

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

MAURÍCIO LUIZ GROCHOSKI GARCIA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO
DE SISTEMAS DE REPARO PARA ESTRUTURAS DE
CONCRETO COM CORROSÃO DE ARMADURAS**

CONSULTA
FT-2519
Ed.rev.

São Paulo
2008

MAURÍCIO LUIZ GROCHOSKI GARCIA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO
DE SISTEMAS DE REPARO PARA ESTRUTURAS DE
CONCRETO COM CORROSÃO DE ARMADURAS**

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

São Paulo
2008

MAURÍCIO LUIZ GROCHOSKI GARCIA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO
DE SISTEMAS DE REPARO PARA ESTRUTURAS DE
CONCRETO COM CORROSÃO DE ARMADURAS**

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 e Urbana

Orientador:
Professor Paulo Helene

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de maio de 2008.


Assinatura do autor

Assinatura do orientador



Grochoski Garcia, Maurício Luiz

Avaliação do comportamento eletroquímico de sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras / M.L. Grochoski Garcia. -- São Paulo, 2008. Edição Revisada. 171 p.

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

**1. Concreto (Recuperação) 2. Concreto (Durabilidade)
3. Corrosão de armaduras I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil
II. t.**

Dedico este trabalho aos meus pais, Arnaldo e Cristina, ao meu irmão Eduardo, e a minha namorada Teresa.

Obrigado pela paciência, carinho e estímulo. Sem vocês eu não chegaria até aqui.

"A dúvida é o principio da sabedoria".

Aristóteles

"É preciso que o discípulo da sabedoria tenha o coração grande e corajoso. O fardo é pesado e a viagem longa".

Confúcio

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família pela confiança e incentivo a este rumo que dei a minha vida profissional, principalmente aos meus pais e meu irmão que me incentivaram e com certeza contribuíram para a realização deste feito tão importante para a minha vida.

A Teresa pela paciência e companheirismo nas horas mais difíceis. Obrigado por fazer parte da minha vida.

Ao Professor Paulo Helene pela amizade e confiança que tem me dispensado durante todos estes anos. Pela oportunidade que me foi dada de estudar um tema tão próximo da prática e diretamente aplicável na minha vida profissional. Obrigado por confiar no meu trabalho.

Aos membros da banca examinadora do exame de qualificação (Prof^a Silvia Selmo e Dr Leonel Tula) pelas sugestões e conselhos valiosos para a conclusão do trabalho.

Ao Pedro Castro e Jairo Andrade pelos momentos de discussões agregando idéias e reflexões sobre o tema em estudo.

À Engracia Bartuciotti e Fátima Sanches pelo grande apoio na parte burocrática que envolve o desenvolvimento de um trabalho como este. Especialmente a Engracia Bartuciotti pela força e conselhos aos longos destes anos.

Aos amigos Paulo Barbosa, Marcelo Medeiros, Manuel Grullón, Evandro Bastos, Marcos Mitre, Eliana Monteiro e Fernanda Araújo, companheiros de mesmo orientador. Ao Clóvis Nita e à Andréia Nince, companheiros de sala. Obrigado pelo apoio e ajuda nos momentos em que precisei. Especialmente ao Marcelo Medeiros, amigo e companheiro na redação dos artigos e trabalhos realizados neste período, ao “Manolito” Grullón pela amizade, pelos artigos e viagens compartilhados durante essa jornada, e ao amigo Marcos Mitre, pelas “intermináveis” horas de aconselhamento e apoio.

A todos os colegas da Pós-Graduação, cujos nomes prefiro não citar para não correr o risco de deixar alguém de fora.

A todos os professores do PCC, pela colaboração na minha formação profissional.

Aos funcionários do laboratório Dorval Aguiar, Reginaldo Mariano, João Soares, Mário Takeashi, Renata Monte, Adilson dos Santos e Talita de Almeida, pela ajuda nas horas que necessitei.

*Aos estagiários e alunos de iniciação científica que efetivamente “puseram a mão na massa”:
Guilherme Mafra Machado, Lilian Hiromi Teruya, Carlos Akio Iyama e Marcos Nogueira. Espero
que a semente da pesquisa que foi plantada durante o período em que estivemos juntos, renda
frutos de sucesso e realização profissional para vocês.*

*À FAPESP pelo apoio financeiro, à BASF Construction Chemicals pelo suporte técnico e financeiro, e
à Escola Politécnica da USP por toda a infra-estrutura que me colocou a disposição para que eu
fizesse meu trabalho.*

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | <i>Justificativa e importância do tema.....</i> | <i>1</i> |
| 1.2 | <i>Pesquisadores e Centros de Pesquisa.....</i> | <i>3</i> |
| 1.3 | <i>Objetivos.....</i> | <i>5</i> |
| 1.3.1 | <i>Objetivo.....</i> | <i>5</i> |
| 1.3.2 | <i>Objetivos complementares.....</i> | <i>5</i> |
| 1.4 | <i>Originalidade.....</i> | <i>5</i> |
| 1.5 | <i>Estrutura da Tese.....</i> | <i>6</i> |
| 1.6 | <i>Limitações desta Pesquisa.....</i> | <i>7</i> |
| 2 | Sistemas de Reparo..... | 8 |
| 2.1 | <i>Generalidades.....</i> | <i>8</i> |
| 2.2 | <i>Classificação.....</i> | <i>9</i> |
| 2.3 | <i>Sistemas de reparo.....</i> | <i>12</i> |
| 2.3.1 | <i>Argamassas de reparo, concretos e grautes base cimento Portland.....</i> | <i>12</i> |
| 2.3.2 | <i>Inibidores de corrosão.....</i> | <i>14</i> |
| 2.3.3 | <i>Sistemas formadores de película.....</i> | <i>16</i> |
| 2.3.4 | <i>Sistemas hidrofugantes.....</i> | <i>17</i> |
| 2.3.5 | <i>Proteção catódica.....</i> | <i>18</i> |
| 2.3.6 | <i>Extração eletroquímica de cloretos.....</i> | <i>20</i> |
| 2.3.7 | <i>Recalcalinização.....</i> | <i>20</i> |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4 | <i>Critérios de seleção</i> | 22 |
| 2.5 | <i>Critérios de recebimento e avaliação da durabilidade</i> | 24 |
| 2.5.1 | <i>Ensaio de caracterização</i> | 28 |
| 2.5.2 | <i>Ensaio eletroquímico</i> | 32 |
| 3 | <i>Protótipo estrutural</i> | 42 |
| 3.1 | <i>Histórico do protótipo estrutural</i> | 42 |
| 3.2 | <i>Inspeção preliminar</i> | 44 |
| 3.3 | <i>Inspeção detalhada</i> | 46 |
| 3.3.1 | <i>Localização das armaduras</i> | 46 |
| 3.3.2 | <i>Extração de testemunhos</i> | 49 |
| 3.3.3 | <i>Carbonatação</i> | 55 |
| 3.4 | <i>Parecer final acerca da situação inicial do protótipo estrutural</i> | 58 |
| 4 | <i>Programa Experimental</i> | 60 |
| 4.1 | <i>Ensaio realizado em campo</i> | 60 |
| 4.1.1 | <i>Impregnação da estrutura com cloretos</i> | 61 |
| 4.1.2 | <i>Determinação dos locais de monitoramento e das áreas de reparo</i> | 64 |
| 4.1.3 | <i>Metodologia de execução dos reparos</i> | 71 |
| 4.1.4 | <i>Metodologia de execução dos ensaios e critérios para a avaliação da corrosão</i> | 71 |
| 4.2 | <i>Ensaio realizado em laboratório</i> | 73 |
| 4.2.1 | <i>Procedimentos gerais</i> | 75 |
| 4.2.2 | <i>Corpos-de-prova utilizados nos ensaios eletroquímicos</i> | 76 |
| 4.2.3 | <i>Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de caracterização física</i> | 82 |
| 4.2.4 | <i>Tipos de exposição</i> | 82 |
| 4.2.5 | <i>Metodologia de execução dos ensaios e critérios para a avaliação da corrosão</i> | 83 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.6 | <i>Metodologia de execução dos ensaios de caracterização das argamassas de reparo</i> | 84 |
| 4.3 | <i>Materiais utilizados</i> | 86 |
| 4.3.1 | <i>Materiais dosados em laboratório – argamassas</i> | 86 |
| 4.3.2 | <i>Argamassas industrializadas</i> | 88 |
| 4.3.3 | <i>Pinturas de revestimento para armaduras</i> | 88 |
| 4.3.4 | <i>Inibidor de corrosão por aspersão</i> | 89 |
| 4.4 | <i>Variáveis dependentes, independentes e intervenientes</i> | 89 |
| 5 | <i>Resultados</i> | 91 |
| 5.1 | <i>Caracterização das argamassas</i> | 91 |
| 5.1.1 | <i>Ensaio no estado fresco</i> | 91 |
| 5.1.2 | <i>Absorção capilar</i> | 93 |
| 5.1.3 | <i>Migração de cloretos</i> | 96 |
| 5.1.4 | <i>Propriedades mecânicas</i> | 98 |
| 5.2 | <i>Ensaio realizado em laboratório</i> | 101 |
| 5.2.1 | <i>Ciclos de molhamento e secagem – 1ª Fase</i> | 101 |
| 5.2.2 | <i>Pré-contaminação com CaCl₂ – 2ª Fase</i> | 114 |
| 5.2.3 | <i>Em solução</i> | 117 |
| 5.3 | <i>Ensaio realizado em campo</i> | 123 |
| 5.3.1 | <i>Argamassa de referência (Ref035)</i> | 125 |
| 5.3.2 | <i>Argamassa industrializada sem inibidor (A.I. s/ Inib.)</i> | 130 |
| 5.3.3 | <i>Argamassa industrializada com inibidor (A.I. c/ Inib.)</i> | 135 |
| 5.3.4 | <i>Argamassa de referência + primer cimentício rico em inibidor de corrosão (Ref035 + PCI)</i> | 140 |
| 5.3.5 | <i>Argamassa de referência + inibidor de corrosão por aspersão (Ref035 + CIT)</i> | 144 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.3.6 | <i>Argamassa de referência + primer rico em zinco (Ref035 + ZP)</i> | 148 |
| 5.3.7 | <i>Análise comparativa entre sistemas</i> | 153 |
| 6 | <i>Conclusões</i> | 159 |
| 6.1 | <i>Conclusões propriamente ditas</i> | 159 |
| 6.2 | <i>Transferência dos resultados ao meio</i> | 161 |
| 6.3 | <i>Sugestões para trabalhos futuros</i> | 163 |
| 7 | <i>Referências Bibliográficas</i> | 164 |

ANEXO

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| <i>Figura 2-1 – Seqüência lógica de uma reabilitação de estrutura (adaptado de RED REHABILITAR, 2003).</i> | 9 |
| <i>Figura 2-2 – Esquema simplificado das diferentes formas de polarização promovidas pelos inibidores de corrosão (adaptado de LIMA, 1996).</i> | 15 |
| <i>Figura 2-3 – Esquema de aplicação do sistema de proteção catódica por corrente impressa (TULA & HELENE, 2001).</i> | 19 |
| <i>Figura 2-4 – Exemplo de um ânodo de sacrifício na forma de malha, aplicado em uma estrutura real (GONÇALVEZ et AL., 2003).</i> | 19 |
| <i>Figura 2-5 – Mecanismo de funcionamento do método de realcalinização passiva (ARAÚJO, 2004).</i> | 21 |
| <i>Figura 2-6 – Esquema simplificado do método de realcalinização eletroquímica (ARAÚJO, F. W. C., 2004).</i> | 22 |
| <i>Figura 2-7 – (a) Representação esquemática do funcionamento do ensaio de resistividade elétrica (Gowers & Millard, 1999); (b) ensaio em um corpo-de-prova de concreto.</i> | 34 |
| <i>Figura 2-8 – Curva de polarização anódica e catódica</i> | 35 |
| <i>Figura 2-9 – Comparação entre as taxas de corrosão de diversos autores (BROOMFIELD, 1991 citado por GONZÁLEZ et AL., 1996).</i> | 37 |
| <i>Figura 2-10 – Transiente de reposta típico para o método do pulso galvanostático.</i> | 39 |
| <i>Figura 3-1 – Foto da fachada da edificação de onde foi retirada a grelha que constitui o protótipo estrutural.</i> | 43 |
| <i>Figura 3-2 - Localização original das grelhas na estrutura de origem.</i> | 43 |
| <i>Figura 3-3 – Estrutura real composta de duas grelhas de concreto armado.</i> | 44 |
| <i>Figura 3-4 – Dimensões das longarinas e transversinas.</i> | 44 |
| <i>Figura 3-5 - Exemplos do estado de deterioração do protótipo.</i> | 45 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 3-6 – Detalhe da locação das armaduras e determinação do cobrimento de concreto.</i> | <i>47</i> |
| <i>Figura 3-7 – Freqüência acumulada do cobrimento de concreto no protótipo estrutural.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 3-8 – Extração de testemunhos para caracterização das propriedades do protótipo estrutural.</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 3-9 – Detalhe da extração de testemunhos.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 3-10 – Detalhe dos testemunhos extraídos.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 3-11 – Resultado da análise de variância realizada entre os grupos de resultados de resistência à compressão realizado em testemunhos extraídos de nervuras finas e nervuras grossas do protótipo estrutural.</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 3-12 – Absorção capilar dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 3-13 – Resultados da análise de variância dos resultados de absorção por imersão (índice de vazios) para os testemunhos extraídos do protótipo estrutural.</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 3-14 – Índice de vazios dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 3-15 – Análise de variância dos resultados do ensaio de espessura de carbonatação.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 3-16 – Espessura de carbonatação no protótipo em diferentes alturas.</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 3-17 – Ensaio de carbonatação realizado no local do corte do protótipo estrutural. A redução acentuada do núcleo não carbonatado no ponto (a) com relação ao ponto (b) sugere a lixiviação do concreto neste ponto (a).....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 4-1 – Detalhe da aspersão de solução de cloretos (5%) no protótipo estrutural.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 4-2 – Valores dos potenciais de corrosão na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 4-3 – Valores da resistividade elétrica na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 4-4 – Leituras de potencial em uma das faces do protótipo estrutural em três momentos distintos.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 4-5 – Potenciais de corrosão agrupados segundo a sua recorrência na estrutura.</i> | <i>66</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 4-6 – Desenho esquemático do protótipo estrutural. Em azul claro estão representadas as superfícies de Controle. Na parte restante, nota-se a localização dos diferentes sistemas empregados.</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 4-7 – Detalhe da aplicação dos diversos sistemas de reparo em um trecho do protótipo estrutural.</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 4-8 – Esquema de distribuição dos pontos de leitura nas transversinas.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 4-9 – Esquema de distribuição dos pontos de leitura nas longarinas.</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 4-10 – Esquema ilustrativo do formato e das dimensões dos corpos-de-prova.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 4-11 – Esquema ilustrativo da configuração dos corpos-de-prova, levando em consideração as alterações necessárias para a realização dos ensaios eletroquímicos.</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 4-12 – Detalhe do corpo-de-prova pronto para iniciar os ciclos de contaminação acelerada.</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura 4-13 – Corpo-de-prova utilizado para avaliação da resistência à corrosão dos sistemas de reparo em meio aquoso.</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura 4-14 – Distribuição granulométrica da areia empregada nos materiais dosados em laboratório.</i> | <i>88</i> |
| <i>Figura 5-1 – Consistência das argamassas estudadas.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura 5-2 – Massa específica das argamassas estudadas.</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura 5-3 – Absorção capilar das argamassas estudadas.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figura 5-4 – Ascensão capilar da água no interior dos corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de absorção capilar.</i> | <i>95</i> |
| <i>Figura 5-5 – Perfil de penetração de cloretos típico na argamassa Ref035. Os cantos escuros no topo do CP indicam os locais onde não existe cloretos em quantidade detectável pelo método colorimétrico. Este comportamento se deve ao contato da célula de ensaio com o CP nesta região, impedindo o fluxo de íons nesta região.</i> | <i>97</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 5-6 – Perfil de penetração de cloretos típico nas argamassas industrializadas (A.I. s/ Inib. e A.I. c/ Inib.).....</i> | <i>98</i> |
| <i>Figura 5-7 – Resistência à compressão axial das argamassas estudadas.....</i> | <i>99</i> |
| <i>Figura 5-8 – Resistência à tração na flexão das argamassas estudadas.</i> | <i>100</i> |
| <i>Figura 5-9 – Módulo de elasticidade das argamassas estudadas.</i> | <i>101</i> |
| <i>Figura 5-10 – Potenciais de corrosão médios dos sistemas de reparo analisados submetidos aos ciclos de molhamento e secagem. Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91. Cada ciclo de molhamento e secagem dura 1 semana.</i> | <i>102</i> |
| <i>Figura 5-11 – Gráfico de Bode das argamassas de reparo analisadas na 1ª fase (leitura inicial). .</i> | <i>103</i> |
| <i>Figura 5-12 – Gráfico de Nyquist das argamassas de reparo analisadas na 1ª fase (leitura inicial).</i> | <i>104</i> |
| <i>Figura 5-13 – Gráfico de Bode (módulo da impedância versus frequência) das argamassas estudadas na 1ª fase.</i> | <i>105</i> |
| <i>Figura 5-14 – Gráfico de Bode (ângulo de fase versus frequência) das argamassas estudadas na 1ª fase.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Figura 5-15 – Gráfico de Nyquist das argamassas estudadas na 1ª fase.</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura 5-16 – Gráfico de Bode das argamassas estudadas na 1ª fase (leitura do 90º ciclo).....</i> | <i>109</i> |
| <i>Figura 5-17 – Gráfico de Nyquist das argamassas estudadas na 1ª fase (leitura do 90º ciclo).....</i> | <i>109</i> |
| <i>Figura 5-18 – Análise de variância dos valores de penetração de cloretos das argamassas estudadas na 1ª fase.</i> | <i>111</i> |
| <i>Figura 5-19 – Valores médios da penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase e intervalo de confiança de 95%.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Figura 5-20 – Perfil de penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase, determinado pelo método colorimétrico.....</i> | <i>113</i> |
| <i>Figura 5-21 – Potenciais de corrosão médios dos sistemas de reparo pré-contaminados. Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91.</i> | <i>115</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 5-22 – Diferença entre as médias dos potenciais de corrosão dos sistemas de reparo com a adição de sal e sem a adição de sal.</i> | <i>116</i> |
| <i>Figura 5-23 – Potencial de corrosão das barras imersas em solução saturada de Ca(OH)_2 c/ 2,5g/L de NaCl. Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91.</i> | <i>117</i> |
| <i>Figura 5-24 – Intensidade de corrosão das barras imersas em solução, obtidas pelo ensaio de resistência de polarização linear. As faixas de intensidade de corrosão representados no gráfico seguem os valores propostos por Andrade (1988).</i> | <i>118</i> |
| <i>Figura 5-25 – Intensidade de corrosão normalizada com relação ao valor de corrosão da referência + sal aos 200 dias de exposição.</i> | <i>119</i> |
| <i>Figura 5-26 – Gráfico de Nyquist das barras imersas em solução.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Figura 5-27 – Gráfico de Bode das barras imersas em solução.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Figura 5-28 – Dados climáticos da região onde se encontra o protótipo estrutural.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Figura 5-29 – Evolução do potencial de corrosão da região de controle segundo a sua orientação.</i> | <i>124</i> |
| <i>Figura 5-30 – Evolução da intensidade de corrosão da região de controle segundo sua orientação. Os As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).....</i> | <i>125</i> |
| <i>Figura 5-31 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035.</i> | <i>126</i> |
| <i>Figura 5-32 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035.</i> | <i>127</i> |
| <i>Figura 5-33 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035.</i> | <i>128</i> |
| <i>Figura 5-34 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).....</i> | <i>128</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 5-35 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>129</i> |
| <i>Figura 5-36 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035.</i> | <i>130</i> |
| <i>Figura 5-37 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. s/ Inib.</i> | <i>131</i> |
| <i>Figura 5-38 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema A.I. s/ Inib.</i> | <i>132</i> |
| <i>Figura 5-39 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. s/ Inib.</i> | <i>132</i> |
| <i>Figura 5-40 – Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema A.I. s/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>133</i> |
| <i>Figura 5-41 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. s/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>134</i> |
| <i>Figura 5-42 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. s/ Inib.</i> | <i>134</i> |
| <i>Figura 5-43 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. c/ Inib.</i> | <i>136</i> |
| <i>Figura 5-44 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema A.I. c/ Inib.</i> | <i>137</i> |
| <i>Figura 5-45 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. c/ Inib.</i> | <i>137</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 5-46 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema A.I. c/ Inib.. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>138</i> |
| <i>Figura 5-47 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I c/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002)..</i> | <i>139</i> |
| <i>Figura 5-48 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. c/ Inib.</i> | <i>139</i> |
| <i>Figura 5-49 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+PCI.</i> | <i>140</i> |
| <i>Figura 5-50 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+PCI.</i> | <i>141</i> |
| <i>Figura 5-51 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+PCI.</i> | <i>141</i> |
| <i>Figura 5-52 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+PCI. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>142</i> |
| <i>Figura 5-53 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+PCI. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002)..</i> | <i>143</i> |
| <i>Figura 5-54 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+PCI.</i> | <i>143</i> |
| <i>Figura 5-55 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural repara com sistema Ref035+CIT.</i> | <i>144</i> |
| <i>Figura 5-56 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+CIT.</i> | <i>145</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 5-57 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+CIT.</i> | <i>145</i> |
| <i>Figura 5-58 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+CIT. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>146</i> |
| <i>Figura 5-59 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural repara com sistema Ref035+CIT. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>147</i> |
| <i>Figura 5-60 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+CIT.</i> | <i>147</i> |
| <i>Figura 5-61 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+ZP.</i> | <i>149</i> |
| <i>Figura 5-62 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+ZP.</i> | <i>150</i> |
| <i>Figura 5-63 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+ZP.</i> | <i>150</i> |
| <i>Figura 5-64 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+ZP. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>151</i> |
| <i>Figura 5-65 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural repara com sistema Ref035+ZP. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).</i> | <i>152</i> |
| <i>Figura 5-66 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+ZP.</i> | <i>152</i> |
| <i>Figura 5-67 – Relação entre o valor do potencial de corrosão médio obtido na última leitura (Nov/2007) e o valor obtido na leitura inicial (Nov/2005 [-100%]). A linha pontilhada representa a relação obtida para a região de controle.</i> | <i>154</i> |

Figura 5-68 – Relação entre o valor da intensidade de corrosão média obtido na última leitura (Nov/2007) e o valor obtido na leitura inicial (Nov/2005). A linha pontilhada representa a relação obtida para a região de controle. 155

Figura 5-69 – Potenciais de corrosão médios medidos após 2 anos do início do monitoramento do protótipo (Nov/2007). A linha pontilhada representa o valor médio na região de controle. 156

Figura 5-70 – Valores de intensidade de corrosão médios medidos após 2 anos do início do monitoramento do protótipo (Nov/2007). As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002). A linha pontilhada representa o valor médio na região de controle. 157

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| <i>Tabela 1-1 – Valores gastos com a construção de novas obras e a manutenção e reparo das existentes (adaptado de UEDA, 2007).</i> | 1 |
| <i>Tabela 2-1 – Metodologias e métodos de ensaio para avaliação do desenvolvimento da corrosão em diversos materiais/sistemas de reparo (adaptado de HELENE, 1993).</i> | 26 |
| <i>Tabela 2-2 – Resumo das propriedades físico-mecânicas e a sua relação com o desempenho dos materiais/sistemas de reparo.</i> | 29 |
| <i>Tabela 2-3 – Classificação da taxa de corrosão em função do i_{corr} (FRØLUND ET AL., 2002).</i> | 40 |
| <i>Tabela 3-1 – Valor do cobrimento de concreto do protótipo estrutural.</i> | 48 |
| <i>Tabela 3-2 – Dados do ensaio de resistência à compressão realizado nos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.</i> | 51 |
| <i>Tabela 3-3 – Coeficientes de variação envolvidos nos processos de produção, ensaio e controle de concretos (adaptado de HELENE & TERZIAN, 1992)</i> | 52 |
| <i>Tabela 3-4 – Dados do ensaio de índice de vazios dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.</i> | 53 |
| <i>Tabela 3-5 – Espessura de carbonatação média do protótipo estrutural.</i> | 56 |
| <i>Tabela 4-1 – Resumo dos parâmetros eletroquímicos na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.</i> | 64 |
| <i>Tabela 4-2 – Valore médios do teor de cloretos com relação à massa de cimento para a faixa de profundidade de 2,0 a 2,5 cm.</i> | 64 |
| <i>Tabela 4-3 – Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão segundo a ASTM C 876-91 (1999)</i> | 73 |
| <i>Tabela 4-4 – Classificação da taxa de corrosão em função do i_{corr} (FRØLUND et AL., 2002)</i> | 73 |
| <i>Tabela 4-5 – Procedimentos de mistura adotados.</i> | 76 |
| <i>Tabela 4-6 – Parâmetros utilizados na espectrometria de impedância eletroquímica.</i> | 84 |

| | |
|---|-----|
| <i>Tabela 4-7 – Quantidade de materiais empregados na argamassa Ref029.</i> | 86 |
| <i>Tabela 4-8 – Quantidade de materiais empregados na argamassa Ref035.</i> | 87 |
| <i>Tabela 4-9 – Variáveis dependentes, independentes e intervenientes.</i> | 90 |
| <i>Tabela 5-1 – Valores teóricos de massa específica das argamassas dosadas em laboratório e valores estimados de ar aprisionado.</i> | 93 |
| <i>Tabela 5-2 – Altura da ascensão capilar da água no interior dos corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de absorção capilar.</i> | 95 |
| <i>Tabela 5-3 – Classificação das argamassas estudadas segundo a ASTM C 1202.</i> | 96 |
| <i>Tabela 5-4 – Profundidade média de penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase.</i> | 111 |
| <i>Tabela 5-5 – Resumo da avaliação dos sistemas reparo, suas características principais de desempenho e sua adequabilidade à situação em estudo.</i> | 158 |

RESUMO

A cada dia os custos econômicos e sociais da corrosão de armaduras nas estruturas de concreto armado têm se tornado mais significativos nas economias dos países, tanto desenvolvidos, quanto em desenvolvimento. Em 2004, a Alemanha gastou aproximadamente 90 bilhões de euros com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado, o correspondente a 50% do total gasto na construção civil deste país. Essa parcela é ainda maior no caso da Itália, onde chega a 57% (UEDA & TAKEWAKA, 2007). Esses gastos mostram o crescimento do mercado mundial de reparo e proteção de estruturas de concreto. Esse mercado já conta com várias soluções disponíveis e a cada dia novos produtos surgem, e outros tantos estão em estudo, seja para a prevenção ou para terapia da corrosão. Diante dessa gama de produtos e sistemas para prevenção e reparo, os engenheiros responsáveis por prescrevê-los para as obras de recuperação, reforço e proteção, precisam conhecer adequadamente o seu comportamento e sua real eficácia, ou seja, precisam dispor de metodologias para bem avaliar a viabilidade técnica e econômica dos sistemas e dos produtos disponíveis.

O estudo desenvolvido durante esta tese procurou, de forma bastante abrangente, avaliar o comportamento eletroquímico, em campo e em laboratório, de seis diferentes sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras, com características bastante distintas. Em campo foi proposto e aplicado um método de avaliação e comparação destes sistemas, utilizando como parâmetros o potencial e a intensidade de corrosão. Em laboratório, além destes parâmetros eletroquímicos, outros parâmetros físicos e mecânicos também foram avaliados.

Os resultados obtidos em campo mostraram tendências de comportamento dos sistemas de reparo avaliados, que, apesar do prazo curto para a realização do experimento (2 anos), permitiram extrair algumas informações importantes acerca do comportamento destes na situação real de uso. Foi possível, através dos resultados obtidos, identificar qual o sistema mais adequado para a situação avaliada, a argamassa industrializada com inibidor. Já a argamassa industrializada sem inibidor e o inibidor por aspersão não se mostraram adequados para esta situação, devendo ser evitados neste caso específico. Os demais apresentaram tendências de melhoria nos parâmetros

eletroquímicos, podendo ser utilizados nesta situação. Esses resultados mostram que o método de avaliação aqui proposto é bastante promissor.

Os resultados de laboratório, além de contribuírem para o entendimento do comportamento dos diferentes sistemas, mostraram a complexidade da avaliação dos sistemas de reparo e a necessidade de consideração das variáveis importantes no problema. Os ensaios de caracterização física apresentaram uma boa correlação com o comportamento eletroquímico dos sistemas avaliados, sendo seu uso bastante recomendável. O ciclo de molhamento e secagem utilizado apresentou deficiência do ponto de vista da velocidade de contaminação dos corpos-de-prova, devendo ser modificado. O ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica mostrou-se bastante útil na avaliação do comportamento eletroquímico dos sistemas de reparo avaliados, disponibilizando informações preciosas sobre estes, como o efeito da hidratação das argamassas ao longo do tempo. Com relação aos sistemas de reparo, os resultados mostram claramente a diferença de comportamento das argamassas industrializadas e a de referência, onde as industrializadas apresentam um desempenho potencial mais elevado. O primer cimentício com polímeros e inibidores de corrosão também apresenta desempenho satisfatório, assim como as argamassas de reparo. Já o sistema de proteção catódica (primer rico em zinco) não apresentou o desempenho esperado no estudo, não sendo possível verificar a efetividade da proteção catódica. Quanto ao inibidor de corrosão por aspersão utilizado na presente pesquisa, os resultados mostram a inadequação deste a estruturas carbonatadas.

ABSTRACT

Social and economic costs due to reinforcement corrosion are becoming even more significant all over the world, in developed and developing countries. In 2004, Germany has spent approximately 90 billion euros with maintenance and repair of concrete structures, what corresponds to 50% of all money spent on Germany's civil construction sector. In Italy, this percentage is even greater, reaching 57% (UEDA & TAKEWAKA, 2007). These facts show an increase on the world market of maintenance and repair of concrete structures. There are already many maintenance and repair solutions available and more solutions are being released every day. Due to this great diversity of solutions, the engineer responsible for recommending their use must know properly their behavior and real efficiency.

This study aimed to evaluate the electrochemical behavior of six different repair systems for concrete with reinforcement corrosion, on-site and in laboratory. On site, an evaluation and comparison method based on corrosion potential and intensity was proposed and applied. In laboratory, besides these parameters, physical and mechanical ones were also evaluated.

Despite the experiment's short duration (2 years), the on-site results showed interesting behavior trends for the evaluated systems, allowing some important information to be extracted. Based on the tests results, it was possible to determinate wich repair system was the most suitable for the studied situation: the industrialized repair mortar with corrosion inhibitors. In this specific case, the industrialized repair mortar without corrosion inhibitors, and the migrating corrosion inhibitor have shown themselves inadequate. The remaining repair systems have shown corrosion reduction trends, thus they can be also used in this specific situation. Nevertheless, the proposed method has showed itself to be very promising.

The results obtained in laboratory have made great contribution on understanding the repair system's behavior. Furthermore they showed the complexity of this theme and the necessity of considering all playing variables. The physical characterization's tests have shown great correlation with the electrochemical behavior of all analysed repair systems, what make its use

very recommendable. The wet-and-dry cycles used in this study presented deficiency on the probes contamination process, being unable to achieve the desired contamination grade in a short time. Alternative wet-and-dry cycles should be researched. The electrochemical impedance spectroscopy test presented very useful information about the electrochemical behavior of the repair systems, as for example, the mortar's hydration process through time. Comparing the electrochemical behavior, the industrialized mortars have shown a performance potencial greater than the reference one. The cement based primer has also shown a satisfactory performance, as the repair mortars. The zinc primer has not presented the expected behavior where any indicative of the cathodic protection could not be found. About the migrating corrosion inhibitor used in this research, the results have shown its inadequacy to carbonated concrete structures.

1 Introdução

1.1 Justificativa e importância do tema

O mercado mundial de reparo e proteção de estruturas de concreto armado vem crescendo o que demonstra de forma indireta que os custos econômicos e sociais da corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado e pretendido estão cada vez mais presentes nas economias dos países tanto desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

Em 2004, somente a Alemanha gastou aproximadamente 90 bilhões de euros com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado (UEDA & TAKEWAKA, 2007). Além disso, a parcela dos gastos realizados com reparos e manutenção frente ao total gasto pela indústria da construção civil é em muitos países superior a 15%, podendo chegar a superar o montante gasto com construções novas, como é o caso da Itália, onde a parcela dos gastos com manutenção e reparo chega a 57% (UEDA & TAKEWAKA, 2007). A Tabela 1-1 mostra os gastos com a construção civil para diversos países.

Tabela 1-1 – Valores gastos com a construção de novas obras e a manutenção e reparo das existentes (adaptado de UEDA, 2007).

| País | Novas estruturas | Trabalhos de manutenção e reparo | Total de gastos com a construção civil |
|--------------------|--|---|---|
| <i>Japão</i> | <i>52,5 trilhões de ienes (83%)</i> | <i>10,7 trilhões de ienes (17%)</i> | <i>63,2 trilhões de ienes (100%)</i> |
| <i>Coréia</i> | <i>116,8 trilhões de wones (85%)</i> | <i>21,1 trilhões de wones (15%)</i> | <i>137,9 trilhões de wones (100%)</i> |
| <i>França</i> | <i>85,6 bilhões de euros (52%)</i> | <i>79,6 bilhões de euros (48%)</i> | <i>165,2 bilhões de euros (100%)</i> |
| <i>Alemanha</i> | <i>99,7 bilhões de euros (50%)</i> | <i>99,0 bilhões de euros (50%)</i> | <i>198,7 bilhões de euros (100%)</i> |
| <i>Itália</i> | <i>58,6 bilhões de euros (43%)</i> | <i>76,8 bilhões de euros (57%)</i> | <i>135,4 bilhões de euros (100%)</i> |
| <i>Reino Unido</i> | <i>60,7 bilhões de libras (50%)</i> | <i>61,2 bilhões de libras (50%)</i> | <i>121,9 bilhões de libras (100%)</i> |

Além dos custos diretos, existem os custos sociais e os custos econômicos indiretos que são mais complexos de avaliar e não constam das estatísticas, sendo na maioria das vezes impossíveis de serem contabilizados com precisão, e em alguns casos irressarcíveis.

As estruturas de concreto têm potencial para apresentarem vida útil muito superior a 50 anos, porém observa-se que estão deteriorando-se precocemente até antes disso. Já aos dez, quinze anos, exigem intervenção corretiva significativa por razões de corrosão das armaduras. Sendo a estrutura de concreto armado o mais freqüente e principal sistema utilizado na construção dos edifícios e da infra-estrutura no mundo atual, deficiências no conhecimento dos materiais, na sua concepção, projeto, construção e manutenção, podem resultar em grandes perdas diretas e indiretas para a sociedade.

Embora a corrosão de armadura seja, em geral, um processo lento, até o colapso de estruturas tem ocorrido, por negligência ou desconhecimento da gravidade do problema por parte dos proprietários.

Como exemplo de ruína de estruturas, cita-se o caso clássico do colapso da Silver Bridge sobre o Rio Ohio, Ohio, EUA em dezembro de 1967, com a morte de mais de 40 pessoas (GENTIL, 1987; FONTANA, 1987) e o caso da Ponte do Socorro, suporte das tubulações de água potável de abastecimento de grande parte da cidade de São Paulo, que deixou mais de 3 milhões de pessoas sem água por cerca de quinze dias sem falar nas inúmeras quedas de marquizes com elevada perda de vidas humanas (MEDEIROS & GROCHOSKI, 2007).

Do ponto de vista técnico, vários estudos têm sido desenvolvidos para explicar, diagnosticar e remediar a fenomenologia envolvida com a corrosão das armaduras, que dentre as manifestações patológicas do concreto armado no mundo, apresenta-se com uma elevada incidência de 14% a 58% (NINCE & CLIMACO, 1996; RINCÓN et. al., 1998). A corrosão de armadura tem sido um dos principais problemas patológicos, responsável pela redução da vida útil das estruturas de concreto armado. Seus mecanismos e causas já foram compreendidos. Várias soluções já estão disponíveis e a cada dia novos produtos surgem no mercado e outros tantos estão em estudo, seja para a prevenção ou para terapia da corrosão.

