpos-de-prova mantidos em câmara úmida.

C.3. Análise das curvas de polarização potenciodinâmicas.

Legenda das tabelas

cp = corpo-de-prova

idade = [semanas]

T = temperatura do ensaio [$^{\circ}\text{C}$]

E_{ca} = potencial de circuito aberto estabilizado [mV]

Ciclos de correção = refere-se aos ciclos de correção automático das curvas, utilizado para diminuir o ruído das medições.

x^2 = indicador de dispersão calculado pelo programa *ParCalc*.

$E(I=0)$ = potencial de corrente zero, potencial de viragem da curva catódica em anódica [mV]

b_a, b_c = valores das pendentes determinadas nas curvas anódicas e catódicas no trecho ± 100 mV do $E(I=0)$, comparáveis teoricamente às pendentes de Taffel [V/década]

I_{corr} = corrente de corrosão medida ao polarizar a barra [μA]

\varnothing = diâmetro da barra [mm]

l = comprimento exposto [mm]

área = área exposta da barra ensaiada [cm^2]

i_{corr} = densidade de corrente de corrosão calculada pelo *ParCalc* [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

$i_{corr}(E_{ca})$ = densidade de corrente de corrosão avaliado para E_{ca} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

" i_{corr} " = densidade de corrente de corrosão determinada graficamente [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

E_p = potencial de pite do aço inoxidável [mV]

Etapa de ensaio = refere-se à etapa dos ensaios: 1 e 2 com diferentes velocidades de varredura e potencial de início da polarização

c.u. = corpos-de-prova em câmara úmida.

Tabela C. 5. Resultados obtidos do programa *ParCalc* que analisa as curvas de polarização.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
0	R0n-2/1	07/08/97	18/05/98	41	20	-147	0	10	-294	0,92	0,09	1,66
0	R0n-2/3	07/08/97	18/06/98	45	20	-55	0	5	-55	0,52	0,01	0,26

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
0	R0n-2/4	07/08/97	01/10/98	60	21	-283	0	2	-283	0,94	0,05	0,52
0	R0n-3/1	07/08/97	18/05/98	41	20	-91	0	31	-261	0,79	0,07	0,86
0	R0n-3/2	07/08/97	01/06/98	43	20	-213	0	6	-295	4,67	0,13	3,42
0	R0n-3/3	07/08/97	26/06/98	47	20	-81	5	32	-239	0,71	0,08	0,81
0	R0n-4/1	07/08/97	18/05/98	41	20	-97	0	30	-260	0,88	0,08	1,36
0	R0n-4/3	07/08/97	29/06/98	47	21	-121	0	23	-276	1,39	0,09	2,59
0	R0n-4/4	07/08/97	18/06/98	45	20	-447	0	5	-447	0,97	0,06	4,66
0	R0n-5/2c.u.	07/08/97	01/10/98	60	21	-115	0	12	-115	0,58	0,02	1,49
0	R0n-5/4c.u.	07/08/97	01/10/98	60	21	-155	0	16	-155	0,64	0,03	1,89
0,4	R04n-1/1	23/08/97	12/05/98	38	21	-26	20	2	-162	0,71	0,12	0,51
0,4	R04n-1/2	23/08/97	29/05/98	40	22	-81	40	28	-223	1,10	0,10	1,00
0,4	R04n-1/3	23/08/97	26/06/98	44	19	-63	0	20	-215	0,90	0,08	0,59
0,4	R04n-1/4	23/08/97	04/07/98	45	20	-64	0	6	-64	0,70	0,02	1,30
0,4	R04n-2/1	23/08/97	20/05/98	39	22	-53	0	23	-204	0,76	0,10	1,31
0,4	R04n-2/2	23/08/97	29/05/98	40	22	-147	0	5	-241	0,74	0,10	0,94
0,4	R04n-2/4	23/08/97	17/10/98	60	21	-253	0	2	-253	0,59	0,06	1,47
0,4	R04n-5/2c.u.	23/08/97	17/10/98	60	21	-131	0	1	-131	0,38	0,01	0,22
1	R1n-1/1	13/08/97	30/06/98	46	20	-109	0	7	-225	0,86	0,16	6,96
1	R1n-1/2	13/08/97	20/05/98	41	21	-211	0	32	-311	1,21	0,16	9,41
1	R1n-1/3	13/08/97	24/06/98	45	20	-355	0	3	-355	0,57	0,06	14,38
1	R1n-2/1	13/08/97	11/05/98	39	19	-363	35	71	-528	54000,00	0,15	2,60
1	R1n-2/2	13/08/97	30/06/98	46	21	-68	5	3	-205	0,64	0,10	9,13

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
1	R1n-2/4	13/08/97	07/10/98	60	21	-562	0	10	-562	3,40	0,06	10,62
1	R1n-3/2c.u.	13/08/97	07/10/98	60	21	-102	0	5	-102	0,43	0,03	0,77
1	R1n-3/4c.u.	13/08/97	24/06/98	45	20	-52	0	6	-52	0,42	0,08	2,02
5	R5n-2/1	17/10/97	13/05/98	30	21	-305	0	17	-427	0,87	0,08	11,54
5	R5n-2/2	17/10/97	25/06/98	36	20	-489	0	2	-624	0,54	0,11	142,20
5	R5n-2/4	17/10/97	11/12/98	60	22	-678	0	2	-678	1,06	0,14	438,34
5	R5n-3/1	17/10/97	13/05/98	30	21	-416	0	9	-574	0,47	0,08	109,00
5	R5n-3/1-2c.u.	17/10/97	11/12/98	60	22	-666	0	9	-574	0,47	0,08	109,01
5	R5n-3/3	17/10/97	25/06/98	36	20	-505	0	17	-624	38,15	0,18	424,60
5	R5n-3/4	17/10/97	28/08/98	45	19	-625	0	5	-625	0,63	0,09	342,73
5	R5n-3/4-2c.u.	17/10/97	11/12/98	60	22	-692	0	56	-692	0,74	0,33	73,27
0	R0x-1/1	07/08/97	19/05/98	41	20	-67	5	30	-245	0,90	0,07	0,71
0	R0x-1/2	07/08/97	18/06/98	45	20	-49	0	80	-49	0,10	0,01	0,05
0	R0x-1/4	07/08/97	18/06/98	45	20	-113	0	78	-113	0,11	0,01	0,03
0	R0x-2/1	07/08/97	14/05/98	41	22	-16	0	31	-194	0,76	0,07	0,54
0	R0x-2/3	07/08/97	19/06/98	45	19	-57	0	212	-57	1,00	0,01	0,04
0	R0x-2/4	07/08/97	19/06/98	45	19	-64	0	152	-64	0,10	0,01	0,06
0	R0x-4/1	07/08/97	14/05/98	41	22	-73	0	33	-251	0,75	0,07	0,55
0	R0x-4/3	07/08/97	17/06/98	45	20	-48	0		-48	0,10	0,02	0,04
0	R0x-4/4	07/08/97	17/06/98	45	20	-85	0		-85	0,22	0,01	0,47
0	R0x-5/1	07/08/97	01/10/98	60	21	-47	0		-47	0,11	0,02	0,05
0	R0x-5/2c.u.	07/08/97	01/10/98	60	21	-126	0	12	-126	0,20	0,01	0,51

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
0,4	R04x-1/1	23/08/97	11/05/98	38	20	-46	40	16	-255	1,29	0,08	0,93
0,4	R04x-1/2	23/08/97	08/06/98	42	20	113	70	32	-28	3,77	0,19	1,21
0,4	R04x-1/4	23/08/97	04/07/98	45	20	-77	0	127	-77	0,10	0,01	0,04
0,4	R04x-4/1	23/08/97	19/05/98	39	21	-50	0	33	-232	0,99	0,07	0,57
0,4	R04x-4/3	23/08/97	26/06/98	44	19	-58	5	19	-256	1,47	0,05	0,51
0,4	R04x-4/4	23/08/97	04/07/98	45	20	-89	0	189	-89	0,11	0,06	0,05
0,4	R04x-5/1c.u.	23/08/97	17/10/98	60	21	-13	0	170	-13	0,11	0,01	0,07
0,4	R04x-5/4c.u.	23/08/97	04/07/98	45	20	109	0	129	109	0,10	0,01	0,12
1	R1x-2/1	22/08/97	19/05/98	39	21	-72	0	26	-241	0,69	0,08	0,38
1	R1x-2/2	22/08/97	01/07/98	45	21	-96	0	23	-253	0,99	0,09	0,52
1	R1x-2/4	22/08/97	01/07/98	45	21	-76	0	22	-76	0,11	0,00	0,04
1	R1x-5/1	22/08/97	07/05/98	37	21	-217	20	10	-412	1,25	0,07	0,76
1	R1x-4/1c.u.	22/08/97	17/10/98	60	21	-43	0	168	-43	0,13	0,01	0,07
1	R1x-4/2c.u.	22/08/97	17/10/98	60	21	-25	0	231	-25	0,11	0,01	0,06
1	R1x-5/2	22/08/97	30/06/98	45	21	-51	0	30	-229	1,05	0,07	0,46
1	R1x-5/4	22/08/97	01/07/98	45	21	-56	0	84	-56	0,10	0,00	0,06
5	R5x-1/1	14/10/97	13/05/98	31	21	-83	35	45	-201	0,27	0,08	0,10
5	R5x-1/3	14/10/97	29/06/98	37	20	-47	20	6	-181	0,36	0,09	0,19
5	R5x-1/4	14/10/97	28/08/98	45	19	-211	60		-211	0,40	0,12	0,13
5	R5x-2/1	14/10/97	12/05/98	31	20	36	5	2	27	0,24	0,13	180,40
5	R5x-2/3	14/10/97	25/06/98	37	20	-63	40	15	-195	0,30	0,08	0,13
5	R5x-2/4	14/10/97	28/08/98	45	19	-113	0	154	-113	0,10	0,00	0,02
5	R5x-4/1c.u.	14/10/97	11/12/98	60	22	-280	0	2	-280	0,41	0,03	0,10

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
5	R5x-4/4c.u.	14/10/97	11/12/98	60	22	-108	0	88	-108	0,10	0,02	0,04
0	T0n-2/1cu	25/8/97	19/10/98	59	21	-320	0	4	-320	0,60	0,12	44,92
0	T0n-2/4cu	25/8/97	16/10/98	59	21	-257	0	14	-257	0,55	0,06	19,89
0	T0n-3/1	25/8/97	24/8/98	51	20	-180	0	19	-180	0,70	0,07	15,28
0	T0n-3/2	25/8/97	16/7/98	46	20	-222	5	15	-313	0,50	0,17	12,55
0	T0n-3/4	25/8/97	13/7/98	45	20	-144	0	76	-269	1,73	0,14	20,84
0	T0n-4/1	27/8/97	27/7/98	47	20	-117	20	9	-116	0,47	0,08	6,72
0	T0n-4/2	27/8/97	14/7/98	45	20	-218	0	5	-322	0,80	0,13	8,42
0	T0n-4/4	27/8/97	24/6/98	42	20	-125	0	11	-235	0,49	0,16	5,99
0	T0n-5/1	25/8/97	8/7/98	45	20	-132	0	6	-260	0,69	0,14	9,18
0	T0n-5/2cu	25/8/97	20/7/98	46	20	-93	0	0	-93	0,47	0,13	0,82
0	T0n-5/3	25/8/97	25/8/98	51	20	-160	40	3	-160	0,25	0,01	24,47
0	T0n-5/4	25/8/97	20/7/98	46	20	-262	0	43	-371	1,35	0,13	32,68
0,4	T04n-1/1cu	26/8/97	24/10/98	60	21	-97	0	5	-97	0,46	0,07	6,05
0,4	T04n-1/3cu	26/8/97	19/10/98	59	21	-93	0	0	-93	0,42	0,05	1,50
0,4	T04n-1/4cu	26/8/97	13/10/98	58	21	-88	0	0	-88	1,00	0,14	0,97
0,4	T04n-2/1	26/8/97	6/7/98	44	20	-348	0	20	-429	0,48	0,14	11,45
0,4	T04n-2/2	26/8/97	17/7/98	46	20	-414	0	7	-528	0,42	0,09	16,24
0,4	T04n-2/4	26/8/97	24/8/98	51	20	-155	0	11	-155	0,48	0,05	5,16
0,4	T04n-4/2	23/8/97	27/7/98	48	20	-180	0	0	-180	1,00	0,13	32,70
0,4	T04n-4/3	23/8/97	24/6/98	43	20	-188	0	48	-308	0,66	0,14	11,58
0,4	T04n-4/4	23/8/97	24/10/98	60	21	-66	35	13	-66	5,70	128,50	24,49

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
1	T1n-1/1cu	22/8/97	24/10/98	60	21	-404	5	39	-404	0,64	0,12	119,21
1	T1n-1/2cu	22/8/97	15/10/98	59	21	-749	0	0	-749	0,66	0,15	101,27
1	T1n-1/4cu	22/8/97	15/10/98	59	21	-688	0	3	-688	1,39	0,07	317,87
1	T1n-2/1	22/8/97	6/7/98	45	20	-467	0	6	-604	0,66	0,13	120,31
1	T1n-2/3	22/8/97	24/8/98	52	20	-181	0	21	-181	0,60	0,09	20,18
1	T1n-2/4	22/8/97	17/7/98	46	20	-359	0	6	-463	0,64	0,15	17,08
1	T1n-3/2	27/8/97	25/8/98	51	20	-226	0	6	-226	0,66	0,06	19,51
1	T1n-3/3	27/8/97	23/6/98	42	20	-129	0	8	-233	0,63	0,19	8,95
1	T1n-3/4	27/8/97	14/7/98	45	20	-368	0	2	-464	0,62	0,15	56,87
5	T5n-1/1cu	15/8/97	15/10/98	60	21	-171	0	50	-256	0,43	0,04	2,63
5	T5n-1/2cu	15/8/97	18/10/98	60	21	-752	0	2	-752	0,44	0,12	244,72
5	T5n-3/2	16/10/97	23/7/98	40	20	-286	0	4	-421	0,66	0,09	15,12
5	T5n-3/3	16/10/97	13/7/98	38	20	-447	5	3	-573	1,22	0,13	85,69
5	T5n-3/4	16/10/97	5/10/98	50	21	-130	0	8	-130	0,46	0,06	7,57
5	T5n-4/1	16/10/97	15/7/98	38	20	-548	0	140	-676	0,95	0,10	265,24
5	T5n-4/3	16/10/97	15/7/98	38	20	-284	0	6	-284	0,44	0,09	35,04
5	T5n-4/4	16/10/97	23/6/98	35	20	-477	0	5	-562	1,39	0,20	179,20
0	T0x-1/2	3/9/97	22/6/98	41	20	-152	0	11	-346	1,69	0,05	3,74
0	T0x-1/3	3/9/97	29/9/98	55	21	-37	0	90	-38	0,17	0,02	0,31
0	T0x-1/4	3/9/97	15/7/98	45	20	-201	0	50	-368	1,83	0,07	5,25
0	T0x-2/1	3/9/97	1/10/98	55	21	-149	0	29	-148	0,44	0,05	1,94
0	T0x-2/2	3/9/97	3/7/98	43	20	-121	0	9	-317	0,23	0,04	3,85

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
0	T0x-2/4	3/9/97	28/7/98	46	20	-100	40	109	-90	0,21	0,03	0,42
0	T0x-5/2cu	29/8/97	19/10/98	59	21	-95	0	88	-95	0,15	0,01	0,61
0	T0x-5/3cu	29/8/97	15/10/98	58	21	-73	0	150	-73	0,15	0,01	0,39
0	T0x-6/1	8/9/97	25/8/98	50	20	126	0	745	175	5,24	1,23	1008,87
0	T0x-6/2	8/9/97	16/7/98	44	20	-130	5	30	-318	0,89	0,07	5,65
0	T0x-6/4	8/9/97	6/7/98	43	20	-175	70	28	-329	1,75	0,09	4,82
0,4	T04x-1/1cu	10/10/97	14/10/98	52	21	-44	0	63	-44	0,20	0,01	1,76
0,4	T04x-1/4cu	10/10/97	16/10/98	52	21	-204	0	29	-204	0,26	0,02	0,55
0,4	T04x-3/1	18/10/97	8/7/98	37	20	-28	0	58	-226	0,96	0,14	3,73
0,4	T04x-3/2	18/10/97	2/10/98	49	21	-62	35	71	-62	0,16	0,02	0,45
0,4	T04x-3/3	18/10/97	20/7/98	39	20	-99	0	24	-138	0,36	0,23	0,22
0,4	T04x-4/1	18/10/97	1/10/98	49	21	-44	0	0	-44	0,76	0,35	1,51
0,4	T04x-4/3	18/10/97	1/10/98	49	21	-58	0	16	-58	0,96	0,09	1,65
0,4	T04x-5/1	20/10/97	1/10/98	49	21	-109	20	40	-109	0,35	0,09	1,98
0,4	T04x-5/2	20/10/97	2/7/98	36	21	-175	0	13	-295	0,71	0,12	1,10
0,4	T04x-5/4	20/10/97	17/7/98	38	20	-160	0	0	-275	0,65	0,08	1,48
1	T1x-1/1	16/10/97	7/7/98	37	20	-68	0	50	-256	0,43	0,04	2,58
1	T1x-1/3	16/10/97	28/9/98	49	21	-39	20	80	-39	0,16	0,03	0,34
1	T1x-1/4	16/10/97	20/7/98	39	20	-196	0	50	-361	0,90	0,08	11,27
1	T1x-2/1	16/10/97	30/9/98	49	21	-212	0	7	-210	1,06	0,01	2,92
1	T1x-2/2	16/10/97	16/7/98	39	20	-190	0	0	-230	0,64	0,05	3,38
1	T1x-2/4	16/10/97	2/7/98	37	21	-151	60	40	-339	0,53	0,06	3,26

Continuação Tabela C. 5.

%Cl	cp	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	T	E_{ca}	Ciclos de correção	Resultados				
								x^2	$E(I=0)$	"pendentes de Taffel"		I_{corr}
										b_a	b_c	
1	T1x-3/1cu	17/10/97	24/10/98	52	21	-211	0	8	-361	4,13	0,11	4,06
1	T1x-3/4cu	17/10/97	14/10/98	51	21	-24	5	71	-24	0,20	0,00	1,23
5	T5x-1/1cu	14/10/97	16/10/98	52	21	152	40	81	152	0,32	0,21	140,94
5	T5x-1/4cu	14/10/97	16/10/98	52	21	-74	0	0	-74	0,45	0,14	1,41
5	T5x-2/2	14/10/97	2/7/98	37	21	-109	0	5	-252	1,01	0,12	2,04
5	T5x-2/3	14/10/97	6/10/98	50	21	-160	0	4	-160	0,41	0,04	1,83
5	T5x-2/4	14/10/97	8/7/98	38	20	-88	0	38	-260	0,72	0,07	1,81
5	T5x-3/1	17/10/97	29/09/98	49	21	-102	0	59	-102	0,24	0,01	0,40
5	T5x-3/2	17/10/97	29/09/98	49	21	-148	0	2	-321	1,02	0,07	2,29
5	T5x-3/4	17/10/97	27/07/98	40	20	-118	0	3	-116	0,30	0,01	0,94

Tabela C. 6. Resultados do programa *ParCalc* e das determinações gráficas das curvas de polarização.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	l	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
0	R0n-2/1	41	1	9,8	49	18,3	-147	-294	0,091	0,125	0,032		-147		
0	R0n-2/3	45	2	9,8	50	18,8	-55	-55	0,017	0,019	0,019		0		
0	R0n-2/4	60	2	9,9	51	19,2	-283	-283	0,033	0,037	0,037		0		
0	R0n-3/1	41	1	9,8	52	19,6	-91	-261	0,044	0,074	0,050		-170		

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
0	R0n-3/2	43	1	9,7	52	19,2	-213	-295	0,178	0,142	0,043		-82		
0	R0n-3/3	47	1	9,9	49	18,6	-81	-239	0,043	0,072	0,035		-158		
0	R0n-4/1	41	1	9,9	54	20,3	-97	-260	0,067	0,111	0,043		-163		
0	R0n-4/3	47	1	9,8	50	18,8	-121	-276	0,138	0,212	0,046		-155		
0	R0n-4/4	45	2	9,9	51	19,4	-447	-447	0,291	0,034	0,034		0		
0	R0n-5/2c.u.	60	2	9,9	49	18,4	-115	-115	0,098	0,073	0,073		0		
0	R0n-5/4c.u.	60	1	9,9	50	18,8	-155	-155	0,122	0,104	0,104		0		
0,4	R04n-1/1	38	1	9,9	51	19,2	-26	-162	0,027	0,041	0,044		-136		
0,4	R04n-1/2	40	1	9,9	49	18,6	-81	-223	0,054	0,070	0,072		-142		
0,4	R04n-1/3	44	1	9,9	51	19,2	-63	-215	0,031	0,046	0,050		-152		
0,4	R04n-1/4	45	2	9,7	53	19,7	-64	-64	0,080	0,109	0,109		0		
0,4	R04n-2/1	39	1	9,8	50	18,8	-53	-204	0,070	0,107	0,111		-151		
0,4	R04n-2/2	40	1	9,9	49	18,6	-147	-241	0,050	0,061	0,087		-94		
0,4	R04n-2/4	60	2	9,8	49	18,4	-131	-131	0,015	0,022	0,022		0		
0,4	R04n-5/2c.u.	60	2	9,9	51	19,2	-253	-253	0,093	0,064	0,064		0		
1	R1n-1/1	46	1	9,9	51	19,4	-109	-225	0,359	0,445	0,566		-116		

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
1	R1n-1/2	41	1	9,9	49	18,4	-211	-311	0,510	0,494	0,612		-100		
1	R1n-1/3	45	2	9,9	51	19,4	-355	-355	0,897	1,230	1,230		0		
1	R1n-2/1	39	1	9,9	52	19,6	-363	-528	0,133	0,126	0,092		-165		
1	R1n-2/2	46	1	9,8	48	17,9	-68	-205	0,511	0,077	0,072		-137		
1	R1n-2/4	60	2	9,9	52	19,6	-562	-562	0,656	0,680	0,68		0		
1	R1n-3/2c.u.	60	2	9,9	51	19,2	-102	-102	0,048	0,038	0,038		0		
1	R1n-3/4c.u.	45	2	9,8	50	18,8	-52	-52	0,130	0,063	0,063		0		
5	R5n-2/1	30	1	9,8	50	18,6	-305	-427	0,619	0,616	0,752		-122		
5	R5n-2/2	36	1	9,9	52	19,6	-489	-624	7,259	10,155	8,820		-135		
5	R5n-2/4	60	2	9,8	49	18,4	-678	-678	28,751	18,700	18,700		0		
5	R5n-3/1	30	1	9,8	50	18,6	-416	-574	5,848	3,716	3,750		-158		
5	R5n-4/1-2c.u.	60	1	9,9	50	19,0	-666	-574	6,936	1,690	1,690		92		
5	R5n-3/3	36	1	9,8	51	19,2	-505	-624	22,110	16,105	9,040		-119		
5	R5n-3/4	45	2	9,9	49	18,4	-625	-625	22,482	12,600	12,600		0		
5	R5n-4/4-2c.u.	60	2	9,9	49	18,6	-692	-692	4,757	2,000	2,000		0		
0	R0x-1/1	41	1	10	51	18,5	-67	-245	0,038	0,058	0,027	-15	-178	230	52
0	R0x-1/2	45	2	10	49	17,8	-49	-49	0,003	0,014	0,014	74	0	123	123
0	R0x-1/4	45	2	10	48	17,2	-113	-113	0,002	0,028	0,028	76	0	189	189
0	R0x-2/1	41	1	10	49	17,8	-16	-194	0,030	0,047	0,026	51	-178	245	67
0	R0x-2/3	45	2	10	51	18,3	-57	-57	0,003	0,023	0,023	48	0	105	105
0	R0x-2/4	45	2	10	49	17,8	-64	-64	0,004	0,019	0,019	30	0	94	94

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
0	R0x-4/1	41	1	10	51	18,5	-73	-251	0,030	0,049	0,024	15	-178	266	88
0	R0x-4/3	45	2	10	51	18,3	-48	-48	0,003	0,017	0,017	56	0	104	104
0	R0x-4/4	45	2	10	51	18,5	-85	-85	0,030	0,026	0,026	52	0	137	137
0	R0x-4/2	60	2	10	52	18,7	-47	-47	0,003	--	--	--	--0	--	--
0	R0x-5/2c.u.	60	2	10	51	18,5	-126	-126	0,033	0,032	0,032	5	0	131	131
0,4	R04x-1/1	38	1	10	49	17,8	-46	-255	0,052	0,072	0,025	63	-209	318	109
0,4	R04x-1/2	42	1	10	49	17,8	113	-28	0,068	0,058	0,014	183	-141	211	70
0,4	R04x-1/4	45	2	10	52	18,7	-77	-77	0,002	0,014	0,014	42	0	119	119
0,4	R04x-4/1	39	1	10	51	18,3	-50	-232	0,031	0,045	0,016	-10	-182	222	40
0,4	R04x-4/3	44	1	10	49	17,8	-58	-256	0,028	0,036	0,018	-23	-198	233	35
0,4	R04x-4/4	45	2	10	50	18,1	-89	-89	0,003	0,013	0,013	40	0	129	129
0,4	R04x-5/1c.u.	60	2	10	49	17,8	-13	-13	0,005	0,019	0,019	86	0	99	99
0,4	R04x-5/4c.u.	45	2	10	50	18,0	2	2	0,008	0,021	0,021	87	0	85	85
1	R1x-2/1	39	1	10	51	18,3	-72	-241	0,021	0,035	0,012	0	-169	241	72
1	R1x-2/2	45	1	10	52	18,7	-96	-253	0,028	0,040	0,014	52	-157	305	148
1	R1x-2/4	45	2	10	51	18,3	-76	-76	0,003	0,012	0,012	45	0	121	121
1	R1x-4/1c.u.	60	2	10	51	18,5	-43	-43	0,004	0,017	0,017	100	0	143	143
1	R1x-4/2c.u.	60	2	10	50	18,1	-25	-25	0,004	0,023	0,023	68	0	93	93
1	R1x-5/1	37	1	10	51	18,5	-217	-412	0,041	0,041	0,020	-42	-195	370	175
1	R1x-5/2	45	1	10	50	18,0	-51	-229	0,026	0,035	0,013	0	-178	229	51
1	R1x-5/4	45	2	10	49	17,8	-56	-56	0,004	0,010	0,010	40	0	96	96

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr} (E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
5	R5x-1/1	31	1	10	50	18,1	-83	-201	0,005	0,011	0,008	-13	-118	188	70
5	R5x-1/3	37	1	10	49	17,8	-47	-181	0,011	0,026	0,006	0	-134	181	47
5	R5x-1/4	45	2	10	51	18,5	-211	-211	0,008	0,007	0,007	0	0	211	211
5	R5x-2/3	37	1	10	51	18,5	-63	-195	0,007	0,019	0,004	23	-132	218	86
5	R5x-2/4	45	2	10	50	18,1	-113	-113	0,001	0,006	0,006	19	0	132	132
5	R5x-4/1c.u.	60	2	10	52	18,7	-280	-280	0,007	0,007	0,007	15	0	295	295
5	R5x-4/4c.u.	60	2	10	50	18,1	-108	-108	0,002	0,007	0,007	15	0	123	123
BARRA COM PITE ↯															
5	R5x-2/1	31	1	10	51	18,3	36	27	9,829	5394,3	12,900	27	-9	0	0
0	T0n-2/1cu	59	2	9,8	50	18,8	-320	-320	2,387	0,729	0,729		0		
0	T0n-2/4cu	59	2	9,7	51	19,0	-257	-257	1,047	0,561	0,561		0		
0	T0n-3/1	51	2	9,9	49	18,4	-180	-180	0,829	0,290	0,290		0		
0	T0n-3/2	46	1	9,9	50	18,8	-222	-313	0,667	0,861	0,380		-91		
0	T0n-3/4	45	1	9,8	51	19,0	-144	-269	1,097	1,161	0,514		-125		
0	T0n-4/1	47	2	9,9	49	18,6	-117	-116	0,361	0,182	0,182		1		
0	T0n-4/2	45	1	9,9	51	19,2	-218	-322	0,439	0,531	0,255		-104		
0	T0n-4/4	42	1	9,9	53	20,1	-125	-235	0,297	0,488	0,221		-110		
0	T0n-5/1	45	1	9,9	50	19,0	-132	-260	0,483	0,855	0,310		-128		
0	T0n-5/2cu	46	2	9,9	49	18,6	-93	-93	0,044	0,080	0,080		0		
0	T0n-5/3	51	2	9,9	49	18,6	-160	-160	1,314	1,360	1,360		0		
0	T0n-5/4	46	1	9,7	51	18,8	-262	-371	1,737	1,803	0,809		-109		

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
0,4	T04n-1/1cu	60	2	9,8	51	19,2	-97	-97	0,315	0,160	0,160		0		
0,4	T04n-1/3cu	59	2	9,8	49	18,3	-93	-93	0,082	0,095	0,095		0		
0,4	T04n-1/4cu	58	2	9,7	51	19,0	-88	-88	0,051	0,104	0,104		0		
0,4	T04n-2/1	44	1	9,9	52	19,6	-348	-429	0,585	0,911	0,494		-81		
0,4	T04n-2/2	46	1	9,9	48	18,1	-414	-528	0,899	1,628	0,733		-114		
0,4	T04n-2/4	51	2	9,8	52	19,4	-155	-155	0,266	0,145	0,145		0		
0,4	T04n-4/2	48	2	9,9	49	18,4	-180	-180	1,773	1,070	1,070		0		
0,4	T04n-4/3	43	1	9,8	50	18,8	-188	-308	0,615	0,868	0,482		-120		
0,4	T04n-4/4	60	2	9,7	51	18,8	-66	-66	1,302	0,011	0,011		0		
1	T1n-1/1cu	60	2	9,9	52	19,8	-404	-404	6,030	4,020	4,020		0		
1	T1n-1/2cu	59	2	9,9	52	19,6	-749	-749	5,172	10,400	10,400		0		
1	T1n-1/4cu	59	2	9,8	49	18,4	-688	-688	17,237	7,560	7,560		0		
1	T1n-2/1	45	1	9,9	53	20,1	-467	-604	5,971	4,744	3,120		-137		
1	T1n-2/3	52	2	9,9	50	19,0	-181	-181	1,061	0,521	0,521		0		
1	T1n-2/4	46	1	9,9	49	18,6	-359	-463	0,917	1,140	0,515		-104		
1	T1n-3/2	51	2	9,9	49	18,6	-226	-226	1,047	0,507	0,507		0		
1	T1n-3/3	42	1	9,9	51	19,2	-129	-233	0,466	0,577	0,298		-104		
1	T1n-3/4	45	1	9,9	51	19,4	-368	-464	2,933	3,607	1,390		-96		
5	T5n-1/1cu	60	1	9,7	49	18,1	-171	-256	0,145	0,237	0,014		-85		
5	T5n-1/2cu	60	2	9,8	51	19,2	-752	-752	12,750	8,090	8,090		0		
5	T5n-3/2	40	1	9,9	52	19,6	-286	-421	0,772	1,284	0,491		-135		

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
5	T5n-3/3	38	1	9,8	48	17,9	-447	-573	4,793	5,086	2,900		-126		
5	T5n-3/4	50	2	9,9	52	19,6	-130	-130	0,387	0,213	0,213		0		
5	T5n-4/1	38	1	9,9	51	19,2	-548	-676	13,815	14,070	7,630		-128		
5	T5n-4/3	38	2	9,9	50	19,0	-284	-284	1,843	0,685	0,685		0		
5	T5n-4/4	35	1	9,9	50	18,8	-477	-562	9,522	7,110	6,370		-85		
0	T0x-1/2	41	1	10	51	18,5	-152	-346	0,202	0,257	0,155	-134	-194	212	18
0	T0x-1/3	55	2	10	49	17,8	-37	-38	0,017	0,092	0,092	43	-1	81	80
0	T0x-1/4	45	1	10	48	17,2	-201	-368	0,305	0,352	0,158	-39	-167	329	162
0	T0x-2/1	55	2	10	49	17,8	-149	-148	0,109	0,103	0,103	-26	1	122	123
0	T0x-2/2	43	1	10	51	18,3	-121	-317	0,210	0,314	0,229	-10	-196	307	111
0	T0x-2/4	46	1	10	49	17,8	-100	-90	0,023	0,103	0,103	0	10	90	100
0	T0x-5/2cu	59	2	10	51	18,5	-95	-95	0,033	0,044	0,044	0	0	95	95
0	T0x-5/3cu	58	2	10	51	18,3	-73	-73	0,021	0,082	0,082	0	0	73	73
0	T0x-6/1	50	1	10	51	18,5	126	175	54,528	2,020	2,020	em pite	49	0	0
0	T0x-6/2	44	1	10	52	18,7	-130	-318	0,302	0,333	0,197	-41	-188	277	89
0	T0x-6/4	43	1	10	51	18,5	-175	-329	0,261	0,376	0,205	-10	-154	319	165
0,4	T04x-1/1cu	52	2	10	49	17,8	-44	-44	0,099	0,071	0,071	40	0	84	84
0,4	T04x-1/4cu	52	2	10	49	17,8	-204	-204	0,031	0,076	0,076	0	0	204	204
0,4	T04x-3/1	37	1	10	52	18,7	-28	-226	0,200	0,369	0,086		-198	226	28
0,4	T04x-3/2	49	2	10	51	18,3	-62	-62	0,025	0,115	0,115	0	0	62	62
0,4	T04x-3/3	39	1	10	49	17,8	-99	-138	0,012	0,009	0,006	0	-39	138	99

Continuação Tabela C. 6.

%Cl	cp	Idade	Etapa de ensaio	ϕ	I	área	E_{ca}	$E(I=0)$	i_{corr}	Determinação gráfica			$E(I=0) - E_{ca}$	$E_p - E(I)$	$E_p - E_{ca}$
										$i_{corr}(E_{ca})$	" i_{corr} "	E_p			
0,4	T04x-4/1	49	2	10	50	18,1	-44	-44	0,083	0,090	0,090	57	0	101	101
0,4	T04x-4/3	49	2	10	49	17,8	-58	-58	0,093	0,131	0,131	25	0	83	83
0,4	T04x-5/1	49	2	10	50	18,0	-109	-109	0,110	0,117	0,117	0	0	109	109
0,4	T04x-5/2	36	1	10	51	18,3	-175	-295	0,060	0,281	0,138	48	-120	343	223
0,4	T04x-5/4	38	1	10	49	17,8	-160	-275	0,083	0,085	0,085	30	-115	305	190
1	T1x-1/1	37	1	10	53	19,2	-68	-256	0,134	0,360	0,118	0	-188	256	68
1	T1x-1/3	49	2	10	50	18,1	-39	-39	0,019	0,089	0,089	47	0	86	86
1	T1x-1/4	39	1	10	49	17,8	-196	-361	0,634	0,673	0,387	-87	-165	274	109
1	T1x-2/1	49	2	10	49	17,8	-212	-210	0,164	0,135	0,135	23	2	233	235
1	T1x-2/2	39	1	10	51	18,3	-190	-230	0,185	0,220	0,220	-10	-40	220	180
1	T1x-2/4	37	1	10	51	18,5	-151	-339	0,176	0,249	0,141	-32	-188	307	119
1	T1x-3/1cu	52	1	10	49	17,6	-211	-361	0,231	0,230	0,083	-45	-150	316	166
1	T1x-3/4cu	51	2	10	51	18,5	-24	-24	0,066	0,061	0,061	65	0	89	89
5	T5x-1/1cu	52	2	10	48	17,2	152	152	8,179	0,872	0,872	em pite	0	0	0
5	T5x-1/4cu	52	2	10	49	17,8	-74	-74	0,079	0,040	0,040	67	0	141	141
5	T5x-2/2	37	1	10	51	18,3	-109	-252	0,111	0,147	0,078	0	-143	252	109
5	T5x-2/3	50	2	10	49	17,8	-160	-160	0,103	0,066	0,066	65	0	225	225
5	T5x-2/4	38	1	10	51	18,5	-88	-260	0,098	0,192	0,080	-10	-172	250	78
5	T5x-3/1	49	2	10	51	18,3	-102	-102	0,022	0,030	0,030	0	0	102	102
5	T5x-3/2	49	1	10	51	18,5	-148	-321	0,124	0,150	0,072	-32	-173	289	116
5	T5x-3/4	40	2	10	52	18,7	-118	-116	0,050	0,074	0,074	0	2	116	118

Tabela C. 7. Resultados das curvas de polarização dos ensaios complementares.

%Cl	cp	edad [semanas]	T [°C]	ciclos de corrección	x ²	E _{ca} [mV]	E(I=0) [mV]	b _a	b _c	I _{corr}	área	i _{corr} [nA/cm ²]
0	D0n-1	33	20	0	8	-200	-306	1,19	0,11	1,26	19,0	66,16
0	D0n-2	35	21	0	6	-86	-212	0,63	0,15	1,71	19,0	90,11
0,4	D04n-1	33	19	0	5	-211	-296	0,50	0,12	1,23	19,0	64,84
0,4	D04n-2	34	21	0	12	-336	-420	0,60	0,14	4,41	19,0	232,11
1	D1n-1	37	20	0	16	-210	-290	0,44	0,15	1,00	19,0	52,37
1	D1n-2	43	22	0	10	-171	-260	0,68	0,23	7,30	19,0	384,00
5	D5n-2	32	19	0	2	-403	-431	1,00	0,22	21,91	19,0	1153,16
5	D5n-3	34	22	0	5	-411	-427	2,12	0,23	46,28	19,0	2435,79
0	D0x-4	39	19	0	4	-171	-313	1,04	0,10	0,49	18,7	26,13
0	D0n-4(x)	0		0	28	-89	-254	0,70	0,08	0,32	18,7	16,92
0,4	D04x-1	34	19	0	5	-143	-273	0,94	0,11	0,48	18,7	25,74
0,4	D04x-2	30	20	0	6	-151	-289	15,30	0,11	1,45	18,7	77,27
1	D1x-3	41	19	0	27	-80	-233	0,60	0,09	0,30	18,7	16,27
1	D1x-4	42	21	0	14	-41	-227	0,80	0,07	0,67	18,7	36,04
5	D5x-2	38	18	0	24	-129	-234	0,39	0,09	0,17	18,7	8,95
5	D5x-3	39	21	0	34	-96	-219	0,29	0,08	0,15	18,7	7,90
0	S0n-1/2	31	21	0	53	-229	-360	0,00	0,09	2,50	19,0	131,58
1	S1n-1/2	40	21	0	5	-131	-248	0,57	0,14	2,31	19,0	121,58
1	S1n-2/2	41	22	0	3	-96	-208	1,04	0,19	8,16	19,0	429,63
0	S0x-1/2	31	22	0	30	-152	-302	0,65	0,08	0,23	18,7	12,33
0,4	S04x-1/2	32	21	5	38	-91	-276	0,97	0,06	0,39	18,7	20,99
0,4	S04x-3/2	32	21	5	34	-136	-304	1,05	0,08	0,43	18,7	23,21
1	S1x-4/2	31	22	0	22	-134	-284	0,80	0,09	0,36	18,7	19,50
1	S1x-5/1	31	21	0	34	-111	-284	0,69	0,07	0,24	18,7	12,77
5	S5x-2/2	30	21	10	54	-82	-237	0,42	0,07	0,17	18,7	8,97
5	S5xn-1/2	32	22	0	30	-179	-267	0,53	0,11	1,12	18,7	59,84

C.4. Análise das curvas pelos diagramas de Evans e de Pourbaix.

C.4.1. Diagramas de Pourbaix

Com ajuda do Diagrama de Pourbaix é possível determinar para um dado pH o potencial de equilíbrio do oxigênio. Este potencial é o ponto de partida da curva anódica do oxigênio representada nos diagramas de Evans. Os Diagramas de Pourbaix utilizados foram o do Fe-água e do Cr-água (POURBAIX, 1987), apresentados na Figura C. 47. O pH estimado da solução aquosa dos poros do concreto da pesquisa foi de 13,5 considerando que se trata de um concreto jovem.

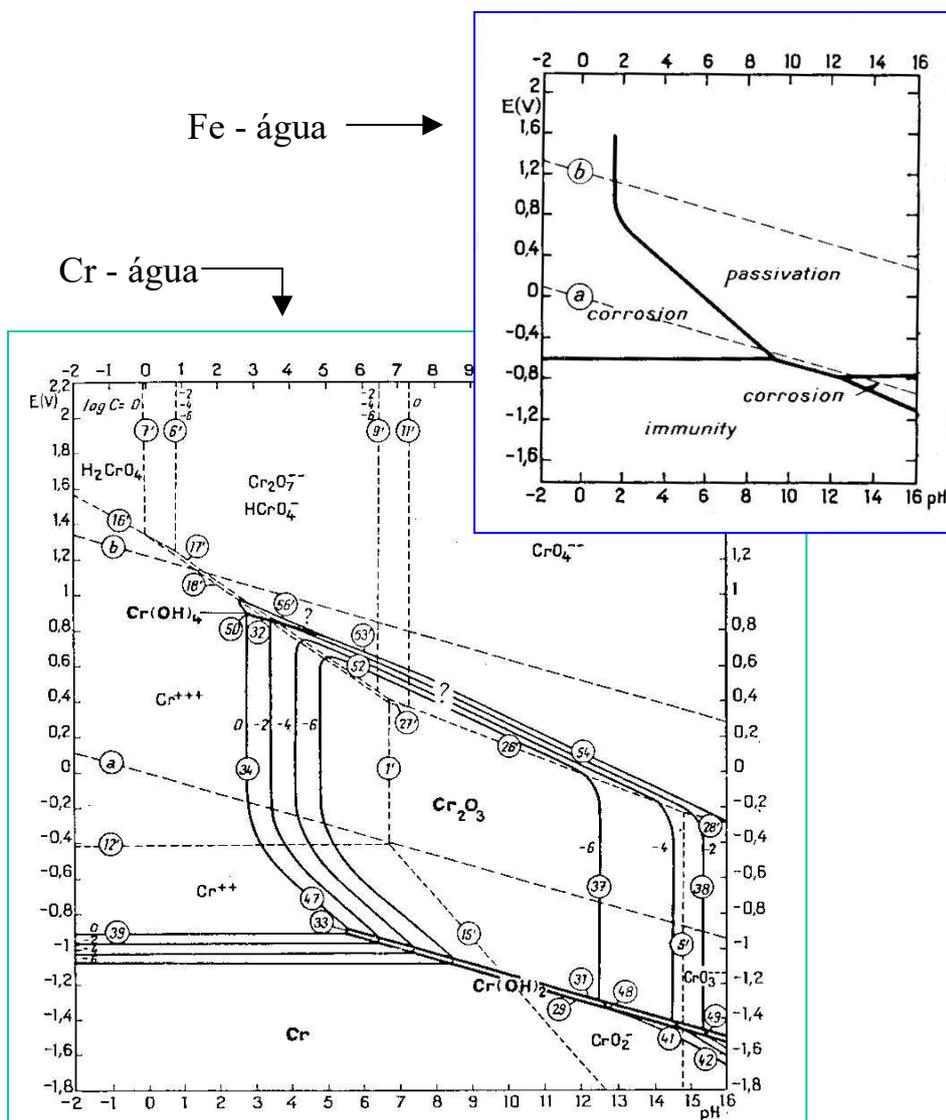


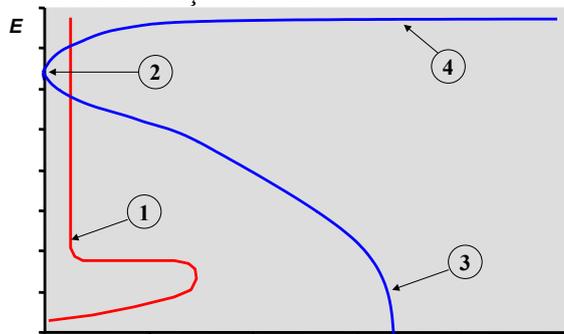
Figura C. 47. Diagramas de Pourbaix para os sistemas Fe-água e Cr-água (POURBAIX, 1987).

O potencial de equilíbrio do oxigênio determinado dos diagramas de Pourbaix foi:

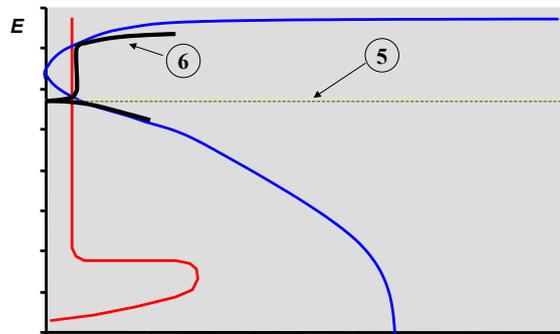
$$\text{Para pH} = 13,5 \rightarrow +440 \text{ mV}_H$$

C.4.2. Análise das curvas do aço carbono pelos diagramas de Evans

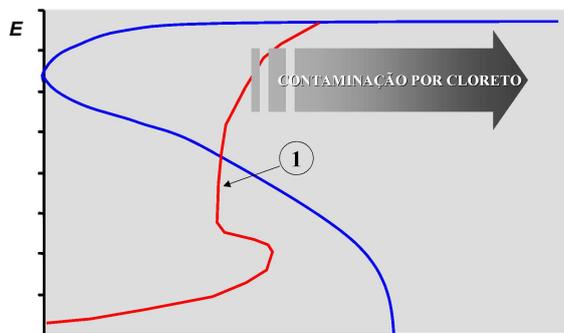
Nas Figuras a continuação descreve-se graficamente a análise pelos diagramas de Evans para as armaduras de aço carbono.



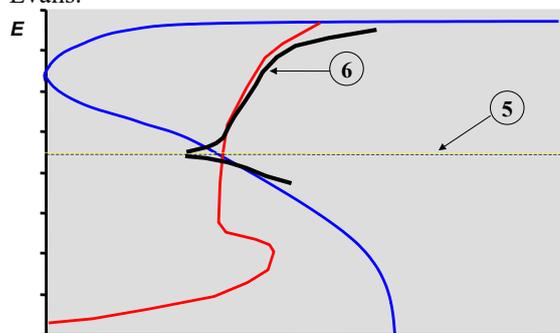
A - Caso do Fe passivo.



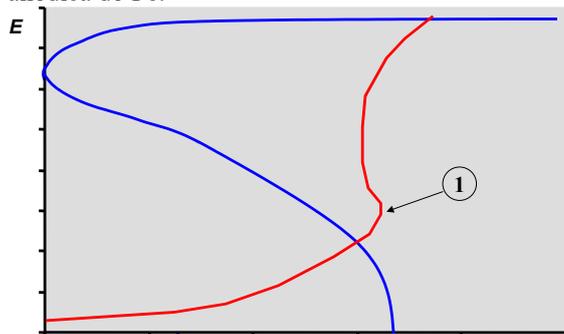
B - Superposição da curva de polarização do aço carbono passivo sobre o possível diagrama de Evans.



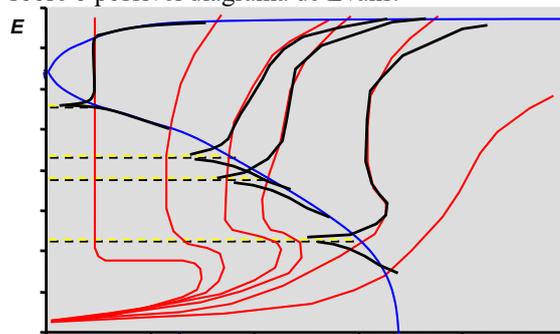
C - Influência da contaminação por cloreto na curva anódica do Fe.



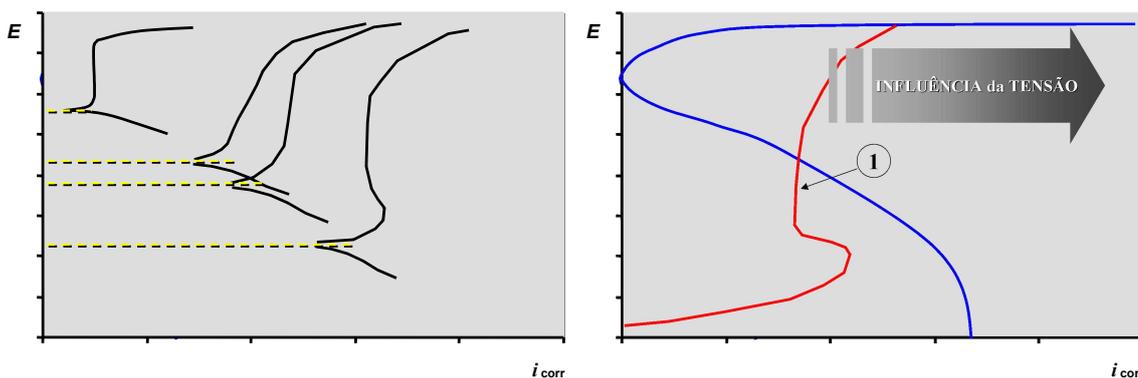
D - Curva de polarização do aço ativo superposto sobre o possível diagrama de Evans.



E - Aumento da densidade de corrente de corrosão do Fe ativo.



F - Curvas de polarização do aço carbono ativo, superpostas sobre os possíveis diagramas de Evans.



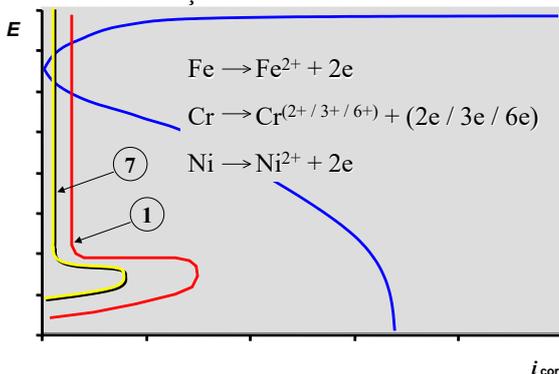
G - Curvas de polarização características do aço carbono obtidas na pesquisa.

H - Os diagramas de Evans influenciados pela tensão nas barras de aço carbono, similar à influência do íon cloreto.

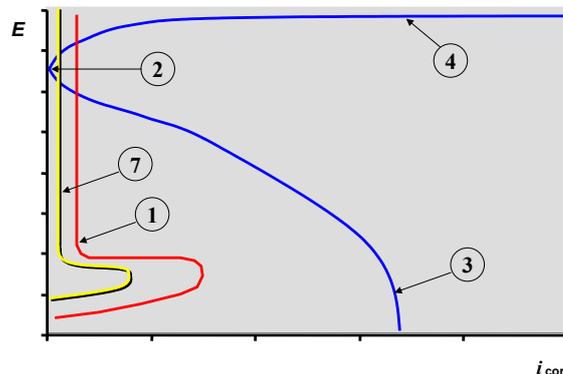
Figura C. 48. Análise dos diagramas de Evans para o aço carbono. Influência da ação dos cloretos e da tensão. 1 - Curva anódica do Fe. 2 - Potencial de equilíbrio do O. 3 - Curva catódica do O. 4 - Curva anódica do O. 5 - Potencial de corrosão da barra. 6 - Curva de polarização da barra de aço carbono.

C.4.3. Análise das curvas do aço inoxidável pelos diagramas de Evans

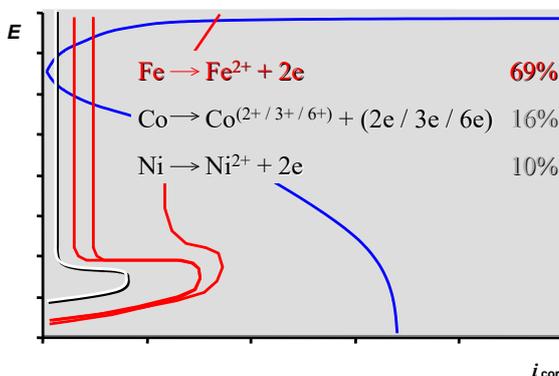
Nas Figuras a continuação descreve-se graficamente a análise pelos diagramas de Evans para as armaduras de aço inoxidável.



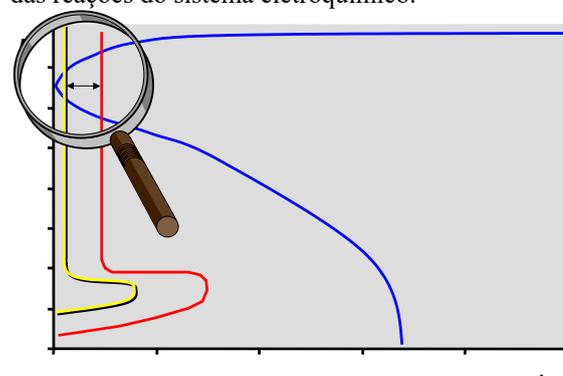
A - Reações de oxidação dos metais de liga principais do aço inoxidável.



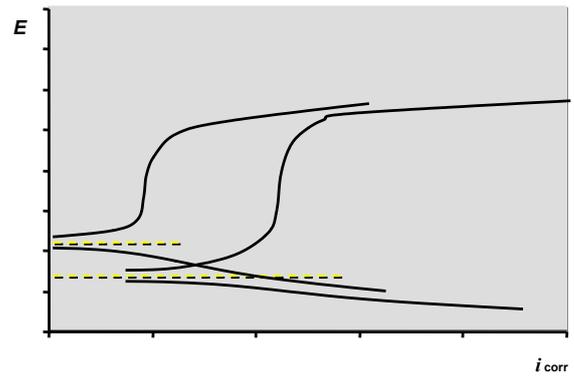
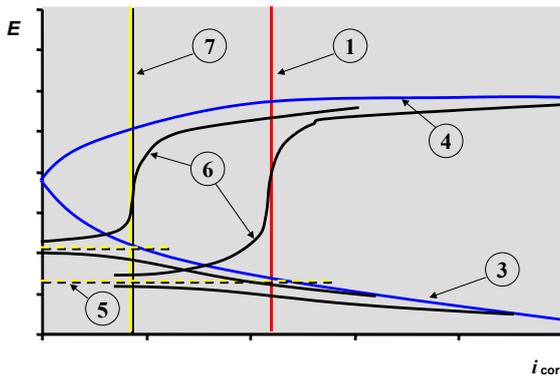
B - Estado de passivação do Cr e o Fe, as correntes menores são as da formação do óxido de Cr da película passiva do aço inoxidável que isola o Fe, do meio agressivo, não participando este elemento das reações do sistema eletroquímico.