Diante dessa gama de produtos e sistemas ofertados para prevenção e reparo, os engenheiros responsáveis por prescrevê-los para as obras de recuperação, reforço e proteção, precisam

conhecer adequadamente o seu comportamento e sua real eficácia, ou seja, precisam dispor de metodologias para bem avaliar a viabilidade técnica e econômica dos sistemas e dos produtos disponíveis, libertando-se da dependência perigosa de se basear apenas nas informações divulgadas pelos fabricantes.

Dessa forma, abre-se um importante espaço de pesquisa para a comunidade científica e acadêmica, qual seja, investigar a viabilidade desses novos sistemas e materiais, fornecendo à comunidade técnica elementos para discernir entre o que é ou não eficiente para as obras de reparo e recuperação.

1.2 Pesquisadores e Centros de Pesquisa

Atualmente existe no mundo um grande número de centros de pesquisa envolvidos no entendimento dos mecanismos de corrosão das estruturas de concreto armado, seu diagnóstico e suas conseqüências, bem como no desenvolvimento de materiais e métodos para recuperação de estruturas de concreto com problemas decorrentes da corrosão de armaduras.

Fazendo um apanhado destes centros de pesquisa e dos pesquisadores envolvidos na área podemos destacar:

Na Europa

*Sem dúvida o principal centro de referência sobre o assunto na Europa é o Instituto de Ciencias de la Construccion “Eduardo Torroja”¹ em Madri, liderado pela pesquisadora Maria del Carmen Andrade Perdrix, autora de um elevado número de bons artigos relacionados ao tema. Ainda na Europa, podemos destacar o grupo que participa da Comissão 5 – “Structural Service Life Aspects”² da **fib** – Federation Internacional du Beton³, onde podemos citar os seguintes pesquisadores: Michael Faber, Finn Fluge, Christoph Gehlen, Carsten Henriksen, Josse Jacobs, Erik Stoklund Larsen, Peter Lenkei, Gabor Madaras, David Manning, Gro Markeset, Ainars Paeplitis, Brett H Pielstick,*

¹ <http://www.ietcc.csic.es/>

² Comitê técnico responsável pelo desenvolvimento de estudos relacionados à durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado.

³ <http://www.fib-international.org/>

Michael Raupach, Christoph Dauberschmidt, Steen Rostam, Peter Schiessel, Bamforth entre outros. Pode-se destacar ainda os pesquisadores Dr. Antonio Aguado da Universidade Politécnica da Catalunha – Espanha e Dr. Fernando Branco da Universidade Técnica de Lisboa-Portugal, muito ativo no âmbito da IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)

Nas Américas

Nos Estados Unidos identificam-se os pesquisadores Dr. Ivan R. Lasa do Departamento de Transportes da Florida-USA, Dr. Alberto A. Sagües da “University of South Florida”, Peter Emmons do ICRI (International Concrete Repair Institute), Paulo Monteiro da Universidade de Berkley-CA, entre outros. No Canadá destacam-se os pesquisadores Dr. Daniel Cusson e Dr. Noel Mailvaganan do IRC (Institute for Research in Construction), parte do National Research Council of Canada. Já na América Latina podemos destacar os pesquisadores participantes da Red Rehabilitar, liderada pelo Prof. Paulo Helene, onde se destacam os seguintes pesquisadores: Dra. Oladis Trocconis de Rincón Universidade de Zulia em Maracaibo na Venezuela, Dr. Pedro Castro do CINVESTAV⁴ - México, entre outros.

No Brasil

No Brasil é possível destacar o grupo pioneiro de pesquisa da Escola Politécnica da USP, liderado pelo Prof. Paulo Helene tendo colaboração dos pesquisadores Eliana Monteiro, Sílvia Selmo, Maryangela Geimba, Leonel Tula Sanabria entre outros. Na região centro-oeste podemos destacar o grupo de pesquisa da UFG liderado pelo pesquisador Enio Pazini Figueiredo e Osvaldo Cascudo, o grupo de pesquisa da UnB, liderado pelo pesquisador Alberto Nepomuceno, entre outros. Na região sul do Brasil, destaca-se o grupo de pesquisa da UFRG (NORIE) liderada pela pesquisadora Denise Dal Molin. Na região sul podemos ainda destacar os pesquisadores Geraldo Isaia, André Guimarães, Wellington Repette e Jairo Andrade.

⁴ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo

Aplicar um método de avaliação do comportamento eletroquímico de diferentes sistemas de reparo em uma estrutura real de concreto armado com problemas de corrosão, através do emprego de ensaios eletroquímicos que também servem para o diagnóstico e o monitoramento da corrosão.

1.3.2 Objetivos complementares

Contribuir para o conhecimento dos mecanismos de funcionamento dos diferentes sistemas de reparo analisados, em situação real e em laboratório, visando à obtenção de subsídios para a correta avaliação da adequação destes às mais diversas situações de campo.

Contribuir para o desenvolvimento de metodologia de avaliação de comportamento de sistemas de reparo e proteção de estruturas de concreto armado com problemas de corrosão de armaduras.

1.4 Originalidade

Embora exista um grande número de pesquisadores na área de recuperação de estruturas com corrosão de armaduras, a maioria dos trabalhos publicados são referentes a estudos realizados em laboratório. Segundo Andrade (2002) a falta de dados referentes a estudos do comportamento de estruturas com corrosão de armaduras em campo é o principal problema para o avanço do conhecimento nesta área.

Executando uma busca bibliográfica em sistemas de base de dados como o IE-Compendex⁵ tendo como objetivo encontrar artigos referentes ao tema, obtem-se um número reduzido de respostas, das quais pode-se destacar:

- ANDRADE, C., C. ALONSO, and J. SARRA. "Corrosion Rate Evolution in Concrete Structures Exposed to the Atmosphere." *Cement and Concrete Composites* 24, no. 1 (2002) pp.55- 64.
- ANDRADE, C; ALONSO, C. "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site." *Construction and Building Materials*, vol 10, no. 5, pp.315-328, 1996.

⁵ Foram encontrados 25 artigos referentes ao tema em 15.12.2006 (busca booleana: concrete AND corrosion AND repair AND [in-situ OR on-site]).

- QIAN, S.; CUSSON, D. "Electrochemical evaluation of the performance of corrosion-inhibiting systems in concrete bridges." *Cement and Concrete Composites* 26 (2004) pp.217–233.
- CUSSON, D.; QIAN, S.; HOOGEVEEN, T. "Field Performance of Concrete Repair Systems on Highway Bridge." *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 5, pp.366-373. Setembro-Outubro, 2006

Dos artigos acima citados, vale mencionar, que apenas os dois últimos se referem à avaliação de materiais e sistemas de reparo. Os demais fazem referência ao monitoramento de estruturas com corrosão de armaduras, no que diz respeito à avaliação das influências climáticas no comportamento eletroquímico da corrosão e à avaliação da metodologia de análise e obtenção dos dados. Dessa forma, a avaliação do comportamento eletroquímico de reparos executados em estrutura de concreto armado com corrosão de armaduras em campo, além de bastante interessante do ponto de vista prático e teórico, é sem dúvida algo inédito, o que justifica completamente o esforço despendido na realização da presente pesquisa.

1.5 Estrutura da Tese

O segundo capítulo contém uma ampla revisão bibliográfica enfocando os de sistemas de reparo empregados em estruturas de concreto danificadas pela corrosão, incluindo as classificações, os principais tipos, critérios de seleção, recebimento, e avaliação da durabilidade.

No terceiro capítulo apresenta-se os resultados uma inspeção e levantamento histórico a cerca do protótipo estrutural utilizado no experimento de campo.

No quarto capítulo é descrita toda a metodologia experimental, com a caracterização dos materiais empregados e o detalhamento dos ensaios realizados.

Tem-se no quinto capítulo a apresentação e discussão dos resultados obtidos, com uma análise fundamentada, teoricamente, elegendo-se as principais causas dos sucessos ou falhas dos sistemas de reparo estudados.

No sexto capítulo faz-se uma avaliação final, comentando-se sobre a eficiência do método de pesquisa, se os objetivos foram alcançados e são feitas recomendações para trabalhos futuros.

1.6 Limitações desta Pesquisa

Apesar deste tema ser aprofundado ao longo desta tese, cabe ressaltar e resumir que vários são os fatores que têm influência no desempenho de um sistema de reparo quando estes são avaliados (tipos de materiais utilizados, métodos de ensaio, condições de ensaio, dentre outros). Alguns fatores tiveram que ser fixados, tais como os traços que são baseados em estudos anteriores, e o próprio tempo de ensaio, limitado pelos prazos estabelecidos para a realização deste trabalho acadêmico.

Definidos os contornos, além dos já mencionados, pode-se citar como principais limitações do trabalho o que segue:

1. O estudo foi realizado num protótipo de uma estrutura real com cerca de 36 anos em 2008, com carbonatação intensa, da ordem de 2,5cm e contaminada com cloretos, da ordem de 0,37% em relação à massa de cimento; os resultados valem para essa estrutura e eventualmente poderão ser extrapolados a outras estruturas porém considerando estes aspectos;
2. Os reparos foram realizados com muito cuidado, com materiais de qualidade comprovada e dentro da boa técnica. Não podem ser extrapolados a casos reais onde materiais e qualidade de execução sejam deficientes;
3. Indefinição da área afetada pela corrosão, em virtude do método utilizado (Resistência de Polarização/Pulso Gavanostático), já que o fenômeno de corrosão é tipificado como localizado, o que influi diretamente na taxa de corrosão (i_{corr}), resultando em valores normalmente inferiores aos reais;
4. Contaminação artificial da estrutura com cloretos, já estando a mesma pré-carbonatada;
5. Macro-clima de desenvolvimento das medidas de campo não é o usual em atmosferas marítimas, podendo conduzir a níveis de equilíbrio termo-higroscópico diferentes dos existentes nestas regiões.

2 Sistemas de Reparo

2.1 Generalidades

Quando se trata de intervir em uma estrutura de concreto com corrosão de armaduras, alguns aspectos devem ser considerados. Deve-se proceder a uma série de levantamento de dados de forma a verificar a origem dos problemas (diagnóstico), sua extensão e a conseqüente evolução do quadro de deterioração (prognóstico) e as suas conseqüências no desempenho estrutural e na funcionalidade da mesma. Com base nesse levantamento, são tomadas as medidas de intervenção para reparar ou reforçar as estruturas danificadas pela corrosão de armaduras (RILEM, 1994).

De acordo com o grau de deterioração da estrutura e a sua importância econômico-social, podemos resumidamente atuar de cinco formas distintas na mesma (RED REHABILITAR, 2003):

- Atuações emergenciais: ocorre quando o risco de colapso total ou parcial da estrutura é elevado, e medidas de proteção devem ser tomadas rapidamente de forma a evitar a ruína desta, ou ainda, acidentes de maiores proporções;
- Atuações de prevenção e/ou proteção: em casos onde a estrutura apresenta um grau de deterioração baixo, podemos atuar de maneira preventiva, protegendo a estrutura com a o ingresso de contaminantes e, assim, reduzindo a velocidade de degradação da mesma;
- Reparos: são ações que visam reconduzir a estrutura à sua condição de uso original: reduzindo ou interrompendo o processo de deterioração e recuperando a integridade da estrutura;
- Reforços: são intervenções que ocorrem quando existe um erro de projeto, e/ou execução na estrutura que não atende as solicitações de carregamento para a qual fora executada, ou quando se pretende alterar o uso previsto em projeto para a mesma; neste caso a capacidade portante desta é aumentada;
- Substituição da estrutura: em determinados casos, o custo da intervenção na estrutura é tão elevado e/ou a sua importância econômico-social é baixa, que a melhor alternativa pode ser a substituição da mesma, ou de parte desta.

Definido o tipo de intervenção, a seleção dos materiais e métodos deve levar em consideração uma série de aspectos operacionais, ambientais, econômicos, arquitetônicos e técnicos.

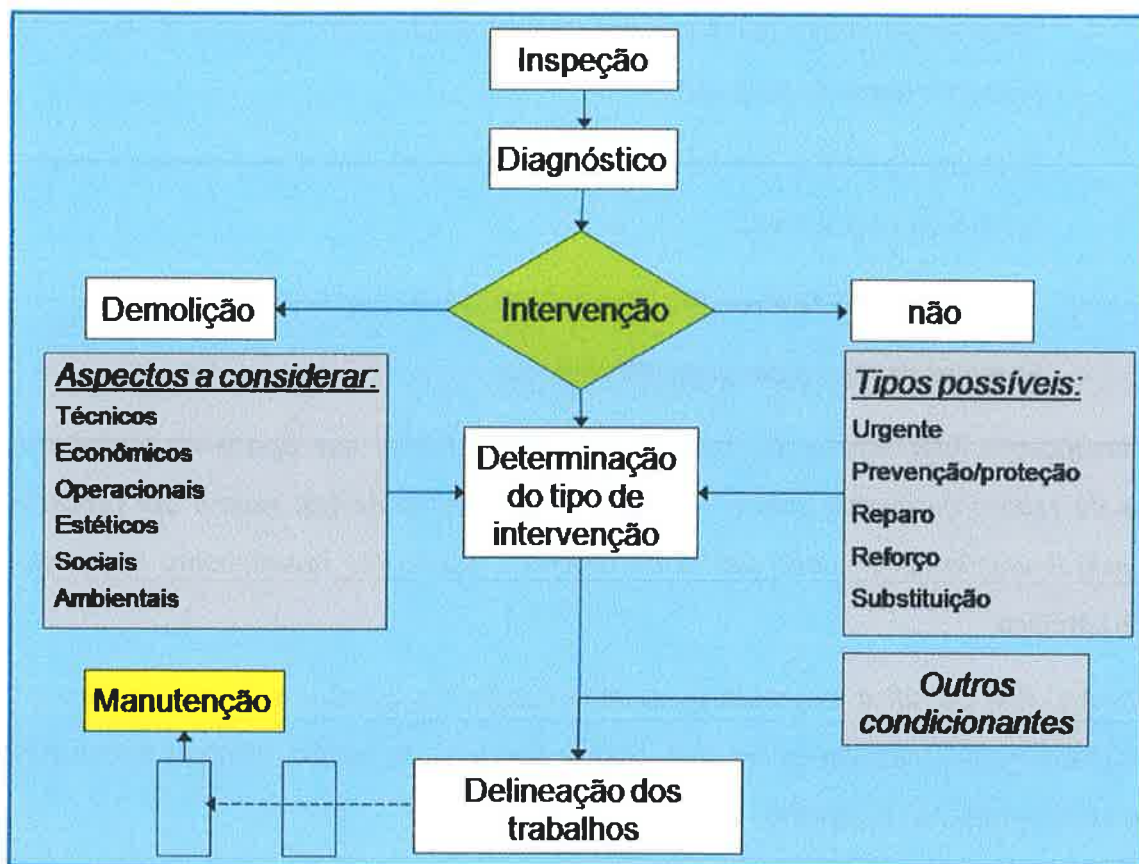


Figura 2-1 – Seqüência lógica de uma reabilitação de estrutura (adaptado de RED REHABILITAR, 2003).

2.2 Classificação

Diante da enorme variedade de materiais e sistemas de reparo, fica difícil de estabelecer uma classificação padronizada destes. Vários autores já fizeram sua proposta baseado em diversos aspectos.

ANDRADE & GONZÁLEZ (1988) dividiram os sistemas de reparo em dois grandes grupos: os métodos que atuam sobre a armadura (proteção catódica, recobrimentos metálicos galvanizados e pinturas epóxi) e os métodos que atuam sobre o concreto que envolve a armadura (aditivos inibidores de corrosão e pinturas epóxi).

HELENE (1993) faz uma classificação dos métodos de reparo dividindo-os em cinco tipos:

- *Sistemas de reparo por repassivação localizada (argamassas, concretos e grautes de base cimento Portland);*
- *Sistemas de reparo por barreira sobre a armadura (argamassas de base epóxi, os primers e tintas de base epóxi);*
- *Sistemas de reparo por barreira sobre o concreto (vernizes e tintas de base epóxi, acrílica ou poliuretana);*
- *Sistemas de reparo por barreira química (inibidores de corrosão);*
- *Sistemas de reparo por proteção catódica.*

Outra classificação interessante foi proposta pela RILEM (1994) que apresenta quatro tipos de sistemas de reparo de acordo com o mecanismo de atuação destes: reparo por repassivação, reparo pela limitação da umidade dentro do concreto, reparo por revestimento da armadura e proteção catódica.

Já ARANHA (1994) classifica os processos de reabilitação das estruturas de acordo com o tipo e local da intervenção, dividindo-os em três grupos: sistemas de reparo, reforços estruturais e os reforços empregados nas fundações.

Os sistemas de reparo podem também ser classificados segundo a natureza química dos seus materiais, como proposto por GEHO, citado por FIGUEIREDO (1994) e ANDRADE (1992). Neste caso os sistemas de reparo são divididos em dois grupos. Os materiais de origem inorgânica (cimento Portland, com ou sem adições minerais), cuja função é restaurar o meio alcalino que permita a passivação da armadura; materiais de origem orgânica (polímeros e pigmentos especiais), cuja função é atuar como barreira contra a penetração de O₂, umidade, CO₂ ou íons cloreto; e materiais mistos, que possuem as duas funções, atuando como barreira, como por passivação.

Outra classificação possível tem a ver com a complexidade do método utilizado. ANDRADE (1997) propõe a classificação dos sistemas de reparo em tradicionais (os que passivam a armadura e os que criam uma barreira que isola a armadura do contato com o meio) e não-tradicionais (dessalinização, realcalinização e proteção catódica).

Mais recentemente, HELENE (1997) apresentou uma nova proposta de classificação dos sistemas de reparo, separando-os diretos e indiretos.

- *Proteção direta atuando sobre a armadura*
 - *Catódica por corrente impressa*
 - *Catódica do tipo galvânica*
 - *Barreira física*
 - *Barreira galvânica*

- *Proteção indireta atuando sobre o concreto*
 - *Repassivação*
 - *Argamassa e concreto de base cimento*
 - *Realcalinização eletroquímica*
 - *Extração eletroquímica de cloretos*
 - *Inibidores químicos*
 - *Recobrimentos superficiais do concreto*

Como foi apresentado, existe uma grande variedade de classificações dos sistemas de reparo, cada qual com as suas vantagens e desvantagens. BERTOLO B. (2006) apresenta uma lista extensa de possibilidades de classificação para os sistemas de reparo, considerando entre outras coisas a extensão, a profundidade e método de execução do reparo. No entanto a proposta desta tese é avaliar o comportamento dos diversos sistemas. Assim, é muito importante que se concentre a classificação na forma de atuação dos diversos sistemas de reparo, como forma de facilitar o entendimento destes. Assim se propõe a seguinte classificação. Os sistemas de reparo são divididos em 6 grupos conforme a forma de atuação do sistema de reparo.

- **Grupo I** – *Este grupo é composto pelos produtos que visam reduzir ou interromper o processo corrosivo através da limitação/eliminação do acesso de agentes agressivos e/ou demais elementos participantes do processo corrosivo como: CO₂, O₂, H₂O, Cl⁻ - como exemplo de sistemas integrantes deste grupo tem-se as pinturas, “primers”, argamassas e groutes, seja de base epóxi, acrílica ou poliuretânica; os hidrofugantes: silanos e siloxanos; e os bloqueadores de poros;*

- **Grupo II** – Este grupo é composto pelos produtos e sistemas que visam restabelecer as condições iniciais de estabilidade da armadura (repassivação) – fazem parte deste grupo as argamassas, concretos e grautes de base cimento Portland, a extração de cloretos e a realcalinização;
- **Grupo III** – Este grupo é composto pelos sistemas de reparo por inibição;
- **Grupo IV** – Este grupo é composto pelos sistemas de reparo por proteção catódica, seja por corrente impressa, ou por ânodo de sacrifício;
- **Grupo V** – Este grupo é composto pelos sistemas que envolvem a substituição das armaduras convencionais por outras de material mais resistente à corrosão – armaduras de aço inoxidável, galvanizado e de PRF (polímero reforçado com fibras);
- **Grupo VI** – Este grupo é composto pelos sistemas que atuam de forma combinada, mesclando as formas de atuação de dois ou mais grupos – um exemplo de sistema misto são as argamassas de cimento Portland com adição de polímeros, que empregam as características do grupo II (repassivação dada pela alta alcalinidade), com as características do grupo I (efeito barreira proporcionado pelo polímero incorporado).

2.3 Sistemas de reparo

Atualmente existe uma grande variedade de materiais e sistemas de reparo disponíveis no mercado. Diante desta diversidade, fica difícil escolher e/ou avaliar o desempenho destes sem conhecer suas características. Alguns destes materiais/sistemas de reparo são descritos a seguir de forma sucinta, apresentando algumas de suas características principais.

2.3.1 Argamassas de reparo, concretos e grautes base cimento Portland

Estes são os materiais mais utilizados na recuperação de estruturas deterioradas pela corrosão das armaduras. Isso ocorre por se tratarem de materiais similares aos empregados quando da confecção do elemento estrutural. O seu princípio de uso é bastante simples: retira-se o material contaminado; limpa-se a região (substrato e armadura); substitui-se a armadura, se necessário; reconstitui-se a seção com material novo. Por não apresentar contaminantes e, além disso, alta alcalinidade, o novo material possui a capacidade de passivar as armaduras e cessar o processo corrosivo no local.

De forma a melhorar o desempenho destes materiais, é muito comum a utilização de aditivos e adições na suas composições ou durante a produção destes materiais, dos quais podem ser destacados: os aditivos inibidores de corrosão, aditivos redutores e/ou compensadores de retração, fibras de polipropileno, fibras de amianto crisotila, e os mais comuns, adições minerais e polímeros de base pva ou acrílico.

2.3.1.1 Efeito das adições minerais

Existem dois tipos principais de adições minerais: as ativas e as inertes. As adições minerais ativas reagem com os compostos hidratados do cimento, já as inertes, apenas provocam efeitos físicos tais como o efeito “microfiller” (FORNASIER, 1995).

Segundo METHA & MONTEIRO (1994) existem quatro grupos de adições ativas: as cimentantes e pozolânicas (escória de alto-forno, cinza volante com alto teor de cálcio); as pozolanas pouco reativas (escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de casca de arroz queimada em campo); as pozolanas comuns (cinza volante com baixo teor de cálcio e materiais naturais que contém quartzo, feldspalto e mica); e as pozolanas altamente reativas (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz). Das adições minerais existentes, a sílica ativa é a mais utilizada.

Vários autores já avaliaram o uso destes materiais e a sua influência no desempenho, tanto mecânico, quanto do ponto de vista da durabilidade de concretos e argamassas. FERREIRA et al (1998) mostraram a influência positiva da sílica ativa no desempenho de concretos frente à migração de íons cloreto. LACERDA (2002) verificou o mesmo efeito em concretos com adição de metacaulim e também em concretos com sílica ativa. Mais recentemente, SILVA (2006) avaliou o desempenho de concretos com sílica ativa e cinza de casca de arroz frente à corrosão de armaduras, onde estas adições apresentaram desempenho muito bom. Registre-se que em todos estes casos foram estudos em laboratório.

2.3.1.2 Efeito das adições poliméricas

Muitos tipos de polímeros (base poliéster, epóxi, acrílicos, látex pva, etc) vêm sendo adicionados a concretos e argamassas com o objetivo de melhorar algumas das propriedades destes (RINCÓN et al, 1996). Esse uso tem sido amplamente difundido devido à sua capacidade de reduzir a entrada de água e de alguns agentes agressivos, aumentando a durabilidade destes materiais. Além disso,

outro ponto marcante é o aumento da aderência entre os materiais acrescidos de polímeros e o substrato antigo.

2.3.2 Inibidores de corrosão

Inibidores de corrosão, como o próprio nome diz, são substâncias químicas capazes de inibir e/ou reduzir o processo de corrosão. Esses materiais foram descobertos na década de 60, em pesquisas que visavam o desenvolvimento de aceleradores de pega que não possuíssem efeitos negativos na corrosão, como os aceleradores de base cloreto. Nessas pesquisas foram desenvolvidos produtos capazes de acelerar a pega do cimento, e verificou-se que, além disso, possuíam a capacidade de inibir e/ou retardar o processo de corrosão do aço (LIMA, 1996). Vale ressaltar que uma parte dos inibidores comercializados atualmente tem como característica serem aceleradores de pega.

Os inibidores de corrosão agem basicamente de três formas distintas, que podem ocorrer, ou não, concomitantemente:

1. Interferem nas reações anódicas e/ou catódicas, alterando a velocidade com que o processo corrosivo se desenvolve (formam nós complexos com os íons cloreto);
2. Alteram a camada de passivação do aço, aumentando a sua estabilidade;
3. Adsorvem-se na superfície do metal, formando um filme que impede as reações na superfície do mesmo.

Vale salientar que a forma de atuação dessas substâncias interfere diretamente na resposta eletroquímica do sistema concreto-aço. Segundo LIMA (1996), uma das formas de classificação dos inibidores é segundo sua forma de atuação, ou seja, como estes interferem na polarização do sistema: catódicos, anódicos, ou mistos.

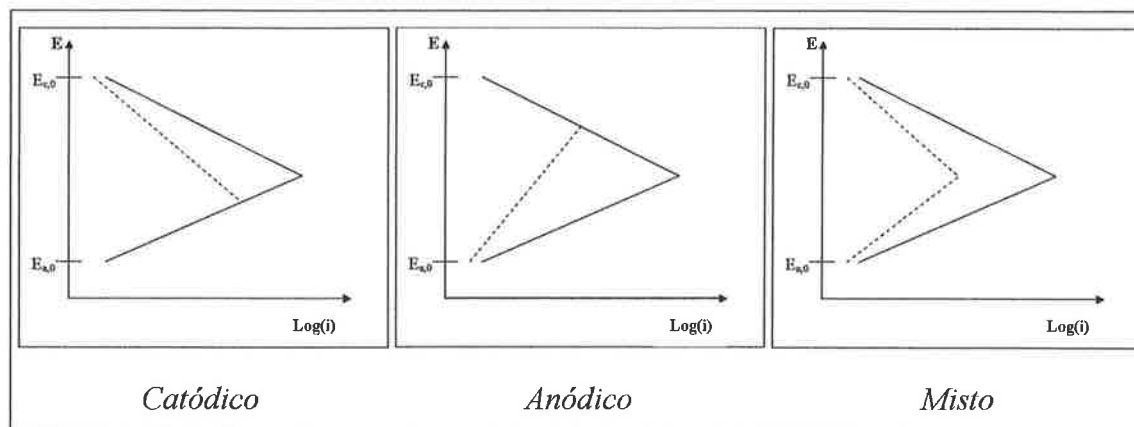


Figura 2-2 – Esquema simplificado das diferentes formas de polarização promovidas pelos inibidores de corrosão (adaptado de LIMA, 1996).

A Figura 2-2 mostra claramente como a interferência promovida por estes produtos nas reações de corrosão altera o equilíbrio eletroquímico do sistema concreto-aço, resultando em diferentes situações. Em todos os casos, observamos a redução da corrente de corrosão, como era esperado, porém em cada caso, o potencial de corrosão assume valores diferentes, ora maiores, ora menores que o valor inicial. Essa informação é muito importante, pois o desconhecimento destes mecanismos pode levar a interpretações erradas sobre o funcionamento destes materiais.

Atualmente são encontrados no mercado diversos tipos de inibidores de corrosão. Estes podem ser vendidos na forma de pó ou líquido para ser adicionado ao concreto e/ou argamassa quando da execução de uma obra nova ou reparo. Mais recentemente novos produtos têm sido desenvolvidos e pesquisados, os quais podem ser aplicados diretamente sobre a superfície do concreto, onde estes penetram e migram até a superfície do aço com o objetivo de protegê-lo. Estes são os chamados MCI (migrating corrosion inhibitors). Entretanto existe muita controvérsia a respeito da capacidade destes últimos realmente alcançarem a superfície do aço (JAMIL et AL., 2005; HOLLOWAY et AL., 2004).

Dos inibidores existentes no mercado, a maioria tem como base as seguintes substâncias químicas:

- Nitrito de sódio e de cálcio;
- Aminas, amino-álcool, amino-carboxilato;
- Mono-flúor fosfato de sódio;
- Óxido de zinco;

- Silano organo-funcional base flúor⁶.

2.3.3 Sistemas formadores de película

São sistemas compostos por polímeros que ao coalescerem formam uma película/filme sobre a superfície a ser protegida, impedindo assim a passagem de gases e íons através da mesma. Esses materiais podem ser aplicados, dependendo do caso, diretamente sobre a superfície do aço, ou sobre o concreto que o envolve. A diferença principal entre as formas de aplicação reside na questão operacional (momento da obra em que a pintura é aplicada), na quantidade de material envolvido e na proteção ou não do concreto de cobrimento. A aplicação direta sobre o aço, apesar de mais econômica do ponto de vista do consumo de material, necessita que o aço esteja exposto (antes da concretagem), sendo seu uso em reparos controverso. Alguns pesquisadores afirmam que o recobrimento de trechos isolados da barra pode levar à formação de macro-células. Já a aplicação sobre o concreto, apesar de consumir maior quantidade de material, apresenta grande vantagem do ponto de vista executivo (maior facilidade na aplicação e re-aplicação), permitindo recobrir todo o trecho da estrutura (não só o reparo), o que minimizaria possíveis efeitos de macro-célula. Outra vantagem reside na proteção do concreto de recobrimento. O uso desses materiais sobre o concreto reduz significativamente a carbonatação e a lixiviação deste (HELENE & PEREIRA, 2007).

A capacidade de proteção destes materiais está relacionada à qualidade da resina empregada e da formulação do produto (relação entre resina, pigmento, solvente e carga). As resinas mais comuns utilizadas na construção civil como um todo são:

- PVAc;
- Acrílicas;
- Alquídicas;
- Poliuretânicas;

⁶ A descrição deste produto segue o disponibilizado pelo fabricante. Sabe-se, no entanto, que a base deste produto é um conhecido hidrofugante, e que segundo o fabricante, esta apresenta uma molécula mui diminuta capaz de penetrar efetivamente no concreto e inibir/reduzir a corrosão. Este material é um dos sistemas estudados no presente trabalho, sendo que a real capacidade de inibição deste produto será verificada no transcorrer da pesquisa.

- Epoxídicas.

Dentre estas resinas, a primeira, devido a sua baixa capacidade de proteção, é utilizada somente nas áreas internas das edificações, onde o grau de agressividade é bastante reduzido. As resinas alquídicas não são recomendadas para uso em contato com o concreto⁷, devido à sua baixa resistência à alcalinidade elevada – sofre um processo de “saponificação”. As demais são bastante empregadas na proteção/recuperação de estruturas de concreto armado, sendo a epoxídica a mais resistente a meios extremamente agressivos. No entanto, esta resina deve ser usada com cautela em locais expostos à intempérie devido à sua baixa resistência à radiação ultravioleta.

2.3.4 Sistemas hidrofugantes

Sistemas hidrofugantes são compostos por resinas da família dos silicones que têm por principal característica serem hidrófobas. Devido à sua polaridade similar à da água, estes materiais têm a capacidade de repelir a mesma, afastando-a da superfície sobre a qual esta está aplicada (isto não ocorre no caso de existirem gradientes de pressão hidráulica sobre a superfície do concreto). Estes materiais devem ser aplicados sobre a superfície do concreto/argamassa que deve estar seca (teor de umidade residual superficial menor que 5%). Estes materiais então penetram nos poros existentes e reagem com a matriz cimentícia, ligando-se quimicamente a mesma. JACOB & HERMANN (1997) afirmam que estes materiais apresentam desempenho reduzido quando aplicados sobre concreto/argamassa jovem (idade menor que seis meses), isso ocorreria uma vez que a continuidade da hidratação da matriz cimentícia após a aplicação destes produtos permitiria a formação de compostos hidratados sobre a área tratada, reduzindo a efetividade do tratamento.

Outra característica muito importante destes materiais é fato destes não colmatarem / tamponarem a superfície dos poros, permitindo que estes “respirem”. Isso é muito interessante, principalmente em situações onde é necessária a passagem de vapor d’água pelo concreto (locais úmidos tais como vestiários e banheiros), onde sistemas formadores de película reteriam a

⁷ Grande atenção deve ser dada a baixa resistência à alcalinidade dessas resinas, uma vez que é muito comum o uso destas diretamente sobre as armaduras. Esse uso está totalmente errado. Essa confusão ocorre uma vez que este tipo de pintura (comumente conhecido como “zarcão”) tem desempenho excelente como primer para elementos metálicos como portões e grades, onde sabemos, não existe a elevada alcalinidade proveniente da argamassa ou concreto.

passagem deste vapor, formando bolhas no revestimento. Esta característica, no entanto, permite não só a passagem de vapor d'água, como também de outros gases, como o CO₂, por exemplo. Dessa forma, reduzem muito a entrada de íons, porém a capacidade de redução da carbonatação não é tão efetiva como nos formadores de película. Todavia, no que diz respeito aos fenômenos de transporte relacionados à água, estes sistemas se mostram bem efetivos, chegando à reduções na absorção de água da ordem de 95% (MEDEIROS & HELENE, 2007).

2.3.5 Proteção catódica

A proteção catódica utiliza conceitos de eletroquímica para proteger o metal desejado. Numa célula eletroquímica convencional, a área anódica se corrói, perdendo seus elétrons para a área catódica onde estes são consumidos. Baseado neste fato, o sistema de proteção catódica visa criar uma corrente de elétrons entre um ânodo de sacrifício e o metal a ser protegido. Dessa forma a área anódica existente na célula eletroquímica, em vez de perder elétrons passa a recebê-los, comportando-se então como uma área catódica. A corrosão neste caso não é eliminada, porém passa a ocorrer em local pré-determinado e de forma controlada enquanto a corrente de elétrons for mantida.

Para conseguir criar esse mecanismo, existem dois métodos bastante comuns: ânodos galvânicos e corrente impressa.

Por corrente impressa:

Para se estabelecer um sistema de proteção catódica por corrente impressa, utiliza-se um retificador de corrente capaz de criar um fluxo constante e controlado de elétrons, da ordem de 3 a 20 mA/cm², entre o metal a ser protegido e o ânodo de sacrifício (Figura 2-3). Esse ânodo de sacrifício é normalmente colocado sobre a estrutura de concreto armado a ser protegida, e revestido com uma argamassa de fixação de alta condutividade iônica (Figura 2-4). Como ânodos de sacrifício são utilizados metais nobres como titânio, por exemplo, já que estes apresentam baixas taxas de corrosão e menor volume nos produtos resultantes desta, aumentando a vida útil do sistema e o intervalo de troca destes.

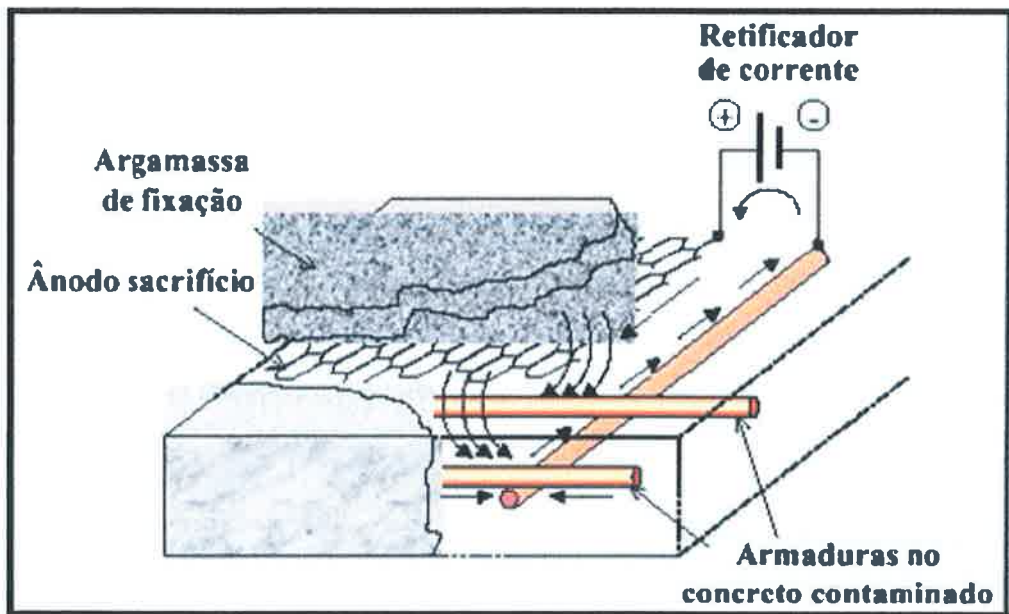


Figura 2-3 – Esquema de aplicação do sistema de proteção catódica por corrente impressa (TULA & HELENE, 2001).