C - Perda local da passividade do aço inoxidável. Quebrada a película de óxido de Cr a participação do Fe no sistema eletroquímico comanda as taxas elevadas de corrosão similares ao caso do Fe ativo.

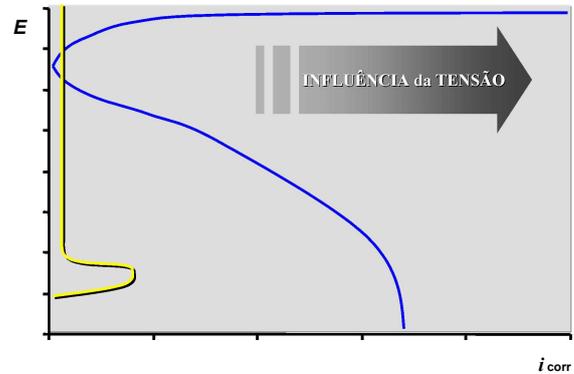
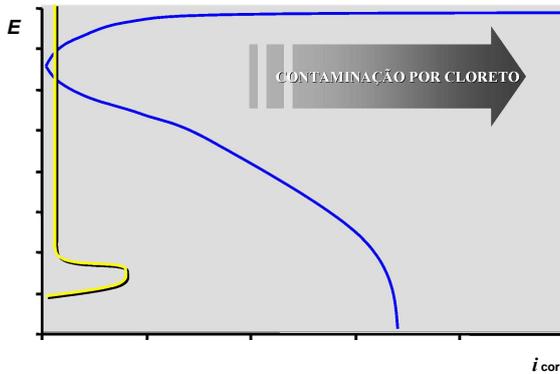


D - Intervalo de estados detectados nas curvas de polarização do aço inoxidável. Situações entre a passivação do Cr e a ruptura da película de óxido de Cr e início da participação do Fe.



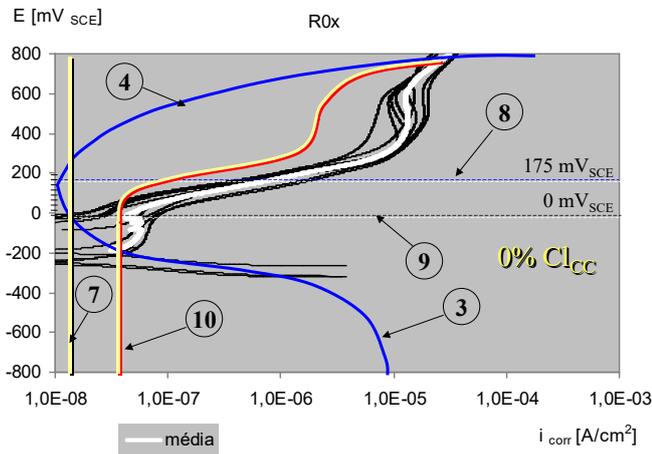
E - Curvas de polarização extremas obtidas na pesquisa com barras do aço inoxidável, superpostas sobre os diagramas de Evans. Desde a passividade do Cr ao início do Fe ativo.

F - Curvas de polarização extremas obtidas na pesquisa com barras do aço inoxidável.

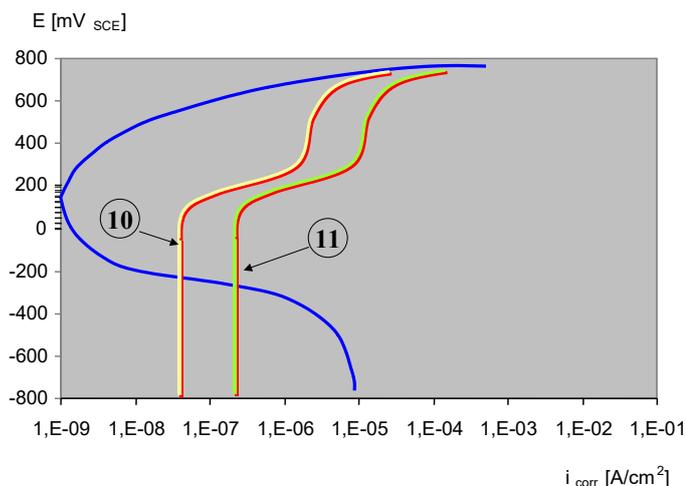


G - Influência da contaminação por cloreto no aumento da densidade de corrente de corrosão do aço inoxidável.

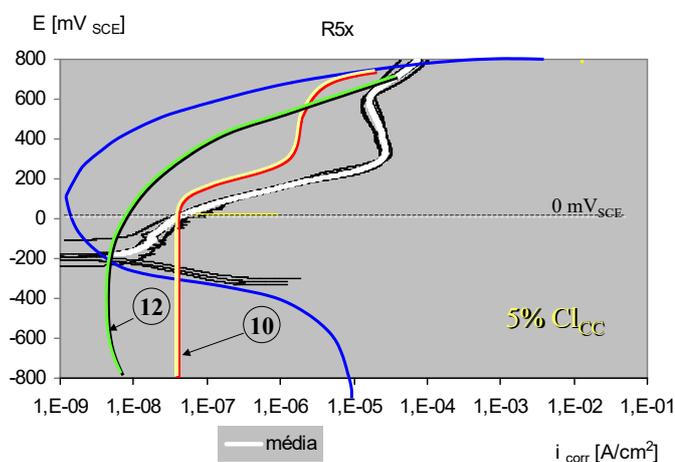
H - Influência do estado de tensão no aumento da densidade de corrente de corrosão do aço inoxidável.



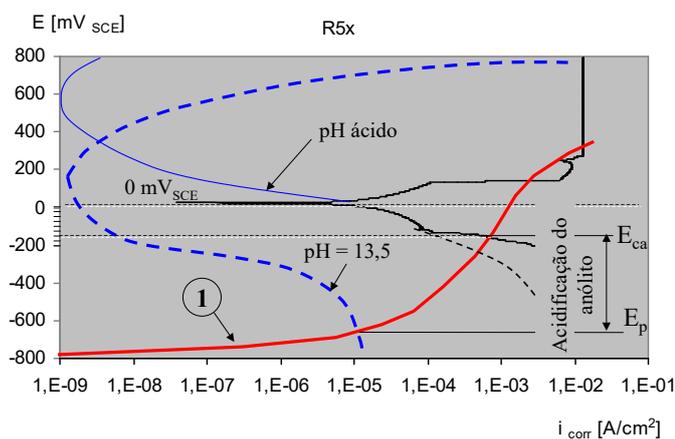
I - Análise das curvas das barras de aço inoxidável em concreto sem cloreto. Determina-se o provável potencial de dissolução da película de passivação igual a 0 mV_{SCE}.



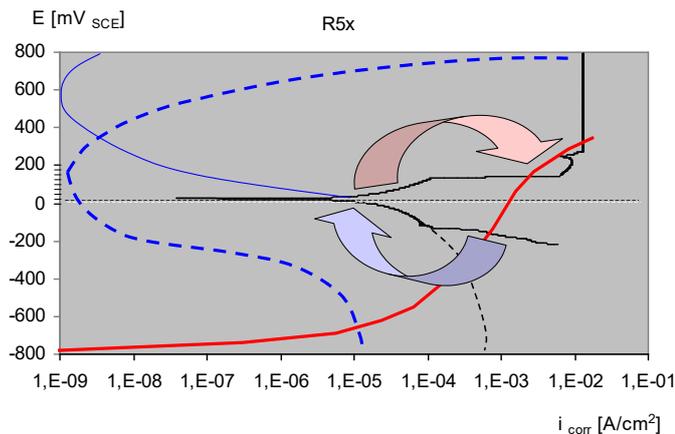
J – Determinação das correntes de passivação igual a $0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para as barras relaxadas e $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para as tracionadas.



As curvas de polarização das barras em 5% de cloreto tanto as relaxadas como as tracionadas apresentam a influência de alguma reação anódica não identificada que reduz as densidades de corrente de corrosão em potenciais menores. Em consequência, aparentemente está aumentando o pH na interface, o potencial de equilíbrio do oxigênio diminui e por tanto o cruzamento das ramas anódicas dos elementos metálicos participantes com a catódica do Oxigênio, se produz em potenciais menores e também com correntes menores. Porém, a aparência da curva é de perda de passivação.



J - Curva típica de barra em pite. O potencial E_{ca} igual a -180 mV_{SCE} é menor que o potencial de dissolução da película de passivação. No pite o anólito é muito ácido por isso nesse meio o potencial de equilíbrio do oxigênio é muito maior. A rama catódica do oxigênio corta a rama anódica do Fe no potencial E_{ca} . No momento da formação do pite o potencial de pite E_p encontra-se bem mais baixo que E_{ca} , no cruzamento da curva anódica do Fe com a catódica do oxigênio para $\text{pH}=13,5$. Possivelmente entre -400 e -700 mV_{SCE} . O aumento de E_p para $E_{ca} = -180 \text{ mV}_{SCE}$ se dá por causa da acidificação do anólito.



K – Além do aumento pela acidificação do anólito, a polarização potenciodinâmica eleva os potenciais a valores mais nobres, onde verifica-se certa tendência ao restabelecimento da camada protetora, até que no potencial de dissolução da película de passivação a corrosão retorna aos valores elevados do pite.

Para determinar o valor real da corrente de pite, teria que se dividir o valor de corrente geral (aproximadamente $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) pela relação {área do olho do pite / superfície exposta da barra}, resultando num valor praticamente infinito no início da formação do pite, $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ para olho de pite de $0,1 \text{ mm}$ e $0,6 \text{ mA}/\text{cm}^2$ para pites grandes com olho do pite de $2,9 \text{ mm}$.

Figura C. 49. Análise dos diagramas de Evans para o aço carbono. Influência da ação dos cloretos e da tensão. 1 – Curva anódica do Fe. 2 – Potencial de equilíbrio do O. 3 – Curva catódica do O. 4 – Curva anódica do O. 5 – Potenciais de corrosão das barras. 6 – Curvas de polarização das barras de aço inoxidável. 7 – Curva anódica do Cr. 8 – Potencial de equilíbrio do oxigênio segundo Diagrama de Pourbaix para sistema Cr-água em $\text{pH}=13,5$. 9 – Aparente potencial de dissolução da película protetora de óxido de Cr. 10 – Curva típica de metais transpassiváveis que apresentam película protetora instáveis (PANOSSIAN, 1993). Estado de passivação das barras relaxadas. 11 – Igual ao 10 das barras tracionadas. 12 – Curva anódica de um outro elemento metálico da liga. Reação anódica não identificada, típica da perda de passivação com teores acima de 5% de cloreto.

Anexo D. Ensaios de arrancamento

D 1. Determinação do grau de corrosão das barras para os ensaios de resistência de aderência

Legenda das tabelas

C.I. = tempo de corrente impressa de $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$ [dias]

cp = corpo-de-prova

\varnothing = diâmetro da barra [mm]

L = comprimento da barra [mm]

l = comprimento exposto [mm]

M_i = massa inicial da barra [g]

m = massa linear [g/mm]

Me_i = massa inicial estimada para a região exposta [g]

M_f = massa final da barra [g]

Δm_r = perda de massa real [g]

Δm_t = perda de massa teórica [g]

α' = grau de corrosão de cada barra [%]

α_t = grau de corrosão teórico [%]

α = média do grau de corrosão de igual C.I. [%]

$Sd(\alpha)$ = desvio padrão do grau de corrosão de igual C.I. [%]

Tabela D. 1. Barras dos ensaios de arrancamento. Características geométricas. Massa e perda de massa.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	Δm_r	Δm_t	α'	α_t	α	$Sd(\alpha)$
Sem corrosão	A0n4	9,84	362	53	218,35	0,603	31,96	218,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A0n5	9,82	353	48	212,42	0,601	28,85	212,42	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A0n6	9,79	351	49	211,35	0,602	29,50	211,35	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04n4	9,71	364	48	217,52	0,598	28,70	217,52	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04n5	9,8	356	50	213,57	0,600	30,00	213,57	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04n6	9,82	353	52	212,79	0,603	31,36	212,79	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A1n1	9,78	352	53	210,36	0,597	31,64	210,36	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A1n2	9,82	353	51	212,54	0,602	30,70	212,54	0,00	0,00	0,00	0,00		

Continuação Tabela D. 1.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	$\frac{\Delta m_r}{(x100)}$	Δm_i	α'	α_i	α	$Sd(\alpha)$
3d	A0n1	9,79	351	49	210,88	0,600	29,40	208,73	2,15	0,07	0,07	0,24	0,09	0,03
	A0n2	9,71	366	51	218,72	0,597	30,45	215,83	2,89	0,07	0,10	0,23		
	A0n3	9,8	364	50	218,41	0,600	30,00	215,98	2,43	0,07	0,08	0,24		
	A04n1	9,82	353	48	211,92	0,601	28,85	209,73	2,19	0,07	0,08	0,25		
	A04n3	9,78	362	53	216,67	0,598	31,69	211,92	4,75	0,07	0,15	0,22		
	A1n4	9,82	365	51	219,61	0,602	30,70	216,82	2,79	0,07	0,09	0,23		
	A1n5	9,79	354	49	212,57	0,600	29,40	208,63	3,94	0,07	0,13	0,24		
	A1n6	9,71	361	51	213,29	0,591	30,14	211,09	2,20	0,07	0,07	0,23		
	A5n4	9,71	357	50	212,17	0,595	29,75	209,37	2,80	0,07	0,09	0,24		
A5n5	9,8	356	48	213,58	0,600	28,80	211,39	2,19	0,07	0,08	0,25			
6dias	A0n7	9,82	350	53	211,03	0,603	31,96	201,95	9,08	0,14	0,28	0,44	0,26	0,02
	A0n8	9,78	358	48	214,61	0,600	28,80	207,44	7,17	0,14	0,25	0,49		
	A0n9	9,82	358	50	215,76	0,603	30,15	207,23	8,53	0,14	0,28	0,47		
	A04n7	9,79	352	52	211,08	0,600	31,20	204,31	6,77	0,14	0,22	0,45		
	A04n8	9,71	358	49	213,01	0,595	29,16	206,19	6,82	0,14	0,23	0,48		
	A04n9	9,8	352	51	211,51	0,601	30,65	202,90	8,61	0,14	0,28	0,46		
	A1n7	9,82	357	50	215,13	0,603	30,15	206,90	8,23	0,14	0,27	0,47		
	A1n8	9,7	359	52	212,80	0,593	30,84	204,44	8,36	0,14	0,27	0,46		
	A1n9	9,71	352	49	210,24	0,597	29,25	202,49	7,75	0,14	0,27	0,48		
	A5n7	9,8	359	51	215,59	0,600	30,60	208,46	7,13	0,14	0,23	0,46		
	A5n8	9,82	360	50	216,45	0,601	30,05	207,80	8,65	0,14	0,29	0,47		
A5n9	9,7	342	48	202,99	0,593	28,46	195,70	7,29	0,14	0,26	0,50			
20dias	A04n2	9,87	354	53	212,26	0,600	31,80	177,09	35,17	0,47	1,11	1,48	1,14	0,09
	A1n3	9,71	354	51	211,56	0,597	30,45	178,89	32,67	0,47	1,07	1,55		
	A5n1	9,8	355	49	213,22	0,600	29,40	177,85	35,37	0,47	1,20	1,60		
	A5n2	9,79	353	51	211,61	0,599	30,55	180,72	30,89	0,47	1,01	1,54		
	A5n3	9,71	366	50	217,20	0,594	29,70	181,95	35,25	0,47	1,19	1,59		
	A5n6	9,8	350	48	210,73	0,602	28,90	174,67	36,06	0,47	1,25	1,63		

Continuação Tabela D. 1.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	$\frac{\Delta m_r}{(x100)}$	Δm_i	α'	α_i	α	$Sd(\alpha)$
0corr	A0x4	10,29	358	52	239,95	0,670	34,84	239,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A0x5	10,28	356	49	238,45	0,670	32,83	238,45	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A0x6	10,29	359	51	240,84	0,670	34,17	240,84	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04x4	10,29	361	50	241,85	0,670	33,50	241,85	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04x5	10,29	356	52	238,40	0,670	34,84	238,40	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A04x6	10,28	361	49	242,02	0,670	32,83	242,02	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A1x1	10,29	357	51	239,19	0,670	34,17	239,19	0,00	0,00	0,00	0,00		
	A5x1	10,29	357	48	239,13	0,670	32,16	239,13	0,00	0,00	0,00	0,00		
A0x7	10,28857	358	49,07143	239,87	0,670	32,88	239,87	0,00	0,00	0,00	0,00			
3dias	A0x1	10,28	357	51	239,32	0,670	34,17	237,41	1,91	0,07	0,06	0,21	0,06	0,01
	A0x2	10,28	356	49	238,63	0,670	32,83	235,94	2,69	0,07	0,08	0,22		
	A0x3	10,28	357	51	239,47	0,670	34,17	237,73	1,74	0,07	0,05	0,21		
	A04x2	10,29	361	50	242,04	0,670	33,50	240,40	1,64	0,07	0,05	0,21		
	A04x3	10,29	355	52	238,07	0,670	34,84	235,53	2,54	0,07	0,07	0,20		
	A1x4	10,28	357	49	239,36	0,670	32,83	237,62	1,74	0,07	0,05	0,22		
	A1x5	10,29	356	51	238,83	0,670	34,17	237,36	1,47	0,07	0,04	0,21		
	A1x6	10,29	356	50	238,42	0,670	33,50	235,71	2,71	0,07	0,08	0,21		
	A5x4	10,28	360	52	241,38	0,670	34,84	238,73	2,65	0,07	0,08	0,20		
A5x5	10,28	357	49	239,35	0,670	32,83	237,45	1,90	0,07	0,06	0,22			

Continuação Tabela D. 1.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	$\frac{\Delta m_r}{(x100)}$	Δm_i	α'	α_i	α	$Sd(\alpha)$
6dias	A0x7	10,28	356	51	238,73	0,670	34,17	231,45	7,28	0,14	0,21	0,41	0,22	0,02
	A0x8	10,29	357	50	239,13	0,670	33,50	231,29	7,84	0,14	0,23	0,42		
	A0x9	10,28	358	51	240,06	0,670	34,17	233,43	6,63	0,14	0,19	0,41		
	A04x7	10,28	358	49	240,18	0,670	32,83	232,99	7,19	0,14	0,22	0,43		
	A04x8	10,29	353	51	236,19	0,670	34,17	227,96	8,23	0,14	0,24	0,41		
	A04x9	10,28	356	50	238,82	0,670	33,50	230,88	7,94	0,14	0,24	0,42		
	A1x7	10,28	360	52	241,05	0,670	34,84	234,26	6,79	0,14	0,20	0,41		
	A1x8	10,28	355	52	237,60	0,670	34,84	229,66	7,94	0,14	0,23	0,41		
	A1x9	10,29	359	49	240,24	0,670	32,83	233,12	7,12	0,14	0,22	0,43		
	A5x7	10,29	356	51	238,37	0,670	34,17	231,64	6,73	0,14	0,20	0,41		
	A5x8	10,29	358	50	240,17	0,670	33,50	232,60	7,57	0,14	0,23	0,42		
A5x9	10,29	357	52	238,99	0,670	34,84	231,71	7,28	0,14	0,21	0,41			
20dias	A04x1	10,28	358	49	240,02	0,670	32,83	215,10	24,92	0,47	0,76	1,44	0,78	0,06
	A1x2	10,28	357	51	239,38	0,670	34,17	215,02	24,36	0,47	0,71	1,38		
	A1x3	10,28	355	50	237,66	0,670	33,50	210,42	27,24	0,47	0,81	1,41		
	A5x2	10,28	356	52	238,68	0,670	34,84	212,27	26,41	0,47	0,76	1,35		
	A5x6	10,29	351	52	235,4	0,670	34,84	204,81	30,59	0,47	0,88	1,35		

D 2. Resultados e tratamento dos resultados dos ensaios de arrancamento em barras corroídas.

Legenda das tabelas

f_{c28} = Resistência média à compressão do concreto a 28 dias [MPa]

P_r = Carga de ruptura [T]

τ_{br}' = Resistência de aderência à ruptura de cada ensaio [MPa]

τ_{br} = Resistência de aderência à ruptura média para barras de igual C.I. [MPa]

τ_{b10} = Resistência de aderência no deslizamento a 10 micrômetros [MPa]

τ_{b100} = Resistência de aderência no deslizamento a 100 micrômetros [MPa]

τ_{b1000} = Resistência de aderência no deslizamento a 1000 micrômetros [MPa]

τ_{bm}' = Resistência de aderência média para cada ensaio [MPa]

τ_{bm} = Resistência de aderência média para barras de igual C.I. [MPa]

Δ_r' = Deslizamento relativo para cada ensaio [%]

Δ_r = Deslizamento relativo médio de barras de igual C.I. [%]

$Sd(\tau_{br})$ = Desvio padrão da resistência de aderência à ruptura [MPa]

$Sd(\tau_{bm})$ = Desvio padrão da resistência de aderência média [MPa]

$Sd(\Delta_r)$ = Desvio padrão do deslizamento relativo médio [%]

$\Delta\tau_{br}'$ = τ_{br}' de cada ensaio respeito à média inicial [%]

$\Delta\tau_{bm}'$ = τ_{bm}' de cada ensaio respeito à média inicial [%]

Tabela D. 2. Resultados dos ensaios de arrancamento.

C.I.	cp	α	f_{c28}	P_r	τ_{br}'	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}'	Δ_r'
0 corr.	A0n4	0,00	38	5,69	29,55	0,97	3,12	5,69	16,93	0,88
	A0n5	0,00	38	3,98	20,75	1,39	2,31	3,98	13,35	1,01
	A0n6	0,00	38	4,10	21,51	1,49	2,75	4,10	14,58	0,94
	A04n4	0,00	34,2	3,07	18,19	1,09	2,15	2,96	12,24	1,23
	A04n5	0,00	34,2	3,20	18,61	0,78	1,94	3,18	11,44	1,12
	A04n6	0,00	34,2	3,14	18,19	1,13	2,07	3,14	12,24	0,73
	A1n1	0,00	35,5	4,00	22,51	0,75	2,85	4,00	14,25	1,00
	A1n2	0,00	35,5	2,80	15,63	0,96	1,91	2,80	10,55	1,05

Continuação Tabela D. 2.

C.I.	cp	α	f_{c28}	P_r	τ_{br}'	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}'	Δ_r'
3d	A0n1	0,073	38	3,26	17,10	0,59	1,54	3,04	9,042	1,93
	A0n2	0,095	38	4,76	25,38	0,65	1,44	4,36	11,46	2,21
	A0n3	0,081	38	4,96	25,97	0,43	1,51	4,42	11,10	2,02
	A04n1	0,076	34,2	3,58	20,74	1,01	1,87	3,16	11,66	2,23
	A04n3	0,15	34,2	4,28	25,00	0,49	2,03	3,58	11,87	2,33
	A1n4	0,091	35,5	4,76	26,57	0,85	2,13	4,28	13,50	2,22
	A1n5	0,134	35,5	5,04	28,30	0,75	2,16	4,64	14,13	1,72
	A1n6	0,073	35,5	4,50	25,69	1,00	1,79	4,12	13,15	2,31
	A5n4	0,094	33,3	3,64	22,15	0,50	1,73	3,31	11,24	1,96
	A5n5	0,076	33,3	3,23	19,30	0,65	1,45	3,13	10,41	1,11
6dias	A0n7	0,284	38	4,18	21,79	0,45	1,59	3,89	10,30	2,65
	A0n8	0,249	38	4,38	23,02	0,46	1,13	3,84	9,51	2,85
	A0n9	0,283	38	4,06	21,17	0,55	1,31	3,76	9,76	2,30
	A04n7	0,217	34,2	3,90	22,73	0,75	2,13	3,54	12,47	2,39
	A04n8	0,234	34,2	2,72	16,12	0,56	1,49	2,44	8,86	2,12
	A04n9	0,281	34,2	2,15	12,50	0,51	1,57	2,11	8,12	2,06
	A1n7	0,273	35,5	4,80	26,79	1,00	2,34	4,61	14,79	2,31
	A1n8	0,271	35,5	2,87	16,41	1,00	2,00	2,57	10,62	2,41
	A1n9	0,265	35,5	4,91	28,03	0,95	2,28	4,88	15,43	2,12
	A5n7	0,233	33,3	3,74	22,34	0,47	1,52	3,70	11,33	2,14
A5n8	0,288	33,3	3,86	22,97	0,56	1,86	3,86	12,45	1,11	
A5n9	0,256	33,3	4,12	25,12	0,63	1,32	3,89	11,87	2,59	
20dias	A04n2	1,106	34,2	3,29	18,87	0,75	1,56	3,10	10,34	2,55
	A1n3	1,073	35,5	2,86	16,32	0,45	1,43	2,56	8,44	2,89
	A5n1	1,203	33,3	4,09	24,43	0,49	2,01	3,75	12,44	2,15
	A5n2	1,011	33,3	2,88	17,24	0,53	1,85	2,64	10,01	2,30
	A5n3	1,187	33,3	3,36	20,45	0,61	1,52	2,91	10,22	2,47
	A5n6	1,248	33,3	2,90	17,32	0,47	1,23	2,75	8,86	2,65

Continuação Tabela D. 2.

C.I.	cp	α	f_{c28}	P_r	τ_{br}'	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}'	Δ_r'
0corr	A0x4	0	38	2,86	13,58	0,67	1,17	2,78	7,31	1,58
	A0x5	0	38	3,08	14,65	0,53	1,21	2,80	7,20	1,55
	A0x6	0	38	4,05	19,23	0,61	1,67	3,84	9,68	1,78
	A04x4	0	34,2	2,48	13,08	0,45	1,03	2,30	6,64	1,63
	A04x5	0	34,2	3,04	16,04	0,23	1,32	2,82	7,68	1,69
	A04x6	0	34,2	4,24	22,41	0,57	1,29	3,50	9,44	2,43
	A1x1	0	35,5	2,55	12,96	0,25	1,12	2,30	6,21	2,00
	A5x1	0	33,3	4,12	22,32	0,29	1,94	4,00	11,25	1,56
	A5x3	0	33,3	4,19	22,75	0,25	1,58	4,00	10,55	1,50
3dias	A0x1	0,056	38	3,12	14,84	0,58	0,97	2,31	6,12	3,14
	A0x2	0,082	38	3,18	15,13	0,25	1,15	2,15	5,63	3,15
	A0x3	0,051	38	3,14	14,94	0,63	0,93	2,17	5,91	2,95
	A04x2	0,049	34,2	2,99	15,77	0,29	0,75	2,12	5,55	4,02
	A04x3	0,073	34,2	3,96	20,89	0,77	1,33	2,88	8,76	3,05
	A1x4	0,053	35,5	4,12	20,98	0,53	2,31	3,04	9,98	3,46
	A1x5	0,043	35,5	3,48	17,69	0,41	0,93	2,44	6,40	3,11
	A1x6	0,081	35,5	4,24	21,55	0,65	1,75	3,16	9,42	3,22
	A5x4	0,076	33,3	3,70	20,09	0,35	1,52	2,61	8,10	3,31
A5x5	0,058	33,3	3,32	18,02	0,65	1,93	2,59	9,35	3,13	

Continuação Tabela D. 2.