Figura 2-4 – Exemplo de um ânodo de sacrifício na forma de malha, aplicado em uma estrutura real (GONÇALVES et AL., 2003)

Por ânodos galvânicos

É sabido que quando dois metais de natureza distinta entram em contato dentro de um eletrólito, o metal mais anódico corrói. No sistema de proteção catódica por ânodos galvânicos, utiliza-se um metal de sacrifício fortemente anódico, de forma a se contrapor a célula de corrosão naturalmente existente na estrutura, conferindo às armaduras de aço, proteção contra a corrosão. Assim, são utilizados como ânodo de sacrifício, metais como o zinco e o alumínio, que possui caráter fortemente anódico e, além disso, seus produtos de corrosão apresentam volumes menores que o do aço.

2.3.6 Extração eletroquímica de cloretos

A extração eletroquímica de cloretos é um método de reabilitação de estruturas de concreto armado que consiste na criação de um campo elétrico entre as armaduras e um ânodo externo. Com a criação desse campo elétrico, os íons de carga negativa, como os cloretos, são mobilizados em direção ao ânodo externo, enquanto os íons positivos são conduzidos ao cátodo (armaduras), esse processo é conhecido como eletro-osmose. Depois de algumas semanas, o eletrólito colocado junto ao ânodo (normalmente polpa de celulose úmida) é removido juntamente com o ânodo e os íons cloreto que migraram para essa região.

2.3.7 Realcalinização

O método de realcalinização, como o próprio nome diz, consiste na reposição dos álcalis no interior do concreto, junto às armaduras, uma vez que estes podem ter sido consumidos por algum processo de degradação, como por exemplo, a carbonatação do concreto. Uma vez repostos o nível de álcalis na solução do poro junto às armaduras, o pH da região é elevado para níveis onde a armadura poderia se repassivar. Embora o método tenha bastante sucesso na elevação do pH, alguns estudos apresentam problemas com a repassivação do aço (ARAÚJO, F. W. C., 2004).

Existem basicamente dois métodos para a realcalinização das estruturas de concreto armado: realcalinização passiva e realcalinização eletroquímica.

Realcalinização passiva

A realcalinização passiva consiste na aplicação de um revestimento rico em álcalis sobre a estrutura de concreto armado a ser realcalinizada. Uma vez mantido úmido esse revestimento, essencial para garantir a mobilidade dos íons alcalinos, a grande diferença de concentração destes no revestimento, com relação ao interior do concreto, faz com estes migrem por difusão para o interior do concreto, como mostra a Figura 2-5.

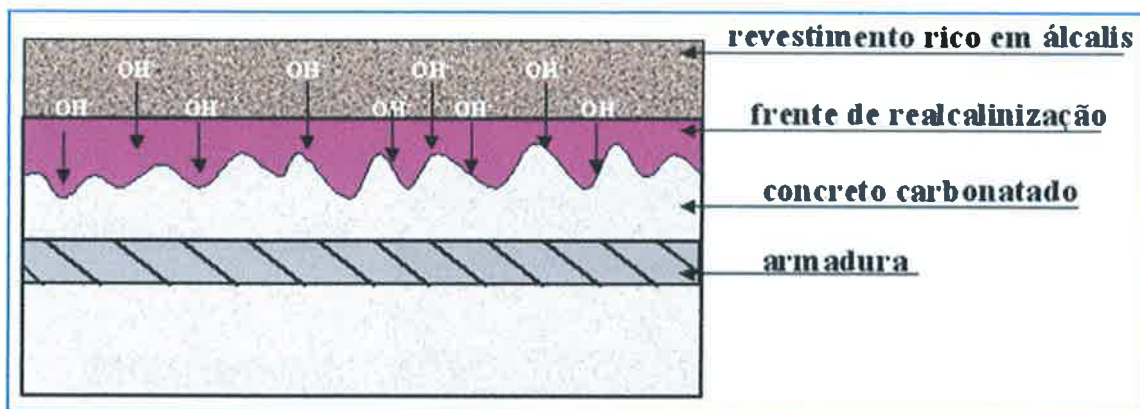


Figura 2-5 – Mecanismo de funcionamento do método de realcalinização passiva (ARAÚJO, 2004).

Esse método, no entanto, possui limitações quanto à profundidade de atuação, limitado a cerca de 20mm dependendo da manutenção da umidade do revestimento e da mobilidade iônica no revestimento e no concreto da região a ser recuperada (influenciada diretamente pela quantidade, dimensões e interconectividade dos poros). Outro ponto importante com relação ao método é o seu tempo de duração bastante longo – cerca de dois anos. De forma a minimizar esses inconvenientes, foi desenvolvida com bastante sucesso em laboratório uma metodologia de realcalinização passiva denominada de “realcalinização natural”, onde o revestimento é trocado por uma solução rica em álcalis (ARAÚJO, F. W. C., 2004), visando reduzir o tempo de duração do método, bem como aumentar a profundidade de atuação do mesmo.

Realcalinização eletroquímica:

A realcalinização eletroquímica é um método bastante semelhante ao de extração eletroquímica de cloretos. Ambos se baseiam no princípio de eletro-osmose, a diferença principal está no objetivo de cada método. Ao invés de visar a retirada dos íons cloreto, a realcalinização eletroquímica visa restabelecer a alcalinidade do concreto. Para isso, utiliza-se um eletrólito rico em álcalis, que por

possuírem carga positiva, são atraídos para o cátodo (armadura a ser protegida), elevando o pH na região. Outro ponto importante de ser mencionado diz respeito às reações catódicas.



As equações acima mostram que há formação de íons hidroxila junto ao cátodo (armadura), auxiliando no restabelecimento das condições de passivação das armaduras.

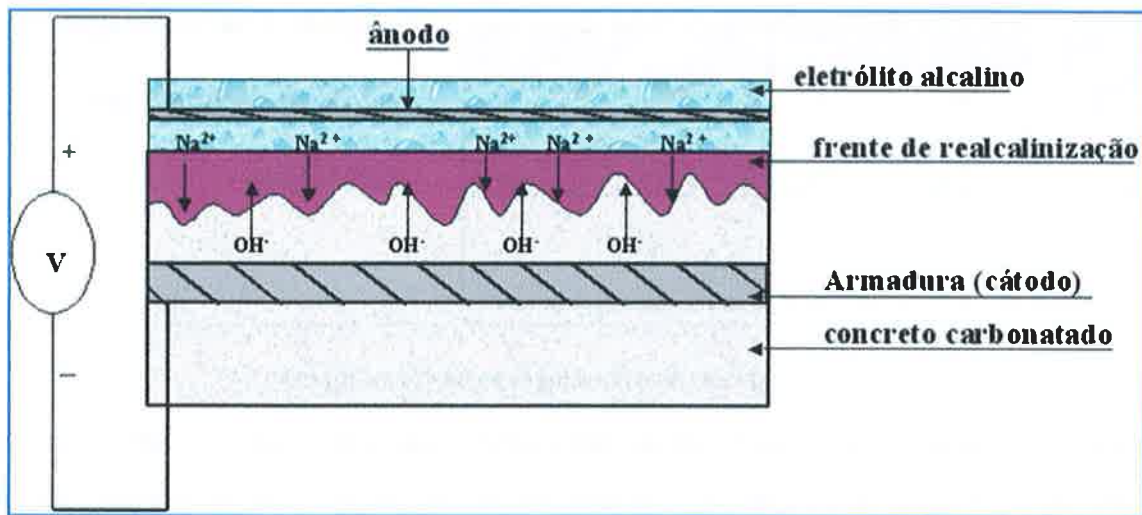


Figura 2-6 – Esquema simplificado do método de realcalinização eletroquímica (ARAÚJO, F. W. C., 2004).

2.4 Critérios de seleção

De acordo com GEHO (1989) e SELMO et al. (2000), deve-se observar os seguintes fatores quando da seleção de uma argamassa de reparo, mas que no entanto podem ser extrapolados para os demais materiais e sistemas de reparo:

- As características do concreto a ser reparado;
- A espessura dos reparos, após a limpeza das regiões danificadas;
- A responsabilidade estrutural das argamassas, se irão apenas conferir acabamento geométrico ou ainda desempenhar função estrutural significativa;
- A densidade, diâmetro e cobertura das armaduras que irão ser repassivadas, nas diversas peças que compõem a estrutura;
- As condições de temperatura e umidade para execução dos serviços de recuperação;

- Tempo disponível para a execução dos reparos, que é função da importância ou finalidade da estrutura e do planejamento da obra;
- As condições de exposição ao intemperismo e demais solicitações de serviço, das diversas partes que compõem a estrutura a ser recuperada.

Mais recentemente, a norma europeia ENV 1504-9/97 relaciona cerca de 90 propriedades que podem ser especificadas para argamassas, sistemas de proteção ou reparo de estruturas de concreto, em função do princípio do processo utilizado, e diferencia aquelas sempre exigíveis das que são específicas ou especiais, para certos tipos de obra. Essas diversas propriedades influentes no desempenho dos sistemas de reparo, de maneira geral, podem ser melhor compreendidas se relacionadas a aspectos requisitos de desempenho e serviço, como propõem a RED REHABILITAR (2003). Desta forma deve-se observar os seguintes aspectos quando da seleção de um material/sistema de reparo:

Requisitos estéticos: dizem respeito às características visuais do material/sistema de reparo a ser utilizado. Em determinadas situações, é fundamental a manutenção das características visuais, como no caso de monumentos e edificações de interesse histórico por exemplo. Nesses casos é importante observar que é muito difícil reproduzir cores e nuances de materiais existentes em materiais novos, o que causa impacto visual negativo. Assim, deve-se observar o tipo de material/sistema de reparo a ser empregado, bem como a extensão e a forma de aplicação deste para se minimizar esses efeitos indesejados quando for o caso.

Requisitos ambientais: dizem respeito aos impactos ambientais causados pelo uso de determinados materiais/sistemas de reparo. Determinados tipos de materiais/sistemas de reparo apresentam maior, ou menor durabilidade, bem como maior ou menor prejuízo ao meio ambiente (seja na sua obtenção, uso, ou descarte). Esses dois parâmetros devem ser analisados conjuntamente de forma a se obter o menor impacto no meio ambiente quando da seleção de um material/sistema de reparo. Em alguns casos, determinados materiais/sistemas de reparo apresentam menor consumo de material e menor impacto ambiental quando do seu uso, mas se observamos a sua durabilidade e a conseqüente taxa de renovação/reaplicação, o mesmo pode se mostrar mais prejudicial ao meio ambiente do que outro, que a princípio apresenta maiores conseqüências, mas sua durabilidade é muito maior.

Requisitos operacionais: dizem respeito às condições operacionais no local a ser reparado. Determinadas situações limitam o acesso de pessoal, equipamentos e máquinas à estrutura a ser recuperada, limitando, portanto, os tipos de materiais/sistemas de reparo possíveis de serem empregados. No momento da seleção dos materiais/sistemas de reparo a serem utilizados, essa condição deve ser avaliada. Além disso, deve-se atentar para os custos operacionais envolvidos. Um exemplo disso são situações práticas, onde o custo operacional (seja de pessoal, acesso, maquinário etc) é tão elevado, que por vezes o material de custo mais elevado torna-se o mais vantajoso economicamente, devido à sua maior durabilidade.

Requisitos técnicos: dizem respeito às características físico-químicas dos materiais/sistemas de reparo. Sem dúvida é a parte fundamental de todo sistema de reparo. Segundo EMMONS & VAYSBURD (1996), todo material/sistema de reparo deve atender três critérios de compatibilidade com o restante da estrutura onde será empregado. São estes:

- **Compatibilidade química:** relacionada às características químicas do material/sistema de reparo e do substrato, e as suas possíveis interações;
- **Compatibilidade física:** relacionada ao comportamento físico-mecânico do material/sistema de reparo e do substrato, suas interações e o comportamento esperado do material de reparo na estrutura (função estrutural ou não);
- **Compatibilidade eletroquímica:** relacionada às mudanças no comportamento eletroquímico do aço impostas pela nova situação criada pelo material/sistema de reparo. Deve-se evitar que a nova situação promovida pelo material/sistema de reparo leve a “inversões de pilha”, onde a região anteriormente anódica passa a se comportar como cátodo e vice-versa.

Segundo VAYSBURD & EMMONS (2000) os problemas de compatibilidade que vêm ocorrendo com os materiais/sistemas de reparo se devem a não observação por parte do meio técnico das duas principais causas de falhas associadas à corrosão prematura de estruturas de concreto armado recém reparadas: a retração (por secagem e/ou diversos outros fatores) e a incompatibilidade eletroquímica.

2.5 Critérios de recebimento e avaliação da durabilidade

Quando se fala em controle e avaliação da qualidade e durabilidade dos materiais/sistemas de reparo, é preciso responder dois questionamentos principais: Por que avaliar? Como avaliar?

Normalmente é preciso avaliar um material/sistema de reparo de forma a conhecer o seu comportamento em comparação a outros, como subsídio para seleção do mais adequado à situação de aplicação, ou ainda para verificar se um serviço de reabilitação atingiu o objetivo proposto. Outro caso, talvez o mais comum, é relacionado ao desenvolvimento dos próprios materiais/sistemas de reparo. Nesse caso a avaliação destes materiais/sistemas visa obter subsídios para balizamento do processo de desenvolvimento destes.

Diante da necessidade clara de avaliação destes materiais/sistemas, precisa-se saber então como avaliá-los. Para isso é necessário então encontrar resposta para as seguintes indagações: O que avaliar, quando, e de que forma?

Segundo HELENE (1993) para avaliar o processo corrosivo de uma estrutura de concreto armado em geral, devemos avaliar três aspectos distintos, que extrapolando para a avaliação de materiais/sistemas de reparo tem-se: avaliação do material/sistema de reparo, avaliação do aço e a avaliação da interação concreto/reparo/aço/meio ambiente (Tabela 2-1).

Tabela 2-1 – Metodologias e métodos de ensaio para avaliação do desenvolvimento da corrosão em diversos materiais/sistemas de reparo (adaptado de HELENE, 1993).

| <i>Estágio da corrosão</i> | <i>Iniciação</i> | <i>Propagação</i> |
|--|---|---|
| <i>Fenômeno</i> | <i>Termodinâmica da corrosão</i> | <i>Cinética da corrosão</i> |
| <i>Significado</i> | <i>Viabilidade da corrosão</i> | <i>Taxa de corrosão</i> |
| <i>Avaliação do material de reparo/concreto</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundidade de carbonatação ▪ Teor de umidade de equilíbrio ▪ pH da solução presente nos poros do concreto ▪ Concentração de cloretos e hidroxilas ▪ Teor de cloretos ▪ Difusão de cloretos ▪ Retenção de cloretos | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistividade elétrica ▪ Penetração de cloretos ▪ Migração de cloretos ▪ Difusão de oxigênio ▪ Teor de sais solúveis |
| <i>Avaliação da armadura</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bitola e tipo | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Composição química ▪ Perda de massa ▪ Observação visual e microscópica |
| <i>Avaliação do sistema concreto/reparo/armadura/meio ambiente</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Heterogeneidades ▪ Meio ambiente ▪ Potencial de eletrodo | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Heterogeneidades ▪ Meio ambiente ▪ Macro-célula ▪ Corrente/tensão impressa ▪ Resistência de polarização ▪ Curvas de polarização ▪ Resistência elétrica ▪ Impedância eletroquímica ▪ Ruído eletroquímico |

A avaliação ideal, portanto envolve a análise de todos os agentes participantes e a sua interação. Assim, a princípio a forma mais apropriada de avaliar os materiais/sistemas de reparo é obtida em situações reais de aplicação, porém isso apresenta uma série de limitações próprias daquele caso que impedem uma generalização automática dos resultados e conclusões.

Essa dificuldade de realizar estudos em estruturas reais tem induzido ao pequeno número de estudos em casos reais. Em uma busca realizada na base de dados Compendex, apenas dois artigos de um mesmo trabalho de avaliação de materiais/sistemas de reparo em campo foram encontrados:

- QIAN, S.; CUSSON, D. "Electrochemical evaluation of the performance of corrosion-inhibiting systems in concrete bridges." *Cement and Concrete Composites* 26 (2004) pp.217–233.
- CUSSON, D.; QIAN, S.; HOOGEVEEN, T. "Field Performance of Concrete Repair Systems on Highway Bridge." *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 5, pp.366-373. Setembro-Outubro, 2006

Isso reforça a necessidade de se aprofundar neste tema, como é o escopo desta tese. Outro ponto importante de ser ressaltado é a ainda inexistente padronização de métodos de envelhecimento acelerado e tipologia dos corpos-de-prova utilizados na avaliação em laboratório, como mostra MEDEIROS (2002). É muito importante que essa padronização seja alcançada, uma vez que os resultados e análises sofrem grande influência destes fatores (CASTRO-BORGES, 1998), impedindo a comparação direta dos resultados de diversas pesquisas. Dessa feita, trabalhos têm sido desenvolvidos no intuito de se atingir esta padronização, como é o caso do trabalho de pós-doutorado que está sendo realizado na EPUSP, intitulado "Estudo e Desenvolvimento de Métodos Para os Ensaios de Carbonatação e Potencial de Corrosão Visando a Padronização"⁸

Outro ponto chave da avaliação de um material/sistema de reparo é quando essa avaliação deve ser feita. Nos estudos em laboratório é muito comum realizar a avaliação dos parâmetros eletroquímicos do sistema em análise por alguns meses antes de se iniciar a contaminação/envelhecimento e, prosseguir com esse estudo por um período equivalente ao já decorrido. Isso, no entanto, só é viável em projetos experimentais, já que em situações reais de controle de recebimento de reparos, muitas vezes não se obtém informações suficientes relativas ao período anterior a este. Dessa forma, a solução seria proceder à análise dos parâmetros eletroquímicos em uma área de referência, a qual não foi reparada e possui uma situação de exposição semelhante à da área analisada.

Além disso, ANDRADE (2000) afirma que, para a avaliação de corrosão em estruturas expostas ao meio ambiente, o período durante o qual a análise deve ser conduzida deve ser maior ou igual a

⁸ SILVA, F. G. Estudo e Desenvolvimento de Métodos para os Ensaios de Carbonatação e Potencial de Corrosão Visando a Padronização. (Em desenvolvimento).

um ano. Essa afirmação baseia-se na grande influência do macro e micro-clima no comportamento da estrutura quanto à corrosão. ANDRADE (2000) e BRITTO (1998) mostraram que os parâmetros eletroquímicos acompanham a sazonalidade dos parâmetros ambientais. Outro ponto importante que não deve ser esquecido quando do tempo de análise é o processo de hidratação dos materiais/sistema de reparo e a conseqüente estabilização dos parâmetros eletroquímicos. As curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica obtidas por SILVA (2006) mostram claramente o efeito da hidratação do cimento na resistência à polarização dos corpos-de-prova armados.

Depois de definir o que e quando avaliar, pode-se então lançar mão de dois tipos principais de ensaios: de caracterização e eletroquímicos.

2.5.1 Ensaios de caracterização

Esses ensaios verificam as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos materiais/sistemas de reparo. Apesar boa parte destes ensaios não avaliarem diretamente o comportamento destes materiais/sistemas de reparo frente ao desenvolvimento da corrosão, muito dos ensaios mais comuns oferecem dados valiosos para se estimar este comportamento. Outros ensaios estão ligados diretamente ao comportamento estrutural destes materiais/sistemas e a sua compatibilidade física com o substrato. A Tabela 2-2 mostra os principais parâmetros de caracterização e as suas correlações com o desempenho dos materiais/sistemas de reparo.

Tabela 2-2 – Resumo das propriedades físico-mecânicas e a sua relação com o desempenho dos materiais/sistemas de reparo.

| Propriedade | Influência no desempenho do reparo |
|--|--|
| <i>Absorção capilar</i> | <i>Capacidade de absorver líquidos por meio da ação capilar, podendo acarretar no acesso de agentes agressivos ao interior do concreto e conseqüentemente às armaduras. Relacionado diretamente ao período de iniciação da corrosão.</i> |
| <i>Porosidade/Índice de vazios</i> | <i>Quantidade de poros existentes no concreto. Inlui no acesso de agentes agressivos e na corrente iônica durante a corrosão. Relacionado tanto ao período de iniciação, quanto ao de propagação da corrosão.</i> |
| <i>Resistência à compressão</i> | <i>Capacidade de resistir a esforços de compressão. Relacionado ao desempenho mecânico e capacidade de suporte do reparo. Está relacionado indiretamente à quantidade de poros existentes no concreto e a sua relação com a corrosão das armaduras. Vale ressaltar que outros fatores influenciam diretamente a porosidade, como o tipo de cimento, tipo de adição etc.</i> |
| <i>Resistência à tração</i> | <i>Relacionado diretamente ao desempenho mecânico do reparo e sua capacidade de suporte. Tem relação direta com a fissuração dos materiais/sistemas de reparo e as suas conseqüências no desempenho do reparo.</i> |
| <i>Módulo de elasticidade</i> | <i>Relaciona os esforços com a respectiva deformação. Inlui diretamente no desempenho mecânico do reparo e na sua capacidade de suporte. Está bastante relacionado à fissuração destes materiais/sistemas e as suas conseqüências.</i> |
| <i>Resistência de aderência</i> | <i>Uma das principais propriedades dos materiais/sistemas de reparo. Mede a capacidade de fixação destes junto ao substrato/estrutura. Relacionado a problemas de delaminação/descolamento e à fissuração da interface material de reparo/substrato.</i> |
| <i>Variação dimensional</i> | <i>A variação dimensional dos materiais/sistemas de reparo (seja de origem térmica, química ou higroscópica) é a principal causa de falha destes. Essas variações dimensionais geram tensões que podem levar à formação de fissuras, que por sua vez, criam condições de acesso para os agentes agressivos, comprometendo o desempenho de um material/sistema de reparo.</i> |
| <i>Difusão e migração de cloretos</i> | <i>Está relacionada à capacidade de penetração de cloretos no interior do material/sistema de reparo. Quanto maior a dificuldade ao ingresso destes íons no interior do material/sistema de reparo, maior é o período de iniciação da corrosão nas armaduras de aço embebidas no mesmo.</i> |
| <i>Determinação do teor de cloretos</i> | <i>Realizado em materiais já contaminados com íons cloretos, permite determinar, conhecendo se o tempo de contaminação decorrido, a velocidade com que os íons penetraram neste material, além do tipo de contaminação ocorrido: na moldagem ou externa. Através dos dados obtidos no ensaio, e do valor do cobrimento de concreto sobre as armaduras de aço, pode-se determinar se o período de iniciação da corrosão nestas já foi superado, ou, até mesmo se estimar quando será.</i> |
| <i>Determinação da espessura de carbonatação</i> | <i>A determinação da espessura de concreto carbonatada permite inferir, conhecendo se o tempo de contaminação decorrido, a velocidade com a qual ocorre o processo de degradação pela ação do CO₂. Além disso, confrontando esses dados com o valor do cobrimento de concreto existente sobre as armaduras de aço, é possível determinar se o período de iniciação da corrosão nestas já foi superado, ou, até mesmo se estimar quando será.</i> |

Dos ensaios de caracterização com influência direta no desenvolvimento do processo corrosivo, alguns ensaios merecem destaque.

2.5.1.1 Difusão e migração de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos é um parâmetro utilizado para caracterizar o concreto de maneira a predizer sua durabilidade, ou seja, sua resistência à penetração de íons.

O método ideal para se determinar este coeficiente seria o caso da pura difusão onde se colocaria uma fatia do corpo-de-prova a ser ensaiado entre duas câmaras contendo soluções com grande diferença de concentração de íons cloreto. Este aparato é comumente chamado de célula de difusão.

Usa-se a primeira lei de Fick para calcular o coeficiente efetivo de difusão (D_{eff}), para o fluxo no estado estacionário, e a segunda lei de Fick para calcular o coeficiente aparente de difusão (D_a), para fluxos não estacionários. Este método demanda um tempo demasiadamente longo para se obter algum resultado. Daí a necessidade de se impor uma diferença de potencial elétrico, acelerando a taxa de penetração dos íons cloreto, quando se deseja resultados rápidos (ANDRADE, 1993).

No teste de migração de cloretos, o fluxo de cloretos é acelerado por meio de um campo elétrico aplicado entre as duas câmaras da célula de difusão, com o auxílio de dois eletrodos metálicos. Os únicos métodos normalizados são ASSHTO T 277-83 Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete e ASTM C 1202 Test Method for Electrician Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration que utilizam duas câmaras, onde uma contém uma solução de Cloreto de Sódio 3% e a outra Hidróxido de Sódio 0,1 M. A diferença de potencial aplicada é de 60 Volts e é medido a quantidade de Coulombs durante 6h de ensaio. O ensaio assume uma direta relação entre a quantidade de Coulombs e o fluxo de cloretos, ou seja, uma grande quantidade de Coulombs representa uma grande "permeabilidade" do concreto aos cloretos.

2.5.1.2 Determinação do teor de cloretos

Este método consiste em perfurar pequenos orifícios no concreto, preferivelmente até o nível das armaduras, coletando amostras do concreto ou argamassa em forma de pó, ou retirando pequenos pedaços do material, os quais devem ser moídos, para posteriormente serem analisados em laboratório, a fim de determinar o teor de cloretos, sejam estes cloretos totais (solúveis em ácido) ou livres (solúveis em água). O teor limite de cloretos no concreto para desencadear o processo de corrosão não é um valor único, sendo dependente de vários fatores.

O número de determinações, bem como a escolha do local de extração das amostras fica a critério do engenheiro responsável. Inspeções visuais com a detecção dos locais de maior risco são recomendadas antes da coleta das amostras.

Existem vários métodos para se determinar o teor de cloretos em concretos ou argamassas, dos quais pode-se citar o método de Volhard, Quantab test, RCT (Rapid Chloride Test), método de Mohr e análise através do eletrodo de íon seletivo sensível aos íons cloreto (GRAN, 1992). Existem também os métodos de ensaio sugeridos pelas normas ASTM C 1411-92 Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixes in Graded Aggregate Road Mixes e ASTM C 1152-92 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

2.5.1.3 Determinação da espessura de carbonatação

As técnicas de laboratório que podem ser usadas para determinar a profundidade de carbonatação incluem análise química, difração de raios X, espectroscopia por infravermelho e análise termogravimétrica (NEVILLE, 1997). Entretanto, o método mais difundido consiste em uma análise qualitativa através da aspersão de indicadores químicos na superfície do concreto. Os reagentes usualmente empregados são a timolftaleína ou a fenolftaleína no teor de 1%, em diluições em solução 1:1 de água e álcool etílico, conforme o valor de detecção desejado.

O procedimento utilizado no ensaio consiste em fraturar o revestimento de concreto, na direção ortogonal à superfície do componente estrutural em estudo, de preferência até as armaduras, para determinar também a espessura de revestimento. Imediatamente após a fratura deve-se pulverizar a solução indicadora sobre a superfície do concreto, aguardando de um a dois minutos para que o indicador altere a sua cor (ANDRADE, 1992). Se não é possível fraturar o próprio concreto em estudo, pode-se obter amostras de pó perfurando o concreto até diversas profundidades, submetendo-as ao ensaio com o indicador químico. É necessário cuidado, pois se a cal livre de uma parte não carbonatada contaminar uma amostra, esta se tornará colorida, dando a impressão de ausência de carbonatação (NEVILLE, 1997).

Para um pH acima da sua faixa de transição (8,2 a 10,0) a fenolftaleína apresenta uma coloração vermelho-carmim, sendo incolor abaixo desta faixa. Já a timolftaleína apresenta um pH de modificação de 9,4 a 10,6, onde acima desta faixa tem coloração azul escuro, não apresentando cor para valores abaixo da faixa (HELENE, 1993). Então, a parte que permanecer incolor indica a

acidificação do meio, mostrando o avanço da frente de carbonatação, e a parte que apresentar coloração, indica que a alcalinidade do meio está preservada.

A parte incolor, ou seja, a espessura de carbonatação, deve ser medida, recomendando-se medir em certas regiões críticas tais como cantos, ao redor dos agregados graúdos e outros pontos onde se esperam profundidades maiores de carbonatação. O número ideal de determinações a serem realizadas depende da agressividade ambiental, das condições de exposição do elemento e da área exposta do mesmo. Considerando tais critérios, o profissional decide a quantidade adequada de leituras necessárias para cada condição em particular. A principal informação que se pretende com esta medida é saber se a frente de carbonatação atingiu a armadura ou não, se ela provocou ou contribui à deterioração da estrutura (HELENE, 1986).

2.5.2 Ensaios eletroquímicos

Estes ensaios têm a finalidade de obter dados sobre o desenvolvimento do processo corrosivo, seja do ponto de vista termodinâmico (probabilidade de corrosão), seja do ponto de vista cinético (velocidade de deterioração). A seguir, tem-se uma breve descrição dos principais métodos de ensaios eletroquímicos.

2.5.2.1 Potencial de corrosão

Devido à sua simplicidade e rapidez, este método tem sido muito utilizado para avaliar qualitativamente o processo de corrosão em estruturas de concreto armado, através de mapas de potencial da estrutura em estudo, os quais revelam as áreas mais prováveis onde o processo de corrosão está ativo, no entanto, sem indicar a velocidade do mesmo (RODRÍGUEZ et AL., 1994).

O princípio do método consiste em medir a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho, que no caso são as armaduras, e um eletrodo de referência, através de um voltímetro de alta impedância, geralmente acima de 10 M Ω , de forma a se reduzir os efeitos de polarização. O circuito da pilha eletroquímica é então fechado através de uma interface condutiva, podendo ser uma esponja, colocada entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto. Os eletrodos de referencia mais usados nesse método são o de calomelano saturado (ECS), o de cobre/sulfato de cobre (ESC) e o de prata/cloreto de prata (ECP), (DEVALAPURA et AL., 1994).

A maior desvantagem desse método é a falta de informação a respeito da velocidade de corrosão (i_{corr}) e a exigência da continuidade do contato elétrico sobre toda a área a ser investigada.

Outro problema que deve ser mencionado é a limitação da técnica para estruturas submersas e/ou muito úmidas, onde a presença de água nos poros do concreto pode reduzir a concentração de oxigênio no mesmo levando a resultados de potenciais de corrosão mais negativos. Esses valores podem então levar a uma falha na interpretação dos resultados, conduzindo a conclusões errôneas sobre o risco de corrosão de uma estrutura.

2.5.2.2 Resistividade elétrica – Método dos quatro eletrodos

Segundo Helene (1993), a resistividade elétrica do concreto é um dos parâmetros mais importantes para o controle da velocidade de corrosão, pois ela regula o fluxo de íons que se deslocam através da solução aquosa presente nos poros do concreto. O autor também esclarece que tal propriedade é fortemente afetada pelo teor de umidade de equilíbrio e pela temperatura do concreto. CASCUDO (1997) indica que a resistividade elétrica do concreto e o acesso de oxigênio às armaduras de aço são os principais elementos controladores do fenômeno eletroquímico de corrosão de armaduras.

O método de ensaio dos quatro eletrodos, ou método de WENNER, normalizado pela ASTM G-57:1998, consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre dois eletrodos que estão em contato com a superfície do concreto. Entre os pólos, forma-se um campo elétrico volumétrico ao logo do concreto. A diferença de potencial entre os dois eletrodos sofre uma redução ao longo do percurso de cada uma das linhas de campo devido à resistividade elétrica do concreto. Dois eletrodos alinhados com os primeiros e situados a um terço da distância total registram a diferença de potencial entre os dois pontos do terço médio. Por meio da equação expressa abaixo, desenvolvida para um campo elétrico formado em um meio semi-infinito, pode-se calcular a resistividade elétrica do concreto a partir das condições de realização do ensaio. A Figura 2-7 ilustra o funcionamento do método e uma aplicação.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot V / I$$

Equação 3

Onde:

- ρ = resistividade elétrica (Ohm x cm);
- a = espaçamento entre eletrodos (cm);
- V = diferença de potencial aplicada (Volts);
- I = corrente elétrica (Ampère).

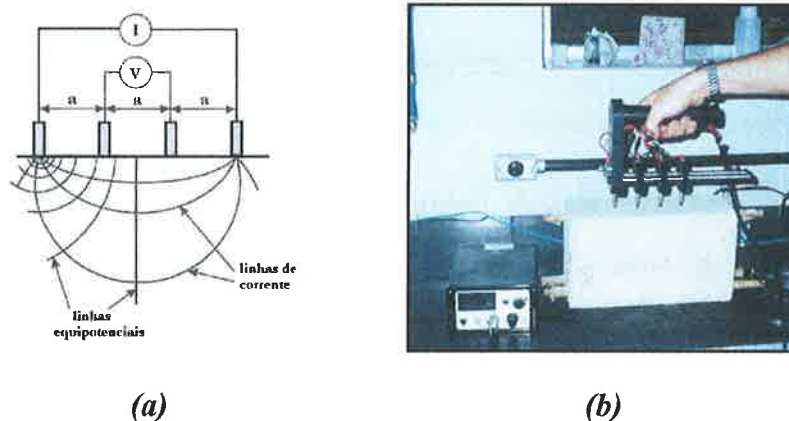


Figura 2-7 – (a) Representação esquemática do funcionamento do ensaio de resistividade elétrica (Gowers & Millard, 1999); (b) ensaio em um corpo-de-prova de concreto.

2.5.2.3 Resistência de polarização linear

O método de Resistência de Polarização foi originalmente desenvolvido por STERN e colaboradores, entre os anos de 1957 e 1959. No entanto, somente nos anos 70, ANDRADE e GONZÁLEZ introduziram o método para determinar a velocidade de corrosão de armaduras em argamassas e concretos (ANDRADE & GONZÁLEZ, 1988; RODRÍGUEZ et al, 1994; CASCUDO, 1997).

A resistência de polarização pode ser entendida como a inércia que o sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, frente a uma polarização imposta. Utiliza o estímulo de uma diferença de potencial aplicada à armadura, exercendo uma polarização ao redor do potencial de circuito aberto. Esse potencial deve ser medido antes da aplicação da polarização.

Admite-se que a curva de polarização para pequenas sobretensões ao redor do potencial de circuito aberto sofre uma variação linear. Esta pequena sobretensão pode ser da ordem de ± 10 a 20 mV. Devem ser evitados valores muito elevados para não comprometer a hipótese básica de linearidade da curva de polarização. A resistência de polarização pode então ser correlacionada à taxa de corrosão pela equação proposta por STERN & GEARY (1957):

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

Equação 4

Onde:

R_p = resistência de polarização

B = constante de Stern e Geary

I_{corr} = corrente de corrosão

A constante de Stern e Geary é função das constantes de Tafel, obtidas por técnicas eletroquímicas que utilizam elevadas sobretensões, perturbando destrutivamente as propriedades do eletrodo de trabalho (Figura 2-8). O valor de B é obtido então a partir da Equação 5.

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2,3 \cdot (b_a + b_c)}$$

Equação 5

Onde:

b_a → constante de Tafel anódica (mV);

b_c → constante de Tafel catódica (mV).

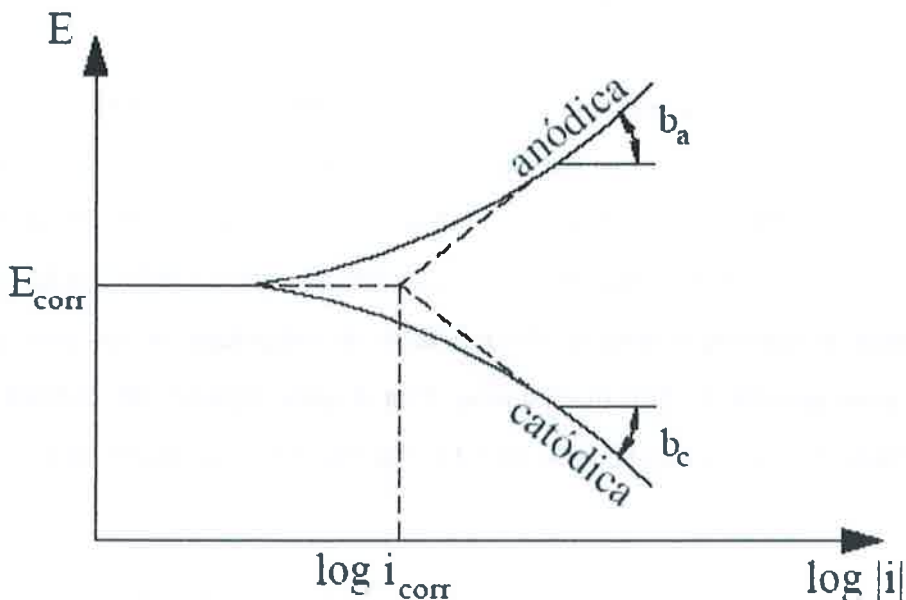


Figura 2-8 – Curva de polarização anódica e catódica

Caso não se tenha corpo de prova para a determinação das constantes de Tafel, pode se adotar o valor 26 mV no caso de corrosão ativa e 52mV no caso de armadura passiva.