C.I.	cp	α	f_{c28}	P_r	τ_{br}'	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}'	Δ_r'
6dias	A0x7	0,213	38	3,50	16,65	0,45	0,95	2,42	6,05	3,77
	A0x8	0,234	38	2,62	12,44	0,43	0,71	1,61	4,35	3,74
	A0x9	0,194	38	3,60	17,13	0,57	1,09	2,44	6,50	3,85
	A04x7	0,219	34,2	2,74	14,48	0,29	0,85	1,59	4,81	3,74
	A04x8	0,241	34,2	2,31	12,19	0,35	1,06	1,51	5,13	3,85
	A04x9	0,237	34,2	2,76	14,59	0,45	0,99	1,99	6,04	3,95
	A1x7	0,195	35,5	3,96	20,17	0,31	0,78	2,56	6,19	3,53
	A1x8	0,228	35,5	3,20	16,30	0,31	1,10	2,22	6,16	3,36
	A1x9	0,217	35,5	3,24	16,47	0,47	0,97	2,10	5,99	3,48
	A5x7	0,197	33,3	3,86	20,92	0,29	0,56	2,95	6,86	3,49
	A5x8	0,226	33,3	3,62	19,61	0,51	0,73	2,54	6,82	3,72
	A5x9	0,209	33,3	3,16	17,12	0,33	0,91	2,25	6,30	3,86
20dias	A04x1	0,759	34,2	2,65	14,01	0,45	0,95	1,86	5,74	3,85
	A1x2	0,713	35,5	3,20	16,30	0,51	0,75	2,55	6,46	3,95
	A1x3	0,813	35,5	3,24	16,50	0,61	0,78	2,77	7,06	3,35
	A5x2	0,758	33,3	2,85	15,47	0,31	0,83	1,75	5,23	3,55
	A5x6	0,878	33,3	2,62	14,19	0,29	1,01	1,41	4,89	3,85

Tabela D. 3. Tratamento dos resultados dos ensaios de arrancamento.

C.I.	cp	α	τ_{br}'	τ_{bm}'	Δ_r'	τ_{br}	$Sd(\tau_{br})$	τ_{bm}	$Sd(\tau_{bm})$	Δ_r	$Sd(\Delta_r)$	$\Delta\tau_{br}'$	$\Delta\tau_{bm}'$
0 corr.	A0n4	0,00	29,55	16,93	0,88	20,62	4,22	13,20	2,03	1,00	0,15	143,32	128,27
	A0n5	0,00	20,76	13,35	1,01							100,66	101,14
	A0n6	0,00	21,51	14,59	0,94							104,33	110,51
	A04n4	0,00	18,19	12,25	1,24							88,24	92,79
	A04n5	0,00	18,62	11,44	1,12							90,29	86,68
	A04n6	0,00	18,19	12,25	0,73							88,24	92,77
	A1n1	0,00	22,51	14,26	1,00							109,18	108,01
	A1n2	0,00	15,63	10,55	1,05							75,80	79,93
3d	A0n1	0,07	17,11	9,04	1,93	23,62	3,61	11,76	1,51	2,00	0,37	82,95	68,50
	A0n2	0,10	25,39	11,47	2,21							123,13	86,88
	A0n3	0,08	25,97	11,10	2,02							125,96	84,10
	A04n1	0,08	20,74	11,67	2,23							100,60	88,38
	A04n3	0,15	25,00	11,88	2,33							121,26	89,99
	A1n4	0,09	26,57	13,51	2,22							128,86	102,34
	A1n5	0,13	28,31	14,13	1,72							137,28	107,08
	A1n6	0,07	25,69	13,15	2,31							124,60	99,63
	A5n4	0,09	22,16	11,24	1,96							107,45	85,15
	A5n5	0,08	19,30	10,42	1,11							93,60	78,92

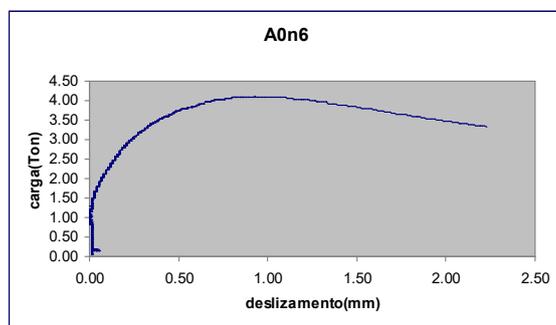
Continuação Tabela D. 3.

C.I.	cp	α	τ_{br}'	τ_{bm}'	Δ_r'	τ_{br}	$Sd(\tau_{br})$	τ_{bm}	$Sd(\tau_{bm})$	Δ_r	$Sd(\Delta_r)$	$\Delta\tau_{br}'$	$\Delta\tau_{bm}'$
6dias	A0n7	0,28	21,80	10,31	2,65	21,59	4,54	11,30	2,24	2,25	0,43	105,72	78,09
	A0n8	0,25	23,03	9,52	2,85							111,68	72,09
	A0n9	0,28	21,17	9,77	2,30							102,68	74,01
	A04n7	0,22	22,74	12,48	2,39							110,27	94,52
	A04n8	0,23	16,12	8,87	2,12							78,18	67,20
	A04n9	0,28	12,51	8,13	2,06							60,66	61,56
	A1n7	0,27	26,79	14,79	2,31							129,95	112,07
	A1n8	0,27	16,42	10,62	2,41							79,63	80,47
	A1n9	0,27	28,03	15,43	2,12							135,95	116,93
	A5n7	0,23	22,35	11,33	2,14							108,38	85,86
	A5n8	0,29	22,97	12,46	1,11							111,40	94,38
A5n9	0,26	25,13	11,87	2,59	121,87	89,95							
20dias	A04n2	1,11	18,87	10,34	2,55	19,11	2,99	10,06	1,40	2,50	0,26	91,52	78,36
	A1n3	1,07	16,33	8,45	2,89							79,19	64,01
	A5n1	1,20	24,44	12,45	2,15							118,52	94,31
	A5n2	1,01	17,24	10,02	2,30							83,63	75,90
	A5n3	1,19	20,45	10,23	2,47							99,18	77,47
	A5n6	1,25	17,33	8,86	2,65							84,04	67,15
0corr	A0x4	0,00	13,58	7,31	1,58	17,45	4,24	8,45	1,82	1,75	0,30	77,84	86,56
	A0x5	0,00	14,66	7,20	1,55							83,99	85,23
	A0x6	0,00	19,24	9,69	1,78							110,23	114,66
	A04x4	0,00	13,09	6,65	1,63							75,00	78,69
	A04x5	0,00	16,04	7,69	1,69							91,94	90,97
	A04x6	0,00	22,42	9,45	2,43							128,48	111,80
	A1x1	0,00	12,96	6,22	2,00							74,29	73,60
	A5x1	0,00	22,33	11,26	1,56							127,96	133,20
	A5x3	0,00	22,75	10,55	1,50							130,39	124,89

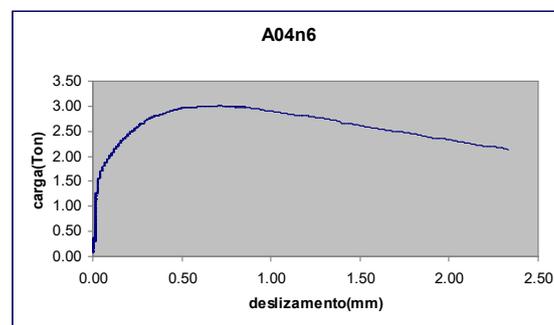
Continuação Tabela D. 3.

C.I.	cp	α	τ_{br}'	τ_{bm}'	Δ_r'	τ_{br}	$Sd(\tau_{br})$	τ_{bm}	$Sd(\tau_{bm})$	Δ_r	$Sd(\Delta_r)$	$\Delta\tau_{br}'$	$\Delta\tau_{bm}'$
3dias	A0x1	0,06	14,85	6,12	3,14	18,00	2,73	7,53	1,77	3,25	0,30	85,08	72,46
	A0x2	0,08	15,13	5,63	3,15							86,72	66,64
	A0x3	0,05	14,94	5,92	2,95							85,63	70,02
	A04x2	0,05	15,78	5,56	4,02							90,42	65,78
	A04x3	0,07	20,90	8,76	3,05							119,76	103,67
	A1x4	0,05	20,99	9,98	3,46							120,27	118,15
	A1x5	0,04	17,69	6,41	3,11							101,39	75,81
	A1x6	0,08	21,56	9,42	3,22							123,53	111,51
	A5x4	0,08	20,09	8,11	3,31							115,14	95,97
	A5x5	0,06	18,03	9,36	3,13							103,32	110,75
6dias	A0x7	0,21	16,66	6,06	3,77	16,51	2,80	5,94	0,78	3,70	0,19	95,45	71,71
	A0x8	0,23	12,44	4,35	3,74							71,31	51,52
	A0x9	0,19	17,13	6,50	3,85							98,17	76,97
	A04x7	0,22	14,49	4,81	3,74							83,02	56,94
	A04x8	0,24	12,19	5,14	3,85							69,86	60,79
	A04x9	0,24	14,59	6,05	3,95							83,63	71,54
	A1x7	0,20	20,17	6,20	3,53							115,60	73,34
	A1x8	0,23	16,30	6,16	3,36							93,41	72,94
	A1x9	0,22	16,47	6,00	3,48							94,40	70,99
	A5x7	0,20	20,92	6,87	3,49							119,89	81,24
	A5x8	0,23	19,62	6,83	3,72							112,43	80,82
A5x9	0,21	17,13	6,31	3,86	98,15	74,62							
20dias	A04x1	0,76	14,01	5,75	3,85	15,30	1,16	5,88	0,89	3,71	0,25	80,30	68,00
	A1x2	0,71	16,30	6,47	3,95							93,41	76,56
	A1x3	0,81	16,50	7,06	3,35							94,58	83,59
	A5x2	0,76	15,48	5,23	3,55							88,69	61,91
	A5x6	0,88	14,20	4,90	3,85							81,38	57,94

D.3. Gráficos de carga *versus* deslocamento dos ensaios de arrancamento.

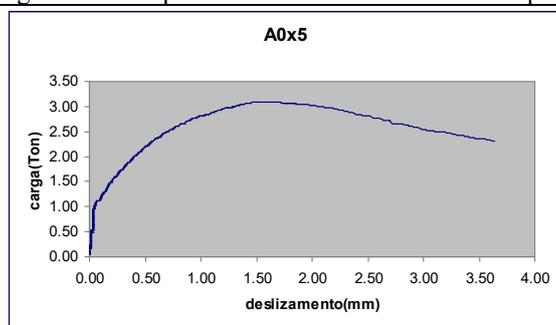


(A).

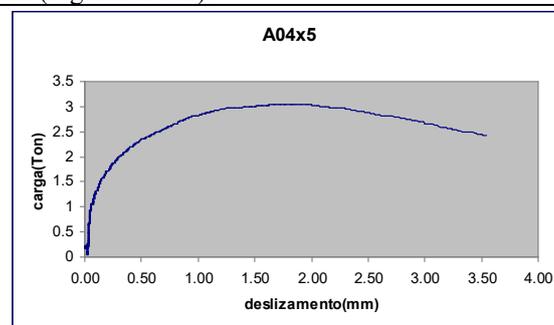


(B).

Figura D. 1. Ruptura em deslocamentos menores que 1 mm (Figuras A e B).



(A).



(B).

Figura D. 2. Ruptura em deslocamentos maiores que 1 mm (Figuras A e B).

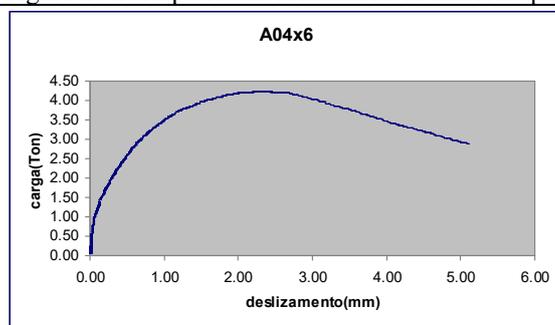


Figura D. 3. Ruptura em deslocamentos maiores que 2 mm.

Anexo E. Ensaio de tração

E 2. Determinação do grau de corrosão das barras para os ensaios de resistência à tração.

Legenda das tabelas

C.I. = tempo de corrente impressa de $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$ [dias]

cp = corpo-de-prova

\varnothing = diâmetro da barra [mm]

L = comprimento da barra [mm]

l = comprimento exposto [mm]

M_i = massa inicial da barra [g]

m = massa linear [g/mm]

Me_i = massa inicial estimada para a região exposta [g]

M_f = massa final da barra [g]

Δm_r = perda de massa real [g]

Δm_t = perda de massa teórica [g]

α' = grau de corrosão de cada barra [%]

α_t = grau de corrosão teórico [%]

α = média do grau de corrosão de igual C.I. [%]

$Sd(\alpha)$ = desvio padrão do grau de corrosão de igual C.I. [%]

Tabela E. 1. Barras dos ensaios de tração. Características geométricas. Massa e perda de massa.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	Δm_r	Δm_t	α'	α_t	α	$Sd(\alpha)$
Sem corrosão	n-17	9,8	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--	0,0000	0,0000
	n-18	9,8	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	n-19	9,9	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	n-20	9,8	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	n-21	9,9	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	n-1	9,8	509	100	304,32	0,598	59,79	304,32	0,00	--	0,00	--		
	n-2	9,9	513	110	308,03	0,600	66,05	308,03	0,00	--	0,00	--		
	n-9	9,9	507	101	304,75	0,601	60,71	304,75	0,00	--	0,00	--		
n-15	9,9	511	105	304,50	0,596	62,57	304,50	0,00	--	0,00	--			

* - Média dos resultados das barras sem corrosão

Continuação Tabela E. 1.

C.I.	cp	\varnothing	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	Δm_r	Δm_t	α'	α_t	α	$Sd(\alpha)$
3dias	B0n-1/1	9,8	513	105	307,75	0,600	62,99	307,69	0,06	0,14	0,10	0,23	0,104596	0,017115
	B0n-1/2	9,8	500	96	299,98	0,600	57,60	299,92	0,06	0,14	0,10	0,25		
	B0n-2/1	9,8	516	99	309,38	0,600	59,36	309,31	0,07	0,14	0,11	0,24		
	B0n-2/2	9,8	501	103	300,50	0,600	61,78	300,44	0,06	0,14	0,10	0,23		
	B04n-1/1	9,8	522	98	312,21	0,598	58,61	312,16	0,05	0,14	0,09	0,24		
	B04n-1/2	9,8	518	102	310,48	0,599	61,14	310,41	0,07	0,14	0,11	0,23		
	B04n-4/1	9,8	509	100	305,80	0,601	60,08	305,74	0,06	0,14	0,10	0,24		
	B04n-4/2	9,8	524	102	314,18	0,600	61,16	314,11	0,07	0,14	0,11	0,23		
	B1n-1/1	9,7	511	97	306,05	0,599	58,10	305,96	0,09	0,14	0,15	0,25		
	B1n-1/2	9,8	517	99	310,13	0,600	59,39	310,07	0,06	0,14	0,10	0,24		
	B1n-3/1	9,7	515	102	308,26	0,599	61,05	308,21	0,05	0,14	0,09	0,23		
	B1n-3/2	9,8	520	98	311,78	0,600	58,76	311,72	0,06	0,14	0,10	0,24		
6dias	B0n-3/1	9,8	502	95	310,65	0,619	58,79	310,49	0,16	0,29	0,27	0,49	0,2836	0,0192
	B0n-3/2	9,8	508	103	308,33	0,607	62,52	308,16	0,17	0,29	0,27	0,46		
	B0n-5/1	9,7	517	101	309,19	0,598	60,40	309,02	0,17	0,29	0,29	0,47		
	B0n-5/2	9,9	527	98	315,94	0,600	58,75	315,77	0,17	0,29	0,29	0,49		
	B04n-5/1	9,8	512	100	306,85	0,599	59,93	306,68	0,17	0,29	0,28	0,48		
	B04n-5/2	9,8	510	98	304,82	0,598	58,57	304,66	0,16	0,29	0,27	0,49		
	B04n-6/1	9,9	510	102	305,93	0,600	61,19	305,79	0,14	0,29	0,24	0,47		
	B04n-6/2	9,9	499	101	299,30	0,600	60,58	299,13	0,17	0,29	0,28	0,47		
	B1n-4/1	9,9	528	102	317,06	0,600	61,25	316,89	0,17	0,29	0,28	0,47		
	B1n-4/2	9,9	521	97	312,61	0,600	58,20	312,44	0,17	0,29	0,29	0,49		
	B1n-5/1	9,9	538	102	323,02	0,600	61,24	322,84	0,18	0,29	0,29	0,47		
	B1n-5/2	9,9	520	98	311,83	0,600	58,77	311,67	0,16	0,29	0,28	0,49		
	B5n-1/1	9,7	516	95	309,00	0,599	56,89	308,82	0,18	0,29	0,31	0,50		
	B5n-1/2	9,8	507	103	303,92	0,599	61,74	303,74	0,18	0,29	0,30	0,46		
	B5n-4/1	9,9	506	101	303,43	0,600	60,57	303,24	0,19	0,29	0,31	0,47		
	B5n-4/2	9,8	520	96	310,94	0,598	57,40	310,76	0,18	0,29	0,31	0,50		

Continuação Tabela E. 1.

C.I.	cp	\emptyset	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	Δm_r	Δm_i	α'	α_i	α	$Sd(\alpha)$
12dias	B0n-6/1	9,9	518	99	311,27	0,601	59,49	310,97	0,30	0,57	0,51	0,96	0,5415	0,0630
	B0n-6/2	9,9	541	103	324,58	0,600	61,80	324,28	0,30	0,57	0,49	0,92		
	B0n-8/1	9,9	529	98	317,37	0,600	58,79	317,13	0,24	0,57	0,41	0,97		
	B0n-8/2	9,9	513	102	307,58	0,600	61,16	307,32	0,26	0,57	0,43	0,93		
	B04n-3/1	9,9	501	100	300,65	0,600	60,01	300,33	0,32	0,57	0,53	0,95		
	B04n-3/2	9,9	524	102	314,33	0,600	61,19	314,01	0,32	0,57	0,52	0,93		
	B04n-8/1	9,9	521	97	312,73	0,600	58,22	312,41	0,32	0,57	0,54	0,98		
	B04n-8/2	9,9	526	98	315,78	0,600	58,83	315,47	0,31	0,57	0,53	0,97		
	B1n-2/1	9,9	512	102	307,72	0,601	61,30	307,36	0,36	0,57	0,59	0,93		
	B1n-2/2	9,8	532	100	318,93	0,599	59,95	318,59	0,34	0,57	0,56	0,95		
	B1n-6/1	9,9	521	102	313,10	0,601	61,30	312,76	0,34	0,57	0,55	0,93		
	B1n-6/2	9,9	519	99	311,51	0,600	59,42	311,18	0,33	0,57	0,56	0,96		
	B5n-5/1	9,9	533	102	319,75	0,600	61,19	319,39	0,36	0,57	0,59	0,93		
	B5n-5/2	9,9	535	98	321,36	0,601	58,87	321,00	0,36	0,57	0,61	0,97		
	B5n-7/1	9,9	519	95	311,38	0,600	57,00	311,02	0,36	0,57	0,63	1,00		
	B5n-7/2	9,9	521	98	312,74	0,600	58,83	312,38	0,36	0,57	0,62	0,97		
20dias	B0n-4/1	9,9	496	100	297,81	0,600	60,04	297,20	0,61	0,95	1,01	1,59	1,1871	0,0975
	B0n-4/2	9,9	516	98	309,46	0,600	58,77	308,69	0,77	0,95	1,32	1,62		
	B0n-10/1	9,9	521	102	312,57	0,600	61,19	311,84	0,73	0,95	1,20	1,56		
	B0n-10/2	9,9	529	101	317,68	0,601	60,65	317,04	0,64	0,95	1,06	1,57		
	B04n-2/1	9,9	512	102	307,50	0,601	61,26	306,82	0,68	0,95	1,11	1,56		
	B04n-2/2	9,9	527	97	316,21	0,600	58,20	315,46	0,75	0,95	1,28	1,64		
	B04n-9/1	9,8	525	102	314,99	0,600	61,20	314,22	0,77	0,95	1,26	1,56		
	B04n-9/2	9,9	519	98	311,41	0,600	58,80	310,68	0,73	0,95	1,25	1,62		
	B5n-2/1	9,8	504	95	301,82	0,599	56,89	301,05	0,77	0,95	1,36	1,67		
	B1n-7/1	9,8	492	103	294,92	0,599	61,74	294,19	0,73	0,95	1,19	1,54		
	B5n-3/1	9,9	511	101	306,14	0,599	60,51	305,41	0,73	0,95	1,21	1,57		
	B1n-8/1	9,8	522	98	313,16	0,600	58,79	312,51	0,65	0,95	1,11	1,62		
	B1n-8/2	9,8	522	100	312,69	0,599	59,90	311,96	0,73	0,95	1,22	1,59		
	B5n-6/2	9,9	526	98	316,04	0,601	58,88	315,33	0,71	0,95	1,20	1,62		
	B5n-8/1	9,8	525	102	314,81	0,600	61,16	314,16	0,65	0,95	1,07	1,56		
	B5n-8/2	9,9	517	101	309,83	0,599	60,53	309,14	0,69	0,95	1,15	1,57		

Continuação Tabela E. 1.

C.I.	cp	Ø	L	l	M _i	m	Me _i	M _f	Δm _r	Δm _i	α'	α _i	α	Sd(α)
Sem corrosão	x-22	10	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--	0,0000	0,0000
	x-23	10	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	x-24	10	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	x-25	10	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	x-26	10	--	--	--	--	--	--	--	--	0,00	--		
	x-1	10	504	101	338,10	0,671	67,75	338,10	0,00	--	0,00	--		
	x-2	10	506	105	339,53	0,671	70,46	339,53	0,00	--	0,00	--		
	x-3	10	504	100	337,80	0,670	67,02	337,80	0,00	--	0,00	--		
	x-17	10	511	103	342,69	0,671	69,07	342,69	0,00	--	0,00	--		
	x-20	10	509	101	341,32	0,671	67,73	341,32	0,00	--	0,00	--		
6dias	B0x-1/1	10	506	97	339,35	0,670	64,99	339,19	0,16	0,29	0,25	0,44	0,2361	0,0299
	B0x-1/2	10	506	99	338,88	0,670	66,33	338,72	0,16	0,29	0,24	0,43		
	B0x-2/1	10	512	103	343,09	0,670	69,01	342,92	0,17	0,29	0,25	0,41		
	B0x-2/2	10	502	98	336,30	0,670	65,66	336,15	0,15	0,29	0,23	0,44		
	B04x-1/1	10	511	102	342,70	0,670	68,34	342,54	0,16	0,29	0,23	0,42		
	B04x-1/2	10	502	100	336,55	0,670	67,00	336,37	0,18	0,29	0,26	0,43		
	B04x-3/1	10	512	102	345,10	0,674	68,75	344,93	0,17	0,29	0,24	0,42		
	B04x-3/2	10	508	97	340,43	0,670	64,99	340,26	0,17	0,29	0,26	0,44		
	B1x-3/1	10	512	98	344,16	0,672	65,87	344,00	0,16	0,29	0,24	0,43		
	B1x-3/2	10	506	100	338,82	0,670	67,00	338,66	0,16	0,29	0,24	0,43		
	B1x-5/1	10	504	98	337,43	0,670	65,66	337,31	0,12	0,29	0,18	0,44		
	B1x-5/2	10	501	102	335,86	0,670	68,34	335,68	0,18	0,29	0,26	0,42		
	B5x-2/1	10	510	101	341,43	0,670	67,67	341,27	0,16	0,29	0,24	0,42		
	B5x-2/2	10	500	102	335,06	0,670	68,34	334,89	0,17	0,29	0,25	0,42		
B5x-3/1	10	512	97	343,18	0,670	64,99	343,01	0,17	0,29	0,26	0,44			
B5x-3/2	10	500	103	334,46	0,669	68,90	334,36	0,10	0,29	0,15	0,41			

* - Média dos resultados das barras sem corrosão

Continuação Tabela E. 1.

C.I.	cp	\emptyset	L	l	M_i	m	Me_i	M_f	Δm_r	Δm_i	α'	α_i	α	$Sd(\alpha)$
12dias	B0x-3/1	10	512	101	342,72	0,670	67,67	342,48	0,24	0,57	0,35	0,84	0,3785	0,0760
	B0x-3/2	10	504	99	337,91	0,670	66,33	337,65	0,26	0,57	0,39	0,86		
	B0x-4/1	10	511	103	342,57	0,670	69,01	342,33	0,24	0,57	0,35	0,83		
	B0x-4/2	10	507	98	339,50	0,670	65,66	339,28	0,22	0,57	0,34	0,87		
	B04x-2/1	10	512	102	343,00	0,670	68,34	342,74	0,26	0,57	0,38	0,84		
	B04x-2/2	10	506	100	339,14	0,670	67,00	338,94	0,20	0,57	0,30	0,85		
	B04x-4/1	10	505	102	338,09	0,670	68,34	337,83	0,26	0,57	0,38	0,84		
	B04x-4/2	10	506	97	338,89	0,670	64,99	338,67	0,22	0,57	0,34	0,88		
	B1x-1/1	10	512	98	342,73	0,670	65,66	342,49	0,24	0,57	0,37	0,87		
	B1x-1/2	10	509	100	340,93	0,670	67,00	340,67	0,26	0,57	0,39	0,85		
	B1x-2/1	10	512	98	344,32	0,673	65,91	344,07	0,25	0,57	0,38	0,87		
	B1x-2/2	10	508	102	340,67	0,670	68,34	340,43	0,24	0,57	0,35	0,84		
	B5x-5/1	10	512	101	344,51	0,673	67,96	344,21	0,30	0,57	0,44	0,84		
	B5x-5/2	10	503	102	337,18	0,670	68,34	336,98	0,20	0,57	0,29	0,84		
	B5x-8/1	10	501	97	335,67	0,670	64,99	335,42	0,25	0,57	0,38	0,88		
	B5x-8/2	10	505	102	338,04	0,670	68,34	337,61	0,43	0,57	0,63	0,84		
20dias	B0x-5/1	10	508	98	340,68	0,670	65,66	340,16	0,52	0,95	0,80	1,45	0,7950	0,0691
	B0x-5/2	10	507	95	339,58	0,670	63,65	339,06	0,52	0,95	0,81	1,50		
	B0x-7/1	10	504	103	337,82	0,670	69,01	337,30	0,52	0,95	0,75	1,38		
	B0x-7/2	10	508	101	340,05	0,670	67,67	339,57	0,48	0,95	0,71	1,41		
	B04x-6/1	10	506	98	339,28	0,670	65,66	338,71	0,57	0,95	0,88	1,45		
	B04x-6/2	10	506	100	339,26	0,670	67,00	338,82	0,44	0,95	0,65	1,42		
	B04x-7/1	10	506	98	338,91	0,670	65,66	338,33	0,58	0,95	0,88	1,45		
	B04x-7/2	10	506	102	338,71	0,670	68,34	338,16	0,55	0,95	0,81	1,39		
	B1x-4/1	10	509	101	341,16	0,670	67,67	340,55	0,61	0,95	0,90	1,41		
	B1x-4/2	10	510	102	341,97	0,670	68,34	341,50	0,47	0,95	0,68	1,39		
	B1x-6/1	10	505	97	336,33	0,666	64,60	335,81	0,52	0,95	0,81	1,47		
	B1x-6/2	10	503	98	336,91	0,670	65,66	336,41	0,50	0,95	0,76	1,45		
	B5x-1/1	10	510	100	341,60	0,670	67,00	341,11	0,49	0,95	0,73	1,42		
	B5x-1/2	10	505	98	337,40	0,668	65,48	336,83	0,57	0,95	0,88	1,45		

Continuação Tabela E. 1.

C.I.	cp	Ø	L	l	M _i	m	Me _i	M _f	Δm _r	Δm _i	α'	α _i	α	Sd(α)
20dias	B5x-6/1	10	503	102	337,05	0,670	68,34	336,46	0,59	0,95	0,87	1,39	0,7950	0,0691
	B5x-6/2	10	500	101	334,16	0,668	67,50	333,60	0,56	0,95	0,83	1,41		
	B5x-4/1	10	512	96	343,72	0,671	64,45	343,17	0,55	0,95	0,85	1,48		
	B5x-4/2	10	500	99	334,30	0,669	66,19	333,79	0,51	0,95	0,77	1,44		
	B5x-9/1	10	500	103	334,71	0,670	69,01	334,18	0,53	0,95	0,77	1,38		
	B5x-9/2	10	505	98	337,13	0,668	65,42	336,62	0,51	0,95	0,77	1,46		

E 2. Resultados e tratamento dos resultados dos ensaios de tração.

Legenda das tabelas

Pr = carga de ruptura [Tf]

f_{st}' = Limite de resistência da barra [MPa]

P_y = carga no escoamento [Tf]

f_y' = Resistência de escoamento da barra [MPa]

f_{st} = Limite de resistência médio de barras com igual C.I. [MPa]

$Sd(f_{st})$ = Desvio padrão do limite de resistência de barras com igual C.I. [MPa]

f_{ym} = Resistência característica de escoamento média de barras com igual C.I. [MPa]

$Sd(f_y)$ = Desvio padrão da resistência característica de escoamento de igual C.I. [MPa]

Δf_{st} = Perda de f_{st} respeito à média inicial [%]

Δf_{ym} = perda de f_{ym} respeito à média inicial [%]

Tabela E. 2. Resultados dos ensaios de resistência à tração.

C.I.	cp	α	Pr	f_{st}'	P_y	f_y'	f_{st}	$Sd(f_{st})$	f_{ym}	$Sd(f_y)$	Δf_{st}	Δf_{ym}
Sem corrosão	n-17	0,00	5,66	747,00	4,87	643,00	749,14	52,26	658,80	14,50	0,00	0,00
	n-18	0,00	6,12	815,00	5,04	671,00						
	n-19	0,00	6,12	801,00	5,17	677,00						
	n-20	0,00	5,95	782,00	4,94	650,00						
	n-21	0,00	6,05	788,00	5,02	653,00						
	n-1	0,00	5,24	690,47	não	não						
	n-2	0,00	5,74	751,76	não	não						
	n-9	0,00	5,32	692,53	não	não						
	n-15	0,00	5,15	674,49	não	não						

Continuação Tabela E. 2.

C.I.	cp	α	Pr	f_{st}'	Py	f_y'	f_{st}	$Sd(f_{st})$	f_{ym}	$Sd(f_y)$	Δf_{st}	Δf_{ym}
3dias	B0n-1/1	0,10	5,80	765,35	4,74	625,42	748,89	23,18	612,41	18,63	0,03	7,04
	B0n-1/2	0,10	5,79	768,13	4,74	627,85						
	B0n-2/1	0,11	5,65	751,84	4,60	612,74						
	B0n-2/2	0,10	5,75	760,40	4,69	620,29						
	B04n-1/1	0,09	5,34	715,67	4,37	584,71						
	B04n-1/2	0,11	5,72	761,33	4,69	624,12						
	B04n-4/1	0,10	5,80	765,97	4,73	623,88						
	B04n-4/2	0,11	5,35	710,16	4,39	583,61						
	B1n-1/1	0,15	5,26	710,34	4,58	618,51						
	B1n-1/2	0,10	5,84	770,44	4,82	636,42						
	B1n-3/1	0,09	5,52	746,99	4,31	583,25						
	B1n-3/2	0,10	5,68	760,11	4,54	608,09						
6dias	B0n-3/1	0,27	4,90	650,22	4,44	588,38	663,89	50,29	573,96	31,40	11,38	12,88
	B0n-3/2	0,27	4,71	621,66	4,15	547,97						
	B0n-5/1	0,29	4,50	608,96	3,98	538,59						
	B0n-5/2	0,29	4,52	590,64	3,97	519,08						
	B04n-5/1	0,28	5,11	680,31	4,49	597,49						
	B04n-5/2	0,27	4,56	605,99	3,94	523,18						
	B04n-6/1	0,24	4,86	634,34	4,33	565,12						
	B04n-6/2	0,28	4,99	655,03	4,47	587,19						
	B1n-4/1	0,28	5,66	732,34	4,74	613,30						
	B1n-4/2	0,29	5,71	749,35	4,68	614,18						
	B1n-5/1	0,29	5,83	757,39	4,78	620,98						
	B1n-5/2	0,28	5,35	698,79	4,52	591,37						
	B5n-1/1	0,31	5,08	684,49	4,34	584,90						
	B5n-1/2	0,30	5,00	658,85	4,32	569,24						
	B5n-4/1	0,31	4,90	642,92	4,22	553,81						
	B5n-4/2	0,31	4,90	650,96	4,28	568,59						

Continuação Tabela E. 2.

C.I.	cp	α	Pr	f_{st}'	Py	f_y'	f_{st}	$Sd(f_{st})$	f_{ym}	$Sd(f_y)$	Δf_{st}	Δf_{ym}
12dias	B0n-6/1	0,51	5,84	757,16	4,20	544,53	627,67	50,59	537,36	23,62	16,21	18,43
	B0n-6/2	0,49	4,53	591,67	4,10	535,96						
	B0n-8/1	0,41	5,61	730,28	4,58	596,20						
	B0n-8/2	0,43	4,43	578,34	3,95	515,48						
	B04n-3/1	0,53	4,83	627,48	4,20	545,63						
	B04n-3/2	0,52	4,69	613,00	4,32	564,64						
	B04n-8/1	0,54	4,47	585,99	3,90	512,32						
	B04n-8/2	0,53	4,37	564,95	3,79	489,76						
	B1n-2/1	0,59	4,70	609,94	4,00	519,65						
	B1n-2/2	0,56	4,82	635,13	4,05	533,66						
	B1n-6/1	0,55	4,95	640,48	4,22	546,02						
	B1n-6/2	0,56	4,71	618,11	4,16	545,94						
	B5n-5/1	0,59	4,85	633,91	4,09	534,58						
	B5n-5/2	0,61	4,90	635,29	4,23	548,42						
	B5n-7/1	0,63	4,61	601,32	4,06	529,58						
B5n-7/2	0,62	4,78	619,73	4,13	535,46							
20dias	B0n-4/1	1,01	4,77	616,54	3,72	481,33	607,48	22,86	529,26	31,17	18,91	19,66
	B0n-4/2	1,32	4,67	610,38	4,17	545,03						
	B0n-10/1	1,20	4,48	581,07	3,79	491,99						
	B0n-10/2	1,06	4,68	606,11	4,20	544,53						
	B04n-2/1	1,11	5,01	648,24	4,44	574,49						
	B04n-2/2	1,28	4,86	632,00	4,29	558,45						
	B04n-9/1	1,26	4,44	585,46	3,89	512,69						
	B04n-9/2	1,25	4,71	616,86	4,23	554,00						
	B5n-2/1	1,36	4,89	650,29	4,28	569,75						
	B1n-7/1	1,19	4,50	597,32	3,79	503,77						
	B5n-3/1	1,21	4,72	618,77	4,25	557,75						
	B1n-8/1	1,11	4,55	601,80	3,88	512,71						
	B1n-8/2	1,22	4,33	575,99	3,68	489,78						
	B5n-6/2	1,20	4,70	609,94	4,18	543,03						
	B5n-8/1	1,07	4,33	579,24	3,68	491,39						
B5n-8/2	1,15	4,52	589,58	4,12	537,41							

. Continuação Tabela E. 2

C.I.	cp	α	Pr	f_{st}'	Py	f_y'	f_{st}	$Sd(f_{st})$	f_{ym}	$Sd(f_y)$	Δf_{st}	Δf_{ym}
Sem corrosão	x-22	0,00	7,10	856,00	6,04	727,60	858,71	25,84	740,34	20,98	0,00	0,00
	x-23	0,00	7,18	865,00	6,17	743,90						
	x-24	0,00	6,97	838,00	5,92	712,30						
	x-25	0,00	7,27	874,00	6,25	751,64						
	x-26	0,00	7,41	891,00	6,37	766,26						
	x-1	0,00	6,92	883,78	não	não						
	x-2	0,00	6,44	833,14	não	não						
	x-3	0,00	6,73	810,89	não	não						
	x-17	0,00	6,90	851,39	não	não						
	x-20	0,00	6,55	883,88	não	não						
6dias	B0x-1/1	0,25	6,91	831,95	5,87	707,16	839,80	14,83	726,45	15,37	2,20	1,88
	B0x-1/2	0,24	6,99	840,25	6,01	714,21						
	B0x-2/1	0,25	6,92	832,14	5,95	723,96						
	B0x-2/2	0,23	6,92	832,14	5,88	715,64						
	B04x-1/1	0,23	6,95	835,15	5,90	718,23						
	B04x-1/2	0,26	6,97	839,78	5,99	722,21						
	B04x-3/1	0,24	6,93	833,34	5,96	716,67						
	B04x-3/2	0,26	6,98	839,35	5,93	730,24						
	B1x-3/1	0,24	6,94	835,66	5,96	727,02						
	B1x-3/2	0,24	6,96	838,97	5,99	729,90						
	B1x-5/1	0,18	7,14	860,00	6,07	748,20						
	B1x-5/2	0,26	6,92	832,65	5,89	724,41						
	B5x-2/1	0,24	6,91	868,00	5,87	755,16						
	B5x-2/2	0,25	6,80	817,71	5,78	711,41						
	B5x-3/1	0,26	6,86	826,53	5,90	719,08						
	B5x-3/2	0,15	6,83	873,24	5,87	759,72						
20dias	B5x-6/1	0,87	6,52	784,17	5,41	674,39	806,84	15,79	691,86	14,61	6,04	6,55
	B5x-6/2	0,83	6,15	812,92	5,11	699,11						
	B5x-4/1	0,85	6,38	802,44	5,42	682,08						
	B5x-4/2	0,77	6,88	827,78	5,71	703,61						
	B5x-9/1	0,77	6,48	805,20	5,12	684,42						
	B5x-9/2	0,77	6,32	759,62	5,37	645,68						

Continuação Tabela E. 2.

C.I.	cp	α	Pr	f_{st}'	Py	f_y'	f_{st}	$Sd(f_{st})$	f_{ym}	$Sd(f_y)$	Δf_{st}	Δf_{ym}
12dias	B0x-3/1	0,35	6,95	837,89	5,98	728,96	820,44	20,38	708,20	20,78	4,46	4,34
	B0x-3/2	0,39	6,88	826,79	5,91	719,31						
	B0x-4/1	0,35	6,63	798,52	5,70	694,71						
	B0x-4/2	0,34	6,92	833,66	5,95	716,95						
	B04x-2/1	0,38	7,02	845,92	5,97	727,49						
	B04x-2/2	0,30	6,96	837,22	5,92	720,01						
	B04x-4/1	0,38	6,61	794,69	5,68	683,44						
	B04x-4/2	0,34	6,88	826,97	5,91	711,19						
	B1x-1/1	0,37	6,08	775,00	5,23	658,75						
	B1x-1/2	0,39	6,24	796,94	5,37	677,40						
	B1x-2/1	0,38	5,78	810,99	4,97	705,56						
	B1x-2/2	0,35	6,35	836,18	5,46	727,48						
	B5x-5/1	0,44	6,56	835,25	5,58	726,67						
	B5x-5/2	0,29	6,54	827,59	5,56	720,00						
B5x-8/1	0,38	6,48	835,25	5,51	718,32							
B5x-8/2	0,63	6,54	808,14	5,62	695,00							
20dias	B0x-5/1	0,80	6,34	809,05	5,01	695,78	806,84	15,79	691,86	14,61	6,04	6,55
	B0x-5/2	0,81	6,75	812,26	5,74	698,55						
	B0x-7/1	0,75	6,36	839,37	5,28	721,86						
	B0x-7/2	0,71	6,59	799,49	5,47	695,56						
	B04x-6/1	0,88	6,26	808,14	5,32	703,08						
	B04x-6/2	0,65	6,34	810,69	5,26	689,08						
	B04x-7/1	0,88	6,36	814,69	5,02	692,49						
	B04x-7/2	0,81	6,64	798,19	5,64	686,45						
	B1x-4/1	0,90	6,26	808,55	5,32	695,35						
	B1x-4/2	0,68	6,72	809,42	5,58	688,00						
	B1x-6/1	0,81	6,76	812,99	5,61	691,04						
	B1x-6/2	0,76	6,64	798,45	5,25	694,65						
	B5x-1/1	0,73	6,26	807,52	5,32	694,47						
	B5x-1/2	0,88	6,78	815,83	5,77	701,61						

E.3. Gráficos de carga *versus* alongamento dos ensaios de tração de barras corroidas.

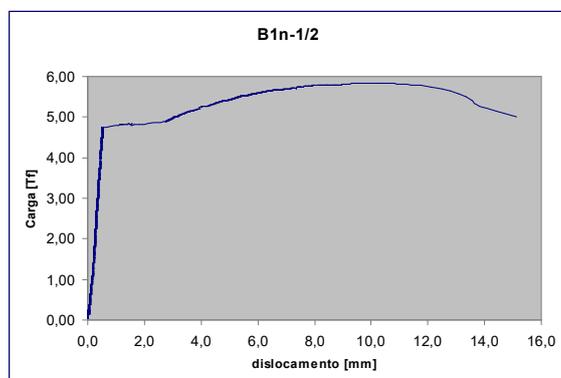


Figura E. 1. Exemplo de gráfico de **carga versus alongamento** de barras de aço carbono.

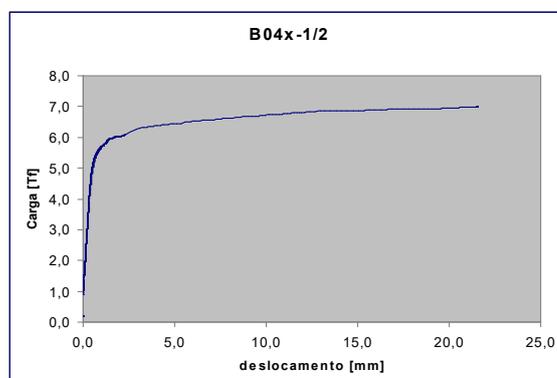


Figura E. 2. Exemplo de gráfico de **carga versus alongamento** de barras de aço inoxidável.

Anexo F. Ensaio de calibração.

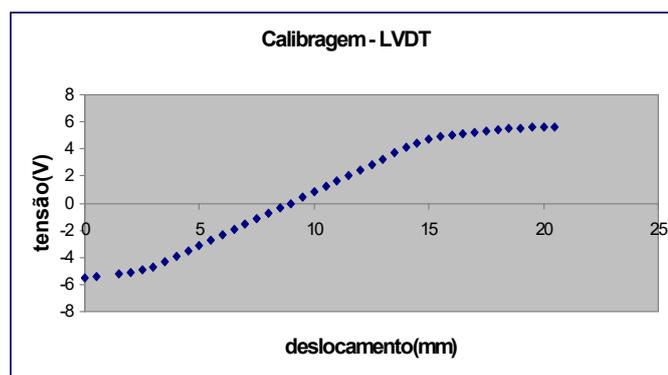


Figura F. 1. Exemplo de gráfico de calibração do LVDT.

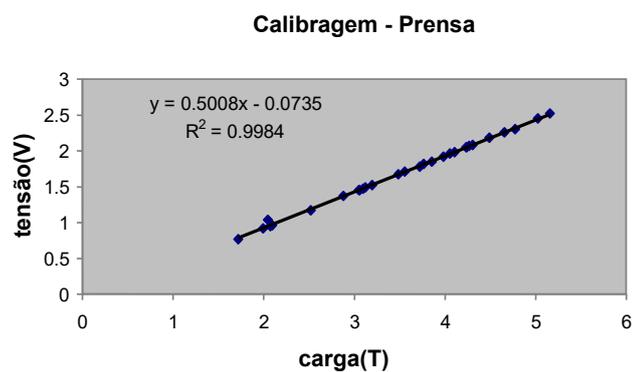


Figura F. 2. Exemplo de gráfico de calibração da prensa.

Anexo G. Caracterização geométrica e físico-mecânica do tipo de ataque por pites das armaduras estudadas

G.1. Profundidade de saturação do pite nas barras de aço inoxidável

Profundidade de saturação dos pites é aquela profundidade atingida pelos pites no momento em que inicia a etapa de “saturação” dos pites, provocando uma mudança de comportamento no deterioro da resistência à tração. Durante a etapa de “saturação”, os pites continuam crescendo em profundidade e abertura do “olho”, mas a perda de resistência à tração se comporta como no caso teórico de perda de resistência à tração por perda regular da seção transversal da barra.

O cálculo da profundidade de saturação dos pites é puramente teórico. Não se corresponde com o evento real da saturação do eletrólito pelos produtos de corrosão formados, e sim, com o momento detectado nos ensaios mecânicos de barras corroídas por corrente impressa.

Considerando apenas um pite na seção de ruptura:

$$A' = (1 - \Delta A) A_o = A_o - A_p = \frac{\pi \cdot \phi_r^2}{4} - \frac{\pi \cdot P_p^2}{2} \rightarrow P_p = \sqrt{\frac{\Delta A \cdot \phi_r^2}{2}}$$

onde: A' = Área de seção residual [mm²]
 ΔA = Perda de seção igual à perda de resistência à tração [%/‰]
 A_o = Área inicial da seção [mm²]
 A_p = Área da seção do pite no mesmo plano da seção da barra [mm²]
 P_p = Profundidade de saturação do pite [mm]⁷⁶
 ϕ_r = Diâmetro real da barra em questão = 10,29 mm

Para: $\Delta A = 0,04 \rightarrow P_p = 1,46$ mm

Sendo que, P_p independe do diâmetro da barra:

$$P_p = 1,46 \text{ mm} \quad \text{para qualquer seja } \phi. \quad (\text{G.1})$$

Para efeitos de simplificação o volume do pite no aço inoxidável poderia ser considerado o volume do cilindro com diâmetro igual a $2P_p$ e profundidade P_p . De modo que:

$$V_p = \pi P_p^3; \quad N = 1000 \frac{m_o \cdot \Delta m}{\rho \cdot \pi \cdot P_p^3} \quad S_p = \frac{4P_p^3}{\phi_r^2 \cdot \Delta m} \quad (\text{G.2})$$

onde: V_p = Volume do pite [mm³]
 m_o = Massa linear inicial da barra [g/cm]
 N = Número de pites por unidade linear [cm⁻¹]
 S_p = Espaçamento mínimo entre pites característicos [mm]
 Δm = Perda de massa [%/‰]
 ρ = Densidade do aço [g/cm³]

Substituindo $\phi_r = 10,29$ mm; $\Delta m = 0,004$ e $P_p = 1,46$ mm $\rightarrow S_p = 29,4$ mm

S_p não representa utilidade prática alguma, a sua determinação permitiu apenas avaliar a viabilidade do modelo teórico desenvolvido, mostrando que este é realmente viável. Igualmente será demonstrado para as barras de aço carbono que além dos pites, na região anódica a corrosão adquire forma de corrosão generalizada.

Na realidade pode acontecer o desenvolvimento de maior quantidade de pites a distâncias menores que S_p e profundidades menores que P_p . A situação representada na Figura G. 1 é a

⁷⁶ Considera-se o diâmetro da olho do pite duas vezes maior que a profundidade do pite.

mais crítica correspondendo ao ponto de início da etapa de “saturação” dos pites. Os três pites representados apresentam igual probabilidade de ruptura da seção à tração.

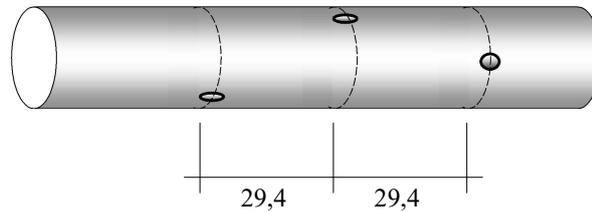


Figura G. 1. Espaçamento dos pites com profundidade P_p na barra de aço inoxidável pesquisada no início da etapa de “saturação”.

G.2. Perda da resistência à tração até a etapa de “saturação” dos pites nas barras de aço inoxidável

No caso concreto de barras de aço inoxidável com 10,29 mm de diâmetro a profundidade de saturação dos pites foi atingida com uma quantidade específica de carga eletroquímica transferida denominada c_p , cuja determinação se expõe a continuação:

Segundo a lei de Faraday:

$$\delta m = \frac{I \cdot t_s \cdot a}{n \cdot F} \quad (\text{G.3})$$

onde:

a = Massa atômica do Fe = 56g

F - Constante de Faraday = 96493 C

I = Corrente elétrica [A]

δm = Perda de massa absoluta = $m_o - m_f$

m_f = Massa final lineal [g/cm]

n = Valência do íon metálico (for Fe^{++} , $n = 2$)

t_s = Tempo [s]

$$t_{[\text{anos}]} = 13,5 \cdot \frac{\Delta m \cdot \phi_r^2}{A_s} \quad (\text{G.4})$$

onde: A_s = área superficial da barra [mm^2/cm]

Para as armaduras de aço inoxidável pesquisadas: $A_s = 373,3 \text{ mm}^2/\text{cm}$; $\phi_r = 10,29 \text{ mm} \rightarrow t_{[\text{anos}]} = 3,83 \Delta m$

Para as de aço carbono: $A_s = 379,8 \text{ mm}^2/\text{cm}$; $\phi_r = 9,89 \text{ mm} \rightarrow t_{[\text{anos}]} = 3,48 \Delta m$

O intervalo de tempo em que deu início à “saturação” dos pites, chamado de t_p é determinado, avaliando as expressões de $t_{[\text{anos}]}$ nos valores de perda de massa correspondentes ao ponto de início desta etapa.

Para o aço inoxidável $\Delta m_p = 0,004 \rightarrow t_p = 15,3\text{E-}3 \text{ anos} \approx 5,6 \text{ dias}$

Para o aço carbono $\Delta m_p = 0,005 \rightarrow t_p = 17,4\text{E-}3 \text{ anos} \approx 6,3 \text{ dias}$

Determinados os intervalos de tempos em que iniciou a etapa de “saturação” dos pites nos ensaios da pesquisa, é possível determinar a quantidade de carga eletroquímica transferida por unidade de área, necessária para conseguir esta condição.

$$c_{\text{corr}} = i_{\text{corr}} t \quad (\text{G.5a})$$

que avaliada para $t = t_p \rightarrow c_p = t_p i_{corr}$ (G.5b)

e para $i_{corr} = i_{impressa} \rightarrow c_p = t_p i_{impressa} = t_p 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (G.5c)

determinando-se:

Para o aço inoxidável $t_p = 15,3\text{E-}3$ anos $\rightarrow c_p = 0,766 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ anos

Para o aço carbono $t_p = 17,4\text{E-}3$ anos $\rightarrow c_p = 0,87 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ anos

Na Tabela G. 1 resumem-se os valores de c_p necessários no cálculo da vida útil das estruturas, quando é considerada a perda da resistência à tração como a manifestação patológica mais importante.

Tabela G. 1. Quantidade de carga eletroquímica transferida a partir da qual as perdas do limite de escoamento começam a serem diretamente proporcionais ao avanço da corrosão (início da etapa de “saturação” dos pites).

Tipo de armadura	c_p [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ano]
Aço inoxidável	0,766
Aço carbono	0,870

O valor de c_p sendo constante, com o aumento do diâmetro da barra diminui Δm_p e com isto as perdas da capacidade resistente aproximam-se às perdas teóricas, equivalentes às de uma barra com Δm uniforme em toda sua área superficial.

A partir da “saturação” dos pites a perda da resistência à tração pode ser considerada proporcional ao avanço da corrosão (na realidade, sendo P_p constante, a resistência à tração cai por causa do aumento da probabilidade de ruptura).

Mantendo constante P_p e variando o diâmetro nominal das armaduras é possível determinar a perda de seção e a perda de resistência à tração no início da “saturação” dos pites. A análise de regressão da Figura G. 2 permitiu chegar a expressão (G.6).

$$\Delta A_p = \Delta f_{y_p} = \frac{4}{\phi^2} \quad (\text{G.6})$$

onde: $\Delta A_p = \Delta f_{y_p}$ = perda de seção igual a perda de limite de escoamento no início da etapa de “saturação” dos pites.

ϕ = diâmetro nominal da armadura inoxidável em [cm]

É possível estender esta análise para os resultados de perda da resistência de aderência média, já que a quantidade de corrente passante que provoca a perda da aderência até o início da etapa de “lubrificação” vai depender da área superficial da barra, isto é, do seu diâmetro.

G.3. Perda da resistência de aderência média até a etapa de “lubrificação” nas barras de aço inoxidável e de aço carbono

Quanto às perdas da aderência média ficou entendido que a partir da etapa de “lubrificação” a resistência de aderência permanece constante, sendo afetada quando aparecem e se desenvolvem as fissuras de fendilhamento, que se mostram exteriormente como fissuras paralelas à barra, e se desenvolvem até o destacamento do concreto. Para então o estado de deterioração do cobrimento passaria a ser a patologia predominante, isto se ainda é possível estar considerando a estrutura em serviço.