A metodologia em questão tem sido amplamente empregada pela Dra Carmen Andrade e colaboradores que, inclusive, desenvolveram um instrumento denominado GECORR (atualmente é comercializado o GECORR8) para medida da velocidade instantânea de corrosão em campo, uma vez que até recentemente a literatura registrava somente aplicações em laboratório em condições especiais, com corpos-de-prova de configuração limitada.

O caminho inverso, ou seja, variar a corrente e registrar a variação do potencial também é utilizado, sendo denominado de método galvanostático. O valor de R_p será, por definição, o quociente entre as variações de potencial e corrente, desde que ΔE e ΔI sejam suficientemente pequenos (Equação 6).

$$R_p = \lim_{\Delta E, \Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

Equação 6

Quanto maior for a R_p , menos intensas serão as taxas de corrosão encontradas, sendo que no caso de sistemas com altos valores de R_p , como as armaduras passivas em concreto, os índices de corrosão são desprezíveis (CASCUDO, 1997). Deve-se ter cuidado ao aplicar as polarizações, pois se estas forem demasiadamente grandes, pode-se modificar a superfície do eletrodo, inabilitando o mesmo para futuras determinações.

BROOMFIELD (1991) apud GONZÁLEZ et AL. (1996), comparou os valores limites obtidos por diversos autores, para as taxas de corrosão, no que diz respeito ao processo de corrosão, encontrando critérios de avaliação diferenciados. A Figura 2-9 compila estes valores obtidos com diversos instrumentos, aplicados a diferentes estruturas sob circunstâncias diferenciadas. Nota-se que há certa discordância entre os autores, a respeito de que valor de velocidade de corrosão o processo corrosivo torna-se preocupante. É claro que se deve fixar o grau máximo de corrosão aceitável, de acordo com o propósito para o qual a estrutura foi projetada. Dentre todos, os mais utilizados são os propostos por Andrade.

Taxas de corrosão acima de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, as quais facilmente são alcançadas em presença de cloretos e umidade, irão demandar menos de 10 anos para exaurir a vida útil das estruturas, o que é muito pouco tempo quando comparado com as predições tidas na etapa de projeto das estruturas de concreto armado, e portanto, estas devem ser consideradas como altamente perigosas (GONZÁLEZ et al, 1998).

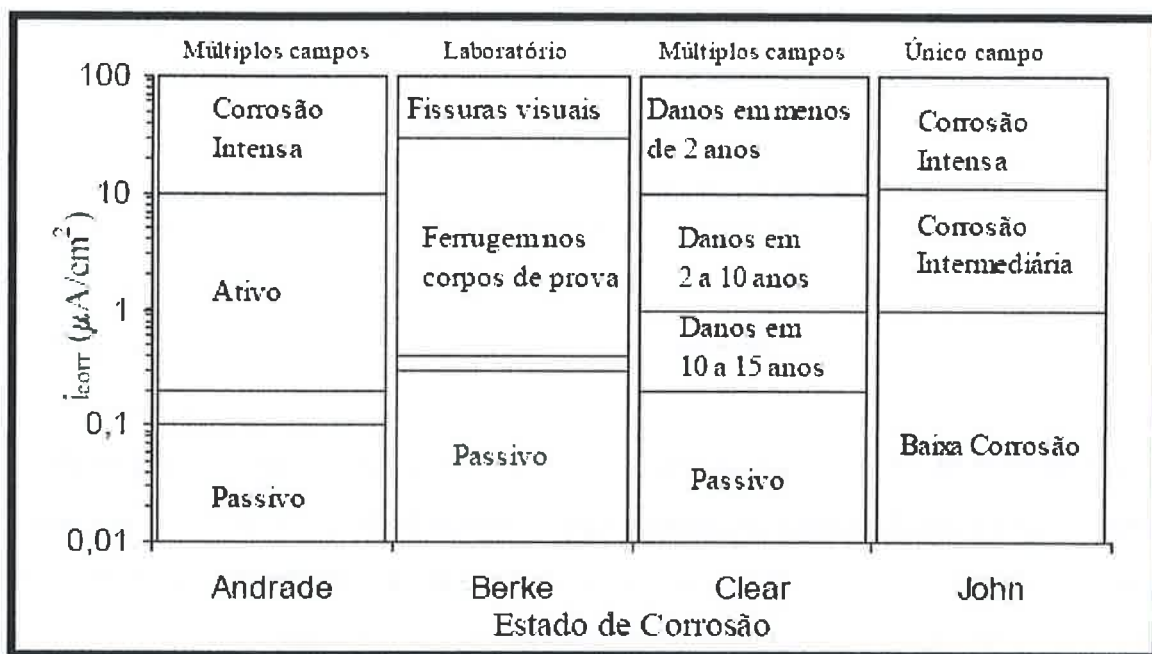


Figura 2-9 – Comparação entre as taxas de corrosão de diversos autores (BROOMFIELD, 1991 citado por GONZÁLEZ et AL., 1996).

GONZÁLEZ (1989) tece algumas críticas a respeito da técnica de Resistência de Polarização quando utilizada para determinar a velocidade de corrosão em aços imersos em concretos ou argamassas, as quais são citadas a seguir.

- Inexatidão do método, pois a relação $\Delta E/\Delta I$ é uma aproximação linear da diferença entre funções exponenciais;
- Suposição de constância das tangentes de Tafel, o que equivale a supor B invariável, o que evidentemente não é o caso de alguns sistemas reais;
- Pode ocorrer uma queda ôhmica devido às capas dos produtos de corrosão que eventualmente podem recobrir o eletrodo ou devido ao eletrólito (resistividade do meio);
- A instabilidade de E_{corr} representa, na prática, uma limitação tão importante que pode resultar na inaplicabilidade do método;
- Como no cálculo da i_{corr} , a área da armadura já está predeterminada, para fenômenos de corrosão localizada, a informação inferida pelo método de resistência de polarização pode induzir erros graves pois não se saberia a fração da superfície afetada, no entanto, não se pode desprezar a técnica em tais circunstâncias, pois esta pode informar perfeitamente

sobre o momento em que se inicia tal ataque, detectado por variações de R_p de uma a várias ordens de magnitude.

2.5.2.4 Método do pulso galvanostático

O método do pulso galvanostático é uma técnica de polarização não-destrutiva que tem sido utilizada para a avaliação do processo de corrosão em laboratório e em campo. Este método foi introduzido pela primeira vez em campo em 1988 (ELSENER, 1988). Desde então, sua utilização e desenvolvimento tem se dado principalmente na Dinamarca⁹, Suíça¹⁰, Alemanha¹¹ e Suécia¹². Segundo ELSENER et AL. (1997), este método foi inicialmente desenvolvido para superar falhas de interpretação na leitura do ensaio de potencial de corrosão (a falta de oxigênio em concretos muito úmidos, densos ou modificados com polímeros pode levar a potenciais de corrosão muito negativos, sem necessariamente significar alta probabilidade de corrosão).

Uma corrente anódica de curta duração é aplicada galvanostaticamente a partir de um contra-eletródo posicionado sobre a superfície do concreto. Normalmente é aplicada uma corrente na faixa de 5 a 400 μA , com duração típica de até 10 segundos. A pequena corrente anódica aplicada promove alterações no potencial da armadura de aço, que são monitoradas com o auxílio de um eletródo de referência e registradas em função do tempo. Essa alteração de potencial se dá na direção anódica quando comparada ao potencial de corrosão livre do aço. A Figura 2-10 mostra o transiente de resposta típico para o sistema submetido ao pulso galvanostático.

⁹ FORCE Institute, Corrosion Department, Brøndby, Dinamarca.

¹⁰ Institut for Materials Chemistry and Corrosion, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Hönggeberg, Zurique, Suíça.

¹¹ BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlim, Alemanha.

¹² SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Suécia.

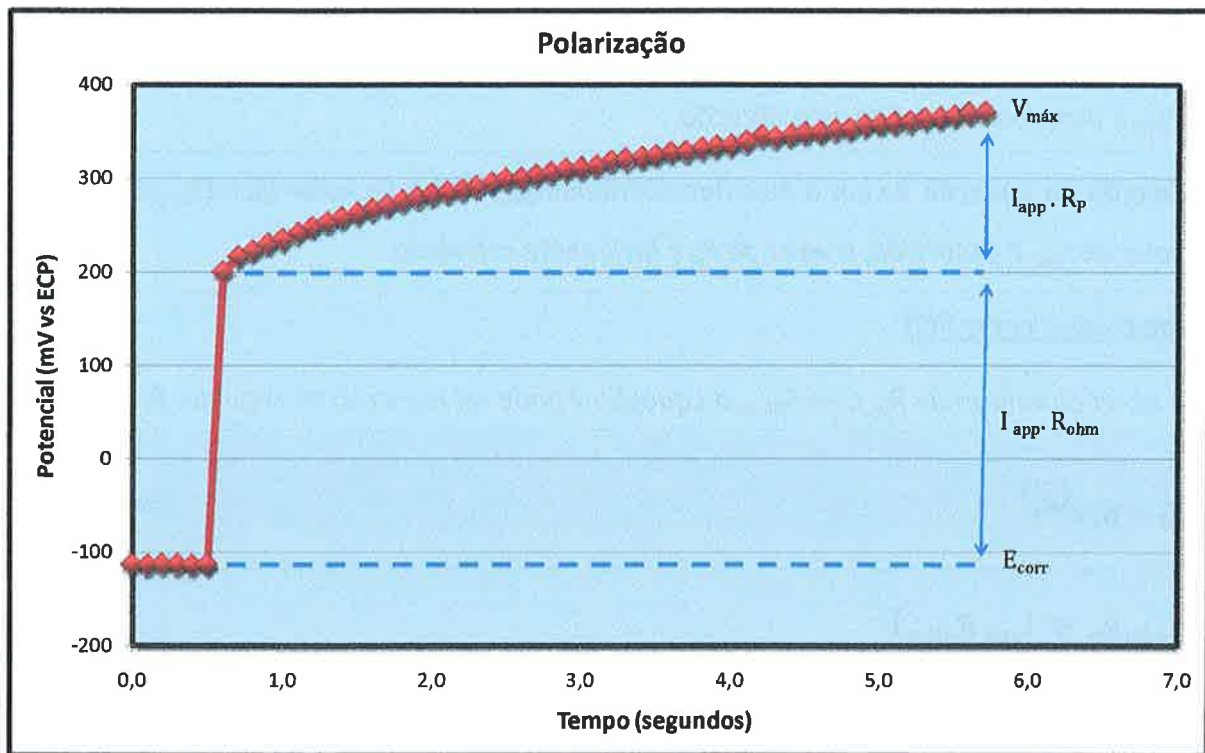


Figura 2-10 – Transiente de reposta típico para o método do pulso galvanostático.

Quando a corrente (I_{app}) é aplicada ao sistema, o potencial do aço polarizado (V_t), num dado tempo, pode ser expresso como:

$$V_t = I_{app} \left(R_p \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{R_p C_{dl}} \right) \right) + R_{ohm} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

R_p : resistência de polarização

C_{dl} : capacitância de dupla camada

R_{ohm} : resistência ôhmica

Para se obter os valores de R_p , C_{dl} e R_{ohm} , dois métodos de cálculo são normalmente utilizados: o método de linearização e o de ajuste de curva ("curve fit")

Linearização

Para se obter os valores de R_p e C_{dl} , separadamente da resistência ôhmica, esta equação pode ser linearizada como mostra a Equação 8.

$$\ln(V_{m\acute{a}x} - V_t) = \ln(I_{app}R_p) - \frac{t}{(R_p C_{dl})} \quad \text{Equação 8}$$

Onde $V_{m\acute{a}x}$ é o potencial final de estabilização.

A intersecção da Equação 8 com o eixo das coordenadas resulta no valor de $\ln(I_{app}R_p)$. Uma vez que o valor de I_{app} é conhecido, o valor de R_p é facilmente calculado.

Ajuste de curva ("curve fit")

Para se obter os valores de R_p , C_{dl} e R_{ohm} , a Equação 7 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$V_t = K_0 - K_1 e^{\left(\frac{-t}{K_2}\right)} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$$K_0 = (I_{app}R_p + I_{app}R_{ohm})$$

$$K_1 = I_{app}R_p$$

$$K_2 = (R_p C_{dl})$$

Os valores dos parâmetros K_0 , K_1 e K_2 são então determinados pelo método dos mínimos quadrados. Extrapolando-se então a curva obtida da Equação 9 para o tempo zero ($t=0$) se obtêm o valor de R_{ohm} ($V_t(0) = I_{app}R_{ohm}$). Já extrapolando-se a curva para o tempo infinito ($\lim_{t \rightarrow \infty} V_t = (I_{app}R_p + I_{app}R_{ohm})$) podemos calcular R_p .

De posse do valor de R_p , a taxa de corrosão pode ser então calculada utilizando a equação proposta por STERN & GEARY (1957), conforme discutido no item 2.5.2.3.

A Tabela 2-3 classifica o grau de corrosão em função da densidade de corrente obtida pelo método do pulso gavanostático (FRÖLUND ET AL., 2002).

Tabela 2-3 – Classificação da taxa de corrosão em função do i_{corr} (FRÖLUND ET AL., 2002).

| i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Classificação |
|--|----------------------|
| < 0,5 | Área passiva |
| 0,5 a 2 | Corrosão desprezível |
| 2 a 5 | Corrosão baixa |
| 5 a 15 | Corrosão moderada |
| > 15 | Corrosão elevada |

2.5.2.5 Impedância eletroquímica

Este método tem provado ser uma poderosa ferramenta na investigação do processo de corrosão, pois fornece informações a respeito do estado da armadura (se passiva ou ativa), além de dados sobre a velocidade de corrosão (i_{corr}) e sobre a morfologia do ataque, bem como sobre o mecanismo de controle eletroquímico (ativação ou difusional).

O método consiste em aplicar ao eletrodo de trabalho, que no caso é a armadura em estudo, um sinal senoidal de amplitude a ser escolhida, que pode ser de potencial (ΔE) ou de corrente (ΔI), em um amplo intervalo de frequências, tipicamente de 100kHz a 10mHz. Como resposta do sistema, tem-se outro sinal senoidal, que pode ser uma corrente (ΔI) ou um potencial (ΔE), o qual se distingue do aplicado, através dos valores de amplitude e ângulo de fase, para cada frequência. A relação entre ambos os sinais é chamada de impedância (Z). Os equipamentos demandados para realização dos ensaios são idênticos aos dos métodos de Curvas de Polarização e Resistência de Polarização, com adição de um analisador de resposta de frequência (DEVALAPURA et AL., 1994).

A forma mais utilizada para expressar os resultados é através do diagrama de Nyquist que consiste de uma série de pontos, onde cada um representa a grandeza e a direção do vetor impedância, em cada frequência. Tem-se também o diagrama de Bode, que representa o ângulo de fase ou o módulo de impedância, em relação ao logaritmo da frequência, sendo que este é menos comum de ser encontrado em trabalhos técnicos envolvendo concreto (CASCUDO, 1997).

Algumas restrições são atribuídas ao método, tais como a dificuldade na interpretação dos resultados, a exigência de instrumentos mais caros e tempos de medida mais longos, particularmente em pequenas taxas de corrosão, as quais exigem frequências muito baixas, e a sua inaplicabilidade in situ devido à distribuição não uniforme da corrente ao longo das barras, principalmente quando o sinal enviado for de alta frequência (RODRÍGUEZ et AL., 1993).

3 Protótipo estrutural

A estrutura escolhida para ser reparada, e que foi avaliada, é uma grelha de concreto armado com dimensões de 21m por 4,5m com vigas longarinas de 70cm de altura por 15cm de espessura, e transversinas de 70cm por 10cm, parte da demolição da estrutura do edifício de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.1 Histórico do protótipo estrutural

O prédio da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo foi inaugurado em 10 de outubro de 1973, considerando-se que a obra durou aproximadamente dois anos para ficar pronta, acredita-se que a idade da estrutura, em 2007, é de aproximadamente 36 anos. A Figura 3-1 e a Figura 3-2 mostram o local de onde foi retirada a parte da estrutura que compõe o protótipo estrutural. A parte da estrutura que foi analisada é composta de duas grelhas de concreto armado como mostra a Figura 3-3. Cada grelha é constituída de nervuras finas e nervuras grossas cujas dimensões estão na Figura 3-4. A resistência característica do concreto no projeto utilizada na época foi de $f_{ck} = 15\text{MPa}$. O diâmetro das barras de aço das armaduras utilizadas foram de 6,3mm e de 8mm do tipo CA 24 (armadura principal, estribos e armadura de pele) laminada a quente, e de 20mm do tipo CA 40 (armadura principal), parte laminada a quente e parte torcida e tracionada (trabalhada) a frio.



Figura 3-1 – Foto da fachada da edificação de onde foi retirada a grelha que constitui o protótipo estrutural.



Figura 3-2 - Localização original das grelhas na estrutura de origem.



Figura 3-3 – Estrutura real composta de duas grelhas de concreto armado.

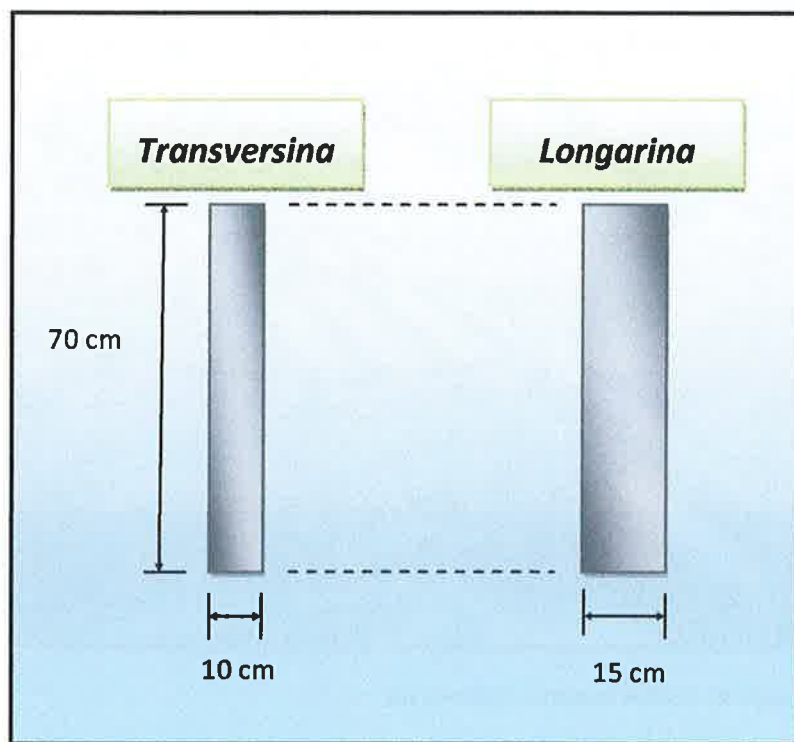


Figura 3-4 – Dimensões das longarinas e transversinas.

3.2 Inspeção preliminar

Na inspeção preliminar foram observados sinais evidentes de intensa corrosão das armaduras, que foi considerado o principal mecanismo de degradação que afetou a estrutura original. Em alguns

lugares apareciam fissuras ao longo do eixo longitudinal da armadura denotando o incremento de volume típico dos produtos corrosivos, que aparecem inicialmente como fissuras, em outros pontos observou-se o destacamento do concreto de cobertura e em algumas áreas a armadura já estava exposta manifestando uma perda de seção.

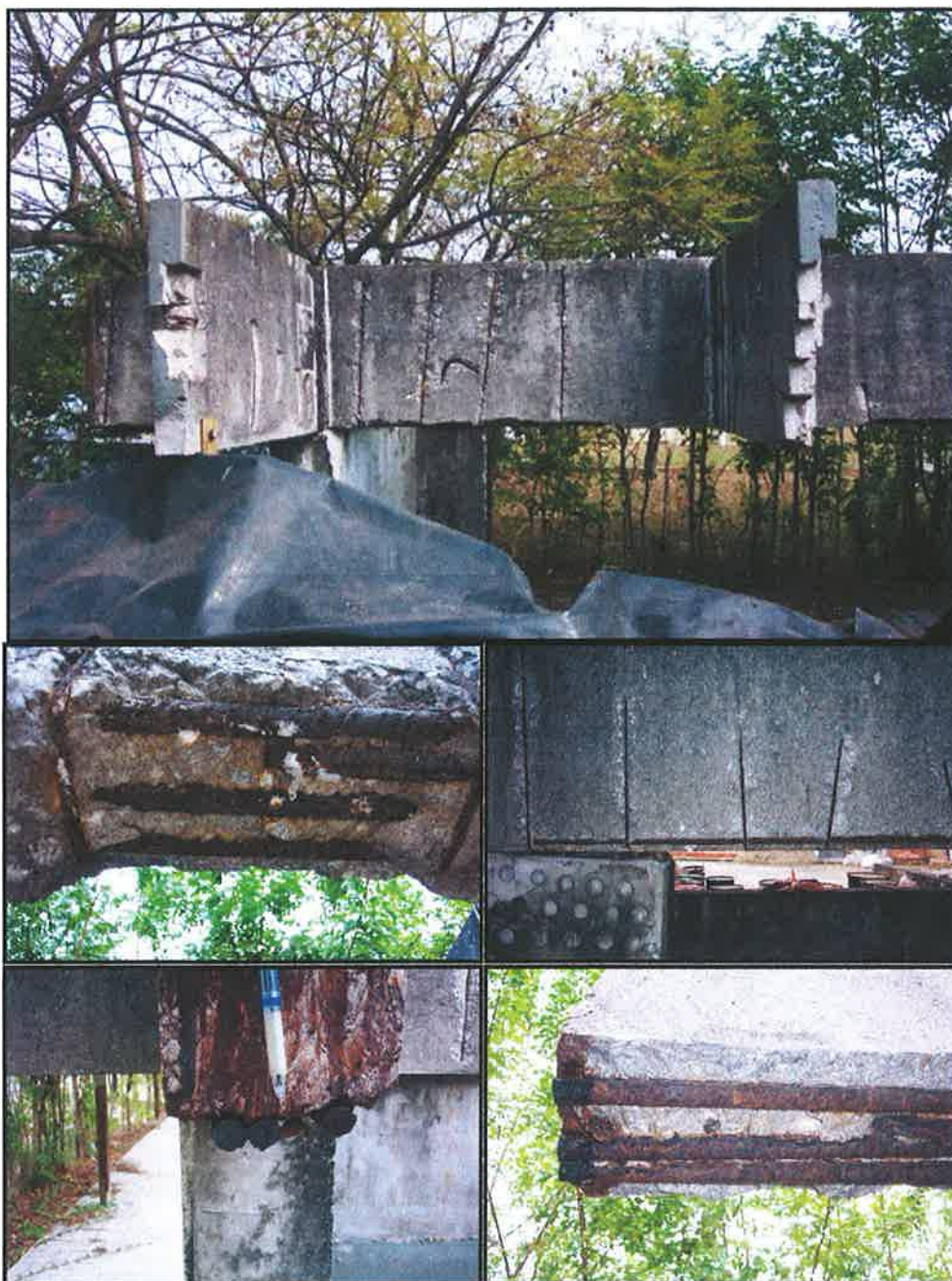


Figura 3-5 - Exemplos do estado de deterioração do protótipo.

3.3 Inspeção detalhada

Para melhor entendimento da situação inicial do protótipo estrutural, foi realizada uma inspeção detalhada a fim de se entender os mecanismos de deterioração predominantes, sua extensão e gravidade. Os ensaios realizados, bem como seus resultados estão descritos a seguir.

3.3.1 Localização das armaduras

O primeiro passo para a avaliação da estrutura foi a localização das armaduras e a determinação do cobrimento das mesmas. Para isso utilizou-se um pacômetro da marca Elcometer que possui, além de uma boa precisão, as seguintes características:

- *Sensor de leitura direcional – permite a determinação do alinhamento do aço (o sinal é mais intenso quando o sensor está alinhado ao aço; o sinal é nulo com o sensor perpendicular ao mesmo);*
- *Determinação de cobrimento – o aparelho possui a capacidade de analisar a intensidade do sinal eletromagnético e conhecida a bitola do aço, determinar a distancia a que este se encontra (cobrimento) e vice-versa.*

A Figura 3-6 mostra um exemplo da locação de armaduras e determinação de cobrimento de concreto.



Figura 3-6 – Detalhe da locação das armaduras e determinação do cobrimento de concreto.

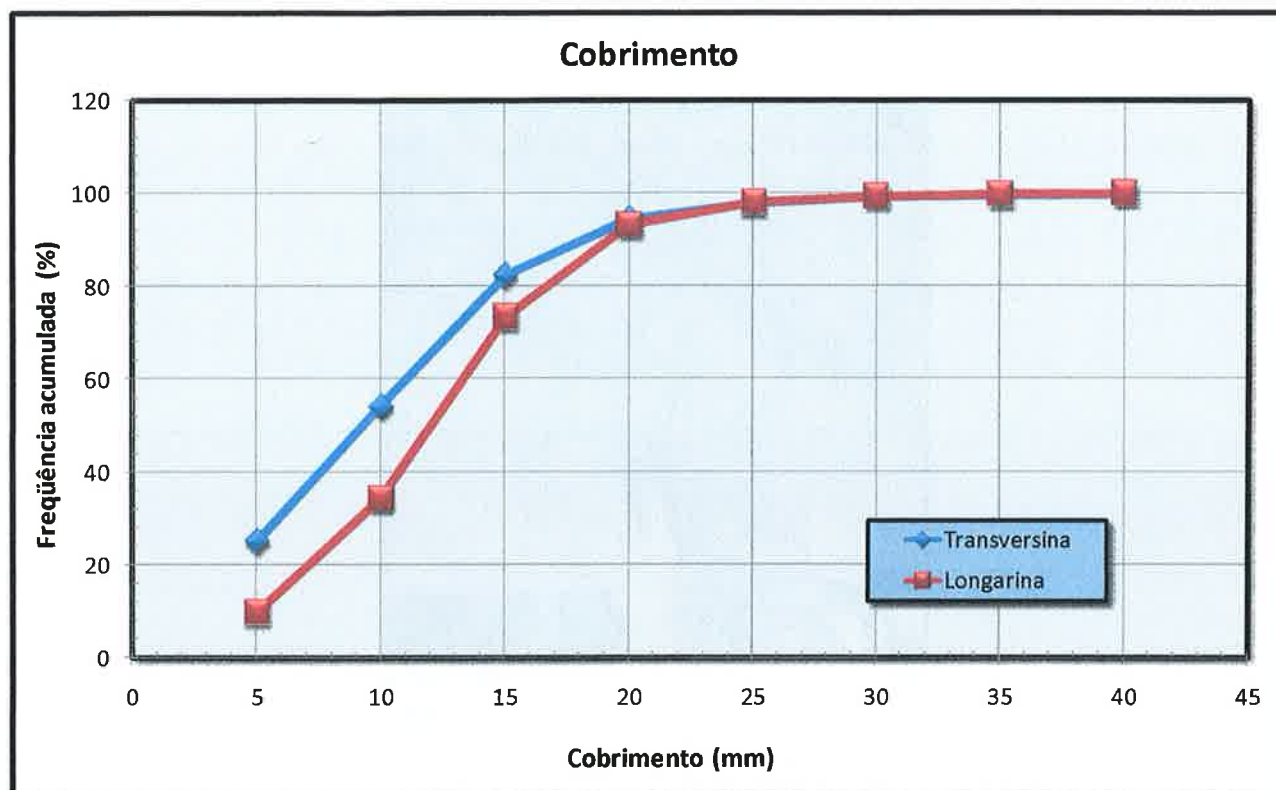


Figura 3-7 – Frequência acumulada do cobrimento de concreto no protótipo estrutural.

Tabela 3-1 – Valor do cobrimento de concreto do protótipo estrutural.

| Média | Desvio padrão | Coefficiente de variação |
|--------------|----------------------|---------------------------------|
| 11,7 mm | 6,4 mm | 55% |

Como podemos observar na Figura 3-7, aproximadamente 80% da estrutura tem cobrimento igual ou menor que o valor de 15mm definido em projeto, assim como a média do cobrimento que fica abaixo de 12mm. Outro fato importante de ser observado é o elevado coeficiente de variação (superior a 50% - Tabela 3-1). Isso leva a hipótese de que uma das origens dos problemas apresentados pela estrutura é devido a um erro executivo na locação das armaduras (fato que pode ser confirmado pela ausência de espaçadores – estes foram raramente encontrados no protótipo). Vale lembrar que esse protótipo, apesar de ser parte da cobertura de uma edificação, possui um caráter meramente arquitetônico, uma vez que só está sujeita ao seu peso próprio. Assim, muito provavelmente o controle de qualidade realizado durante a execução foi ineficaz.

3.3.2 Extração de testemunhos

Para melhor avaliação do estado do concreto fez-se necessária a avaliação de seus parâmetros físicos tais como absorção capilar, absorção por imersão e resistência à compressão. Estes parâmetros são necessários para uma melhor avaliação das causas e mecanismos de degradação do protótipo estrutural.



Figura 3-8 – Extração de testemunhos para caracterização das propriedades do protótipo estrutural.



Figura 3-9 – Detalhe da extração de testemunhos.



Figura 3-10 – Detalhe dos testemunhos extraídos.

As figuras acima apresentam detalhes da extração de testemunhos e dos mesmos depois de extraídos. Para a extração de testemunhos foi utilizada uma extratora da marca HILT com serra

copo de 7,5cm de forma a se preservar ao máximo a relação de altura/diâmetro dos corpos-de-prova próxima a dois. Foi realizada também uma avaliação da homogeneidade dos concretos utilizados nas nervuras finas e grossas através de uma análise de variância dos resultados obtidos nas diferentes situações.

3.3.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos testemunhos foi realizada segundo a NBR 7680:1983 atentando-se para as correções de resistência em função da relação altura/diâmetro.

Tabela 3-2 – Dados do ensaio de resistência à compressão realizado nos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.

| CP | Diâmetro (mm) | Altura (mm) | Relação h/d | Carga de ruptura (Tf) | Fator de correção | Tensão de ruptura (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coef. Variação (%) |
|------|---------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|-------------|---------------------|--------------------|
| EX1 | 73,82 | 90,58 | 1,227 | 15,6 | 0,86 | 31,4 | 33,8 | 4,8 | 14 |
| EX2 | 73,92 | 156,33 | 2,115 | 16,7 | 1,05 | 41,0 | | | |
| EX4 | 73,95 | 149,30 | 2,019 | 15,2 | 1,03 | 36,7 | | | |
| EX6 | 73,90 | 94,90 | 1,284 | 19,2 | 0,87 | 39,2 | | | |
| EX7 | 73,97 | 147,78 | 1,998 | 11,3 | 1,03 | 27,2 | | | |
| EX8 | 73,95 | 154,98 | 2,096 | 12,9 | 1,05 | 31,6 | | | |
| EX9 | 74,08 | 95,40 | 1,288 | 16,5 | 0,88 | 33,5 | | | |
| EX10 | 74,07 | 102,47 | 1,383 | 14,2 | 0,90 | 29,7 | | | |

Anova: fator único

RESUMO

| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Transversina | 4 | 133,9311899 | 33,48279747 | 17,22041041 |
| Longarina | 4 | 136,6258471 | 34,15646177 | 36,41915518 |

ANOVA

| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|-------------|----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Entre grupos | 0,907647172 | 1 | 0,907647172 | 0,033842451 | 0,860102168 | 5,987374152 |
| Dentro dos grupos | 160,9186968 | 6 | 26,8197828 | | | |
| Total | 161,826344 | 7 | | | | |

Figura 3-11 – Resultado da análise de variância realizada entre os grupos de resultados de resistência à compressão realizado em testemunhos extraídos de nervuras finas e nervuras grossas do protótipo estrutural.

Como podemos observar na Tabela 3-2 e na Figura 3-11 não existe diferença significativa entre os concretos utilizados nas nervuras finas e grossas, o que mostra a homogeneidade do concreto utilizado nestas. Outro fato importante que confirma essa hipótese é o coeficiente de variação, da ordem de 14%, próximo ao encontrado em canteiros de obras bem administradas, como mostra a Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Coeficientes de variação envolvidos nos processos de produção, ensaio e controle de concretos (adaptado de HELENE & TERZIAN, 1992)

| <i>Coeficiente de variação real do processo de produção do concreto</i> $V_{c,real} (%)$ | <i>Coeficiente de variação dos procedimentos de ensaio e controle</i> $v_e (%)$ | <i>Coeficiente de variação total do processo de produção e ensaio do concreto $v_c (%)$</i> <i>Resistência</i> |
|---|--|--|
| 9% <i>Usual em usinas gravimétricas</i> | <i>muito bom</i> | 3,0 |
| | <i>razoável</i> | 5,5 |
| | <i>deficiente</i> | 7,0 |
| 12% <i>Usual em canteiro de obras bem administradas</i> | <i>muito bom</i> | 3,0 |
| | <i>razoável</i> | 5,5 |
| | <i>deficiente</i> | 7,0 |
| 16% <i>Usual em canteiros de obras mal administradas</i> | <i>muito bom</i> | 3,0 |
| | <i>razoável</i> | 5,5 |
| | <i>deficiente</i> | 7,0 |

3.3.2.2 Absorção capilar e índice de vazios

Os ensaios de absorção capilar e índice de vazios foram realizados segundo a NBR 9779: 1995 e a NBR 9778:1995.

Tabela 3-4 – Dados do ensaio de índice de vazios dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.

| Índice de vazios | | | | | | | |
|------------------|--------|----------|----------|------------|--------|-------|-----|
| CP | Massa | | | I_v | | | |
| | Seco | Saturado | Submerso | Individual | Média | D.P | C.V |
| 1F | 826,3 | 886,3 | 489,3 | 15,11% | 13,93% | 0,71% | 5% |
| 2G | 1464,7 | 1560,1 | 882,8 | 14,09% | | | |
| 4G | 1402,5 | 1493,7 | 844,2 | 14,04% | | | |
| 6F | 885,1 | 944,7 | 526,5 | 14,25% | | | |
| 7G | 1359,2 | 1447,7 | 808,2 | 13,84% | | | |
| 8G | 1472,4 | 1558,9 | 882,4 | 12,79% | | | |
| 9F | 894,2 | 954,1 | 532,1 | 14,19% | | | |
| 10F | 972,6 | 1031,9 | 581,5 | 13,17% | | | |

A Tabela 3-4 mostra os resultados do ensaio de índice de vazios dos testemunhos extraídos do protótipo. Como se pode observar, o volume de vazios do concreto utilizado no protótipo, da ordem de 14%, é compatível com a classe de concreto empregada.

A Figura 3-12 apresenta os resultados do ensaio de absorção capilar realizado nos testemunhos extraídos do protótipo estrutural. Observa-se a semelhança entre os resultados obtidos nas longarinas e transversinas.

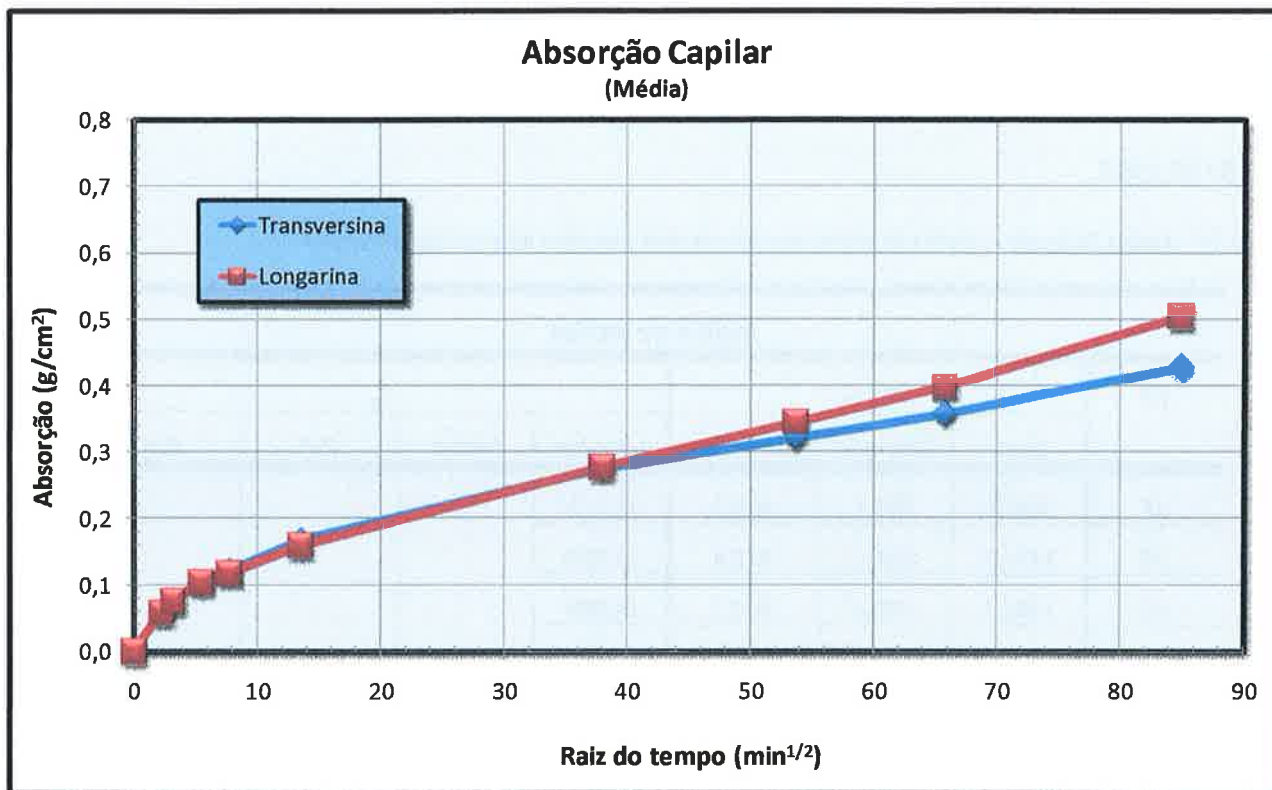


Figura 3-12 – Absorção capilar dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.

Assim como nos ensaios de resistência à compressão, a análise dos resultados provenientes das longarinas e transversinas não apresenta diferenças significativas (para o grau de confiança de 95%) como mostra o resultado da análise de variância (Figura 3-13) e é bem clara na análise da Figura 3-14. Isso reforça a idéia de homogeneidade do concreto empregado no protótipo estrutural levantada anteriormente.

Anova: fator único

RESUMO

| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Transversina | 4 | 0,567252918 | 0,14181323 | 6,34835E-05 |
| Longarina | 4 | 0,547522465 | 0,136880616 | 3,72851E-05 |

ANOVA

| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|-------------|----|-------------|-------------|----------|-----------|
| Entre grupos | 4,86613E-05 | 1 | 4,86613E-05 | 0,965803534 | 0,363681 | 5,987374 |
| Dentro dos grupos | 0,000302306 | 6 | 5,03843E-05 | | | |
| Total | 0,000350967 | 7 | | | | |

Figura 3-13 – Resultados da análise de variância dos resultados de absorção por imersão (índice de vazios) para os testemunhos extraídos do protótipo estrutural.

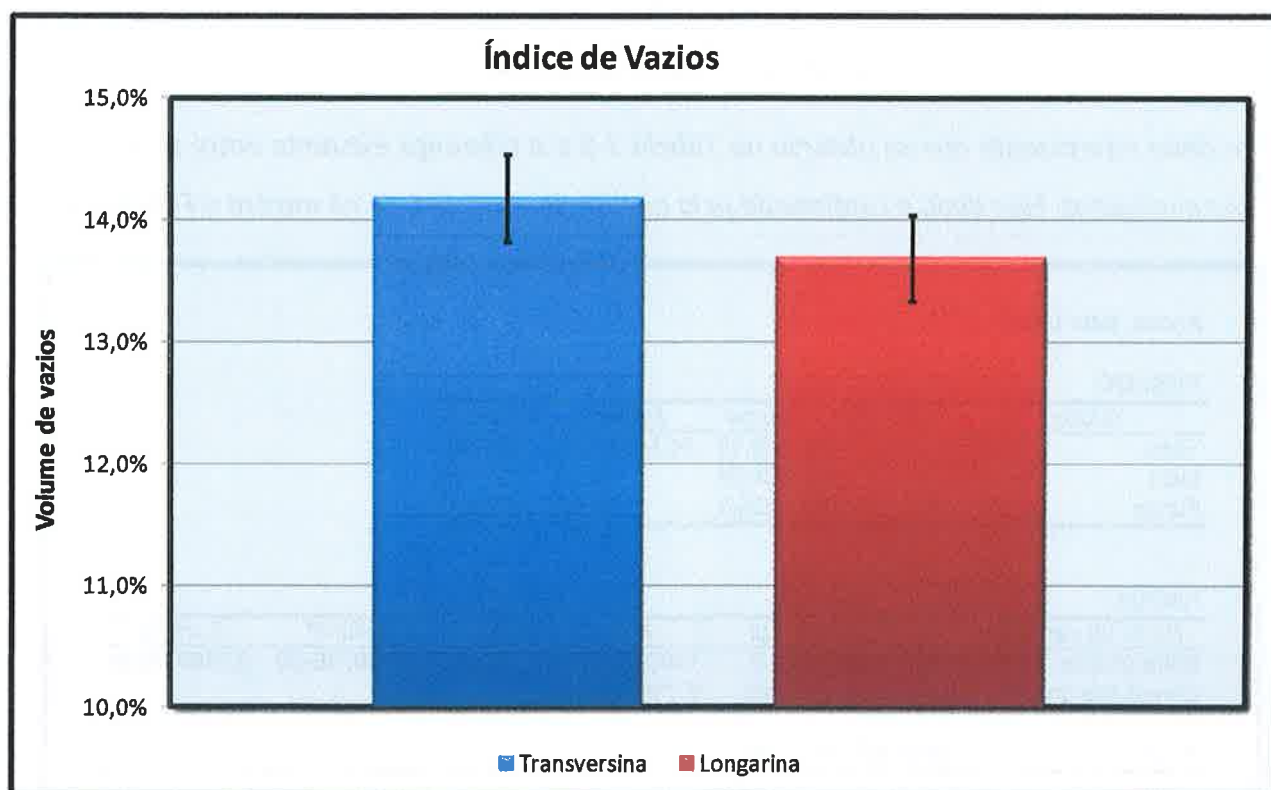


Figura 3-14 – Índice de vazios dos testemunhos extraídos do protótipo estrutural.

3.3.3 Carbonatação

O ensaio de carbonatação foi realizado em vários pontos da estrutura e em alturas diferentes. Para a avaliação da carbonatação utilizou-se como indicador uma solução de fenolftaleína em álcool etílico e água (1:1).

Tabela 3-5 – Espessura de carbonatação média do protótipo estrutural.

| | Média | Desvio padrão mm | Coefficiente de variação % |
|-------|---------|---------------------|-------------------------------|
| Geral | 22,8 mm | 8,5 mm | 38 % |
| Topo | 34,1 mm | 2,6 mm | 7,5% |
| Meio | 20,4 mm | 3,5 mm | 17,3% |
| Fundo | 15,0 mm | 2,9 mm | 19,5% |

A Tabela 3-5 apresenta os resultados do ensaio de carbonatação. Como se pode observar o valor médio de carbonatação é de aproximadamente 23 mm. Esse valor é bem superior ao valor médio do cobrimento, o que reforça a tese de que a estrutura está sofrendo um processo de deterioração com corrosão de armaduras devido à carbonatação. Como a idade da estrutura era de aproximadamente 30 anos na ocasião da realização deste ensaio, pode-se simplificarmente assumir que a taxa de carbonatação média da estrutura ao longo destes anos foi de $4,17\text{mm/ano}^{\frac{1}{2}}$. Esse valor é compatível com a classe de concreto empregada.

Outro dado interessante que se observa na Tabela 3-5 é a diferença existente entre as diferentes alturas analisadas. Esse dado é confirmado pela análise de variância, como mostra a Figura 3-15.

| Anova: fator único | | | | | | |
|--------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| Topo | 15 | 512,15 | 34,14333333 | 6,644952 | | |
| Meio | 15 | 305,55 | 20,37 | 12,4785 | | |
| Fundo | 15 | 225,3 | 15,02 | 8,592429 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 2920,145444 | 2 | 1460,072722 | 158,04 | 2,84874E-20 | 3,219938094 |
| Dentro dos grupos | 388,0223333 | 42 | 9,238626984 | | | |
| Total | 3308,167778 | 44 | | | | |

Figura 3-15 – Análise de variância dos resultados do ensaio de espessura de carbonatação.

Na Figura 3-16 pode-se observar claramente as diferenças entre as alturas analisadas. Essa diferença é significativa no trecho superior que apresenta um resultado de carbonatação bem superior aos demais. Também não observa-se diferenças entre o meio e o fundo das nervuras.

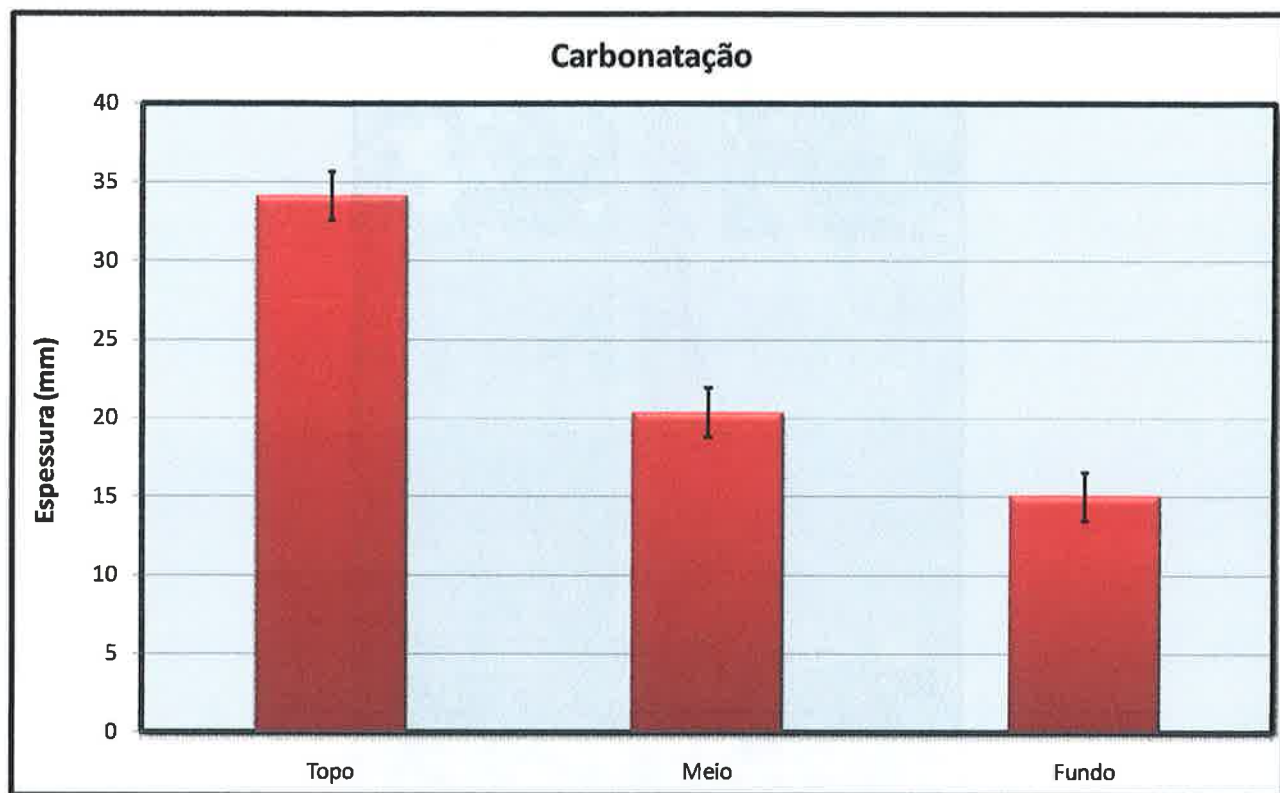


Figura 3-16 – Espessura de carbonatação no protótipo em diferentes alturas.

Durante a preparação da estrutura – adequação ao espaço físico do local onde ela está localizada – parte de uma das nervuras necessitou ser removida. Isso possibilitou a oportunidade única de avaliar a carbonatação em toda a altura desta nervura como mostra a Figura 3-17.

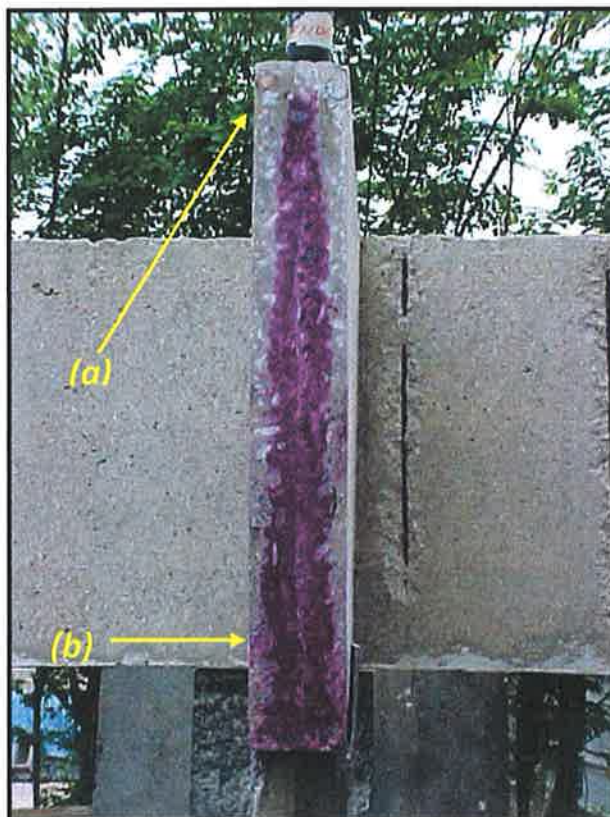


Figura 3-17 – Ensaio de carbonatação realizado no local do corte do protótipo estrutural. A redução acentuada do núcleo não carbonatado no ponto (a) com relação ao ponto (b) sugere a lixiviação do concreto neste ponto (a).

Observando a Figura 3-17, percebe-se uma clara redução no núcleo não carbonatado na parte superior da mesma. Isso mostra nitidamente a possível existência de um efeito de lixiviação na parte superior da nervura provocado possivelmente pela ação de chuvas ácidas e/ou deposição de resíduos industriais que na presença de água compõem algum tipo de ácido ($SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ por exemplo), associado a um efeito de segregação/exudação do concreto quando do seu lançamento. Essa figura confirma os resultados obtidos durante o ensaio de carbonatação.

3.4 Parecer final acerca da situação inicial do protótipo estrutural

Diante dos resultados obtidos ao longo da inspeção do protótipo pode-se concluir que a estrutura em questão apresenta estágio de deterioração avançado, caracterizado pela corrosão de armaduras, já evidenciado pela presença de manchas, fissuras e destacamento do concreto de cobertura, sendo possível em alguns casos observar armaduras expostas e com sua seção transversal reduzida.

Quanto à origem do problema pode-se destacar a deficiência de cobrimento, que tão pouco atinge o especificado em projeto, caracterizando assim um erro de execução. Quanto ao projeto, embora os valores de cobrimento e classe de concreto representem o padrão utilizado quando da época de construção da estrutura, esses não atendem as normas atuais, muito mais exigentes do ponto de vista da durabilidade. Outra origem então dos problemas patológicos são os valores definidos em projeto, que apesar de não representarem um erro específico do projeto – uma vez que este atendeu às normas vigentes à época, ficam abaixo do exigido hoje para que se atendam as questões relativas à durabilidade.

O mecanismo de deterioração predominante no protótipo estrutural é a corrosão generalizada das armaduras por carbonatação. Avaliando rapidamente de maneira determinística os dados relativos à estrutura podemos observar que bem mais de 50% da estrutura está despassivada (o período de iniciação foi superado) e, portanto está em processo de corrosão (período de propagação) como mostra a Equação 10.

$$\mu_{\text{cobrimento}} = 11,7\text{mm} < \mu_{\text{carbonatação}} = 22,8\text{mm} \quad \text{Equação 10}$$

4 Programa Experimental

Para melhor compreensão do programa experimental, este foi dividido em duas frentes de execução e análise: laboratório e campo.

4.1 Ensaios realizados em campo

Após a realização da inspeção da estrutura, esta foi dividida em 4 partes, sendo estas partes separadas e isoladas eletroquimicamente umas das outras. Nesse instante a estrutura foi impregnada por cloretos, através de um sistema de aspersão com ciclos de molhagem e secagem. Após a impregnação da estrutura com cloretos, foram determinadas as áreas a serem reparadas, em função dos parâmetros eletroquímicos. Nesse momento foi feita a leitura referencial. As áreas então escolhidas foram reparadas segundo metodologias específicas de cada sistema. Dois meses após a execução do reparo, a primeira leitura dos parâmetros eletroquímicos foi realizada. A partir de então, as leituras foram realizadas em intervalos de 2,5 meses.

A parte experimental realizada em campo foi dividida em 7 etapas que estão listadas a seguir:

1. Inspeção preliminar
 - a. Avaliação visual;
 - b. Caracterização geométrica;
2. Preparação do protótipo estrutural
 - a. Remoção, transporte e realocação;
 - b. Corte do protótipo para adequação dimensional e isolamento eletroquímico entre as partes;
 - c. Limpeza superficial com água quente sob pressão;
 - d. Reavaliação visual;
3. Inspeção detalhada
 - a. Localização das armaduras e determinação do cobrimento;
 - b. Determinação da espessura da frente de carbonatação;
 - c. Determinação da dureza superficial – índice esclerométrico;
 - d. Extração de testemunhos para caracterização das propriedades físicas do concreto utilizado no protótipo;
 - i. Determinação da absorção capilar;

- ii. *Determinação de absorção por imersão;*
- iii. *Determinação da resistência à compressão;*
- 4. *Impregnação do protótipo com cloretos*
 - a. *Aspersão de solução salina;*
 - b. *Determinação do teor de cloretos no protótipo;*
- 5. *Leitura inicial dos parâmetros eletroquímicos*
 - a. *Potencial de corrosão (E_{corr});*
 - b. *Velocidade de corrosão (i_{corr});*
- 6. *Reparo do protótipo estrutural*
 - a. *Determinação das áreas a serem reparadas e das áreas a serem monitoradas;*
 - b. *Aplicação dos diferentes sistemas de reparo segundo as características de cada produto;*
- 7. *Monitoramento do protótipo estrutural*
 - a. *Leitura trimestral dos parâmetros eletroquímicos;*
 - i. *Potencial de corrosão (E_{corr});*
 - ii. *Velocidade de corrosão (i_{corr});*

Para melhor entendimento das atividades realizadas, algumas destas estão mais bem detalhadas a seguir. Outras informações adicionais acerca dos procedimentos adotados estão detalhadas na forma de figuras no anexo.

4.1.1 Impregnação da estrutura com cloretos

Após as etapas iniciais de caracterização da estrutura e limpeza (etapas 1, 2 e 3), foi decidido que para acelerar o processo corrosivo de forma a viabilizar o projeto experimental a estrutura seria submetida a ciclos de molhamento com solução de cloretos. Para a realização destes ciclos adotou-se um procedimento de aspersão de solução de cloretos a 5% através de um pulverizador costal de alavanca.



Figura 4-1 – Detalhe da aspersão de solução de cloretos (5%) no protótipo estrutural.

Foram realizados ciclos de aspersão de cloretos a 5% duas vezes por dia, cinco dias na semana, durante aproximadamente três meses. Após este período foram realizados ensaios que comprovaram que o teor de cloreto nas armaduras havia atingido o valor crítico para o início da corrosão. Assim criou-se uma situação onde passou a existir uma combinação de efeitos (uma estrutura carbonatada e, ao mesmo tempo, contaminada com cloretos).

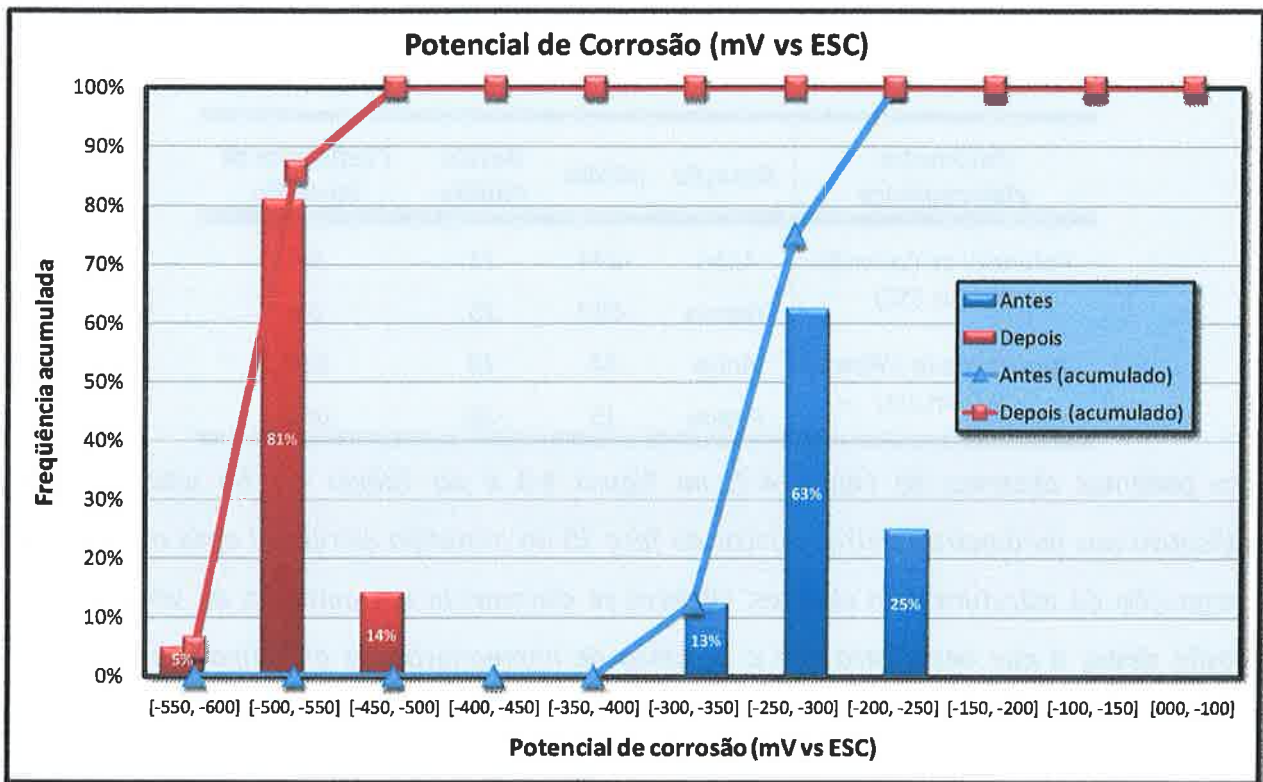


Figura 4-2 – Valores dos potenciais de corrosão na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.

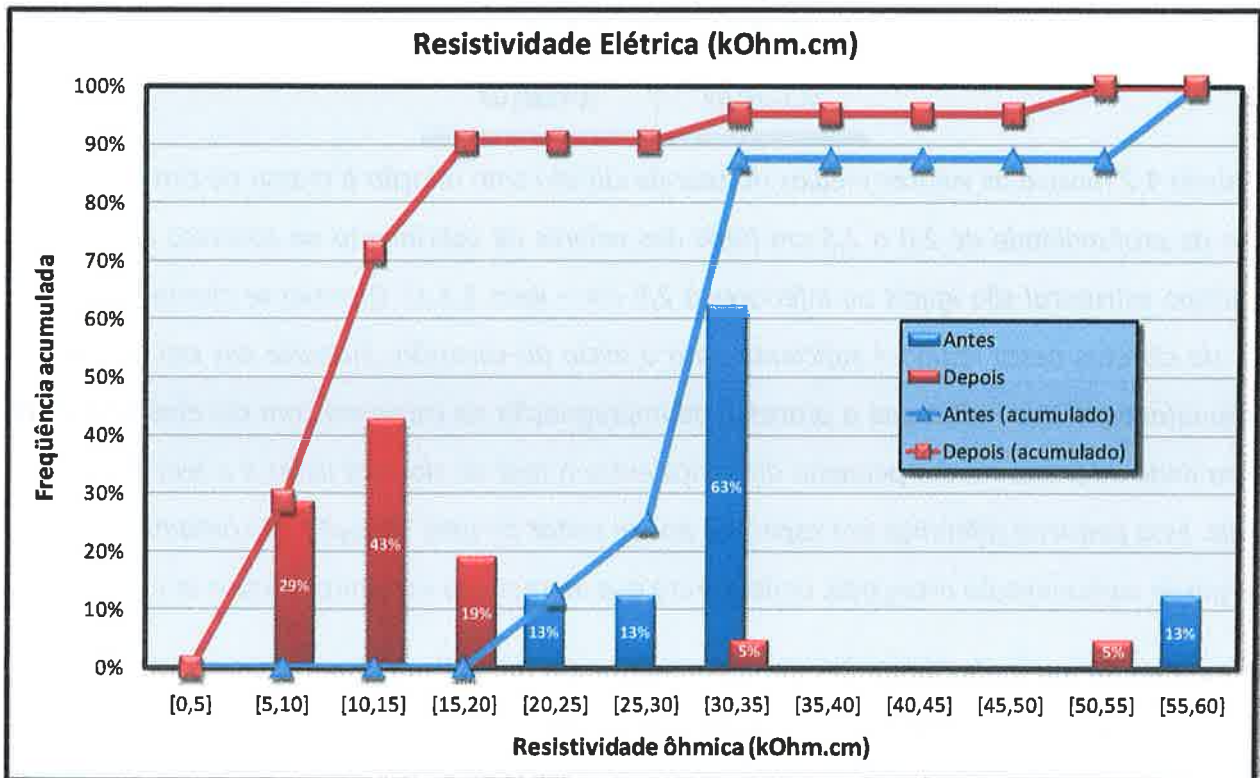


Figura 4-3 – Valores da resistividade elétrica na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.

Tabela 4-1 – Resumo dos parâmetros eletroquímicos na face 10 do protótipo estrutural antes e depois da impregnação de cloretos.

| Parâmetro eletroquímico | Situação | Média | Desvio Padrão | Coefficiente de variação |
|-----------------------------------|----------|-------|---------------|--------------------------|
| Potencial de Corrosão (mV vs ESC) | Antes | -274 | 25 | 9% |
| | Depois | -517 | 25 | 5% |
| Resistividade Elétrica (kOhm.cm) | Antes | 34 | 10 | 31% |
| | Depois | 15 | 10 | 66% |

Como podemos observar na Figura 4-2, na Figura 4-3 e na Tabela 4-1 há uma alteração significativa nos parâmetros eletroquímicos da face 10 do protótipo estrutural após o período de impregnação da estrutura com cloretos. Observa-se claramente um aumento da velocidade de corrosão desta, o que demonstra que o processo de impregnação do protótipo estrutural com cloretos teve sucesso.

Tabela 4-2 – Valore médios do teor de cloretos com relação à massa de cimento para a faixa de profundidade de 2,0 a 2,5 cm.

| Cloretos livres (% m.c.) | Cloretos totais (% m.c.) |
|--------------------------|--------------------------|
| 0,37±0,07 | 0,43±0,09 |

A Tabela 4-2 mostra os valores médios do teor de cloreto com relação à massa de cimento para a faixa de profundidade de 2,0 a 2,5 cm (98% dos valores de cobrimento de concreto medidos no protótipo estrutural são iguais ou inferiores à 2,5 cm – item 3.3.1). Observa-se claramente que o teor de cloretos nesta região é suficiente para o início da corrosão, inclusive em estruturas não-carbonatadas, o que indica que o processo de impregnação da estrutura com cloretos teve êxito. Outro dado interessante é a pequena diferença entre o teor de cloretos livres e o teor de cloretos totais. Essa pequena diferença era esperada por se tratar de uma situação de contaminação num estágio de carbonatação avançado, onde cloreto que ingressa na estrutura tende a se manter livre.

4.1.2 Determinação dos locais de monitoramento e das áreas de reparo

Para avaliação do comportamento dos diversos sistemas de reparo empregados no protótipo estrutural, foram feitas leituras dos parâmetros eletroquímicos em locais pré-estabelecidos. Estes locais foram determinados de forma a se obter o máximo de informação possível relativa ao

comportamento dos referidos sistemas. Segundo ANDRADE (1996) para a correta avaliação dos parâmetros eletroquímicos de uma estrutura, deve-se efetuar leituras em diversos pontos desta e avaliar a recorrência estatística dos fenômenos. Um estudo preliminar desenvolvido ao longo desta tese reforça a afirmação da pesquisadora.

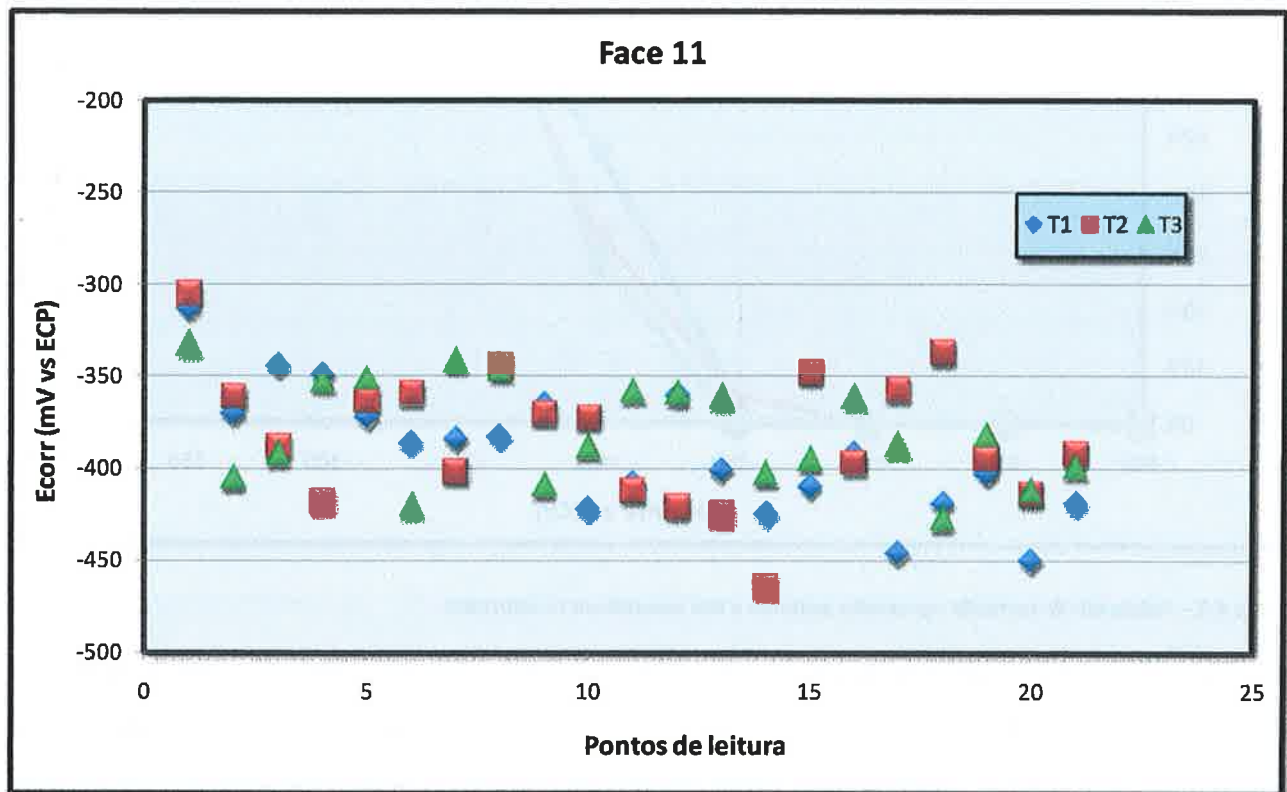


Figura 4-4 – Leituras de potencial em uma das faces do protótipo estrutural em três momentos distintos.

A Figura 4-4 mostra claramente que não existe um comportamento uniforme das leituras de E_{corr} efetuadas na estrutura em questão. Já observando a Figura 4-5, relacionando os potenciais com a quantidade de vezes que estes são apresentados na estrutura, tem-se uma leitura muito mais clara do comportamento eletroquímico desta, onde os potenciais tendem a aumentar ao longo do tempo como esperado (menores temperaturas e índice pluviométrico relacionados à mudança de estação → menor atividade do processo corrosivo).

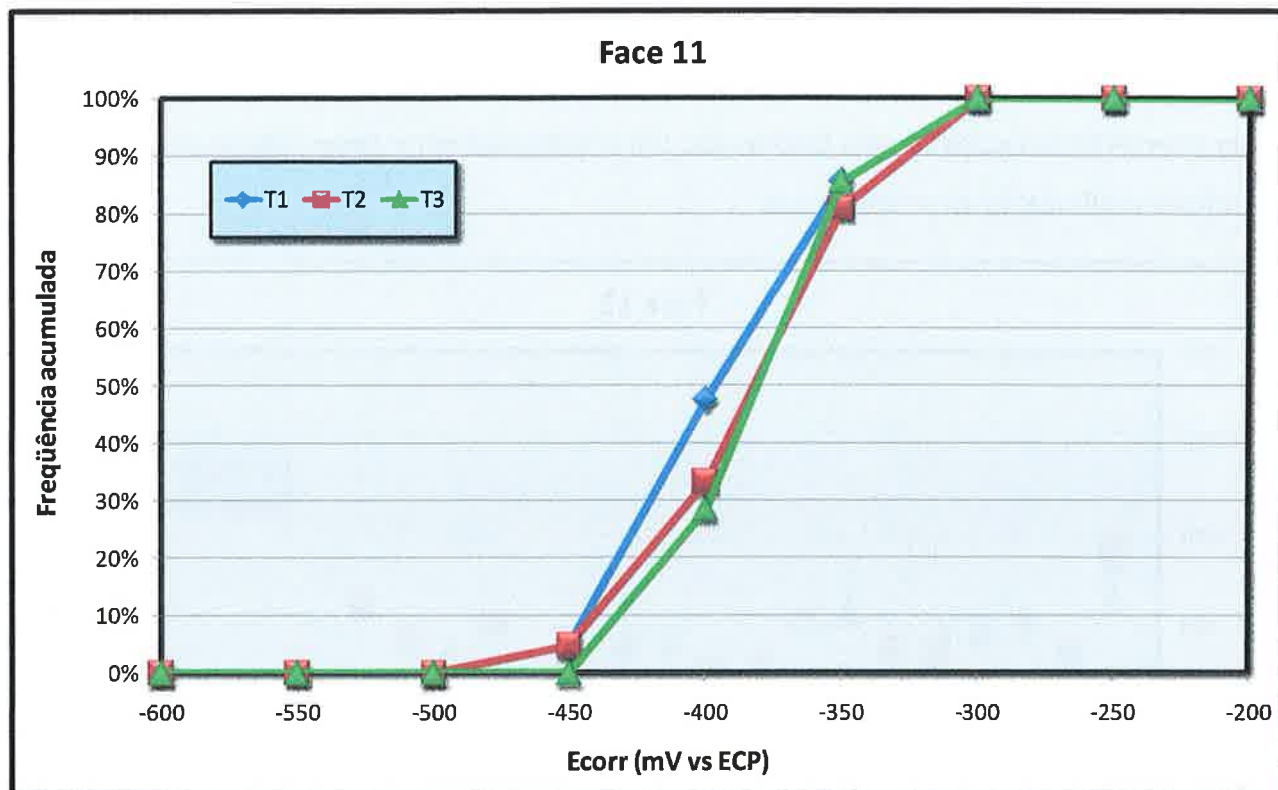


Figura 4-5 – Potenciais de corrosão agrupados segundo a sua recorrência na estrutura.