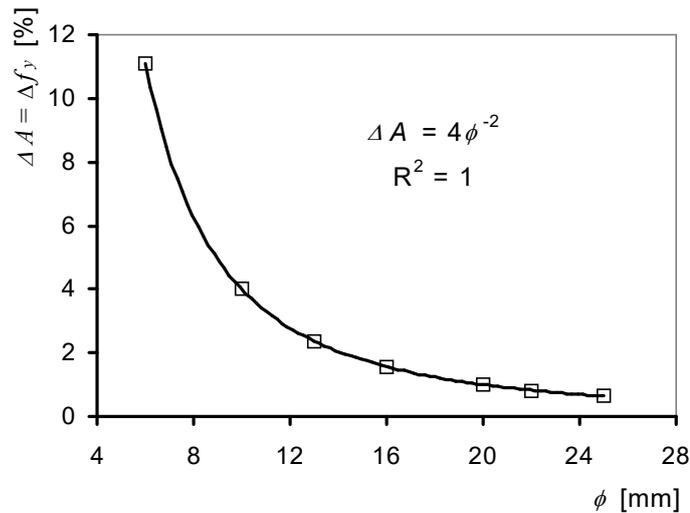


Figura G. 2. Perda de seção e do limite de escoamento ao início da etapa de “saturação” dos pites em relação ao diâmetro nominal das armaduras de aço inoxidável.

O fenômeno da perda de aderência foi associado ao aparecimento dos produtos de corrosão sobre a superfície da armadura, portanto associado a uma determinada quantidade de massa corroída por unidade de área superficial ($\delta m/A_s$).

$$\text{pela lei de Faraday (G.3)} \rightarrow \frac{\delta m}{A_s} = \frac{i_{corr} \cdot t}{3,45E9} = \frac{c_l}{3,45E9} = cte. \quad (G.7)$$

onde: c_l = quantidade de carga eletroquímica transferida por unidade de área a partir da qual inicia a etapa de lubrificação com resistência de aderência média praticamente constante até a aparição das fissuras de fendilhamento

Se em (G.7) $\delta m_p/A_s$ é constante, então c_l também é. Na Tabela G. 2 resumem-se os valores de c_l necessários no cálculo da vida útil das estruturas, quando é considerada a perda da resistência de aderência como a manifestação patológica mais importante (casos de armaduras de ancoragem por exemplo).

Tabela G. 2. Quantidade de carga eletroquímica transferida a partir da qual as perdas de aderência podem ser consideradas constantes (cobrimento não fissurado).

Tipo de armadura	c_l [$\mu\text{A}/\text{cm}^2 \text{ ano}$]
Aço inoxidável	0,422
Aço carbono	0,502

As perdas máximas da aderência média serão de 25% para as barras de aço carbono e de 30% para as de aço inoxidável, porém esta deterioração acontece com diferentes perdas de massa em dependência do diâmetro das armaduras.

$$\frac{\delta m}{A_s} = cte. = \frac{\delta m}{\pi \cdot \phi} \rightarrow \delta m = \pi \cdot \phi \cdot \left(\frac{\delta m}{A_s} \right) \quad (G.8a)$$

$$\frac{\delta m}{m_0} = \frac{\pi \cdot \phi \cdot \left(\frac{\delta m}{A_s} \right)}{m_0} = \frac{4 \left(\frac{\delta m}{A_s} \right)}{\gamma \cdot \phi} \quad (G.8b)$$

substituindo os valores reais de:

$\delta m/A_s = 4,443E-3 \text{ g}/\text{cm}^2$ para as barras de aço inoxidável e $5,823E-3 \text{ g}/\text{cm}^2$ para as de aço carbono;

γ - massa específica do aço = 7,85 g/cm³

então:

$$\Delta m_l = (0,023/\phi) \quad \text{para as barras de aço inoxidável} \quad (\text{G.9a})$$

$$\Delta m_l = (0,03/\phi) \quad \text{para as barras de aço carbono [%%/%%]} \quad (\text{G.9b})$$

G.4. Profundidades do ataque nas barras de aço carbono

No caso das do aço carbono o ataque começa por pites que ao se multiplicarem conformam o panorama da corrosão generalizada na região anódica. Contudo, na região anódica destacam-se os pites mais profundos. Em relação ao ataque deverá levar-se em consideração o fator geométrico R, segundo GONZÁLEZ et al. (1995) igual a um valor entre 4 e 8. Para simplificações do cálculo foi considerado inicialmente que numa única seção transversal da barra de aço carbono possam aparecer até 4 pites e foi desprezada a penetração da corrosão correspondente ao ataque de tipo generalizado.



Figura G. 3. Corrosão por cloreto nas barras de aço carbono com ataque generalizado e destaque de pites na mesma seção.

$$\text{Supondo só 1 pite} \rightarrow P_p = \sqrt{\frac{\pi \cdot \phi_r^2 \cdot \Delta A}{8}} \quad (\text{G.10})$$

Substituindo $\phi_r = 9,89$ mm; $\Delta m = 0,18$ $\rightarrow P_p = 2,63$ mm;

\rightarrow área de seção eliminada pelo pite $A_p = 13,83$ mm²

$$N = \frac{\Delta m \cdot L \cdot \phi_r^2}{4 \cdot P_p^3} \quad (\text{G.11})$$

onde: N = Número de pites de profundidade de saturação

L = Comprimento de barra exposto [mm]

Substituindo $\phi_r = 9,89$ mm; $\Delta m = 0,18$; $L = 100$ mm obtém-se a Tabela G. 3.

Tabela G. 3. Pites prováveis nas seções de ruptura das barras de aço carbono corroídas no início da etapa de “saturação” dos pites.

N considerado	P_p [mm]	$V_{I \text{ pite}}$ [mm ³]	N calculado	Observações
1	2,63	7,22	0,7	Pouco provável de acontecer
2	1,82	11,03	1,9	
3	1,52	20,22	3,48	Provável
4	1,32	57,15	5,32	Mais provável

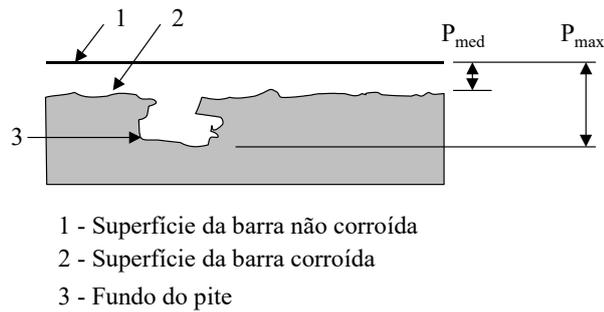


Figura G. 4. Superfícies corroídas por cloreto das barras de aço carbono.

Segundo GONZÁLEZ et al. (1995) $P_{\max} = (4 \div 8) P_{\text{med}}$, portanto:

$$P_p = P_{\max} - P_{\text{med}} = (3 \div 7) P_{\text{med}}, \text{ podendo ser assumido } P_{\text{med}} = \frac{P_p}{5} \quad (\text{G.12})$$

$$A' = (1 - \Delta A) A_o = A_o - (A_{cg} + N A_p)$$

$$\text{onde: } A_o = \text{Área inicial} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{cg} = \text{Área da seção eliminada pela corrosão generalizada [mm}^2\text{]}$$

$$A_p = \text{Área da seção eliminada por cada pite [mm}^2\text{]}$$

$$(1 - \Delta A) \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} - \left(\pi \cdot \left(\phi - 2 \frac{P_p}{5} \right) \frac{P_p}{5} \Delta P_{cg} + 2 P_p^2 N \right) \quad (\text{G.13})$$

onde: ΔP_{cg} = Porção do perímetro da seção com corrosão generalizada [%/%%]

Avaliando (G.13) segundo a Tabela G. 4 obtém-se os valores prováveis de P_p e P_{med} .

Tabela G. 4. Características prováveis do ataque por cloreto nas barras de aço carbono no momento do início da etapa de “saturação”, visando perda de massa da ordem de 0,5% e perda de resistência à tração de 18%.

ΔA [%/%%]	ϕ_r [mm]	Variante	N	ΔP_{cg} [%/%%]	P_p [mm]	P_{med} [mm]
0,18	9,89	I	4	1,00	1,00	0,20
		II	4	0,33	1,20	0,24
		III	3	0,50	1,29	0,26

Com ajuda de (G.13) pode ser calculada a perda de seção pela expressão (G.14)

$$\Delta A = \frac{\pi \cdot \left(\phi_r - 2 \frac{P_p}{5} \right) \cdot \frac{P_p}{5} \cdot \Delta P_{cg} + 2 \cdot N \cdot P_p^2}{\frac{\pi \cdot \phi_r^2}{4}} \quad (\text{G.14})$$

A expressão (G.14) pode ser avaliada para cada uma das três variantes anteriores em diferentes diâmetros de armadura e obtém-se a relação da perda de seção (perda de resistência à tração) com o aumento do diâmetro. Isto para a mesma perda de massa, no início da etapa de “saturação” que é independente do diâmetro da armadura.

A expressão (G.14) pode ser simplificada como segue:

$$\Delta A = 8,3 \cdot \phi^{-1,7} \quad (\text{G.15})$$

Como a perda de resistência à tração na etapa de “saturação” dos pites é proporcional à perda de seção (perda de massa), então a expressão (G.15) serve também para defini-la:

$$\Delta f = 8,3 \cdot \phi^{-1,7} \quad (G.16)$$

As expressões (G.15) e (G.16) consideram a profundidade de pite analisada nas variantes I à III, como sendo $P_p = (1,00 \div 1,3) \text{ mm}$ para as barra de aço carbono independentemente do seu diâmetro.

Tabela G. 5. Perdas de seção e perdas de resistência à tração no início da etapa de “saturação” dos pites em armaduras de aço carbono de diferentes diâmetros.

Variante	$\Delta A = \Delta f$ para ϕ de barra em [mm] igual a:						
	6	10	13	16	20	22	25
I	0,41	0,18	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05
II	0,49	0,19	0,11	0,08	0,05	0,04	0,04
III	0,41	0,17	0,10	0,07	0,05	0,04	0,04

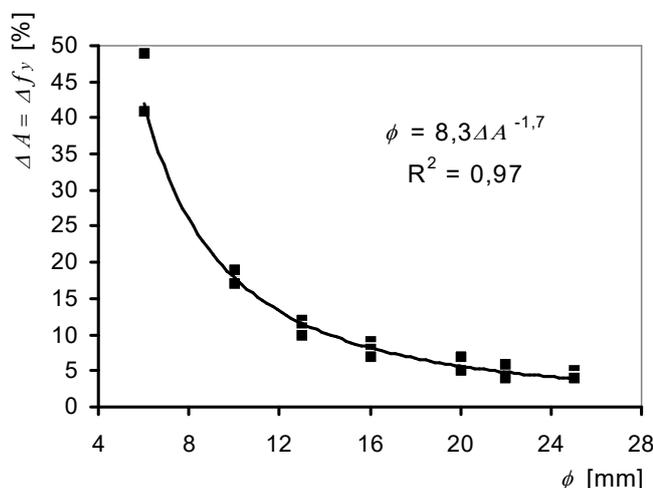


Figura G. 5. Relação da perda de seção com o diâmetro das armaduras de aço carbono ao início da etapa de “saturação” dos pites (corrosão generalizada).

G.5. Perda da resistência à tração na etapa de “saturação” dos pites nas barras de aço inoxidável e de aço carbono

Nesta etapa as perdas de resistência à tração podem ser consideradas como no caso de corrosão generalizada, iguais às perdas de massa. $\Delta A = \Delta V = \Delta m = \Delta f_y$

$$\Delta f_y = \frac{\delta m}{m_0} = 4,73E-3 \cdot \frac{i_{corr} \cdot t}{\phi} \quad (G.17)$$

onde: t – tempo em [anos]

ϕ - diâmetro nominal da barra em [cm]

i_{corr} – densidade de corrente de corrosão em [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

G.6. Estimativa da densidade de corrente de corrosão de pites do aço inoxidável no concreto

A densidade de corrente de corrosão de pite detectada nas curvas de polarização foi de 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Isto na formação de um pite em 5 cm de exposição de barra. A densidade de corrente

real relativa apenas à área anódica é tantas vezes maior quanto a relação da área do olho do pite pela área total exposta.

Por outro lado, a corrente impressa de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ nos ensaios acelerados, provocou nas barras de aço inoxidável um número finito de pites.

Aplicando os resultados teóricos de G.1, temos que, com a corrente impressa de $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ poderia se formar um pite de 1,46 mm de profundidade a cada 3 cm em um intervalo de tempo igual ao início da etapa de “saturação” dos pites ($c_s = 0,677 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$).

Como o comprimento da barra submetida a corrente impressa foi de 10 cm, então nela se formam $10/3$ pites = 3,3 pites, cada um com uma quantidade de carga passante igual a $0,677/3,3 = 0,203 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ano.

A etapa de saturação acontece num intervalo de tempo de $0,677/50 = 1,354\text{E}-2$ anos (4,94 dias), portanto a densidade de corrente de formação do pite até a “saturação” no ensaio acelerado foi de $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ que é 1,5 vezes o valor obtido no ensaio potenciodinâmico.

Neste caso, pode se considerar, que os valores do ensaio acelerado são aproximadamente 1,5 vezes maiores aos esperados na realidade. A densidade de corrente de pite igual a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pode ser recomendada para cálculos de vida útil de estruturas armadas com aço inoxidável, em caso de estimado o estado de corrosão das armaduras.

Anexo H. Cálculos de estimativa de vida útil de serviço

O cálculo de vida útil se baseia na determinação do grau de deterioração da estrutura atacada por cloretos. As densidades de corrente de corrosão correspondentes a cada grau de contaminação provocam a fissuração do concreto de cobrimento, e a redução da capacidade resistente da peça estrutural por causa das perdas de resistência à tração e de aderência armadura/concreto. A fissuração do cobrimento e a perda da aderência podem acontecer como manifestações patológicas de caráter local, em quanto que a perda da capacidade resistente à tração das armaduras em qualquer seção representa na perda da capacidade resistente do componente estrutural, independentemente do caráter localizado do ataque.

É indispensável conhecer o regime de contaminação das armaduras ao longo do tempo. Para isto, determinam-se os tempos em que a frente de cloreto penetra até a armadura com diferentes teores. Um método simplificado muito utilizado é aplicar a segunda lei de Fick à penetração dos íons cloreto⁷⁷:

$$\frac{Ce_{Cl} - Co}{Cs - Co} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{e_{Cl}}{2 \cdot \sqrt{Def_{Cl} \cdot t}}\right) \rightarrow \operatorname{erf}\left(\frac{e_{Cl}}{2 \cdot \sqrt{Def_{Cl} \cdot t}}\right) = \frac{Cs - Ce_{Cl}}{Cs - Co} = \operatorname{erf}(z)$$

- onde:
- $Ce_{Cl} - Cl_{cc}$ na profundidade e_{Cl} , no tempo t [%]
 - $Co - Cl_{cc}$ inicial no interior do componente estrutural de concreto (na maioria dos casos pode ser admitido igual a 0,02%)
 - $Cs - Cl_{cc}$ (em relação à massa de cimento) na superfície do componente estrutural de concreto, admitido constante [%] segundo Tabela H. 1
 - erf - função de erro de Gauss segundo Tabela H. 2
 - e_{Cl} - profundidade atingida pela frente de cloretos com Cl_{cc} igual a Ce_{Cl} [m] (é interessante fixa-lo e_{Cl} - espessura de cobrimento)
 - Def_{Cl} - coeficiente efetivo de difusão de cloretos [m^2/s] calculado ou assumido segundo Tabela H. 3.
 - t_{ano} - duração de tempo considerado [anos]

⁷⁷ Métodos mais modernos chamados de “refinados”, utilizados para previsões probabilísticas da vida útil, utilizam expressões mais complicadas que consideram o coeficiente de difusão variável no tempo, consideram outras condições de exposição como por exemplo a temperatura e umidade.

$$\text{chamando } \frac{e_{Cl}}{2 \cdot \sqrt{Def_{Cl}} \cdot t} = z \Rightarrow t_{ano} = \frac{e_{Cl}^2}{4 \cdot z^2 \cdot Def_{Cl}} \cdot 31,5 \cdot 10^6 \quad (\text{H.1})$$

Tabela H. 1. Teores de cloreto de referência, no concreto da superfície, em função do meio ambiente (simplificado de HELENE, 1993).

Tipo de concreto pela durabilidade		Ambiente				
		Tanques industriais	Água de mar oceano Atlântico e névoa salina	Respingos de maré	Atmosfera marinha ou industrial	Atmosfera urbana ou industrial
Concretos duráveis	$f_{ck} > 35$ MPa $a/c < 0,48$ $C > 400$ kg/m ³ $Ab_H < 4,2\%$	4,47%	0,63%	0,78%	0,16%	0,024%
Concretos normais	$f_{ck} = 20$ a 35 MPa $a/c = 0,48$ a 0,68 $C = 280$ a 400 kg/m ³ $Ab_H = 4,2\%$ a 6,3%	6,64%	0,93%	1,14%	0,24%	0,036%
Concretos deficientes	$f_{ck} < 20$ MPa $a/c > 0,68$ $C < 280$ kg/m ³ $Ab_H > 6,3\%$	10,65%	1,5%	1,8%	0,36%	0,046%

Ab_H = absorção capilar no concreto

Tabela H. 2. Tabela de da função de erro de Gauss.

z	$erf(z)$								
0,00	0,0000	0,25	0,2763	0,60	0,6039	1,20	0,9103	1,80	0,9891
0,01	0,0113	0,30	0,3286	0,70	0,6778	1,30	0,9340	1,90	0,9928
0,05	0,0564	0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,40	0,9523	2,00	0,9953
0,10	0,1125	0,40	0,4284	0,90	0,7969	1,50	0,9661		
0,15	0,1680	0,45	0,4755	1,00	0,8427	1,60	0,9763		
0,20	0,2227	0,50	0,5205	1,10	0,8802	1,70	0,9838		

Tabela H. 3. Classificação dos concretos com base no coeficiente efetivo de difusão do cloreto, Def_{Cl} (simplificado de HELENE, 1993).

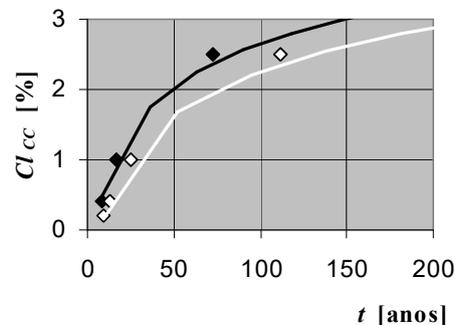
Concreto		Def_{Cl} [m ² /s]
Classificação	Características médias	
Excelentes	$f_{ck} > 55$ MPa; $a/c < 0,38$; $C > 400$ kg/m ³ ; Cimento com adições	<5E-13
Duráveis	$f_{ck} > 35$ MPa; $a/c < 0,48$; $C > 400$ kg/m ³ ; $Ab_H < 4,2\%$	5 a 40E-13
Normais	$f_{ck} = 20$ a 35 MPa; $a/c = 0,48$ a 0,68; $C = 280$ a 400 kg/m ³ ; $Ab_H = 4,2\%$ a 6,3%	40 a 90E-13
Deficientes	$f_{ck} < 20$ MPa; $a/c > 0,68$; $C < 280$ kg/m ³ ; $Ab_H > 6,3\%$	> 90E-13

H.1. Metodologia para o cálculo da vida útil de serviço

Passo 1. Determina-se o regime de contaminação à profundidade e_{Cl} igual à espessura de cobrimento, aplicando por exemplo a segunda lei de Fick da expressão (H.1).

$$t_{ano} = \frac{e_{Cl}^2}{4 \cdot z^2 \cdot Def_{Cl} \cdot 31,5 \cdot 10^6} \quad \text{em anos}$$

Podem ser utilizados gráficos determinando através das linhas de tendência as correlações exponenciais que definem o regime de contaminação ao nível das armaduras. O emprego de equações matemáticas facilita os cálculos e permite chegar a resultados mais confiáveis.



Passo 2. Determina-se o tempo de iniciação t_0 considerando as concentrações limites seguintes:

	Armaduras:	$Cl_{cc, lim}$ [%]
Para o aço carbono	Relaxadas	0,4
	Tracionadas	0,2
Para o aço inoxidável	Relaxadas	5,0
	Tracionadas	1,0

Passo 3. Determina-se o regime de corrosão (quantidade de carga eletroquímica transferida) no período de propagação, dado o grau de contaminação ao longo do tempo. Isto é a relação c_{corr} versus t , utilizando a expressão:

$$c_{corr} = i_{corr}' t \quad (H.2)$$

onde:

c_{corr} = quantidade de carga eletroquímica transferida durante a corrosão [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]

i_{corr}' = densidade de corrente de corrosão dado o tipo de aço, o Cl_{cc} e a condição de tensão da armadura [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$], segundo a recomendação:

	Armaduras:	Para:	Calcula-se pela equação
Para o aço carbono	Relaxadas	$Cl_{cc} > 0,4\%$	$i_{corr}' = 0,432 Cl_{cc}^2 - 0,1324 Cl_{cc} + 0,0354$
	Tracionadas	$Cl_{cc} > 0,2\%$	$i_{corr}' = 0,0106 Cl_{cc}^2 + 2,0533 Cl_{cc} + 0,4676$
Para o aço inoxidável	Relaxadas	$Cl_{cc} > 1\%$	$i_{corr}' = 0,0625 Cl_{cc} - 0,0125$
	Tracionadas	$Cl_{cc} > 0,4\%$	$i_{corr}' = 0,4909 Cl_{cc}^2 - 0,5207 Cl_{cc} + 0,3297$

Passo 4. A vida útil de serviço ($t_0 + t_1$) por fissuração ou por perda de aderência estima-se nos limites de quantidade de carga eletroquímica transferida durante a corrosão para uma ou outra condição, segundo o critério recomendado a seguir:

	Por fissuração	Por perda de aderência	
		25%	30%
	c_{corr}^{lim} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]	c_{corr}^{lim} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]	c_{corr}^{lim} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]
Para o aço carbono	0,38	0,41	--
Para o aço inoxidável	0,29	--	0,53

Passo 5. Determina-se o instante de tempo t_p a partir do qual as perdas de resistência à tração podem ser consideradas iguais às perdas de massa por corrosão:

$$c_p = t_p i_{corr}$$

Considerando os valores de c_p seguintes:

	c_p [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]
Para o aço carbono	0,870
Para o aço inoxidável	0,766

Passo 6. Determina-se o regime de deterioração da resistência à tração considerando dois trechos lineais:

- De t_0 a t_p a deterioração Δf_y vai de 0 a $\Delta f_y'$ valor que depende do tipo de aço e do diâmetro da armadura, segundo as recomendações seguintes:

Calcula-se pela equação	
Para o aço carbono	$\Delta f_y' = 8,3 \cdot \phi^{-1,7}$
Para o aço inoxidável	$\Delta f_y' = 4 \cdot \phi^{-2}$

- Para $t > t_p$ pode ser calculada segundo a expressão:

$$\Delta f_y = \Delta f_y' + 4,73 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{i_{corr} \cdot t}{\phi}$$

Passo 7. A vida útil de serviço ($t_0 + t_1$) por perda de resistência à tração, ou mesmo a vida útil total será estimada avaliando $\Delta f_y = \Delta f_y^{máx}$, isto é, determinando o instante de tempo em que a perda de resistência à tração atinge um valor máximo permissível, segundo estipulado no projeto (para vida útil de serviço pode ser estimado $\Delta f_y^{máx} < 0,20$; para vida útil total $\Delta f_y^{máx} \geq 0,2$).

Passo 8. Determinação da vida útil de serviço estimada da estrutura.

Passo 9. A vida útil de serviço determinada um dado local correspondente à área mais crítica da estrutura ($t_0 + t_1$) poderá ser afetada por coeficientes de ajuste do cálculo de t_0 e t_1 , e ajustes globais. Estes coeficientes deverão levar em consideração:

- Os desvios próprios do modelo acelerado de corrosão adotado na pesquisa laboratorial;
- Os desvios próprios dos métodos acelerados de medição adotados na pesquisa laboratorial;
- Os desvios próprios das diferenças entre as condições reais de exposição e as condições laboratoriais: temperatura (T), umidade de equilíbrio do concreto (GU), regime de umidade ($r.u.$), acesso de oxigênio, etc.

$$(t_0 + t_1)_{local} = (t_0 K_0 + t_1 K_1) K_g \quad (H.3)$$

onde:

t_0, t_1 = prognóstico laboratorial respectivamente do período de iniciação e de propagação

$(t_0 + t_1)_{local}$ = vida útil de serviço visando localmente o comportamento da área mais crítica da estrutura

K_0 = coeficiente de ajuste do prognóstico laboratorial do período de iniciação

K_1 = coeficiente de ajuste do prognóstico laboratorial do período de propagação ou residual

K_g = coeficiente de ajuste global do prognóstico laboratorial da vida útil de serviço

O coeficiente K_g deve levar em consideração:

- As condições reais do meio, temperatura e o grau de umidade (GU) assim como o regime de umidade ($r.u.$). Podem ser utilizadas correlações com as medidas realizadas na superfície do concreto ou ainda com medidas realizadas no ambiente, de modo que se facilite a determinação desta influência.
- A taxa de armadura do mesmo cobrimento. Afeta a probabilidade de aparição das manifestações patológicas assim como o sinergismo próprio no desenvolvimento da corrosão do aço no concreto.

Ainda a vida útil estimada vai depender do grau de aparição em toda a superfície da estrutura de ataques críticos iguais ao prognosticado para uma área mais ou menos pontual.

$$(t_0 + t_1)_{estimada} = \varphi (t_0 + t_1)_{local} \quad (H.4)$$

onde:

$(t_0 + t_1)_{estimada}$ = vida útil de serviço estimada do componente estrutural

φ = coeficiente de incidência que vai depender do grau de aparição tolerável da manifestação patológica em questão neste componente estrutural.

H.2. Exemplo de cálculo de vida útil de serviço.

H.2.1. Duas etapas de avaliação

Os cálculos de estimativa de vida útil foram realizados em duas etapas. Uma primeira para prognosticar a durabilidade de uma estrutura com as mesmas características (mesmos materiais e mesmas condições de exposição) dos corpos-de-prova da pesquisa. Neste caso são aplicados diretamente os resultados obtidos. Uma segunda etapa onde se prognostica a durabilidade de uma estrutura com diferentes características (concreto mais durável, outros diâmetros de armadura, e outras condições de exposição). Os cálculos da Segunda etapa têm o objetivo de permitir uma determinada generalização do problema.

Na Tabela H. 4 e Tabela H. 5 apresentam-se as características dos materiais e das condições de exposição das estruturas calculadas. Os dados do problema proposto para a segunda etapa são assumidos hipoteticamente (umidade de equilíbrio do concreto – GU ; regime de umidade – $r.u.$; temperatura – T ; teor de cloreto na superfície do concreto – Cs). O coeficiente Def_{Cl} não foi calculado nem para o concreto utilizado na pesquisa, assumiu-se pela

Tabela H. 3 e pelos resultados dos ensaios de difusão (ASTM C 1202-94) realizados por GUIMARÃES et al., 1999.

As estruturas selecionadas para as etapas 1 e 2 são:

Etapa 1 (E1) → Cais marinho composto por pilares e vigas

Etapa 2 (E2) → Reservatório industrial composto de paredes e laje de cobertura

Tabela H. 4. Características dos materiais das estruturas calculadas etapa 1 e etapa 2.