Esse tipo de tratamento dos dados é necessário à medida que a variação dos parâmetros ambientais e atmosféricos (insolação, índice pluviométrico, ventilação entre outros) não é homogênea, isto é, ao longo do ano e mesmo ao longo dos dias, a forma como estes parâmetros agem sobre a estrutura não é constante em sua extensão. Por exemplo, à medida que o sol muda a sua trajetória (caminho percorrido entre o nascente e o poente) ao longo do ano (fenômeno que caracteriza a mudança de estação climática) parte da estrutura passa a receber incidência solar enquanto outra pára de receber. Este tipo de variação faz com que partes da estrutura se comportem de maneira distinta ao longo do tempo, o que justifica a necessidade de se avaliar diversos pontos da estrutura de maneira simultânea ao longo do tempo. Outro fato importante que justifica esse tipo de avaliação está na grande dispersão dos resultados apresentados nos ensaios eletroquímicos usuais, como mostra BASTOS (2006).

Para a avaliação do comportamento dos sistemas de reparo em avaliação, o protótipo estrutural foi dividido em 4 partes iguais. Três delas funcionam como Controle, e a outra foi dividida em 6 partes, uma para cada sistema de reparo, como mostra a Figura 4-6.

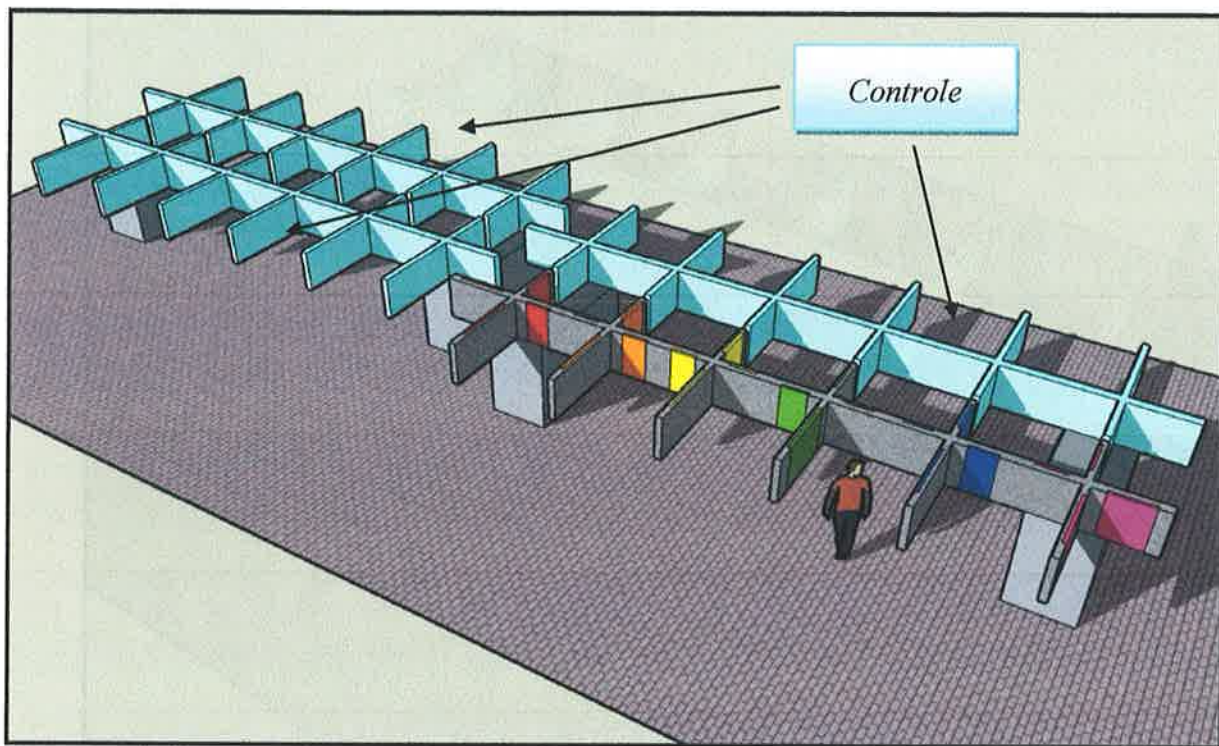


Figura 4-6 – Desenho esquemático do protótipo estrutural. Em azul claro estão representadas as superfícies de Controle. Na parte restante, nota-se a localização dos diferentes sistemas empregados.

O sistema de Controle (trechos do protótipo sem aplicação de algum tipo de reparo) serve como parâmetro de comparação para discernir entre quais das variações nos parâmetros eletroquímicos das regiões reparadas são decorrentes da aplicação do sistema de reparo e quais são decorrentes e mudanças no ambiente de exposição. Com relação às variações decorrentes do micro-clima, além do aumento na quantidade de pontos de leitura e forma de análise estatística explicado anteriormente, foi tomado o cuidado de se aplicar os diversos sistemas em 4 trechos distintos, cada um voltado para uma direção, como observa-se com maior detalhe na Figura 4-7.

Esses trechos tiveram suas dimensões determinadas de forma deliberada, visando a obtenção da maior superfície de reparo possível, de forma a simular uma situação extrema do ponto de vista da retração por secagem e conseqüente fissuração da interface reparo/substrato antigo, que é uma das principais causas de falhas em sistemas de reparo.

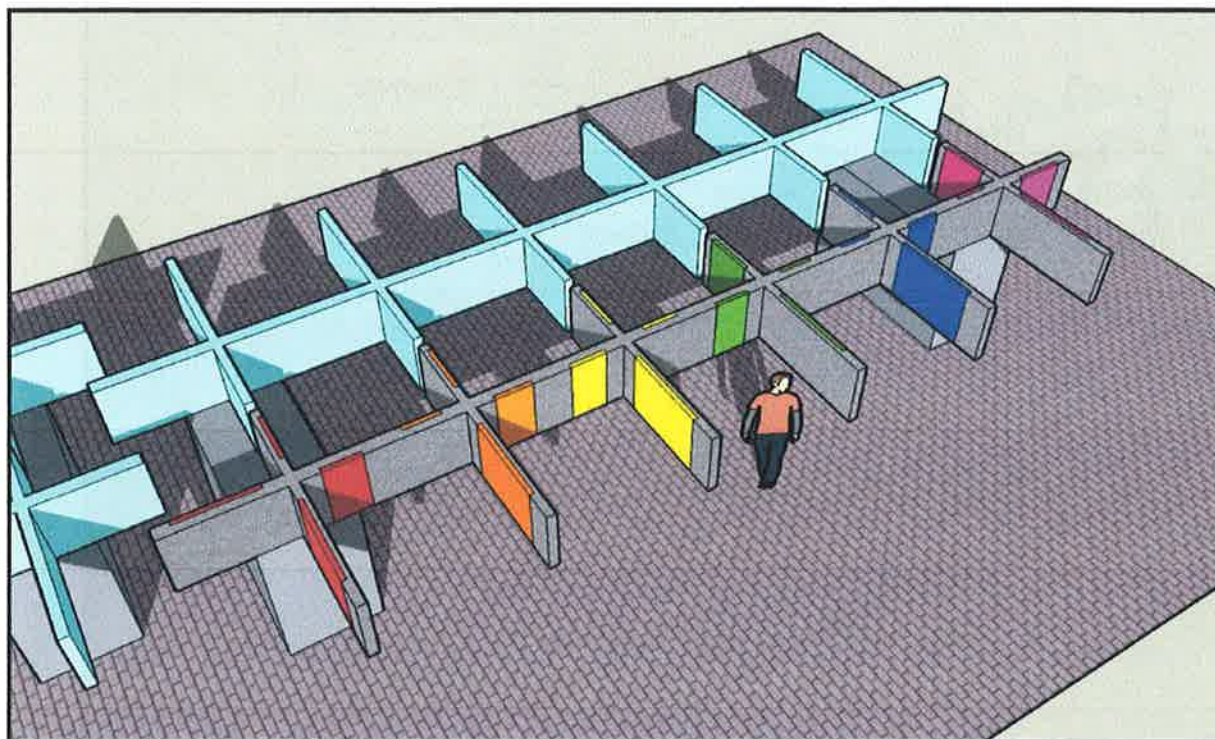


Figura 4-7 – Detalhe da aplicação dos diversos sistemas de reparo em um trecho do protótipo estrutural.

Para a avaliação dos parâmetros eletroquímicos no protótipo estrutural, foi determinada uma malha com pontos a cada 20cm sobre as armaduras longitudinais. Os pontos de leitura foram então agrupados em 4 grupos conforme a sua posição no protótipo em relação ao reparo, de forma a se obter a maior quantidade de informação possível como mostra a relação abaixo, a Figura 4-8 e a Figura 4-9.

| Ponto | Informação |
|---------------|--|
| Interno | Efeito do reparo propriamente dito. |
| Externo | Possível efeito de macro-célula. |
| Interface | Possível falha na região de interface reparo/substrato antigo. |
| Interferência | Avaliação de possível interferência entre os distintos sistemas. |

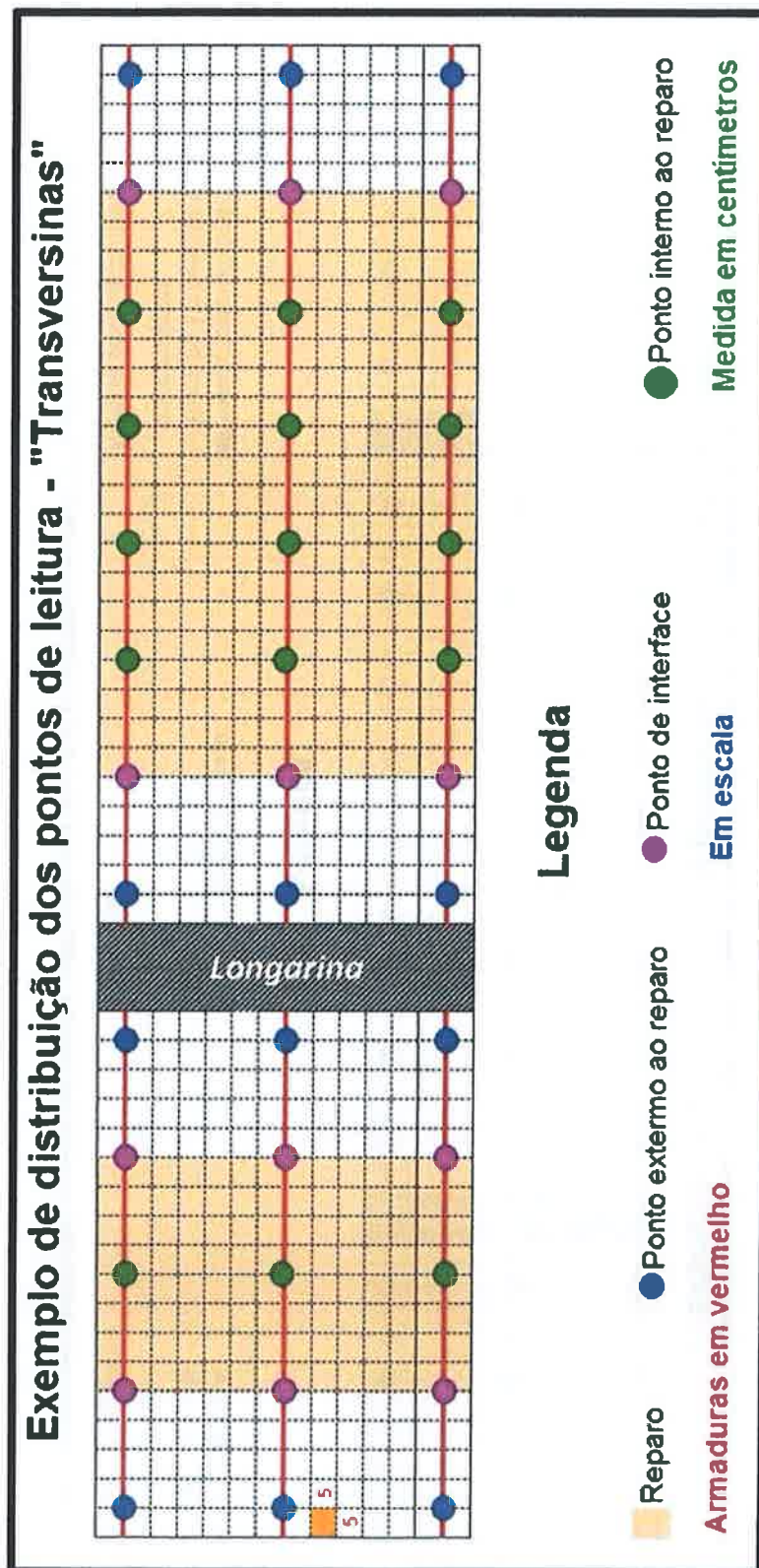


Figura 4-8 – Esquema de distribuição dos pontos de leitura nas transversinas.

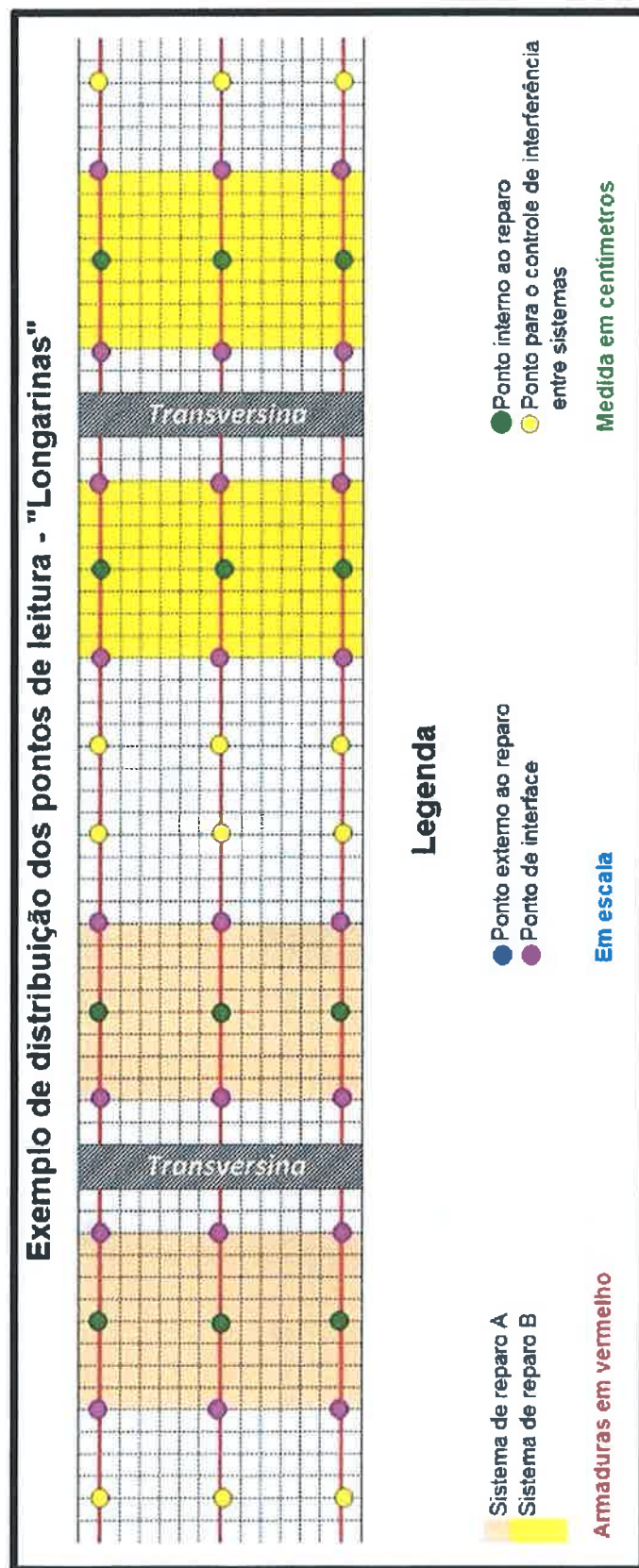


Figura 4-9 – Esquema de distribuição dos pontos de leitura nas longarinas.

4.1.3 Metodologia de execução dos reparos

A metodologia de execução dos reparos seguiu à proposta no livro “Reparación y Protección del Acero de Refuerzo” (HELENE & PEREIRA , 2007). A seqüência de atividades realizadas foi a seguinte:

1. Delimitação das áreas a serem reparadas com auxílio de um disco de corte;
2. Remoção do concreto deteriorado com um marteleto pneumático;
3. Limpeza das barras de aço através do jateamento de areia seca;
4. Limpeza do substrato com jato de água quente (80°C) sob pressão;
5. Aplicação das pinturas sobre a armadura, quando fosse o caso;
6. Saturação do substrato (saturado superfície seca) com água para promoção da aderência entre material de reparo de base cimentícia e o substrato;
7. Aplicação manual da argamassa de reparo;
8. Desempeno e acabamento da superfície do reparo;
9. Cura da área reparada com manta de geotextil durante 7 dias;
10. Após 2 meses, quando fosse o caso, aplicação do inibidor de migração na superfície do reparo através de um rolo de espuma.

4.1.4 Metodologia de execução dos ensaios e critérios para a avaliação da corrosão

A eficiência dos referidos sistemas foi comprovada avaliando-se o comportamento dos parâmetros medidos na área de análise (entendam-se pontos internos e externos à área reparada, bem como na interface do reparo com o substrato antigo). Se esse demonstrasse redução da atividade da cinética de corrosão e da probabilidade de corrosão (através do estado termodinâmico da armadura) na área reparada, sem o incremento destes nas áreas adjacentes ao reparo o sistema era considerado efetivo. Para isso utilizou-se os seguintes procedimentos de ensaio.

Preparação da área a ser avaliada

Para se obter o mínimo de influência da umidade do substrato nos parâmetros eletroquímicos, antes da execução de cada leitura a superfície do protótipo estrutural era saturada com auxílio de um aparato que aplicava uma névoa sobre esta durante 15 minutos. Esse tempo de saturação foi determinado através de ensaios bem simples, que consistiam na aplicação da névoa em várias faces do protótipo estrutural, em diversas condições prévias de exposição (sol, chuva etc). Durante estas aplicações, a resistividade elétrica foi determinada a cada 5 minutos em diversos pontos da face ensaiada. Os resultados mostraram que, no caso do protótipo estrutural utilizado nesta pesquisa, após 10 minutos de exposição à névoa as leituras de resistividade apresentavam certa estabilidade. Mesmo assim, de forma a se evitar quaisquer erros, foi adotado o tempo de 15 minutos de exposição à névoa. Vale ressaltar que a metodologia acima descrita e utilizada nesta tese, não só pode, como deve ser aplicada para outras estruturas, uma vez que esse tempo de exposição é dependente das características do substrato a ser saturado, sendo particular a este. Outro fator determinante na escolha deste tempo é o fato de que as leituras dos parâmetros eletroquímicos em cada face levavam em torno de 15 minutos, o que permitia saturar uma face enquanto eram executados os ensaios em outra.

Potencial de corrosão

A leitura do potencial de corrosão foi realizada duas vezes por ponto de análise utilizando-se o equipamento Galva Pulse (GP 5000) da Germann Instruments que dispõe de um eletrodo de referência de Ag/AgCl. A primeira leitura era realizada através do método de ensaio HCP (Half-Cell Potential) disponível no equipamento (neste método, o potencial é medido e depois um pequeno pulso elétrico é aplicado para se medir a resistência ôhmica do concreto no local). Após a leitura de todos os pontos da face, outro valor do potencial de corrosão era obtido ao se realizar a leitura da velocidade de corrosão. Para avaliação do comportamento dos sistemas de reparo através do ensaio de potencial foi adotado um critério que consistia na avaliação dos gradientes de potencial ao longo do tempo. Em alguns casos, as faixas de probabilidade de corrosão da ASTM, apresentadas na Tabela 4-3 foram citadas como referência, e tiveram sua validade para a situação

de estudo questionada. Vale lembrar que para a padronização dos resultados, estes foram convertidos para a escala do eletrodo de cobre/sulfato de cobre através da seguinte relação¹³:

$$E_{Cu/CuSO_4} = E_{Ag/AgCl} - 110$$

Equação 11

Onde os potenciais de corrosão são expressos em milivolts.

Tabela 4-3 – Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão segundo a ASTM C 876-91 (1999)

| <i>E_{corr}</i> (mV, Cu/CuSO ₄) | Probabilidade de corrosão |
|---|---------------------------|
| > - 200 | menor que 10% |
| entre -200 e - 350 | Incerta |
| < - 350 | maior que 90% |

Velocidade de corrosão

A metodologia empregada para medida da velocidade de corrosão foi a do pulso galvanostático por meio do Galva Pulse (GP-5000 Germann Instruments).

A Tabela 4-4 classifica o grau de corrosão em função da densidade de corrente obtida pelo método do pulso galvanostático (FRØLUND et AL., 2002).

Tabela 4-4 – Classificação da taxa de corrosão em função do i_{corr} (FRØLUND et AL., 2002).

| i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Classificação |
|-----------------------------|----------------------|
| < 0,5 | Área passiva |
| 0,5 a 2 | Corrosão desprezível |
| 2 a 5 | Corrosão baixa |
| 5 a 15 | Corrosão moderada |
| > 15 | Corrosão elevada |

4.2 Ensaios realizados em laboratório

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram realizados diversos ensaios em laboratório de forma a se obter subsídios para a correta avaliação do comportamento eletroquímico dos diversos sistemas de reparo utilizados.

¹³ Essa equação foi obtida com base na literatura fornecida com o equipamento, e em ensaios de correlação realizados em diversos corpos-de-prova de laboratório.

Além dos ensaios referentes à caracterização dos materiais empregados, foi possível avaliar o comportamento eletroquímico dos sistemas de reparo utilizados de forma isolada, uma vez que estes podem ter desempenho diferente quando utilizado em corpos-de-prova laboratoriais do que em estruturas reais.

O programa experimental realizado em laboratório foi dividido em 4 etapas listadas a seguir.

1. Caracterização dos materiais

a. Areia;

i. Curva granulométrica;

ii. Módulo de finura;

b. Cimento

i. Composição química;

ii. Finura;

iii. Área específica;

c. Argamassas

i. Massa específica;

ii. Índice de consistência;

iii. Absorção capilar;

iv. Absorção por imersão;

v. Resistência à tração na flexão;

vi. Resistência à compressão;

vii. Módulo de elasticidade;

viii. Migração de ions cloreto

d. Concreto

i. Absorção por imersão;

ii. Absorção capilar;

iii. Resistência à compressão;

2. Moldagem dos corpos-de-prova

a. Tipologia dos corpos-de-prova;

b. Preparação das barras;

c. Confecção e cura;

d. Acabamento;

3. Tipos de exposição
 - a. Ciclos de molhamento e secagem;
 - b. Câmara de envelhecimento¹⁴;
4. Leitura dos parâmetros eletroquímicos;
 - a. Potencial de corrosão (E_{corr});
 - b. Resistência de Polarização Linear;
 - c. Espectroscopia de Impedância eletroquímica;

4.2.1 Procedimentos gerais

4.2.1.1 Preparação das barras de aço

Para a correta avaliação dos parâmetros eletroquímicos a superfície das barras de aço utilizadas nos corpos-de-prova foi limpa com solução de ácido clorídrico com hexametiltetramina conforme preconiza a norma ASTM G 01 - 90 para remoção dos óxidos preexistentes na superfície do metal. Após a limpeza, as barras de aço foram secas com jato de ar sob pressão e armazenadas em um dessecador com sílica gel, onde permaneceram até a sua utilização na confecção dos corpos-de-prova.

Para tornar possível a avaliação da perda de massa após a realização dos ensaios eletroquímicos, as barras foram pesadas e numeradas. Após a determinação de suas massas, as barras foram recobertas com fita isolante¹⁵ de forma a delimitar uma área de exposição padrão de 9.90 cm².

4.2.1.2 Procedimentos de mistura

Durante a etapa de laboratório foram utilizados 4 tipos procedimentos de mistura bastante semelhantes, diferindo apenas em alguns pontos. As tabelas abaixo mostram os procedimentos de mistura utilizados.

¹⁴ Refere-se ao método de exposição proposto e utilizado na segunda fase do programa experimental. Este método está mais detalhado no item 4.2.4.

¹⁵ O uso de fita isolante foi considerado adequado através dos resultados obtidos em um ensaio preliminar onde uma barra envolvida em uma camada de fita isolante ficou submersa em água por período superior a 2 meses sem apresentar sinal de corrosão nas áreas cobertas pela fita. Vale ressaltar que apesar desses resultados, foram aplicadas duas camadas de fita isolante de forma a aumentar a confiabilidade no sistema utilizado.

Tabela 4-5 – Procedimentos de mistura adotados.

| Argamassas Tradicionais (dosada em laboratório) |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Colocação da areia e cimento na argamassadeira;2. Adição de parte da água;3. Mistura em velocidade baixa por 1 minuto;4. Adição do restante da água e do aditivo superplastificante;5. Mistura em velocidade baixa por mais um minuto;6. Mistura em velocidade alta por 3 minutos. |
| Arg. Tradicional - Contaminada (dosada em laboratório) |
| <ol style="list-style-type: none">1. Colocação da areia e cimento na argamassadeira;2. Adição de parte da água;3. Mistura em velocidade baixa por 1 minuto;4. Adição do restante da água, do aditivo superplastificante e do sal previamente dissolvido;5. Mistura em velocidade baixa por mais um minuto;6. Mistura em velocidade alta por 3 minutos. |
| Argamassas industrializadas |
| <ol style="list-style-type: none">1. Colocação da argamassa seca na argamassadeira;2. Adição de toda a água;3. Mistura em velocidade baixa por 2 minutos;7. Mistura em velocidade alta por 3 minutos. |

4.2.1.3 Cura

Após a moldagem os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida (UR – 95%; T – 25°C) por 1 dia, após o qual foram submetidos ao processo de desfôrma. Após essa etapa, eles retornaram à câmara úmida onde permaneceram até a idade 28 dias.

4.2.2 Corpos-de-prova utilizados nos ensaios eletroquímicos

4.2.2.1 Ensaios de resistência à corrosão – argamassa armada

Tipologia

O corpo-de-prova utilizado no programa experimental consiste basicamente de uma barra de aço com superfície de exposição delimitada através de fita isolante e/ou pintura epóxi, imersa em argamassa. Esse modelo de corpo-de-prova foi desenvolvido para a avaliação de materiais de reparo, sendo utilizado por diversos autores em diferentes dimensões e formas. Este corpo-de-prova segue em linhas gerais a disposição empregada por diferentes pesquisadores em outros trabalhos (ANDRADE et al, 1996); (NEPOMUCENO, 1992); (FIGUEIREDO, 1994); (BAUER, 1995) e (MONTEIRO, 2002), principalmente este último, uma vez que as fôrmas utilizadas por este já se

encontravam disponíveis no laboratório. Apesar de a forma e dimensão empregada serem as mesmas, algumas modificações fundamentais foram empregadas. Como um dos sistemas de reparo em análise poderia provocar uma impermeabilização da superfície do corpo-de-prova, impedindo o contato iônico necessário para a realização dos ensaios eletroquímicos, foram então feitas algumas adaptações utilizadas por ARAÚJO, A. (2004) em seus corpos-de-prova. Para o contato iônico foi inserido um tubo plástico com um pedaço de esponja na ponta, de forma a permitir o acesso do eletrodo de referência através da superfície protegida do corpo-de-prova. Além disso, foi também inserida uma barra de cobre para atuar como contra-eletrodo como mostram a Figura 4-10 e a Figura 4-11.

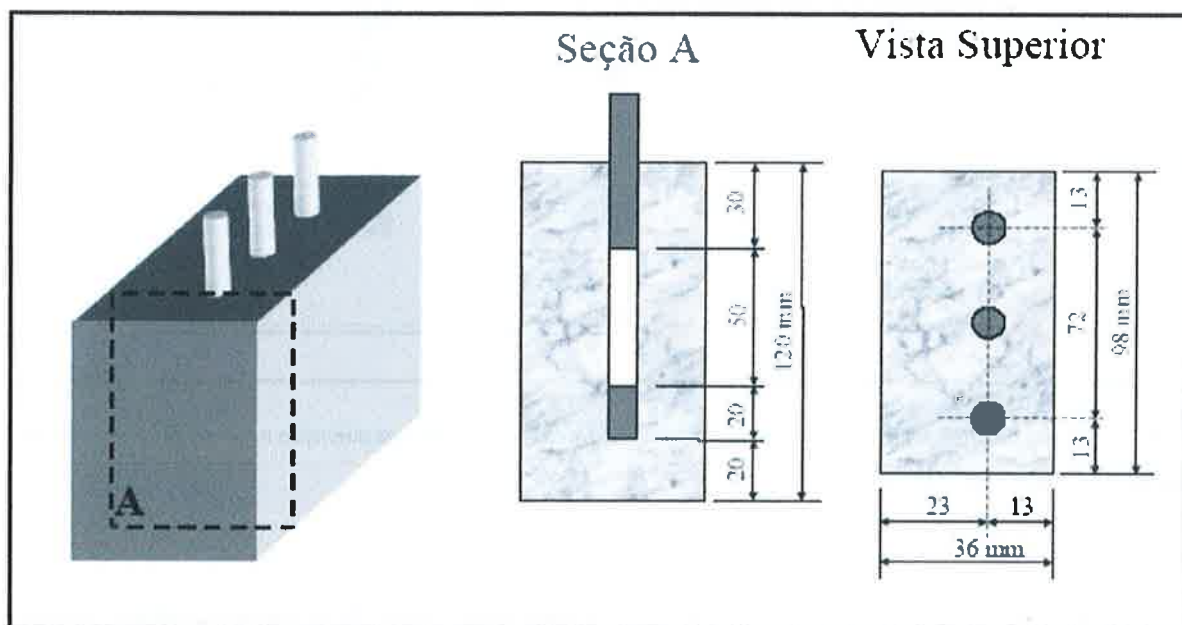


Figura 4-10 – Esquema ilustrativo do formato e das dimensões dos corpos-de-prova.

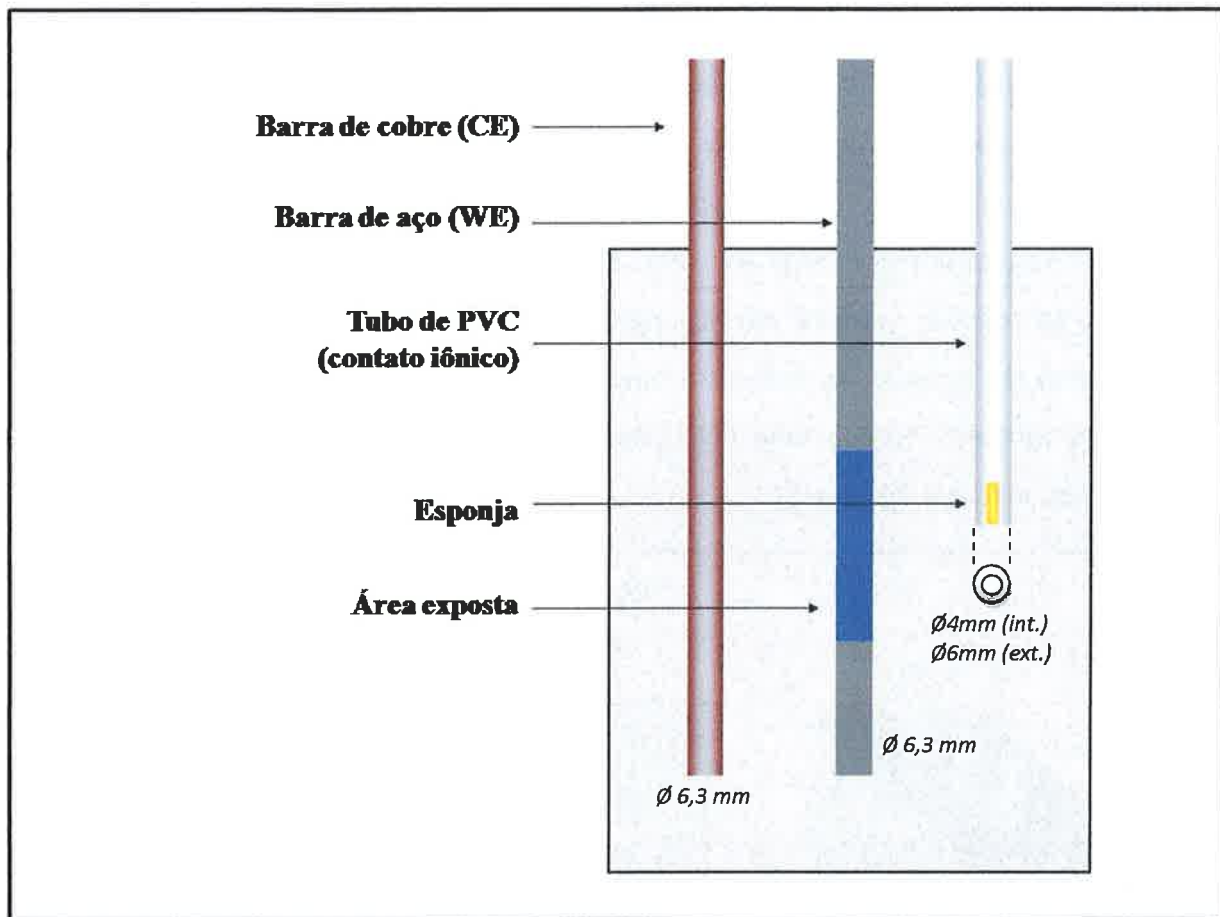


Figura 4-11 – Esquema ilustrativo da configuração dos corpos-de-prova, levando em consideração as alterações necessárias para a realização dos ensaios eletroquímicos.

Quantidades

Para cada situação de análise foram moldados 5 corpos-de-prova de forma a se obter resultados significativos do ponto de vista estatístico. Esse valor foi adotado com base em experiência anterior do pesquisador.

Na primeira fase da pesquisa foram avaliadas somente as argamassas de reparo, para quais foram então moldados 5 corpos-de-prova, totalizando 15 corpos-de-prova¹⁶.

Já na segunda fase foram moldados 10 CPs por sistema de reparo (5 são e 5 previamente contaminados com cloretos), totalizando 60 corpos-de-prova.

¹⁶ Na primeira fase foram utilizados apenas 15 CPs dos 90 moldados. Os demais se encontram armazenados para análises futuras.

Confecção

Após o procedimento de mistura, e verificada a conformidade da consistência da argamassa (ensaio de índice de consistência), seguia-se então com a moldagem dos corpos-de-prova, aplicando a argamassa na fôrma¹⁷ e utilizando-se das mãos para o adensamento desta.

Terminada a moldagem dos corpos-de-prova, uma camada de graxa condutiva¹⁸ era aplicada sobre os contatos elétricos para evitar a sua corrosão e estes seguiam para a câmara úmida (UR – 95%; T – 23±2°C).

Após a cura, os corpos-de-prova ficaram armazenados em ambiente de laboratório até atingirem idades superiores a 90 dias (a maioria atingiu idade superior a 120 dias nessas condições) quando, assumido o “fim”¹⁹ das reações de hidratação do cimento e a estabilização dos parâmetros eletroquímicos, a preparação dos corpos-de-prova teve prosseguimento com a delimitação da área de exposição e outros cuidados adicionais.

Delimitação da área de exposição e cuidados adicionais

Na confecção dos corpos-de-prova alguns cuidados adicionais foram tomados de forma a se evitar alguns problemas possíveis de ocorrer que poderiam vir a comprometer os ensaios:

- 1. fragilidade das arestas – poderia vir a comprometer o desempenho do inibidor de corrosão aspergido (silano organo-funcional base flúor) quando este atuasse como um hidrofugante;*

¹⁷ *Para a moldagem dos corpos-de-prova foi utilizada uma forma de PVC disponível no Laboratório de Construção Civil da EPUSP. É importante mencionar o material empregado na fôrma, pois este devido a sua tensão superficial provocou certa dificuldade no processo de moldagem dos corpos-de-prova. Apesar de todo o cuidado tomado quando da aplicação do filme de desmoldante na fôrma, em alguns corpos-de-prova houve o surgimento de micro-bolhas na superfície em contato com a mesma.*

¹⁸ *Graxa à base de cobre coloidal utilizada normalmente para a proteção de contatos elétricos em subestações de energia elétrica.*

¹⁹ *É importante mencionar que nessa idade as reações de hidratação do cimento (CP V ARI) ainda não terminaram por completo, porém a maturidade do cimento é tão elevada e a evolução da hidratação tão lenta que para efeitos práticos tal consideração pode ser adotada.*

2. efeito parede nas interfaces barra de aço/argamassa, cobre/argamassa e tubo plástico/argamassa – possível criação de um caminho preferencial para a penetração dos íons cloreto.

Dessa forma, após o período de estabilização dos parâmetros eletroquímicos, os corpos-de-prova foram lavados com detergente neutro para retirada dos resíduos de graxa e após secarem ao ar, foram cobertos com 3 demãos de tinta epóxi, deixando apenas uma área padrão exposta (100 cm²). Depois de pintados os corpos-de-prova, uma camada de selante de poliuretano de alta aderência foi aplicada junto às interfaces barra de aço/argamassa, cobre/argamassa e tubo plástico/argamassa, de forma a impedir o acesso dos íons cloreto a essa região. Após a cura do selante, uma nova camada de graxa condutiva foi aplicada sobre os contatos e os corpos-de-prova permaneceram em repouso até o início do período de exposição. A Figura 4-12 mostra um corpo-de-prova após terminada a etapa de confecção.



Figura 4-12 – Detalhe do corpo-de-prova pronto para iniciar os ciclos de contaminação acelerada.

4.2.2.2 Ensaios de resistência à corrosão - meio aquoso

Além dos ensaios em argamassa armada, onde foram obtidas informações acerca do comportamento do sistema de reparo como um todo (pinturas sobre a armadura/inibidor por migração + argamassa de reparo para reconstituição da seção), foram realizados ensaios em solução, onde as alterações nas propriedades eletroquímicas proporcionadas pelas pinturas e inibidor puderam ser isoladas dos efeitos de proteção proporcionados pela argamassa de reconstituição.

Para que isso fosse possível, foram confeccionados corpos-de-prova onde as barras de aço (as mesmas utilizadas nos demais ensaios) foram imersas em uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e contendo 2,5g/l de NaCl, como mostra a Figura 4-13.



Figura 4-13 – Corpo-de-prova utilizado para avaliação da resistência à corrosão dos sistemas de reparo em meio aquoso.

Foi preparado 1 corpo-de-prova por sistema de reparo, contendo 3 barras de aço para análise cada. No caso dos sistemas de reparo constituídos por pinturas, estas foram aplicadas diretamente sobre a armadura. No caso do inibidor de corrosão por migração, este foi adicionado à solução onde as barras foram imersas em 2 teores distintos (1% e 10%). Além destes sistemas também foram confeccionados corpos-de-prova de referência, um contendo as barras imersas diretamente na solução, sem nenhuma proteção adicional, além de uma situação onde a solução não apresentava NaCl em sua composição.

Depois de confeccionados, estes corpos-de-prova foram armazenados em ambiente de laboratório, e tiveram seus parâmetros eletroquímicos medidos de tempos em tempos através dos ensaios de potencial de corrosão e resistência de polarização linear.

4.2.3 Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de caracterização física

Confecção

O processo de mistura utilizado nesta etapa foi o descrito na Tabela 4-5, exatamente o mesmo utilizado nos demais corpos-de-prova.

Após o procedimento de mistura, e verificada a conformidade da consistência da argamassa, seguia-se então com a moldagem dos corpos-de-prova, aplicando a argamassa na fôrma e utilizando-se das mãos para o adensamento desta.

Terminada a moldagem dos corpos-de-prova, estes seguiam para a câmara úmida (UR – 95%; T – 23±2°C).

4.2.4 Tipos de exposição

Durante o programa experimental realizado em laboratório, foram utilizados 2 tipos diferentes de exposição para os corpos-de-prova.

Métodos de contaminação acelerada

Fase I: nesta fase foram utilizados em laboratório ciclos de molhamento e secagem baseados na literatura (MONTEIRO, 2002). Nesta situação, os corpos-de-prova foram mantidos a 40°C em estufa ventilada por 5 dias. Após este período, eles eram colocados em solução de Cloreto de Sódio P.A. a 5% (em massa), onde permaneciam até a idade de 7 dias. Nesse momento, eles eram ensaiados, ainda imersos na solução, e então transferidos de volta estufa.

Fase II: devido à dificuldade de contaminação observada nos corpos-de-prova submetidos ao ciclo de molhamento e secagem descrito acima, foi proposto um novo método de avaliação, comparando corpos-de-prova contaminados durante a mistura com 0,7% de íons cloreto em relação à massa de cimento, com corpos-de-prova não contaminados. De forma a se garantir o controle sobre a umidade e a temperatura de exposição, e, além disso, acelerar a cinética do processo corrosivo de forma a destacar mais os efeitos dos sistemas de reparo, foi confeccionada uma câmara com umidade elevada e temperatura constante de 45°C, onde os corpos-de-prova foram mantidos durante todo o ensaio.

4.2.5 Metodologia de execução dos ensaios e critérios para a avaliação da corrosão

Potencial de corrosão

Antes de se realizar o ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, era realizada a leitura do potencial de corrosão dos corpos-de-prova. Para a realização desta leitura, o tubo de plástico previamente inserido no corpo-de-prova era preenchido com a solução artificial de água do poro (água destilada saturada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Após dois minutos de estabilização, o eletrodo de referência era então introduzido no orifício do tubo e a leitura instantânea do potencial de corrosão era realizada com o auxílio de um multímetro comercial.

Resistência de polarização linear

Apesar das limitações da aplicação desta técnica a meios extremamente resistivos, como é caso das argamassas analisadas, esta técnica foi empregada de forma complementar, por ocasião da realização das leituras de impedância eletroquímica.

Impedância eletroquímica

Aproximadamente a cada 10 ciclos de molhamento e secagem, após a realização da leitura do potencial de corrosão, os corpos-de-prova eram então submetidos à espectroscopia de impedância eletroquímica. Para a realização deste ensaio foi utilizado um potenciostato-galvanostato da marca GAMRY, modelo PCI4/750, com analisador de frequência embutido²⁰. A Tabela 4-6 mostra os parâmetros utilizados na realização do ensaio. Para a realização do ensaio foi utilizada uma configuração com dois eletrodos, colocando o sensor do eletrodo de referência em curto circuito com o contra-eletrodo. Isso se fez necessário uma vez que alguns dos sistemas analisados apresentavam elevada resistência ôhmica.

Tabela 4-6 – Parâmetros utilizados na espectrometria de impedância eletroquímica.

| <i>Frequência de análise</i> | <i>Tensão de polarização</i> | <i>Período de estabilização</i> | <i>Pontos por década</i> |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 300 kHz – 5 mHz | 10 mV | 10 min | 5 |

4.2.6 Metodologia de execução dos ensaios de caracterização das argamassas de reparo

Massa específica

Para a realização do ensaio de massa específica foi utilizado o procedimento descrito na NBR 9778-95. A análise foi realizada em 5 corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm por tipo de argamassa utilizada na pesquisa, perfazendo um total de 15 corpos-de-prova.

Índice de consistência

Para determinação do índice de consistência foi utilizado o procedimento descrito na NBR 13276-95, onde a argamassa ainda no estado fresco é moldada na forma de um tronco de cone, que é então submetido a 30 golpes (1 por segundo) da mesa de consistência. O índice de consistência da argamassa é então determinado como o diâmetro médio de espalhamento, determinado através de 3 medidas uniformemente distribuídas ao longo do perímetro.

²⁰ Esse equipamento foi utilizado durante boa parte da pesquisa. Entretanto após a ocorrência de um furto, este foi substituído por um potenciostato da marca PAR, modelo 283, acoplado a um analisador de frequência “Lock-in M512” da PAR. Isso explica a diferença no espectro de frequência analisado no decorrer da pesquisa, que sofreu uma alteração devido às limitações dos equipamentos.

Absorção capilar

Para a realização do ensaio de absorção capilar foi utilizado o procedimento descrito na NBR 9779-95. A análise foi realizada em 5 corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm por tipo de argamassa utilizada na pesquisa, perfazendo um total de 15 corpos-de-prova.

Absorção por imersão

Para a realização do ensaio de absorção por imersão foi utilizado o procedimento descrito na NBR 9778-95. A análise foi realizada em 5 corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm por tipo de argamassa utilizada na pesquisa, perfazendo um total de 15 corpos-de-prova.

Resistência à tração na flexão

Para a determinação da resistência à tração foi utilizada a norma americana ASTM C348-97. O ensaio foi realizado aos 28 dias em 5 corpos-de-prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada argamassa.

Resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão foi utilizada a norma americana ASTM C349-97. O ensaio foi realizado aos 28 dias em 5 metades dos corpos-de-prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada argamassa.

Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade das argamassas foi utilizada uma adaptação do método proposto na NBR 8522-84 onde a velocidade de carregamento obedecia à proposta no ensaio de compressão ASTM C349-97. O ensaio foi realizado aos 28 dias em 5 metades dos corpos-de-prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada argamassa.

Migração de cloretos

Para a determinação da resistência à migração de cloretos das argamassas de reparo foi utilizada a norma americana ASTM C 1202-07. Este ensaio foi realizado em 3 fatias de corpos-de-prova 10 cm x 20 cm para cada argamassa.

4.3 Materiais utilizados

Neste item estão descritas as características dos materiais empregados ao longo da pesquisa.

4.3.1 Materiais dosados em laboratório – argamassas

Durante a pesquisa foram utilizadas duas argamassas de reparo, dosadas em laboratório, passíveis de serem dosadas em obra. A princípio o objetivo era utilizar uma única argamassa. Essa argamassa tinha como finalidade servir como referência para os estudos dos sistemas de reparo, bem como servir de elemento em alguns deles (pinturas para armaduras e inibidores de corrosão por aspensão). No entanto, durante a realização dos reparos no protótipo estrutural, a argamassa proposta inicialmente, mesmo apresentando bons resultados nos ensaios laboratoriais, apresentou grande dificuldade de aplicação, tendo de ser substituída por uma nova argamassa. Apesar disto, um reparo piloto foi executado com essa argamassa, mesmo em condições não ideais. Durante a pesquisa essa argamassa será referida como Ref029. Para a execução dos reparos no protótipo e para a realização dos ensaios eletroquímicos na fase II foi utilizada a argamassa referida como Ref035.

Traços

Argamassa Ref029

Para a confecção desta argamassa foi utilizado um traço desenvolvido no laboratório da Escola Politécnica durante a pesquisa de mestrado de GRULLÓN (2004). Essa argamassa apresenta um consumo de cimento bastante elevado para se obter uma maior coesão, uma vez que não se pretendia utilizar adições poliméricas nesta. A Tabela 4-7 apresenta os valores empregados na confecção desta argamassa.

Tabela 4-7 – Quantidade de materiais empregados na argamassa Ref029.

| Traço (em massa) | a/c | Teor de aditivo |
|-----------------------|------|-----------------|
| 1:2,2 (cimento:areia) | 0,29 | 1,5% |

Argamassa Ref035

Para a confecção desta argamassa foi utilizado um traço bastante parecido com o proposto inicialmente, alterando-se basicamente a relação a/c e o teor de aditivo necessário para a obtenção da consistência ideal.

Tabela 4-8 – Quantidade de materiais empregados na argamassa Ref035.

| <i>Traço (em massa)</i> | <i>a/c</i> | <i>Teor de aditivo</i> |
|----------------------------|-------------|------------------------|
| <i>1:2 (cimento:areia)</i> | <i>0,35</i> | <i>0,8%</i> |

Água

Foi utilizada água potável da rede de abastecimento da Sabesp.

Cimento

Para a produção da argamassa tradicional foi utilizado CP V ARI.

Aditivo plastificante

Para a obtenção da consistência adequada para aplicação das argamassas foi utilizado um aditivo super-plastificante de base naftaleno-sulfonado.

Sal contaminante

Para efeito de pré-contaminação dos corpos-de-prova foi utilizado cloreto de cálcio de forma a se obter um teor de 0,7% de íons cloreto em relação à massa de cimento.

Areia

Como agregado miúdo foi utilizado areia rosa (quartzosa) de elevada finura como meio de aumentar a coesão da argamassa, sem se utilizar de adições poliméricas. A Figura 4-14 mostra o resultado do ensaio de granulometria da areia utilizada.

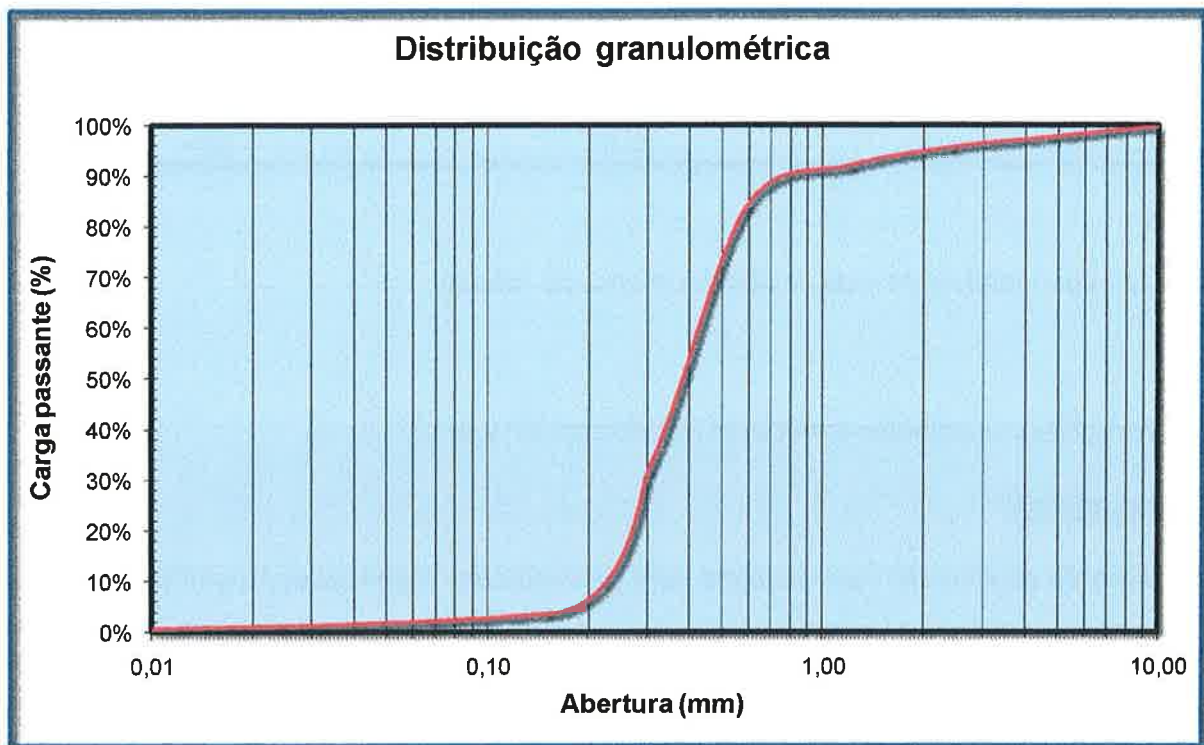


Figura 4-14 – Distribuição granulométrica da areia empregada nos materiais dosados em laboratório.

Como podemos observar, mais de 90% do agregado possui dimensão máxima inferior a 1 mm, o que mostra a elevada finura deste.

4.3.2 Argamassas industrializadas

Foram analisadas durante a pesquisa duas argamassas industrializadas produzidas no país. Ambas possuem como principais características elevada resistência mecânica, baixa absorção capilar e baixa retração, diferindo no fato de apenas uma possuir inibidor de corrosão incorporado. Estas serão denominadas “A.I. s/ Inibidor” e “A.I. c/ Inibidor” de agora em diante.

4.3.3 Pinturas de revestimento para armaduras

Foram analisados na presente pesquisa dois tipos de pinturas de revestimento para armaduras:

1. primer para armaduras base cimentícia rico em inibidores de corrosão e com adição de polímeros (doravante chamado PCI);
2. primer para armaduras base zinco (doravante chamado ZP).

4.3.4 Inibidor de corrosão por aspersão

Foi analisado durante a pesquisa um inibidor de corrosão aplicado por aspersão, ainda não disponível no país. Trata-se de um produto composto por um silano-siloxano organo-funcional base flúor, tendo como característica uma molécula funcional bastante diminuta, segundo o fabricante, capaz de penetrar no concreto até atingir a armadura, parando o processo corrosivo. Para efeito de nomenclatura, esse produto será chamado de CIT ao longo do texto.

4.4 Variáveis dependentes, independentes e intervenientes

As variáveis de estudo estão separadas em variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis intervenientes. As variáveis dependentes, que são os principais parâmetros a serem estudados para a demonstração da eficiência dos sistemas, são:

- Potencial de corrosão (E_{corr}), medido em mV;
- Corrente de corrosão (i_{corr}), medida em $\mu A/cm^2$;
- Corrente de macro-célula, medida em μA ;

As variáveis independentes são os próprios sistemas a serem avaliados, sendo estes:

- Argamassas de reparo de referência (dosada no laboratório – Ref029 e Ref035);
- Argamassa industrializada com características poliméricas com inibidor de corrosão;
- Argamassa industrializada com características poliméricas sem inibidor de corrosão;
- Revestimento de base cimentícia rico em inibidores de corrosão ($NaNO_2$) e polímeros aplicado sobre as armaduras + argamassa de reparo de referência;
- Revestimento à base de Zinco aplicado sobre as armaduras + argamassa de reparo de referência;
- Argamassa de reparo de referência + proteção superficial com inibidor por aspersão.

Por último, as variáveis intervenientes, que influem ou podem influir no resultado das variáveis dependentes como: temperatura, umidade relativa do ar, resistência à compressão, porosidade,

umidade interna do concreto, umidade superficial do concreto, teor de cloreto, profundidade de carbonatação, espessura de cobrimento, heterogeneidades, entre outras.

A Tabela 4-9 mostra as variáveis dependentes, intervenientes e independentes.

Tabela 4-9 – Variáveis dependentes, independentes e intervenientes

| |
|--|
| Variáveis dependentes |
| Potencial de corrosão – E_{corr} |
| Corrente de corrosão – i_{corr} |
| Variáveis independentes |
| Argamassas de reparo de referência (Ref029 e Ref035) |
| Argamassa industrializada com características poliméricas sem inibidor de corrosão |
| Argamassa industrializada com características poliméricas com inibidor de corrosão |
| Revestimento de base cimentícia rico em inibidores de corrosão ($NaNO_2$) e polímeros aplicado sobre as armaduras + argamassa de reparo de referência (Ref035) |
| Revestimento à base de Zinco aplicado sobre as armaduras + argamassa de reparo de referência (Ref035) |
| Argamassa de reparo de referência (Ref035) + proteção superficial da estrutura com inibidor por aspersão |
| Variáveis intervenientes |
| Temperatura ambiente (t) |
| Umidade relativa ambiente (U. R.) |
| Resistência à compressão (f_c) dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Resistência à tração (f_t) dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Módulo de elasticidade (E) dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Retração por secagem dos materiais de reparo |
| Resistência de aderência entre os materiais de reparo e o substrato do protótipo estrutural |
| Volume de vazios dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Umidade interna dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Umidade superficial dos materiais de reparo e do substrato do protótipo estrutural |
| Teor de cloretos presente no substrato protótipo estrutural |
| Profundidade de carbonatação no substrato do protótipo estrutural |
| Espessura de cobrimento de concreto e materiais de reparo sobre as armaduras |
| Métodos ou procedimentos de ensaio |

5 Resultados

5.1 Caracterização das argamassas

5.1.1 Ensaios no estado fresco

Foram realizados no estado fresco ensaios para controle da produção dos corpos-de-prova das argamassas estudadas.

A Figura 5-1 mostra a consistência das argamassas estudadas. Como se pode observar, as argamassas apresentam uma consistência adequada para a aplicação em reparos tradicionais, ficando dentro da faixa pré-estabelecida para o presente projeto (210 ± 30 mm). Outro dado importante a ser observado no gráfico é o efeito do sal (CaCl_2) adicionado às argamassas. Podemos observar que, apesar da grande dispersão nos dados da argamassa industrializada com inibidor de corrosão, a adição do sal provocou redução na consistência das argamassas, muito provavelmente provocado por interferência nas reações de hidratação (trata-se de um aditivo acelerador de pega). Essa redução no caso das argamassas industrializadas provocou certa dificuldade na moldagem dos corpos-de-prova, o que pode no futuro trazer conseqüências para os resultados dos demais ensaios, embora aparentemente os referidos corpos-de-prova não apresentem sinais visíveis de qualquer anomalia.

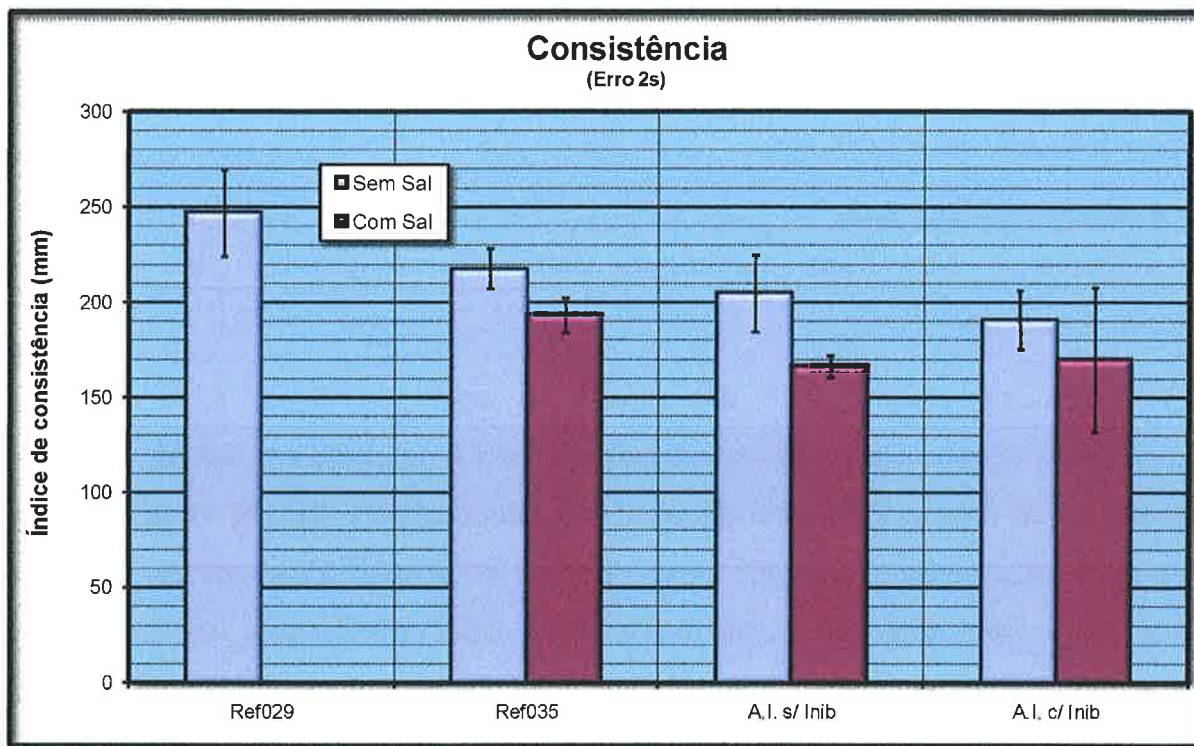


Figura 5-1 – Consistência das argamassas estudadas.

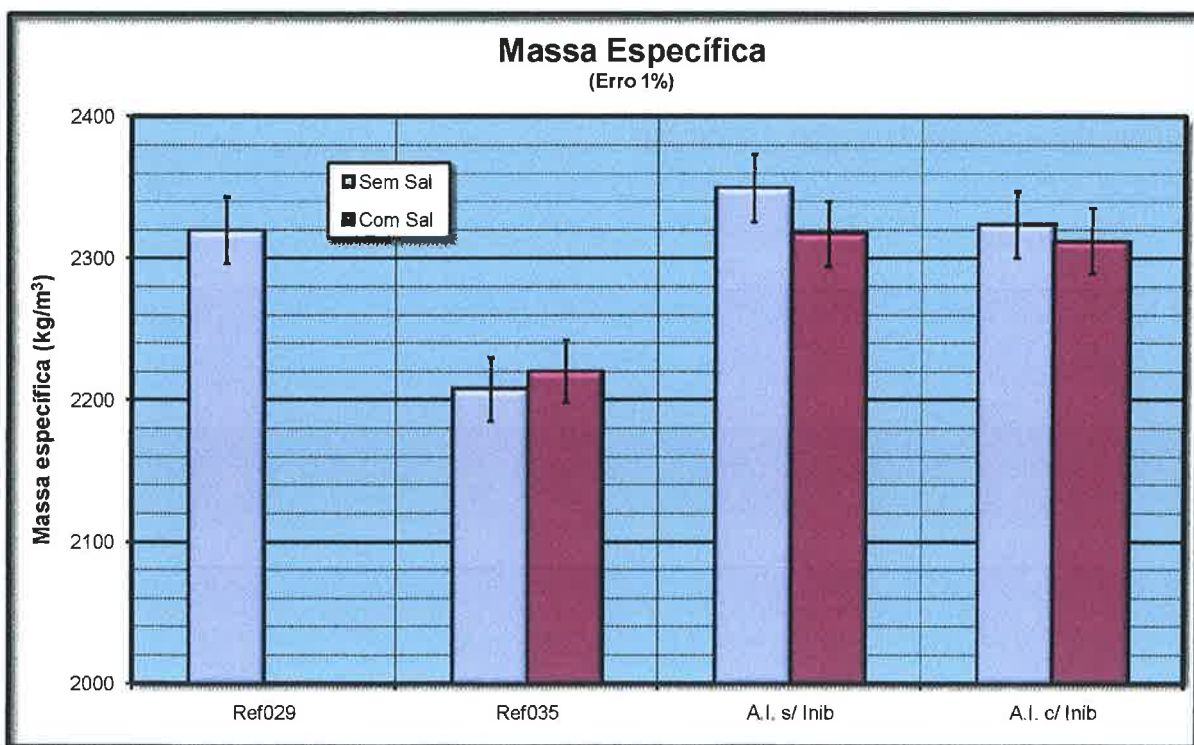


Figura 5-2 – Massa específica das argamassas estudadas.

A Figura 5-2 apresenta os resultados do ensaio de massa específica no estado fresco para as argamassas utilizadas no presente estudo. Pode-se observar que não existem diferenças significativas entre as argamassas industrializadas e a argamassa Ref029, nem tão pouco entre as argamassas com e sem a adição do sal (CaCl_2). Já a argamassa Ref035 apresenta uma densidade inferior às demais. Essa diferença é resultado da maior quantidade de água existente na sua composição, bem como provavelmente de uma maior incorporação de ar por parte da mesma, como se observa na Tabela 5-1. Esse dado é extremamente relevante, uma vez que pode influir negativamente no desempenho mecânico desta argamassa, bem como frente à penetração de agentes agressivos. Vale ressaltar que esse resultado é coerente com o apresentado na resistência à compressão, onde o desempenho desta argamassa é significativamente inferior às demais.

Tabela 5-1 – Valores teóricos de massa específica das argamassas dosadas em laboratório e valores estimados de ar aprisionado.

| | Desconsiderando o ar aprisionado | | | | | | Considerando o ar aprisionado | | | | | |
|---|----------------------------------|-------|------------------|---------|-------|------------------|-------------------------------|-------|------------------|---------|-------|------------------|
| | Ref029 | | | Ref035 | | | Ref029 | | | Ref035 | | |
| | Cimento | Areia | H ₂ O | Cimento | Areia | H ₂ O | Cimento | Areia | H ₂ O | Cimento | Areia | H ₂ O |
| Traço | 1 | 2,2 | 0,29 | 1 | 2 | 0,35 | 1 | 2,2 | 0,29 | 1 | 2 | 0,35 |
| Massa específica (kg/m ³) | 3100 | 2650 | 1000 | 3100 | 2650 | 1000 | 3100 | 2650 | 1000 | 3100 | 2650 | 1000 |
| Massa Unitária (kg) | 3,49 | | | 3,35 | | | 3,49 | | | 3,35 | | |
| Teor de ar aprisionado "estimado" (%) | ---- | | | ---- | | | 4,3% | | | 6,3% | | |
| Volume Unitário (litros) | 1,44 | | | 1,43 | | | 1,50 | | | 1,52 | | |
| Massa específica teórica (kg/m ³) | 2419 | | | 2347 | | | 2320 | | | 2208 | | |
| Massa específica medida (kg/m ³) | 2320 | | | 2208 | | | 2320 | | | 2208 | | |

5.1.2 Absorção capilar

Observando a Figura 5-3 pode-se notar claramente o melhor comportamento das argamassas industrializadas comparadas com as argamassas de referência. Estas chegam a apresentar 40% da absorção capilar da argamassa Ref029 e 25% da absorção capilar da argamassa Ref035, o que mostra o efeito das características poliméricas e do maior controle granulométrico de produção entre outros. Essa informação é muito importante, pois afeta diretamente os mecanismos de

transporte dentro das argamassas, alterando assim o comportamento destas frente à proteção contra a corrosão.

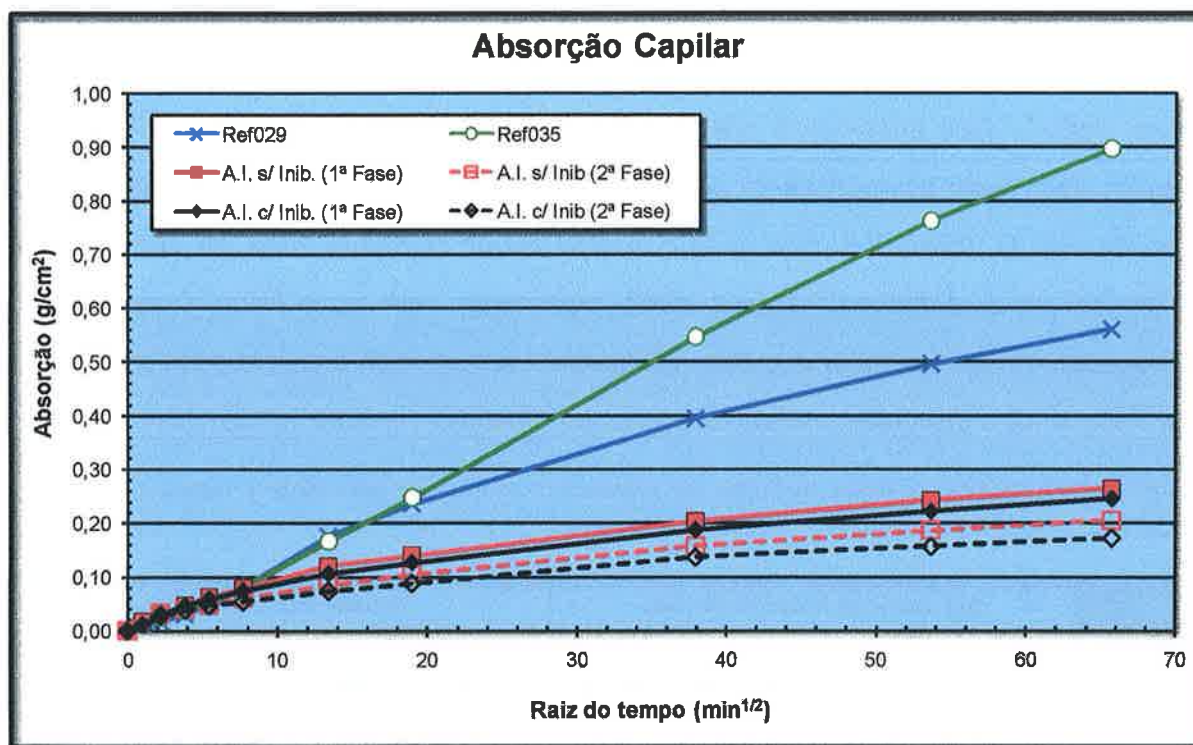


Figura 5-3 – Absorção capilar das argamassas estudadas.

Outro dado interessante é a ascensão capilar da água medida nas argamassas utilizadas. Pode-se notar que a altura atingida pela água na argamassa Ref035 chega a ser maior que 10 vezes a altura atingida nas argamassas industrializadas, como mostra a Tabela 5-2 e a Figura 5-4.

Tabela 5-2 – Altura da ascensão capilar da água no interior dos corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de absorção capilar.

| Sistema de Reparo | Ref035 | A.I. s/ Inib. | A.I. c/ Inib. |
|---------------------------------|--------|---------------|---------------|
| Altura da ascensão capilar (mm) | 80 | 6 | 4 |

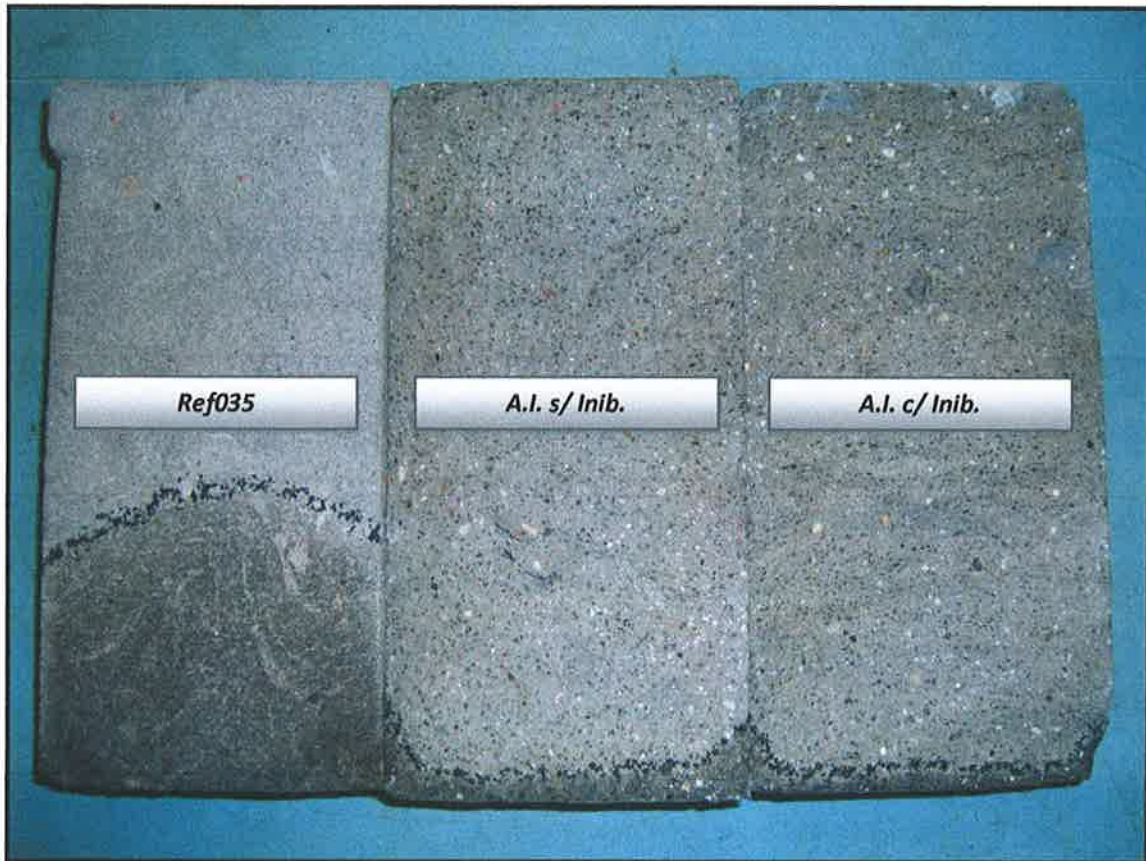


Figura 5-4 – Ascensão capilar da água no interior dos corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de absorção capilar.

Levando-se em consideração que os corpos-de-prova ficaram imersos em uma lâmina d'água de 5mm, pode-se inferir que praticamente não houve efeito de capilaridade nas argamassas industrializadas. Ainda observando-se a figura acima, pode-se notar o efeito de borda na absorção de água pelos corpos-de-prova. Esse efeito de borda provocou certamente distorções nos resultados do ensaio de absorção, levando a resultados mais amenos com relação ao pior desempenho das argamassas de referência (Ref035). No caso das argamassas industrializadas, nota-se um aumento na altura da ascensão da água junto às bordas provocado pelo ingresso de água junto às mesmas, levando a um resultado final de absorção maior que o real. Já na argamassa Ref035 nota-se um decréscimo na altura da ascensão da água junto à superfície lateral

do corpo-de-prova provocado pela evaporação da água nestas superfícies, ocasionando uma minoração do valor de absorção capilar medido nesta argamassa.