Etapa	Componente estrutural	Propriedades do concreto de interesse ao cálculo	Função da barra	Cobrimento [mm]	Superfície *	Estado da barra	Def_{Cl}^{**} [m ² /s]	Armadura	
								Ø [mm]	Tipo de aço
E1	Pilar	$f_{cm} = 34$ MPa $a/c = 0,65$ $C = 310$ kg/m ³	Estribo	40	Topo	Tracionada	70E-13	10	Aço carbono e aço inoxidável
			B. longitudinal	50	Lateral	Relaxada	60E-13		
	Viga		Estribo	30	Lateral	Relaxada	60E-13		
			B. longitudinal	40	Topo	Tracionada	70E-13		
E2	Parede	$f_{ck} > 55$ MPa $a/c < 0,38$ $C > 400$ kg/m ³	B. vertical	40	Lateral	Relaxada	10E-13	12	Aço carbono e aço inoxidável
			B. horizontal	50		Tracionada		16	
	Laje		Tela	20	Fundo	Tracionada	10E-13	6	

* superfície de concretagem paralela à barra.

** valor estimado dada a qualidade do concreto empregada e a superfície de concretagem paralela à barra

Tabela H. 5. Condições de exposição das estruturas calculadas na primeira e segunda etapa.

Etapa	Componente estrutural	Ambiente	GU	$r.u.$	T	Cs
E1	Pilar	Respingo de maré	86%	100%	22°C	1,2%
	Viga	Névoa salina (marinha)	86%	100%	22°C	1%
E2	Parede	Reservatório industrial *	97%	50%	22°C	4,47%
	Laje	Névoa salina (industrial) **	86%	50%	40°C	2,5%

* tanque industrial com líquidos de elevado teor de cloretos

** evaporação do líquido do reservatório

Os graus de deterioração admissíveis escolhidos neste exercício são: para o aço carbono de nível “forte” e para o aço inoxidável de nível “intenso”. Segundo o Boletim 162 do CEB, 1983, o nível “forte” se corresponde com capacidade resistente residual mínima de aproximadamente 45% e o nível “intenso” com 60%.

Para este exercício de exemplo não foi determinada a perda de resistência à tração limite relacionada em cada variante com a capacidade resistente residual mínima correspondente ao grau de deterioração admissível. Assumiu-se que:

Para o cais marinho da Etapa 1:

A vida útil de serviço ($t_0 + t_1$) acaba quando:

- Aproximadamente 30% do revestimento está destacado ou fissurado;
- Aproximadamente 30% das armaduras perdem a aderência equivalente a: 25% no caso das armaduras de aço carbono e 30% no caso das armaduras de aço inoxidável;
- Em qualquer ponto das armaduras verifica-se perdas da resistência à tração equivalentes a:
 - para as armaduras de aço carbono: na primeira intervenção até 10% e na última intervenção até 20%;
 - para as armaduras de aço inoxidável: na primeira intervenção até 5% e na última intervenção até 10%.

A vida útil total (t_t) acaba quando:

- Aproximadamente 75% do revestimento tem sido reparado;
- Em qualquer ponto das armaduras verifica-se perdas da resistência à tração equivalentes a: 25% no caso das armaduras de aço carbono e 15% no caso das armaduras de aço inoxidável.

Para o reservatório industrial da Etapa 2:

A vida útil de serviço ($t_0 + t_1$) acaba quando:

- Aproximadamente 10% do revestimento está destacado ou fissurado;
- Aproximadamente 30% das armaduras perdem a aderência equivalente a: 25% no caso das armaduras de aço carbono e 30% no caso das armaduras de aço inoxidável;
- Em qualquer ponto das armaduras verifica-se perdas da resistência à tração equivalentes a: 10% no caso das armaduras de aço carbono e 5% no caso das armaduras de aço inoxidável.

A vida útil total (t_t) acaba quando:

- Aproximadamente 75% do revestimento tem sido reparado;
- Em qualquer ponto das armaduras verifica-se perdas da resistência à tração equivalentes a: 20% no caso das armaduras de aço carbono e 10% no caso das armaduras de aço inoxidável.

Quanto ao tempo de exploração das estruturas propõe-se: para o cais marinho da etapa 1 um tempo de exploração de **120 anos** e para o reservatório industrial da etapa 2 a exploração por **40 anos**.

H.2.2. Exemplo de cálculo. Passo 1. Regime de contaminação das armaduras (Cl_{cc} versus t)

Para a determinação dos teores de cloreto a nível das armaduras ao longo do tempo é avaliada a expressão (H.1) para e_{cl} - espessura de revestimento. Os instantes de tempo calculados são aqueles em que o teor de cloreto Cl_{cc} atinge os valores de interesse definidos pela Tabela 40 da página 124.

Para as armaduras de aço carbono relaxadas: $t_{0,4\%}$; $t_{1\%}$; $t_{5\%}$

Para as armaduras de aço carbono tracionadas: $t_{0,2\%}$; $t_{0,4\%}$; $t_{1\%}$; $t_{5\%}$

Para as armaduras de aço inoxidável relaxadas: $t_{1\%}$; $t_{5\%}$

Para as armaduras de aço inoxidável relaxadas: $t_{0,4\%}$; $t_{1\%}$; $t_{5\%}$

Exemplo do cálculo:

E1: Armaduras de aço carbono: Pilar: Estribo:

$$erf(z) = \frac{C_s - C_{e_{Cl}}}{C_s - C_o} = \frac{1,2 - 0,2}{1,2 - 0,02} = 0,85 \rightarrow z = 1,03$$

$$\Rightarrow t_{ano} = \frac{e_{Cl}^2}{4 \cdot z^2 \cdot Def_{Cl} \cdot 31,5 \cdot 10^6} = \frac{0,04^2}{4 \cdot 1,03^2 \cdot 70 \cdot 10^{-13} \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 1,8 \text{ anos}$$

E1: Armaduras de aço carbono: Pilar: Barra longitudinal:

$$erf(z) = \frac{1,2 - 0,4}{1,2 - 0,02} = 0,68 \rightarrow z = 0,7$$

$$\Rightarrow t_{ano} = \frac{0,05^2}{4 \cdot 0,7^2 \cdot 60 \cdot 10^{-13} \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 6,8 \text{ anos}$$

E2: Armaduras de aço inoxidável: Parede: Barras horizontais:

$$erf(z) = \frac{4,47 - 1,0}{4,47 - 0,02} = 0,7797 \rightarrow z = 0,865$$

$$\Rightarrow t_{ano} = \frac{0,05^2}{4 \cdot 0,865^2 \cdot 10 \cdot 10^{-13} \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 26,5 \text{ anos}$$

E2: Armaduras de aço inoxidável: Laje: Tela:

$$erf(z) = \frac{2,5 - 1,0}{2,5 - 0,02} = 0,6048 \rightarrow z = 0,607$$

$$\Rightarrow t_{ano} = \frac{0,02^2}{4 \cdot 0,607^2 \cdot 10 \cdot 10^{-13} \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 8,8 \text{ anos}$$

Tabela H. 6. Resultados do cálculo do regime de contaminação das armaduras à profundidade do cobrimento.

Etapa	Componente estrutural	Função da barra	Tipo de aço							
			Aço carbono				Aço inoxidável			
			<i>t</i> em anos para teores de cloreto Cl_{cc} de:							
0,2%	0,4%	1%	2,5%	0,4%	1%	2,5%	4,0%			
E1	Pilar (P)	Estribo	1,8	4,3	93,6	--	<i>a.pass</i>	93,6	--	--
		B. longitudinal	<i>a.pass</i>	6,8	126,0	--	<i>armadura passiva</i>			
	Viga (V)	Estribo	<i>a.pass</i>	3,2	>200	--	<i>armadura passiva</i>			
		B. longitudinal	2,0	4,9	>200	--	<i>a.pass</i>	>200	--	--
E2	Parede (P)	B. vertical	<i>a.pass</i>	8,6	16,3	72,4	<i>armadura passiva</i>			
		B. horizontal	9,4	13,3	25,5	112,0	<i>a.pass</i>	26,5	112,0	>200
	Laje (L)	Tela	1,9	3,1	8,9	>200	<i>a.pass</i>	8,8	>200	--

Gráficos:

Os resultados tabelados podem ser mostrados em gráficos e determinadas as suas correlações matemáticas que permitem maiores facilidades para o cálculo.

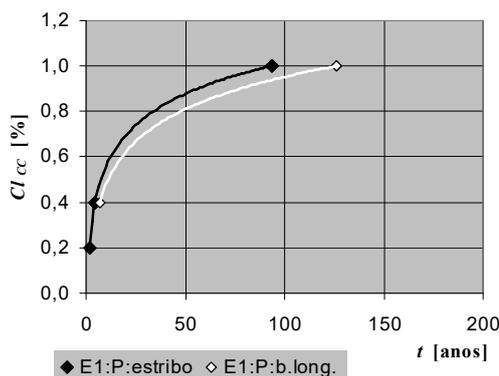


Figura H. 1. Teor de cloreto ao nível das armaduras. E1:P:estribo – Estrutura da etapa 1, pilar, armadura do estribo. E1:P:b.long. – Estrutura da etapa 1, pilar, barra longitudinal.

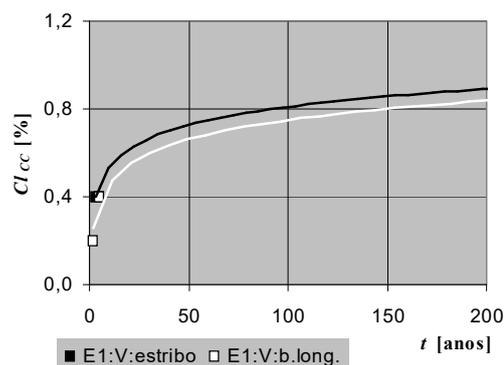


Figura H. 2. Teor de cloreto ao nível das armaduras. E1:V:estribo – Estrutura da etapa 1, viga, armadura do estribo. E1:V:b.long. – Estrutura da etapa 1, viga, barra longitudinal.

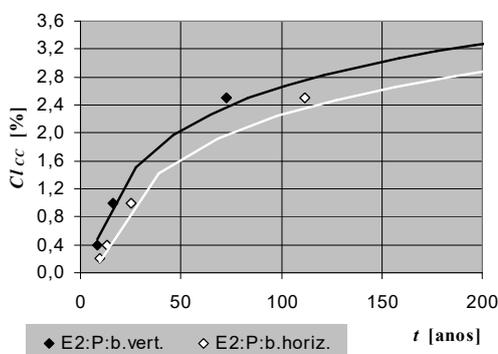


Figura H. 3. Teor de cloreto ao nível das armaduras. E2:P:b.vert. – Estrutura da etapa 2, parede, barra vertical. E2:P:b.horiz. – Estrutura da etapa 2, parede, barra horizontal.

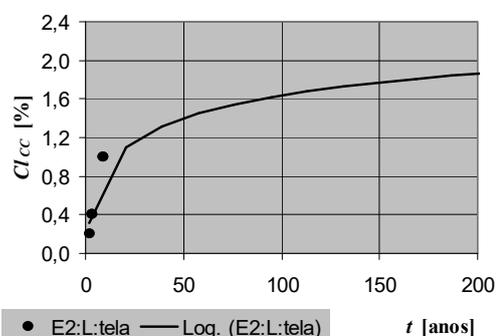


Figura H. 4. Teor de cloreto ao nível das armaduras. E2:L:tela – Estrutura da etapa 2, laje, tela.

De muita utilidade é a determinação das equações matemáticas que descrevem as correlações dos gráficos e permitem a simplificação dos cálculos com ajuda de planilhas eletrônicas, como as do Microsoft Excel ou similares.

Equações determinadas:

As equações determinadas que descrevem o regime de contaminação das armaduras são:

Para E1:P:estribo:	$t = 0,6084 \cdot e^{5,0226Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,1989 \cdot \ln(t) + 0,0994$	$R^2 = 0,9991$
Para E1:P:b.long.:	$t = 0,9711 \cdot e^{4,8656Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,2055 \cdot \ln(t) + 0,006$	$R^2 = 1$
Para E1:V:estribo:	$t = 0,1103 \cdot e^{8,4191Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,1188 \cdot \ln(t) + 0,2618$	$R^2 = 1$
Para E1:V:b.long.:	$t = 0,2798 \cdot e^{7,827Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,1266 \cdot \ln(t) + 0,1667$	$R^2 = 0,9909$
Para E2:P:b.vert.:	$t = 5,0699 \cdot e^{1,1221Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,8877 \cdot \ln(t) - 1,4331$	$R^2 = 0,9962$
Para E2:P:b.horiz.:	$t = 8,3246 \cdot e^{1,0509Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,8882 \cdot \ln(t) - 1,8319$	$R^2 = 0,9966$
Para E2:L:tela.:	$t = 0,7732 \cdot e^{2,9629Cl_{cc}}$	$Cl_{cc} = 0,3324 \cdot \ln(t) + 0,1028$	$R^2 = 9849$

Estas equações são determinadas como linhas de tendências com ajuda de planilhas automáticas de cálculo como por exemplo o programa Microsoft Excel.

H.2.3. Exemplo de cálculo. Passo 2. Estimativa da vida útil de projeto (t_0)

Da Tabela H. 6 extraem-se os mínimos valores de tempo que provocam a despassivação de alguma das armaduras do componente estrutural, valores que correspondem ao período de iniciação considerado como vida útil de projeto.

Tabela H. 7. Vida útil de projeto das estruturas do exemplo.

Etapa	Componente estrutural	t_0 [anos]		Relação (t_0^x/t_0^n)
		Solução com armaduras de:		
		Aço carbono (t_0^n)	Aço inoxidável (t_0^x)	
E1	Pilar (P)	2	94	47
	Viga (V)	2	> 200	> 100
E2	Parede (P)	9	25	3
	Laje (L)	2	17	8

Comentários:

- A vida útil de projeto das armaduras de aço inoxidável resultou ser mais do que 3 vezes maior que a das armaduras de aço carbono em todas as variantes.
- A efetividade do emprego de armaduras de aço inoxidável é maior em concretos menos duráveis ou como proteção adicional para regiões de falhas de projeto ou execução de concretos duráveis.

H.2.4. Exemplo de cálculo. Passo 3. Regime de corrosão no período de propagação

Em cada caso determina-se a quantidade de carga eletroquímica transferida por corrosão em diferentes instantes de tempo ($t > t_0$)

Exemplo do cálculo:

Para E1:P:estribo:

Para armaduras de aço carbono: $t_0 = 1,8$ anos $\rightarrow t = 2; 3; 5; 10$ anos

$$Cl_{CC} = 0,1989 \cdot \ln(t) + 0,0994 \quad \Rightarrow$$

t [anos]	2	3	5	10
Cl_{CC} [%]	0,24	0,32	0,42	0,56
Barra de aço carbono tracionada: $i_{corr}' = -0,1165 Cl_{CC}^2 + 2,5433 Cl_{CC} + 0,1935$				
t [anos]	2	3	5	10
Cl_{CC} [%]	0,24	0,32	0,42	0,56
i_{corr}' [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	0,80	1,00	1,24	1,58
$c_{corr} = i_{corr}'(t - t_{anterior}) + c_{corr anterior} \quad \Rightarrow$				
t [anos]	2	3	5	10
Cl_{CC} [%]	0,24	0,32	0,42	0,56
i_{corr}' [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	0,80	1,00	1,24	1,58
c_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{ano}$]	0,80 (2-1,8)= 0,16	1,00 (3-2)+0,16= 1,16	1,24 (5-3)+1,16= 3,64	1,58 (10-5)+3,64= 11,54

Exemplo de gráficos:

Pilar em zona de respingo

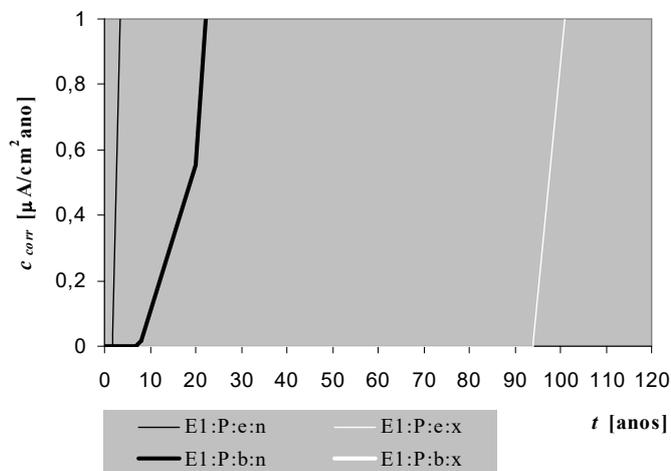


Figura H. 5. Quantidade de carga eletroquímica transferida por corrosão ao longo da vida útil da estrutura. E1:P:e:n – Estrutura da etapa 1, pilar, armadura do estribo, de aço carbono. E1:P:b:n – Estrutura da etapa 1, pilar, barra longitudinal, de aço carbono. E1:V:e:n – Estrutura da etapa 1, viga, armadura do estribo, de aço carbono. E1:V:b:n – Estrutura da etapa 1, viga, armadura longitudinal, de aço carbono. lim n – quantidade

de corrente a partir da qual no aço carbono as perdas de resistência à tração são iguais às perdas de massa (manifestação de corrosão generalizada).

H.2.4. Exemplo de cálculo. Passo 4. Determinação da vida útil de serviço por fissuração ou perda de aderência

Nos gráficos de c_{corr} versus t desenham-se os valores limites de c_{corr}^{lim} por fissuração e aderência (independentes do diâmetro das armaduras)

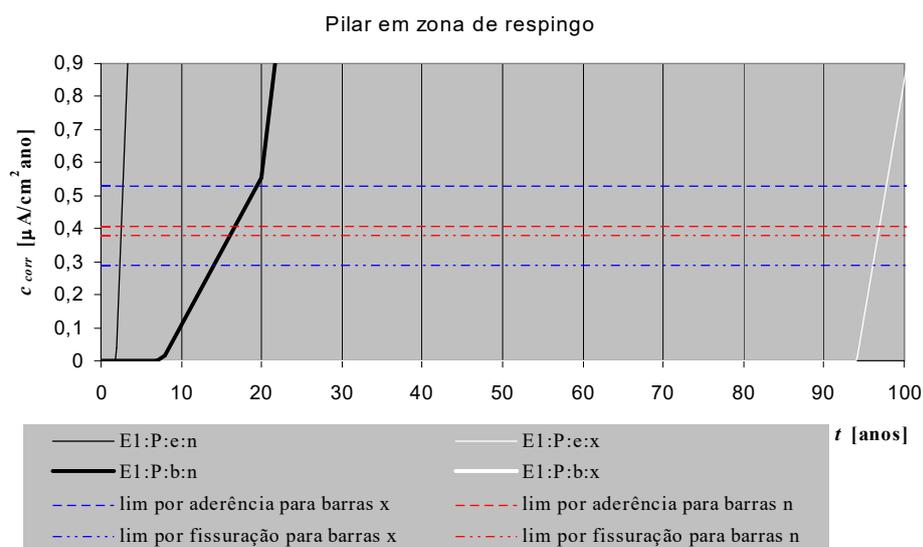


Figura H. 6. Determinação de (t_0+t_1) por fissuração e perda de aderência nas áreas mais críticas do pilar da estrutura marinha da etapa 1.

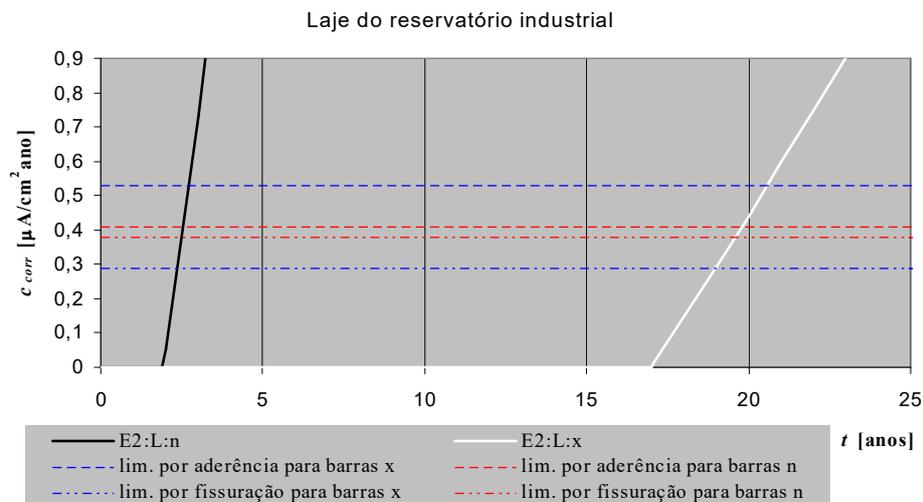


Figura H. 9. Determinação de (t_0+t_1) por fissuração e perda de aderência nas áreas mais críticas da laje do tanque industrial da etapa 2.

Tabela H. 8. Vida útil de serviço por fissuração e por perda de aderência nas áreas mais críticas das estruturas da etapa 1 e 2 do exemplo.

Etapa	Componente	Barra	Tipo de aço	(t_0+t_1) [anos]		
				Por fissuração	Por perda de aderência	
					$\Delta\tau_{bm} = 25\%$	$\Delta\tau_{bm} = 30\%$
Etapa 1	Pilar	Estribo	Carbono	3	3	--
			Inoxidável	96	--	98
		B. long.	Carbono	16	16	--
			Inoxidável	> 200	--	> 200
	Viga	Estribo	Carbono	9	9	--
			Inoxidável	> 200	--	> 200
	B. long.	Carbono	3	3	--	
		Inoxidável	> 200	--	> 200	
Etapa 2	Parede	B. vert.	Carbono	10	12	--
			Inoxidável	> 200	--	> 200
		B. horiz.	Carbono	10	10	--
			Inoxidável	26	--	27
	Laje	Tela	Carbono	2	2	--
			Inoxidável	19	--	21

H.2.5. Exemplo de cálculo. Passo 5. Início da etapa de “saturação” dos pites

Determina-se o instante de tempo t_p a partir do qual as perdas de resistência à tração podem ser consideradas iguais às perdas de massa por corrosão. No exemplo a determinação foi gráfica em curvas iguais as mostradas no Passo 4 (anterior)

Tabela H. 9. Determinação de t_p .

Etapa	Componente	Barra	Tipo de aço	t_p	
Etapa 1	Pilar	Estribo	Carbono	5	
			Inoxidável	120	
	B. long.		Carbono	20	
			Inoxidável	> 200	
	Viga	Estribo		Carbono	15
				Inoxidável	> 200
B. long.			Carbono	5	
			Inoxidável	13	
Etapa 2	Parede	B. vert.		Carbono	15
				Inoxidável	> 200
		B. horiz.		Carbono	13
				Inoxidável	30
	Laje	Tela		Carbono	4
				Inoxidável	22

Onde: t_p = instante de tempo em que a perda da resistência à tração começa a ser igual à perda de massa como na corrosão generalizada, início da etapa de “saturação” dos pites.

H.2.6. Exemplo de cálculo. Passo 6. Regime de deterioração da resistência à tração

Determina-se o regime de deterioração da resistência à tração em dois trechos:

- De t_0 a t_p a perda de resistência à tração atinge o valor de $\Delta f_y'$:

Tipo de aço	Barra	ϕ [mm]	$\Delta f_y'$ [%/%]		
carbono	E1:P:estribo:	10	0,17		
	E1:P:b.long.:				
	E1:V:estribo:				
	E1:V:b.long.:	12	0,12		
	E2:P:b.vert.:				
	E2:P:b.horiz.:			16	0,07
	E2:L:tela.:			6	0,39

Tipo de aço	Barra	ϕ [mm]	$\Delta f_y'$ [%/%]
inoxidável	E1:P:estribo:	10	0,04
	E1:P:b.long.:		
	E1:V:b.long.:		
	E2:P:b.vert.:	12	0,03
	E2:P:b.horiz.:	16	0,02
	E2:L:tela.:	6	0,11

- Para $t > t_p$ a perda de resistência à tração são:

Tipo de aço	Barra	$\Delta f_y'$ [%/%]	
carbono	E1:P:estribo:	$0,17 + 4,75E-4 c_p$	
	E1:P:b.long.:		
	E1:V:estribo:		
	E1:V:b.long.:	$0,12 + 3,96E-4 c_p$	
	E2:P:b.vert.:		
	E2:P:b.horiz.:		$0,07 + 2,97E-4 c_p$
	E2:L:tela.:		$0,39 + 7,92E-4 c_p$

Tipo de aço	Barra	$\Delta f_y'$ [%/%]
inoxidável	E1:P:estribo:	$0,04 + 4,75E-4 c_p$
	E1:P:b.long.:	
	E1:V:b.long.:	
	E2:P:b.vert.:	$0,03 + 3,96E-4 c_p$
	E2:P:b.horiz.:	$0,02 + 2,97E-4 c_p$
	E2:L:tela.:	$0,11 + 7,92E-4 c_p$

Como resultado de avaliar as equações de perda de resistência à tração ao longo do tempo são desenhados os gráficos das figuras a seguir:

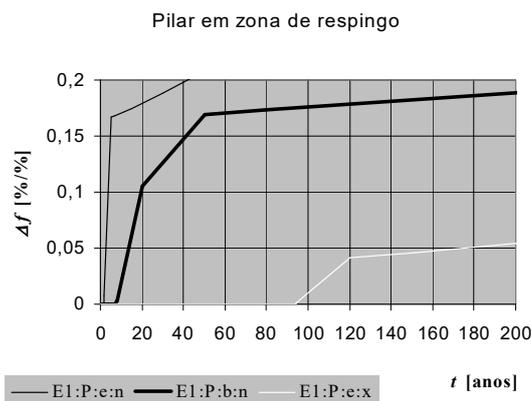


Figura H. 10. Deterioração da resistência à tração com a corrosão. E1:P:e:n; E1:P:b:n – Estrutura da etapa 1, pilar em zona de respingo de maré, armaduras de aço carbono do estribo (e) e da barra longitudinal. E1:P:e:x – ident. com armaduras de aço inoxidável.



Figura H. 11. Deterioração da resistência à tração com a corrosão. E1:V:e:n; E1:V:b:n – Estrutura da etapa 1, viga em zona de névoa marinha, armaduras de aço carbono do estribo (e) e da barra longitudinal. As armaduras de aço inoxidável não despavimam.

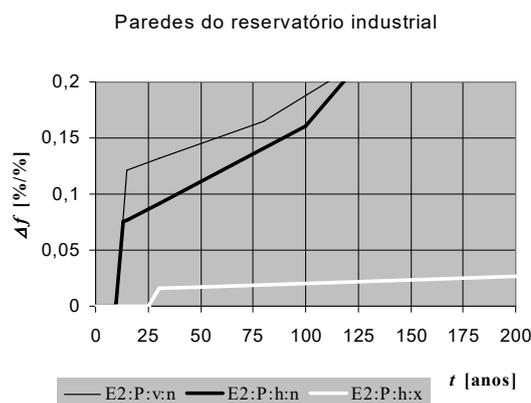


Figura H. 12. Deterioração da resistência à tração com a corrosão. E2:P:v:n; E2:P:h:n – Estrutura da etapa 2, parede de reservatório industrial de cloretos, armaduras de aço carbono verticais (v) e horizontais (h). E2:P:h:x – ident. com armaduras de aço inoxidável.

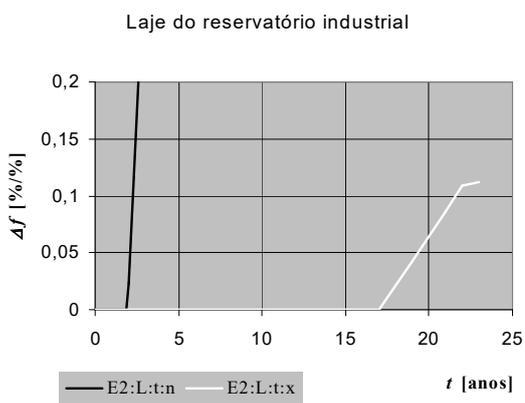


Figura H. 13. Deterioração da resistência à tração com a corrosão. E2:L:t:n; E2:L:t:x – Estrutura da etapa 2, laje de reservatório industrial de cloretos, tela de aço carbono (n) e de aço inoxidável (x).

H.2.7. Exemplo de cálculo. Passo 7. Estimativa da vida útil de serviço e da vida útil total por perda de resistência à tração

Neste exemplo foi proposta uma deterioração admissível do limite de escoamento de 10% para as armaduras de aço carbono e 5% para as armaduras de aço inoxidável menos conhecidas. A deterioração máxima tolerável que define a vida útil total ou estrutural é de 20% do limite de escoamento das armaduras de aço carbono e 10% das armaduras de aço inoxidável. Na Tabela H. 13 resumem-se os valores de vida útil calculados para cada estrutura proposta.

Tabela H. 10. Vida útil de serviço por perda de resistência à tração nas áreas mais críticas das estruturas da etapa 1 e 2 do exemplo.

Etapa	Componente	Barra	Tipo de aço	(t_0+t_1) [anos]		t_f [anos]
				$\Delta f = 5\%$	$\Delta f = 10\%$	$\Delta f = 20\%$
Etapa 1	Pilar	Estribo	Carbono	3	4	40
			Inoxidável	175	> 200	--
		B. long.	Carbono	13	19	> 200
			Inoxidável	200	> 200	--
	Viga	Estribo	Carbono	8	12	> 200
			Inoxidável	> 200	>> 200	--
B. long.		Carbono	3	4	46	
		Inoxidável	> 200	>> 200	--	
Etapa 2	Parede	B. vert.	Carbono	12	14	110
			Inoxidável	> 200	>> 200	--
		B. horiz.	Carbono	12	38	120
			Inoxidável	> 200	>> 200	--
	Laje	Tela	Carbono	2	2	3
			Inoxidável	19	22	--

H.2.8. Exemplo de cálculo. Passo 8. Estimativa da vida útil de serviço e da vida útil total por perda de resistência à tração

Os resultados do cálculo correspondentes a etapa 2 são afetados por coeficientes que tentam ajustar as condições reais de exposição diferentes às dos ensaios laboratoriais. No exemplo não foram considerados os desvios próprios do modelo acelerado de corrosão adotado na pesquisa, nem os desvios próprios dos métodos de medição empregados.

$$(t_0 + t_1)_{\text{local}} = (t_0 K_0 + t_1 K_1) K_g$$

Adoto-se:

$$K_0 = K_1 = 1;$$

$$K_g = (K_{GU} + K_{r.u.} + K_T)/3$$

Onde:

K_{GU} - leva em conta os desvios entre o grau de umidade laboratorial e a real

$K_{r.u.}$ - leva em conta os desvios entre o regime de umidade do concreto laboratorial e o real

K_T - leva em conta os desvios entre a temperatura ambiente laboratorial e a real

Esta proposta de K_g não baseia-se em resultados experimentais, portanto deverá assumir-se apenas como linha de bom senso. Estudos específicos nesta área estão sendo desenvolvido no Instituto Eduardo Torrojas (Madri, Espanha) e na Universidade de Chalmers (Göteborg, Suécia)

Considerou-se que com o aumento do grau de umidade (GU), acima de um certo valor as densidades de corrente de corrosão do aço carbono tendem a diminuir por causa da dificuldade de difusão do oxigênio (HELENE, 1993), por outro lado teores de umidade de equilíbrio baixas significam em pouca disponibilidade de eletrólito e aumento da resistividade do meio e com isto a redução das densidades de corrente de corrosão. Para o aço inoxidável a ausência de oxigênio em elevadas umidades e em presença de cloretos significa em aumento da densidade de corrente de corrosão pela dificuldade de estabilizar a camada de passivação de óxido de cromo. O aumento da temperatura dentro de determinados limites (entre 40° e 70°C para o aço inoxidável) acelera o processo de corrosão, situação que afeta mais ao aço inoxidável (LECKIE e UHLIG, 1966; SARKIS, et al., 1995; ZIVICA, et al. 1997). A redução do regime de umidade ($r.u.$) significa em redução do tempo real em corrosão das armaduras. Em determinados casos, esta situação acelera a corrosão pois em ciclos de molhagem-secagem podem estar se combinando as

condições ideais para o desenvolvimento da corrosão. No caso concreto do reservatório industrial proposto, considera-se que os ciclos são suficientemente cumpridos a fim de provocar a secagem total do concreto e paralisação do processo de corrosão.

Tabela H. 11. Coeficientes de ajuste adotados para o cálculo da vida útil de serviço da estrutura da etapa 2.

Componente estrutural	Ambiente	Tipo de aço	GU	K_{GU}	$r.u.$	$K_{r.u.}$	T	K_T	K_g
Parede	Reservatório industrial	Aço carbono	97%	1,5	50%	1,5	22°C	1,0	1,33
		Aço inoxidável		0,8		2,0		1,0	1,27
Laje	Névoa salina do reservatório	Aço carbono	86%	1,0	50%	1,8	40°C	0,9	1,23
		Aço inoxidável		1,0		2,0		0,5	1,17

Deve ter sido aplicado o coeficiente K_g na etapa 1, este deveria considerar a taxa de concentração das armaduras longitudinais nos pilares e vigas onde as barras podem estar a uma distância igual ao cobrimento (maior nas vigas, elementos que trabalham geralmente só a flexão demandando uma maior quantidade de armadura a ser distribuída na mesma largura que a do pilar). A parcela correspondente a influência da taxa de armadura pode ser denominada K_ω . $K_\omega > 1$ para espaçamentos entre barras menores que a distancia de influência da ação expansiva dos produtos de corrosão formados (a ser determinada).

$$(t_0 + t_1)_{estimada} = \varphi (t_0 + t_1)_{local}$$

Adoto-se o coeficiente φ da Tabela H. 12 ponderando os graus de deterioração admissíveis do exercício expostos no item H.2.1. deste Anexo.

Tabela H. 12. Coeficiente de ajuste (ρ) adotado para a estimativa da vida útil de serviço da estrutura.

Etapa	φ		
	Por fissuração $\varphi(\Delta F)$	Por aderência $\varphi(\Delta\tau_{bm})$	Por perda de resistência à tração $\varphi(\Delta f)$
E1	1,5	2,5	1,0
E2	1,2	2,5	1,0

No tempo de exploração previsto de 120 anos para a estrutura da etapa 1, deverão ser construídas, pelo menos, 3 vezes a variante com aço carbono que deverá ser recuperada 27 vezes durante todo o tempo de exploração. A variante com aço inoxidável poderá resistir todo o tempo de exploração sem intervenção.

No caso da estrutura da etapa 2, com tempo de exploração previsto de 40 anos, a variante da laje com aço carbono se torna inviável, pois cada laje resistiria menos de uma decima parte do tempo de exploração. Precisaria de um aumento do cobrimento do concreto e do aumento do diâmetro de armadura, mesmo que se torne hiper-reforçada. As paredes da variante com aço carbono precisariam de 2 intervenções durante o tempo de exploração. A laje com aço inoxidável resistiria a metade do tempo de exploração. Se recomenda também aumentar o cobrimento de concreto e aumentar o diâmetro da armadura. As paredes com aço inoxidável resistiriam o tempo de exploração sem intervenção.

Tabela H. 13. Valores de vida útil calculados para cada componente estrutural.

Etapa	Tipo de aço	Componente	Barra	Vida útil de serviço										Vida útil estrutural
				Resultado direto do cálculo ($t_0 + t_1$)			Afetada pelos K_g ($t_0 + t_1$) _{local}			Afetada pelo φ ($t_0 + t_1$) _{estimada}				
				ΔF	$\Delta \tau_{bm}$	Δf	ΔF	$\Delta \tau_{bm}$	Δf	ΔF	$\Delta \tau_{bm}$	Δf	min	
Etapa 1	Carbono	Pilar	Estribo	3	3	4	3	3	4	4	8	4	4	40
			B. long.	16	16	19	16	16	19	24	40	19		
		Viga	Estribo	9	9	12	9	9	12	14	22	12	4	46
			B. long.	3	3	4	3	3	4	4	5	4		
	Inoxidável	Pilar	Estribo	96	98	175	96	98	175	144	>200	175	144	>200
			B. long.	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200		
Viga		Estribo	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	
		B. long.	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200			
Etapa 2	Carbono	Parede	B. vert.	12	12	14	16	16	19	19	40	19	16	110
			B. horiz.	10	10	38	13	13	51	16	32	50		
		Laje	Tela	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	3
	Inoxidável	Parede	B. vert.	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	40	>200
			B. horiz.	26	27	>200	33	34	200	40	85	>200		
		Laje	Tela	19	21	19	22	25	22	26	62	22	22	25

Tabela H. 14. Valores de vida útil determinados para cada estrutura.

Etapa	Tipo de aço	Componente	Vida útil de projeto t_0 [anos]	Vida útil de serviço ($t_0 + t_1$) _{estimada} [anos]	Vida útil total t_t [anos]	Intervenções durante t_t considerando $t_{res} = (t_0 + t_1)$ _{estimada}	Tempo de exploração previsto [anos]
Etapa 1	Carbono	Pilar e Viga	2	4	40	9	120
	Inoxidável	Pilar e Viga	94	144	> 200	1	
Etapa 2	Carbono	Parede	9	16	110	6	40
		Laje	2	2	3	1	
	Inoxidável	Parede	25	40	> 200	4	
		Laje	17	22	25	1	

* considerou-se 200 anos como idade limite de previsão.

t_{res} = vida residual após uma intervenção

Comentários finais do exemplo de Vida Útil:

- A vida útil total das variantes com aço inoxidável são de 2 a 8 vezes maiores que as das variantes com aço carbono;
- As variantes com aço inoxidável dispensam intervenções por manutenção e as conseqüentes paralisações para os trabalhos de reparo.

- Com a aplicação dos coeficientes de ajuste fixados para o exemplo a vida útil de serviço é definida nos 50% dos casos pela fissuração e nos outros 50% pela deterioração da resistência à tração. A perda local da aderência perdeu significância na determinação da vida útil de serviço⁷⁸ ;

Tabela H. 15. Número total de construções e intervenções determinados para cada estrutura.

Estrutura	Componente	Tipo de aço	Construção inicial	Número de reconstruções	Número total de construções	Número total de intervenções
Etapa 1	Pilar e Viga	Carbono	1	2	3	27
		Inoxidável	1	0	1	0
Etapa 2	Parede	Carbono	1	0	1	2
		Inoxidável	1	0	1	0
	Laje	Carbono	1	13	14	13
				19*	19	0
	Inoxidável	1	1**	2	0	

* assumindo a reconstrução cada 2 anos.

** assumindo a reconstrução aos 22 anos.

⁷⁸ Em casos de armaduras de ancoragem ou tratando-se de probabilidade de ataque ao trecho de ancoragem de armadura em tração, os coeficientes de ajuste deverão valorizar mais a perda local da aderência que pode significar em perda da capacidade resistente do componente estrutural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, C.J. Corrosion-free concrete structures with stainless steel. **Concrete**, p. 37-42, May., 1997.
- AHMAD,S.; BHATTACHARJEE,B.; WASON,R. Experimental service life prediction of rebar-corroded reinforced concrete structure. **ACI Material Journal**, p. 311-16, Jul./Aug., 1997.
- ALONSO, C. et al. Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producido por la corrosión de las armaduras. **Hormigón y Acero**, n. 194, p. 29-41, 1994.
- AL-SULAIMANI, G.J. et al. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 220-231, Mar./Apr., 1990.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Abstract of state-of-the-art-report: bond under cyclic loads. In: **ACI Materials Journal**, Nov./Dec., 1991. / Abstract /
- _____. Building code requirements for reinforced concrete: reported by ACI Committee 318. In: **ACI Manual of Concrete Practice**. Detroit, ACI, 1992, v. 3. / Report /
- _____. Corrosion of metals in concrete: reported by ACI Committee 222. In: **ACI Manual of Concrete Practice**. Detroit, ACI, 1990. v. 1. / Report /
- _____. Guide to durable concrete: reported by ACI Committee 201. **ACI Material Journal**, v. 88, n. 5, p. 544-82, Sep./Oct., 1991. / Report /
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Standard practice for developing accelerated test to aid prediction of the service life of building components and materials. ASTM E 632-88. In: _____. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, ASTM, 1989.
- _____. Standard practice for repairing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. ASTM G1-88. In: _____. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, ASTM, 1989.
- _____. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C876. In: _____. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, ASTM, 1990.
- _____. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM C 1202-94. In: _____. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, ASTM, 1994.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. Refined methods for the calculation of the design life of reinforced concrete (em CD Rom). In: CONGRESO DE CORROSIÓN NACE – REGIÓN LATINOAMERICANA, 1., Maracaibo, 1994. **Anais**. Maracaibo, PUS, 1994. Cod. 94115.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J.A. Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. **Informes de la Construcción**, v.40, n. 398, p. 7-14, nov./dic., 1988.
- ARAUJO, L.A. **Manual de siderurgia**. São Paulo, Arte & Ciência, 1997. v.2.

ARMINOX. **Pier in Progresso, Mexico**. Yucatán, 1999. (Inspection report evaluation of the stainless steel reinforcement, Job. No 990022), Denmark, Ramboll, 1999. / Report /

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços inoxidáveis. Classificação por composição química**; padronização - NBR 5601. Rio de Janeiro, 1981.

_____. **Agregado. Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo** – NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregado. Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis** – NBR 7218. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregado. Determinação do teor de materiais pulverulentos** – NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregado em estado solto. Determinação da massa unitária** – NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **Agregados. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman** – NBR 9776. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Arame de aço. Ensaio de tração. Método de Ensaio** - NBR 6207. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado** - NBR 7480. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone** - NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **Concreto. Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico** - NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos. Método de ensaio** - NBR 6152. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto** - NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **Fio, barra e cordoalha de aço para armaduras de protensão. Ensaio de tração. Método de ensaio** - NBR 6349. Rio de Janeiro, 1987.

BERKE, N.S. Corrosion inhibitors in concrete. **Concrete International**, p. 24-27, Jul., 1991.

BERTOLINI, L. et al. Stainless steel behavior in simulated concrete pore solution. **Brief Corrosion Journal**, v. 31, n. 3, 1996.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **British standard specification for austenitic stainless steel bars for the reinforcement of concrete** - BS 6744:1986. London, BS, 1986.

BUTZMANN, G. Stainless steel for reinforcing bar. **Focus Rosfrei**, n. 5, p. 11, 1994.

CAIRNS, J.; JONES, K. Influence of rib geometry on strength of lapped joints: an experimental and analytical study. **Magazine of Concrete Research**, v. 47, n. 172, p. 253-62, Sept., 1995.

- CALLAGHAN, B.G. The performance of a 12% chromium steel in concrete in severe marine environments. **Corrosion Science**, v. 35, n. 5, p. 1535 – 41, Aug., 1993.
- CEDINOX. Estudio del ciclo de vida del puente Shaffausen. **Inoxidable**, NiDI, n. 33, p. 7-10, jul., 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÕES DE ESTRUTURAS METÁLICAS. Características gerais do parque siderúrgico brasileiro. **Anuário Estatístico - 1996**, São Paulo, ABCEM, 1997.
- CÁMARA, L.M., LATORRE, P.G-M. Restauración con acero inoxidable. Iglesia de San Martin en Mota Del Marqués. **Inoxidable**, n.2, p. 4-5, 1995.
- CASCUDO, O.; HELENE, P.; FRANCINETE JR., P. Avaliação do comportamento mecânico do concreto de cobrimento a partir da geração dos produtos de corrosão das armaduras. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 1., Florianópolis, 1996. **Anais**. Florianópolis, UFSC/UFRGS/EPUSP, 1996, p. 367-78.
- CLIFTON, J.R. Predicting the service life of concrete. **ACI Material Journal**, p. 611-17, Nov./Dec., 1993.
- COCHRANE, D.J. Making the infrastructure work. In: CONFERENCE - PROCESSES AND MATERIALS: INNOVATION STAINLESS STEEL. s. l. **Proceedings**. v. 1, s. ed., 1993, p. 157 – 162.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **Assessment of concrete structures and design procedures for upgrading** (Redesign). Praga, CEB, 1983. (Bulletin D'Information, 162)
- _____. **Recommendation RILEM/CEB/FIP RC 6: Essais portant sur l'adhérence des armatures du béton 2. Essais par traction**. Paris, CEB, 1978. (Bulletin D'Information No 118)
- _____. **Recommendation RILEM/CEB/FIP RC 5: Bond test for reinforcing steel 1. Beam test**. Paris, CEB, 1978. (Bulletin D'Information No 118)
- CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT POUR LA RECHERCHE L'ETUDE ET LA DOCUMENTATION & RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS. CIB W80 / RILEM 71 – PSL. **On prediction of service life of Building materials and components**. Rotterdam, 1983.
- COX, R.N.; OLDFIELD, J.W. The Long term performance of austenitic stainless steel in chloride contaminated concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE CONSTRUCTION, 4., Cambridge, 1996. **Proceedings**. Cambridge, Royal Society of Chemistry, 1996, p. 662-69.
- DAVINSON, R.M.; DEBOULT, T.; JOHNSON, M.J. Corrosion of stainless steel. **Metals Handbook**. 9. ed., London, MacMillan, 1987.
- ESPAÑA. Ministerio de fomento. Comisión permanente del hormigón. **Instrucción de hormigón estructural**. EHE-99. Madrid, MF, 1999.

- EUROPEAN FEDERATION OF CORROSION. **Stainless steel in concrete – state of the art report**. Nürnberger, U. ed., London, EFC - The Institute of Materials, (Publication n. 18), 1996.
- FARIELLO, L.S., TULA. L. **Avaliação do desempenho de armaduras de aço inoxidável para as estruturas de concreto armado do ponto de vista da aderência armadura/concreto**. São Paulo, FAPESP/USP, 1998 (Relatório de Iniciação Científica, 2., Processo FAPESP n. 97/09539-5).
- FLINT, G.N.; COX, R.N. The resistance of stainless steel partly embedded in concrete to corrosion by seawater. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 142, p. 13 –27, 1988.
- GONZÁLEZ, J.A. et al. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 257-64, 1995.
- GONZALEZ, J.A. et al. On the mechanism of steel corrosion in concrete: the role of oxygen diffusion. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 150, p. 23-27, mar., 1990.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Pini, 1992.
- HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docente) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.; TULA, L.; DIAZ, N. Evaluación y corrección de manifestaciones patológicas - caso de estudio. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONSTRUCCIONES. 5., Montevideo, 1999. **Anais**. Montevideo, IEM, 1999.
- HORNAIN H. et al. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1667-74, 1995.
- HUSSAIN, S.E.; RASHEEDUZZAFAR. Corrosion resistance of fly ash blended cement. **ACI Materials Journal**, v. 91, n. 3, p. 264-72, May/Jun., 1994.
- ISA M.M. **Aderência concreto-armadura: Influência da corrosão e da proteção catódica**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- KOSA, K., NAAMAN, A .E. Corrosion of steel fiber reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 1, Jan./Feb., 1990.
- LAMARCA, R.L.M., TULA L. **Avaliação do desempenho de armaduras de aço inoxidável para as estruturas de concreto armado do ponto de vista da resistência à tração**. São Paulo, FAPESP/USP, 1998, (Relatório de bolsa de iniciação científica, 2., Processo FAPESP, n. 97/03683-7).
- LECKIE, H.P.; UHLIG, H.H. Environmental factors affecting the critical potential for pitting in 18-8 stainless steel. **Journal of Electrochemical Society**, n. 12, p. 1262-67, Dec., 1966.
- LIN, C.Y. Bond deterioration due to corrosion of reinforcing steel. In: ACI CONGRESS. PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENTAL, Florida, 1979. **ACI Special Publication**, SP-65. ACI, Detroit, 1980, p. 255-69.

- LINDVALL, A. Duracrete – Probabilistic performance based durability design of concrete structures (em Internet). In: INTERNATIONAL PHD SYMPOSIUM IN CIVIL ENGINEERING, 2., Budapest, 1998. www.vbt.bme.hu/phdsymp/, 1999.
- MASLEHUDDIN, M. et al. Effect of rusting of reinforcing steel on its mechanical properties and bond with concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 5, p. 496-502, Sept./Oct., 1990.
- McDONALD, D.B. et al. Stainless steel reinforcing as corrosion protection. **Concrete International**, ACI, p. 126-33, May, 1995.
- McGURN, J. Nickel alloys. Some prospects for the future. **Stainless Steel World**, p. 25-26, Oct., 1996.
- NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE. Saving St. Paul's. **Nickel**, NiDI, v. 12, n.1, Autumn, 1996.
- _____. Stainless rebar gaining acceptance. **Nickel**, NiDI, v. 12, n.3, p. 12, Sprint, 1997.
- _____. State of the art: stainless steel reinforcement. **Stainless Steel Focus**, n. 191, p. 12-13, 1997.
- _____. Another stainless rebar project. **Nickel**, NiDI, v. 14, n.2, p. 12, Winter, 1997.
- NÜRNBERGER, U.; BEUL, W.; ONUSEIT, G. Corrosion behavior of welded stainless steel in concrete. **Otto Graf Journal**, v. 4, p. 225 –59, 1993.
- NÜRNBERGER, U. et al. **Stainless steel in concrete – state of the art report**. London, European Federation of Corrosion by The Institute of Materials, 1996.
- PADILHA, A F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos**. São Paulo, s. ed., 1994, p 133-70.
- PANOSSIAN Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo, IPT, 1993.
- PASTORE, T.; PEDEFERRI, P. Corrosion behavior of duplex stainless steel in chloride contaminated concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF STAINLESS STEEL. Chiba, 1991. **Proceedings**. Chiba, ISIJ, 1991, v. 1.
- PEDEFERRI, P. Behavior of stainless steel in the rehabilitation of corrosion damaged infrastructures and effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel (em CDRom). In: NACE LATIN AMERICAN REGION CORROSION CONGRESS, 3., Cancún, 1998. **Proceedings**. Cancún, NACE, 1998. Ref. 9802S3
- POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Houston/Brussels, Cebelcor, 1987.
- RASHEEDUZZAFAR, D.F.H.; BADER, M.A.; KHAN, M.M. Performance of corrosion resisting steel in chloride bearing concrete. **ACI Materials Journal**, v. 89, p. 439 – 48, Sept./Oct., 1992.
- RODRÍGUEZ, J.S. et al. Disminución de la adherencia entre hormigón y barras corrugadas debido a la corrosión. **Hormigón y Acero**, p. 49-64, 4º Trimestre, 1993.

- ROSTAN, S. Service life design - the european approach. **Concrete International**, p. 24-32, Jul., 1993.
- SAGUES, A.; POWERS, R.; ZAYED, A. Marine environment corrosion of epoxy-coated reinforcing steel. In: PAGE, C.L.; TREADWAY, T.W.J. E BAMFORTH, P.B. ed. **Corrosion of Reinforcement in Concrete**, New York, Elsevier Applied Science, 1990.
- SARKIS, P.J. et al. Patologias de reservatórios elevados provocadas por campo de temperaturas. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 27., Tucumán, 1995. **Anais**. Tucumán, UCBA, 1995, p. 295-306.
- SMITH, E.N. The use of stainless steel for concrete reinforcing bars is gaining momentum. **Stainless Steel World**, p. 52-5, Aug. 1998.
- SOMERVILLE, G. Service life prediction - an overview. **Concrete International**, p. 45-49, Nov., 1992.
- SORENSEN, B.; JENSEN, P.B.; MAAHN, E. The corrosion properties of stainless steel reinforcement. In: PAGE, C.L.; TREADAWAY, K.W.J.; BAMFORTH, P.B. ed. **Corrosion of Reinforcement in Concrete**. New York, Elsevier Applied Science, 1990, p. 601 – 10.
- TANAKA, D.K.; WOLYNEC, S.; PANOSSIAN, Z. **Corrosão de aços austeníticos na indústria**. São Paulo, IPT, 1991. (Publicação 1847)
- TICIANELLI, F., TULA L. **Avaliação do desempenho de armaduras de aço inoxidável para as estruturas de concreto armado do ponto de vista da expansibilidade dos produtos de corrosão**. São Paulo, 1998, FAPESP/USP, (Relatório de Iniciação Científica, 2., Processo FAPESP n. 97/05553-3).
- TULA, L.; CASCUDO, O.; HELENE, P. Qualidade das armaduras para estruturas de concreto. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., Porto Alegre, 1996. **Anais**. Porto Alegre, UFRGS/EPUSP, 1996, v. 2, p. 547-54.
- TULA, L.; HELENE, P. Emprego de armaduras inoxidáveis nas estruturas de concreto armado (em CDROM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., Rio de Janeiro, 1998. **Anais**. Rio de Janeiro, IBRACON, 1998. Trabalho 47.
- _____. Redução da aderência de armaduras de aço inoxidável com o avanço da corrosão (em Pôster). In: COLLOQUIA INTERNACIONAL SOBRE CORROSÃO, 2., São José dos Campos, 1999. **Anais**. São José dos Campos, ITA/EPUSP, 1999. / Resumo /
- _____. Reducción de la resistencia a tracción con la corrosión en armaduras de acero inoxidable. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONSTRUCCIONES, 5., Montevideo, 1999. **Anais**. Montevideo, IEM, 1999.
- TULA, L.; HELENE, P.; PANOSSIAN, Z. Evaluación de armaduras inoxidables para el hormigón através del análisis de curvas de polarización (em CDROM). In: NACE LATIN AMERICAN REGION CORROSION CONGRESS, 3., Cancún, 1998. **Proceedings**. Cancun, NACE, 1998. Referência 9838S3
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CIB, n. 4, 1982.

- WALKER, M.J. et al. **Guidance on the use of stainless steel reinforcement – Report of the Concrete Society Steering Committee**, 1998. / Draft paper /
- WOLF, L.M.; SARCHINELLA, R.L.; JIRSA, J.O. Epoxy-coated reinforcement in texas bridge structures. **Structural Engineering International**, n. 4, p. 275-77, 1996.
- ZIVICA, V. et al. Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 2, p. 99-103, 1997.
- ZOOB, A.B; LE CLAIRE, P.J.; PFEIFER, D.W. Corrosion protection tests on reinforced concrete with solid stainless steel reinforcing bars. In: **Joslyng Stainless Steel**. Report Wiss, Janney. Elstner Associates Inc. 1985. / Report /