5.1.3 Migração de cloretos

A Tabela 5-3 mostra os resultados do ensaio de migração de cloretos (ASTM C 1202-07) realizado nas argamassas utilizadas na presente pesquisa. Como se observa, as argamassas industrializadas apresentam desempenho bem superior à argamassa de referência (Ref035). Estas apresentam valores de carga passante muito baixa segundo a ASTM C 1202-07. Vale lembrar que esta classificação se refere à concretos, dos quais se esperam desempenhos bastante superiores com relação às argamassas. Dessa forma, os resultados mostram que as argamassas industrializadas apresentam capacidade de restrição à passagem de íons cloretos realmente muito elevada.

Tabela 5-3 – Classificação das argamassas estudadas segundo a ASTM C 1202.

| Material | Ref035 | A.I. s/ Inib. | A.I. c/ Inib. |
|---|---------------|----------------------|----------------------|
| Carga passante | *** | 372 Coulombs | 428 Coulombs |
| Permeabilidade aos íons cloreto (segundo ASTM C 1202) | Muito alta | Muito baixa | Muito baixa |

*** Ensaio interrompido por limite de temperatura.

Com relação ao resultado da argamassa de referência, pode-se somente afirmar que seu desempenho é bastante inferior ao das argamassas industrializadas. A limitação do método (super-aquecimento da solução de ensaio) impede a real avaliação do desempenho desta.

AL-ZAHRANI et al (2003) estudaram 7 argamassas de reparo comerciais e 2 feitas em laboratório, e em todos os casos, os valores de permeabilidade aos íons cloretos são muito baixos segundo a ASTM C 1202, com exceção de 3 que foram classificadas como de baixa permeabilidade. Esses resultados são semelhantes aos obtidos para as argamassas industrializadas avaliadas neste estudo. A grande discrepância observada na argamassa Ref035 deve ser melhor avaliada em um trabalho futuro, de forma a se compreender que fatores e características de sua composição levaram a esse desempenho bastante reduzido. Vale ressaltar que uma das argamassas estudadas por AL-ZAHRANI et al (2003) possui um traço (1:2,5:0,38 – cimento:areia:água/cimento) bastante

semelhante à Ref035 (1:2:0,35 – cimento:areia:água/cimento), porém com comportamento bastante superior (permeabilidade aos íons cloreto muito baixa segundo ASTM C 1202).

A Figura 5-5 e a Figura 5-6 mostram claramente a grande diferença de desempenho das argamassas industrializadas avaliadas no presente estudo com relação à argamassa Ref035. Observa-se claramente que no caso da argamassa Ref035 os íons cloretos atravessam toda a espessura do corpo-de-prova, enquanto nas argamassas industrializadas, apenas uma pequena camada superficial apresenta-se contaminada com cloretos livres (passíveis de detecção através do método colorimétrico). Esse comportamento confere com o observado no ensaio de absorção capilar e massa específica.

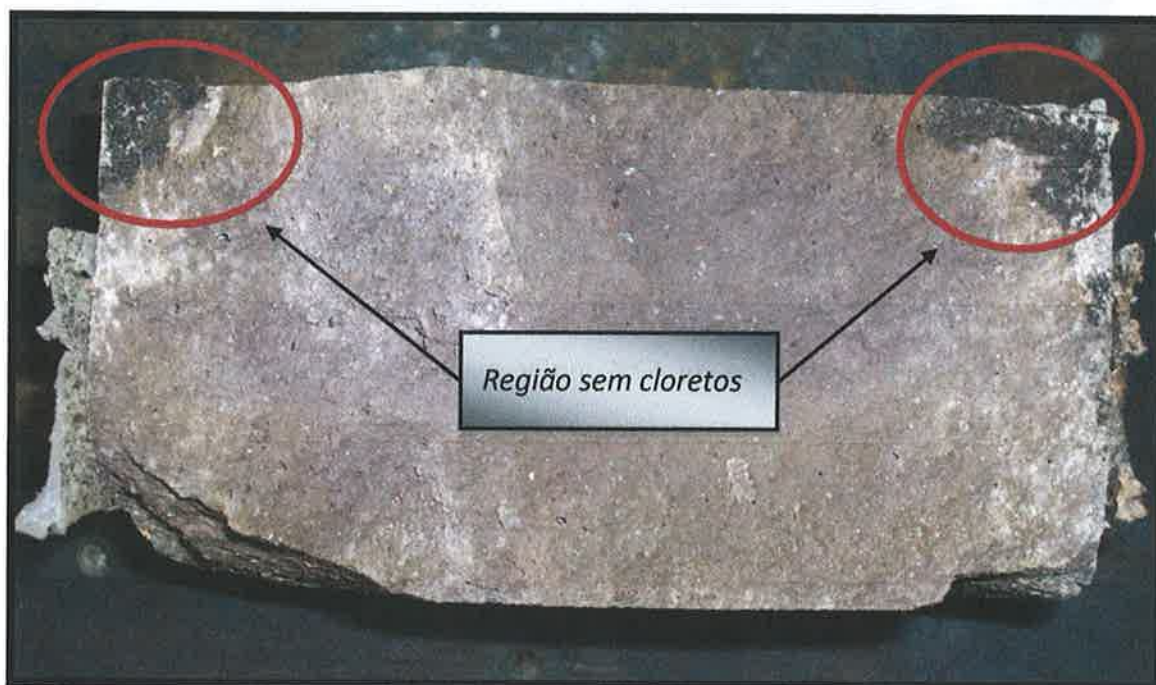


Figura 5-5 – Perfil de penetração de cloretos típico na argamassa Ref035. Os cantos escuros no topo do CP indicam os locais onde não existe cloretos em quantidade detectável pelo método colorimétrico. Este comportamento se deve ao contato da célula de ensaio com o CP nesta região, impedindo o fluxo de íons nesta região.

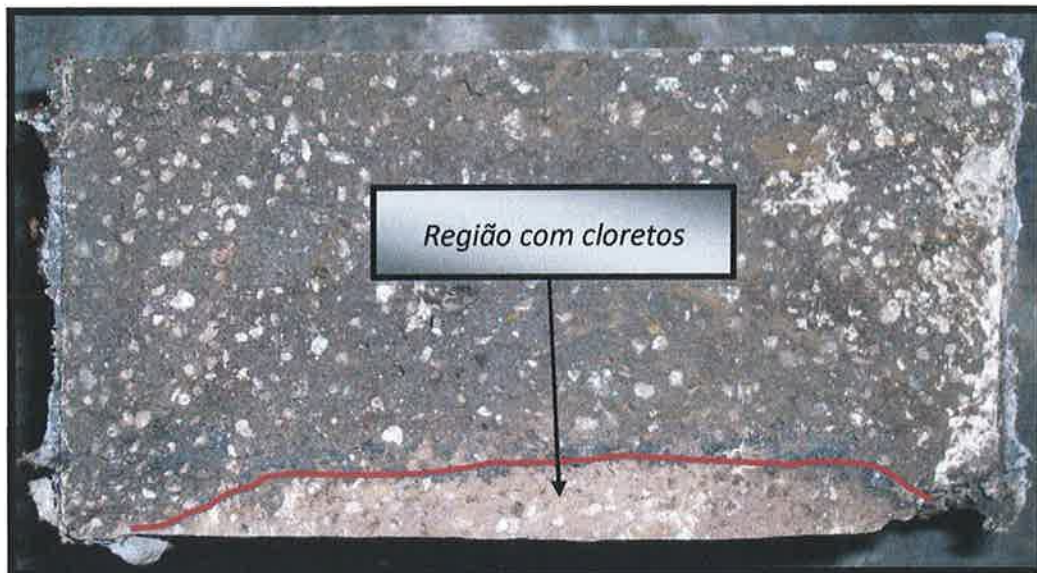


Figura 5-6 – Perfil de penetração de cloretos típico nas argamassas industrializadas (A.I. s/ Inib. e A.I. c/ Inib.).

5.1.4 Propriedades mecânicas

As figuras Figura 5-7 e Figura 5-8 mostram claramente o melhor comportamento mecânico das argamassas industrializadas. Como se pode observar na Figura 5-7 as argamassas industrializadas possuem resistência à compressão significativamente superior às argamassas de referência (cerca de 25% maior que a Ref029 e cerca de 67% maior que a Ref035). Entretanto não possuem diferença significativa entre elas, o que mostra que neste caso, ou não existe influência do aditivo inibidor de corrosão na resistência à compressão das argamassas no teor empregado, ou existe algum artifício por parte da indústria dosadora para minimizar possíveis diferenças de comportamento (adição de aditivos retardadores de pega, por exemplo). Vale lembrar que o inibidor de corrosão utilizado (nitrito de sódio) é reconhecidamente um aditivo acelerador de pega.

Outro fato interessante é a influência do sal adicionado nas argamassas para promover a corrosão logo nas primeiras idades. Pode-se observar uma tendência ao aumento da resistência à compressão das argamassas com o sal. Esse fato pode estar relacionado a uma maior velocidade na hidratação do cimento. Vale ressaltar que o sal utilizado (CaCl_2) é um conhecido acelerador de pega, muito utilizado nas décadas de 50 a 80 do século passado.

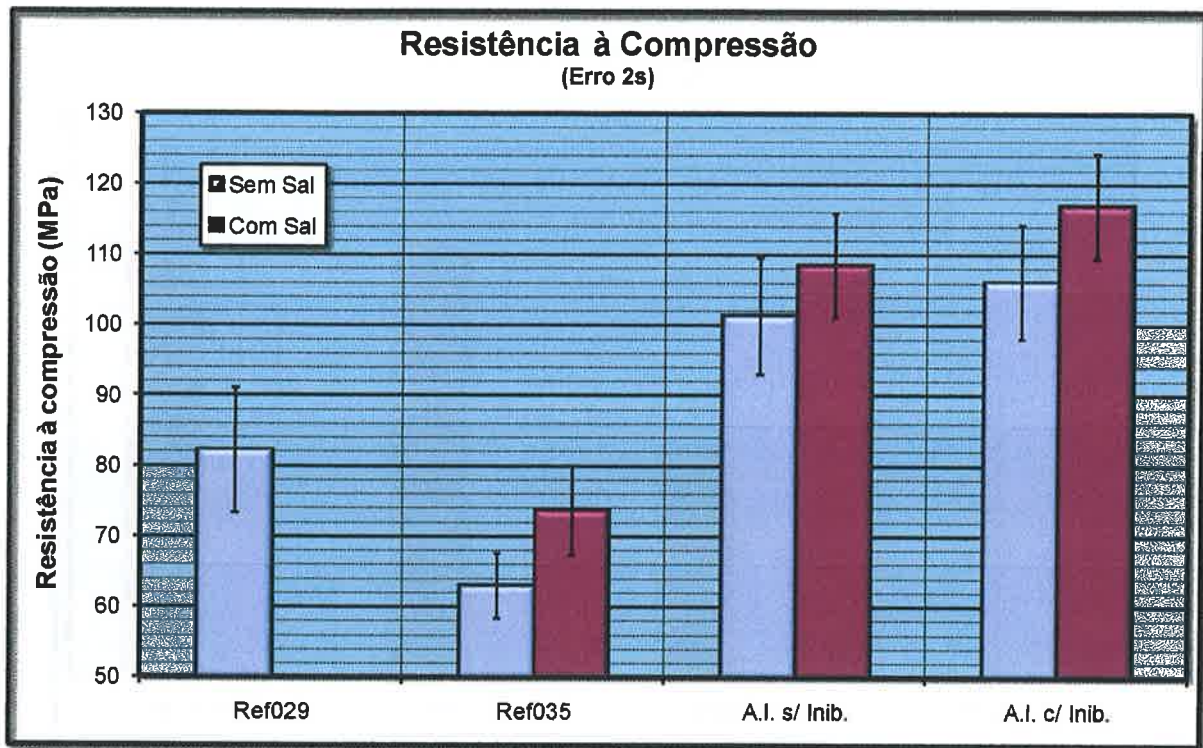


Figura 5-7 – Resistência à compressão axial das argamassas estudadas.

Observando a Figura 5-8 pode-se notar na resistência à tração na flexão destas argamassas um comportamento semelhante à resistência à compressão, onde as argamassas industrializadas apresentavam um melhor desempenho. Entretanto a grande dispersão ocorrida no ensaio não permite fazer maiores considerações a cerca da influência do sal (CaCl_2) no comportamento destas.

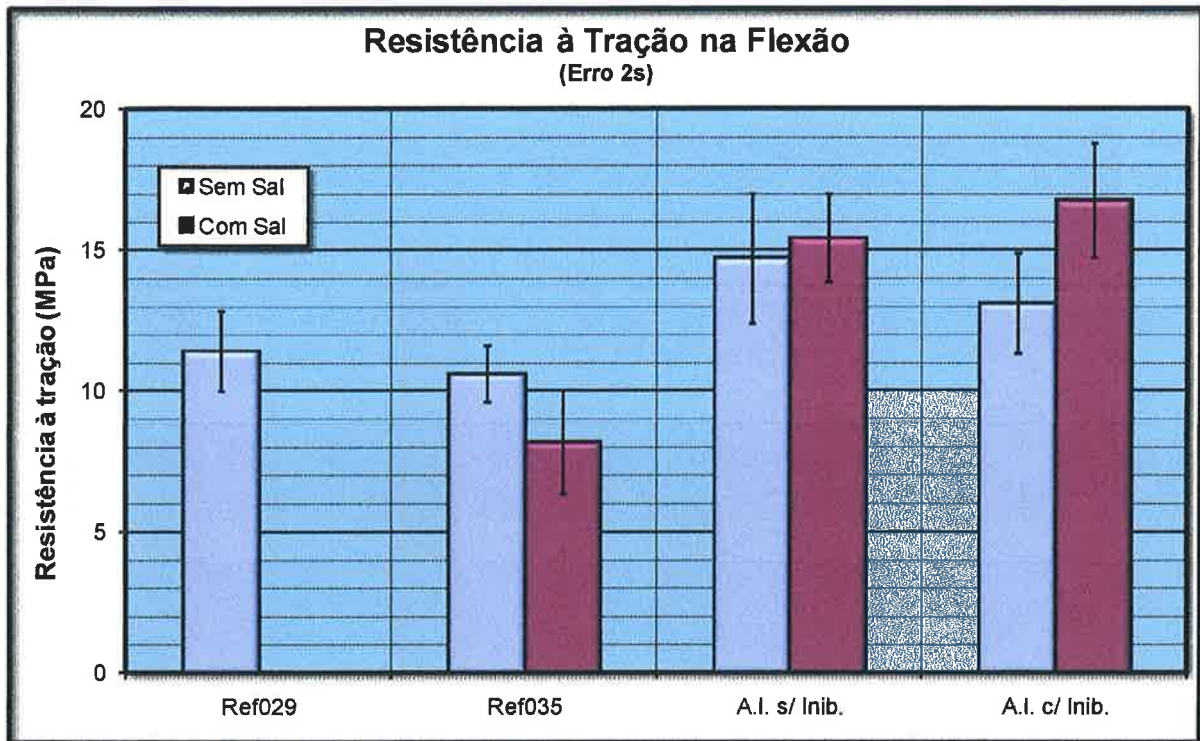


Figura 5-8 – Resistência à tração na flexão das argamassas estudadas.

Com relação ao módulo de elasticidade, observa-se na Figura 5-9 uma leve tendência de que as argamassas industrializadas apresentem um valor mais elevado. Entretanto essa tendência não pode ser confirmada estatisticamente, uma vez que a dispersão dos resultados é maior que essa variação nas médias. Essa mesma análise pode ser feita para o efeito do sal (CaCl_2) nesta propriedade. Embora pareça haver uma tendência a um aumento nos valores do módulo para as situações com sal, estatisticamente isso não pode ser comprovado. Pode-se observar que essas tendências seguem o comportamento apresentado pela resistência à compressão como era esperado. Essa informação é muito importante uma vez que o módulo de elasticidade influi diretamente nas tensões resultantes em reparos, seja por ação da retração, ou movimentação da estrutura. Essas tensões podem levar à fissuração do reparo, principalmente na região de interface, comprometendo assim o desempenho deste. Deve-se observar então a relação entre o aumento nas resistências à compressão e, principalmente, à tração com relação ao módulo – elevados módulos de elasticidade podem, em determinados casos, ser indesejáveis em argamassas de reparo.

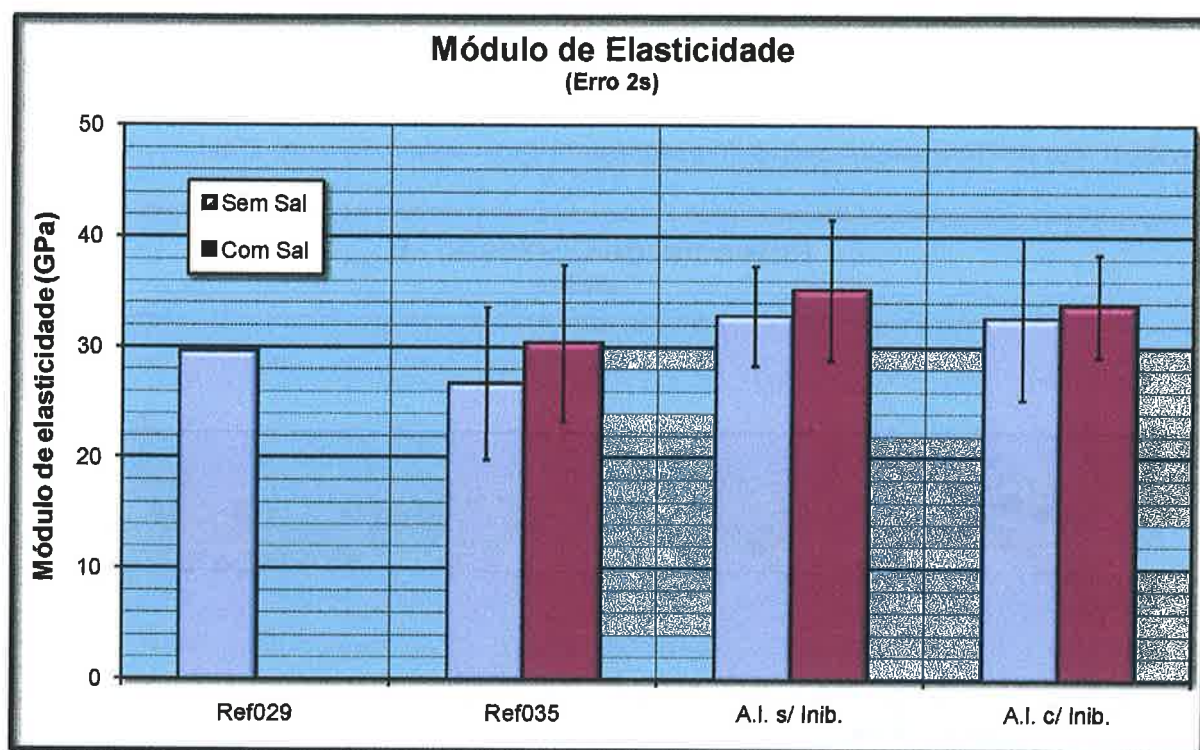


Figura 5-9 – Módulo de elasticidade das argamassas estudadas.

5.2 Ensaios realizados em laboratório

5.2.1 Ciclos de molhamento e secagem – 1ª Fase

5.2.1.1 Potencial de corrosão

A Figura 5-10 mostra que o potencial de corrosão dos sistemas de reparo analisados, mesmo após 90 ciclos de molhamento e secagem, estão estáveis e com valores próximos a -200 mV o que segundo a ASTM C 876-91 significa que estes estão passivos. Esperava-se que dentro de alguns ciclos os potenciais de corrosão apresentassem uma queda brusca, representando o rompimento do filme de passivação e a determinação do início do período de propagação da corrosão, o que não ocorreu. De qualquer forma, o tempo decorrido até o presente momento é bastante elevado, o que por um lado mostra a qualidade dos materiais analisados, por outro torna o uso deste método de avaliação inadequado para esses sistemas, uma vez que após quase dois anos de ciclagem, nenhuma diferença significativa entre os sistemas pode ser observada. Essa mesma constatação pode ser observada por outros pesquisadores em trabalhos relacionados a concretos de alto desempenho. SILVA (2006) avaliou vários concretos de alto desempenho submetidos a ciclos de molhamento e secagem ao longo de 28 meses, sem que estes apresentassem qualquer tipo de

alteração nos valores de potencial de corrosão que indicasse a despassivação das armaduras embebedas nestes, mesmo a utilização de alto teor de cloretos na segunda metade do estudo (após o 19º mês, o teor de cloretos utilizado pelo pesquisador passou de 3,5% para 10%).

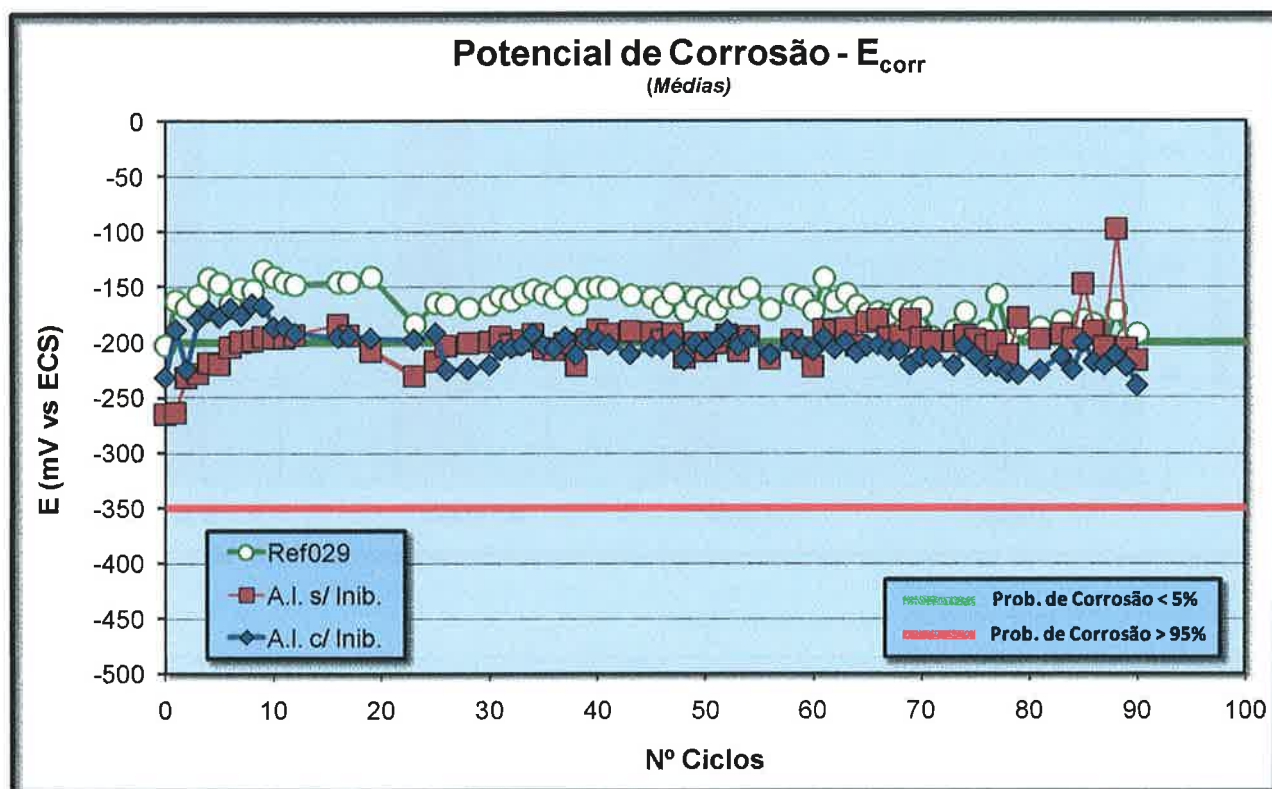


Figura 5-10 – Potenciais de corrosão médios dos sistemas de reparo analisados submetidos aos ciclos de molhamento e secagem. Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91. Cada ciclo de molhamento e secagem dura 1 semana.

5.2.1.2 Impedância eletroquímica

A Figura 5-11 e a Figura 5-12 mostram os resultados da espectroscopia de impedância eletroquímica realizada nos sistemas de reparo. Podemos observar que o comportamento das argamassas com características poliméricas é bem semelhante. Ambas apresentam valores de R_{Ω} bem superiores à argamassa tradicional (10x maiores), o que mostra a maior resistência à movimentação iônica das argamassas industrializadas, como foi observado no resultados de absorção capilar, migração de íons cloreto etc. Esse comportamento sugere que o processo de contaminação das argamassas industrializadas com cloretos (iniciação da corrosão) deverá ser mais lento que o observado na argamassa dosada em obra. Outra etapa que também deverá ser influenciada por esse resultado é a etapa de propagação, uma vez que o controle do processo

corrosivo nessa etapa se dá ora pela resistividade do meio (em corpos-de-prova não-saturados), ora pela difusão do oxigênio (corpos-de-prova saturados), ambos processos diretamente influenciados pela resistência ôhmica medida.

Em relação à resistência de transferência de carga, pode-se inferir através da análise do gráfico de Nyquist (2º arco) que esta apresenta valor extremamente elevado, o que confirma a análise feita nos resultados de potencial de corrosão, de que as armaduras estão passivas.

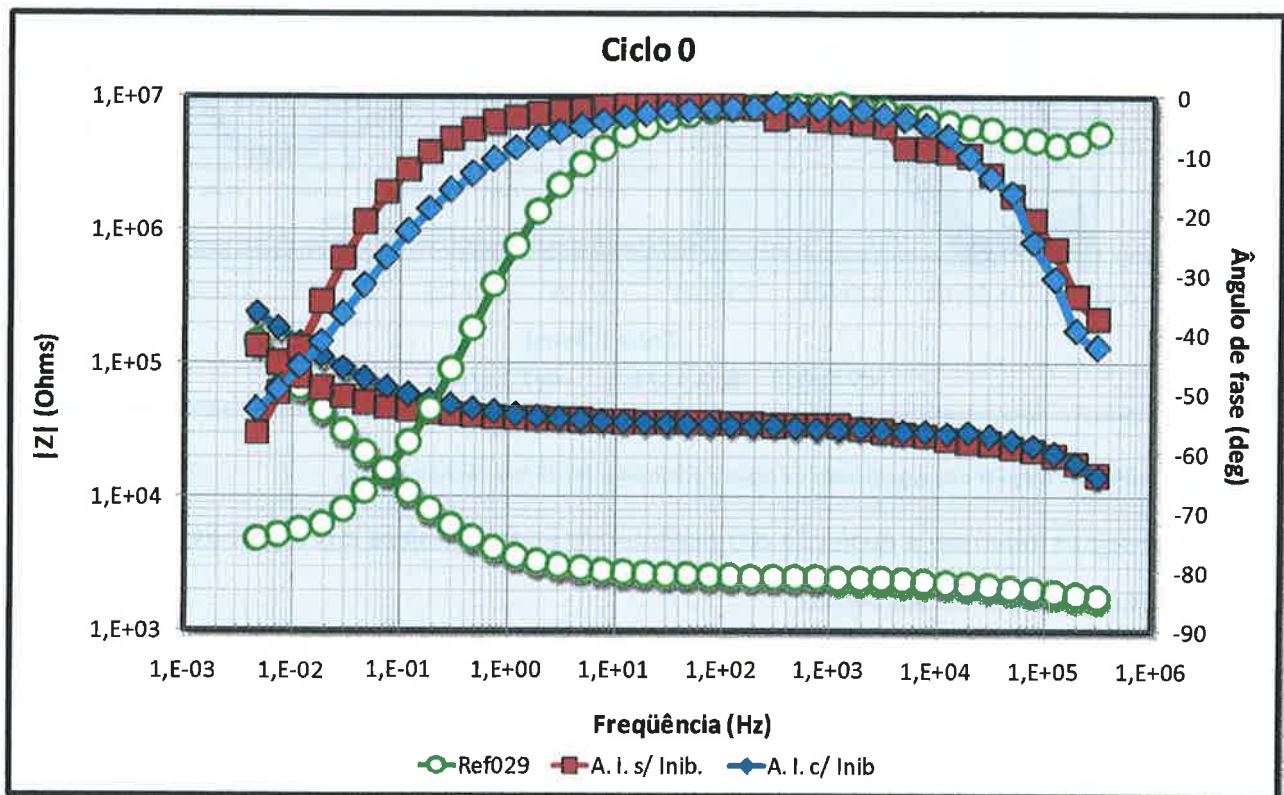


Figura 5-11 – Gráfico de Bode das argamassas de reparo analisadas na 1ª fase (leitura inicial).

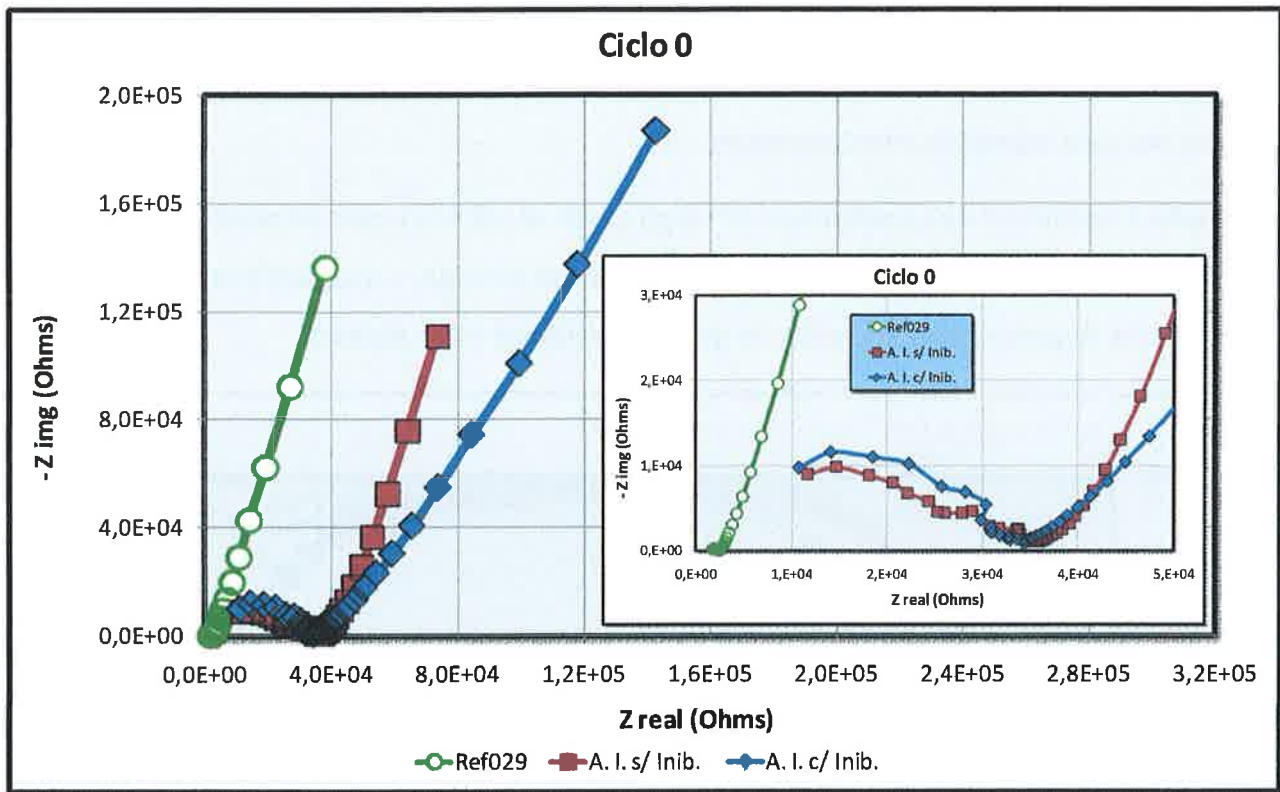


Figura 5-12 – Gráfico de Nyquist das argamassas de reparo analisadas na 1ª fase (leitura inicial).

As figuras a seguir mostram a evolução dos parâmetros eletroquímicos das argamassas estudadas ao longo dos ciclos de envelhecimento.

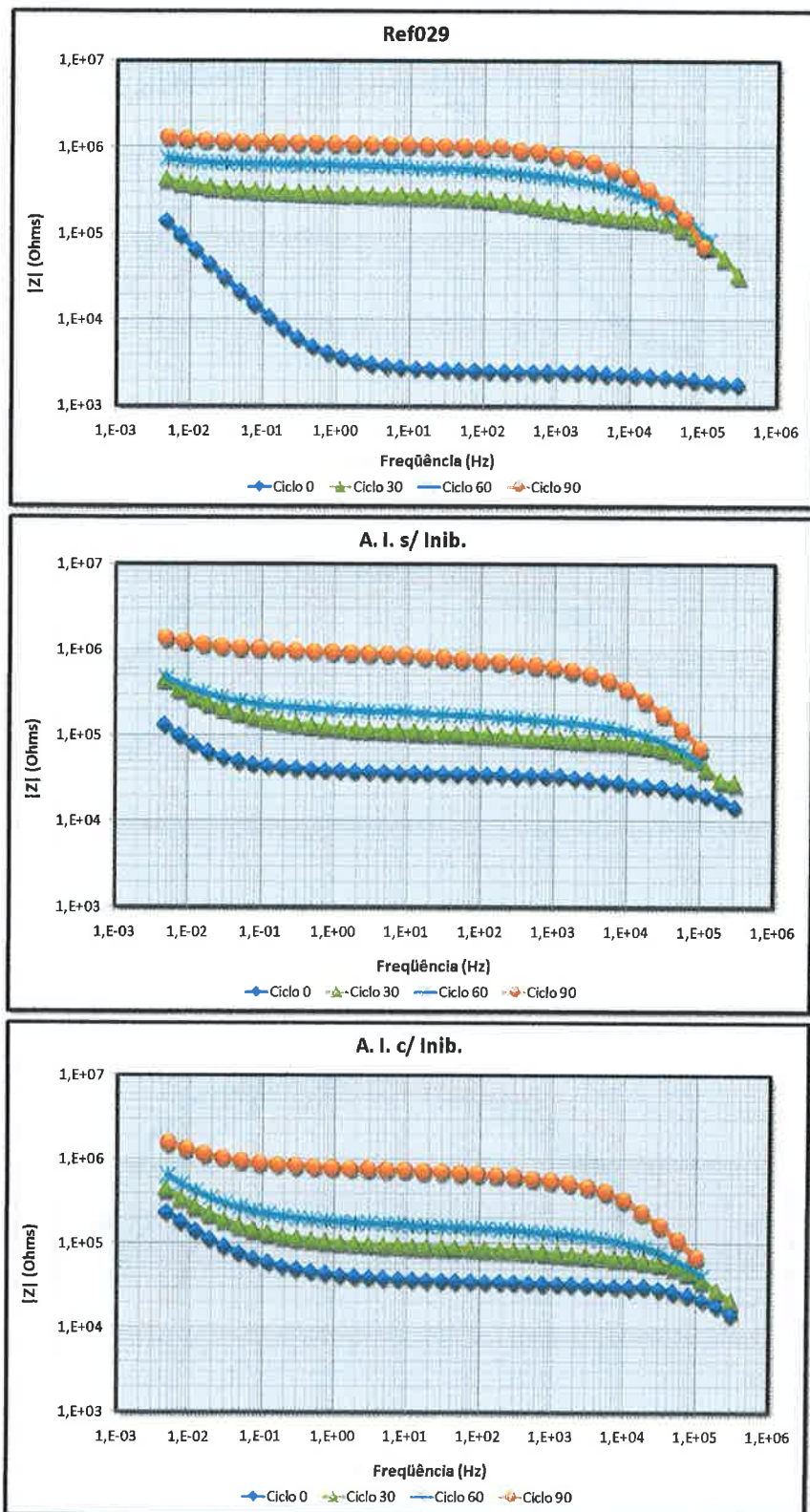


Figura 5-13 – Gráfico de Bode (módulo da impedância versus frequência) das argamassas estudadas na 1ª fase.

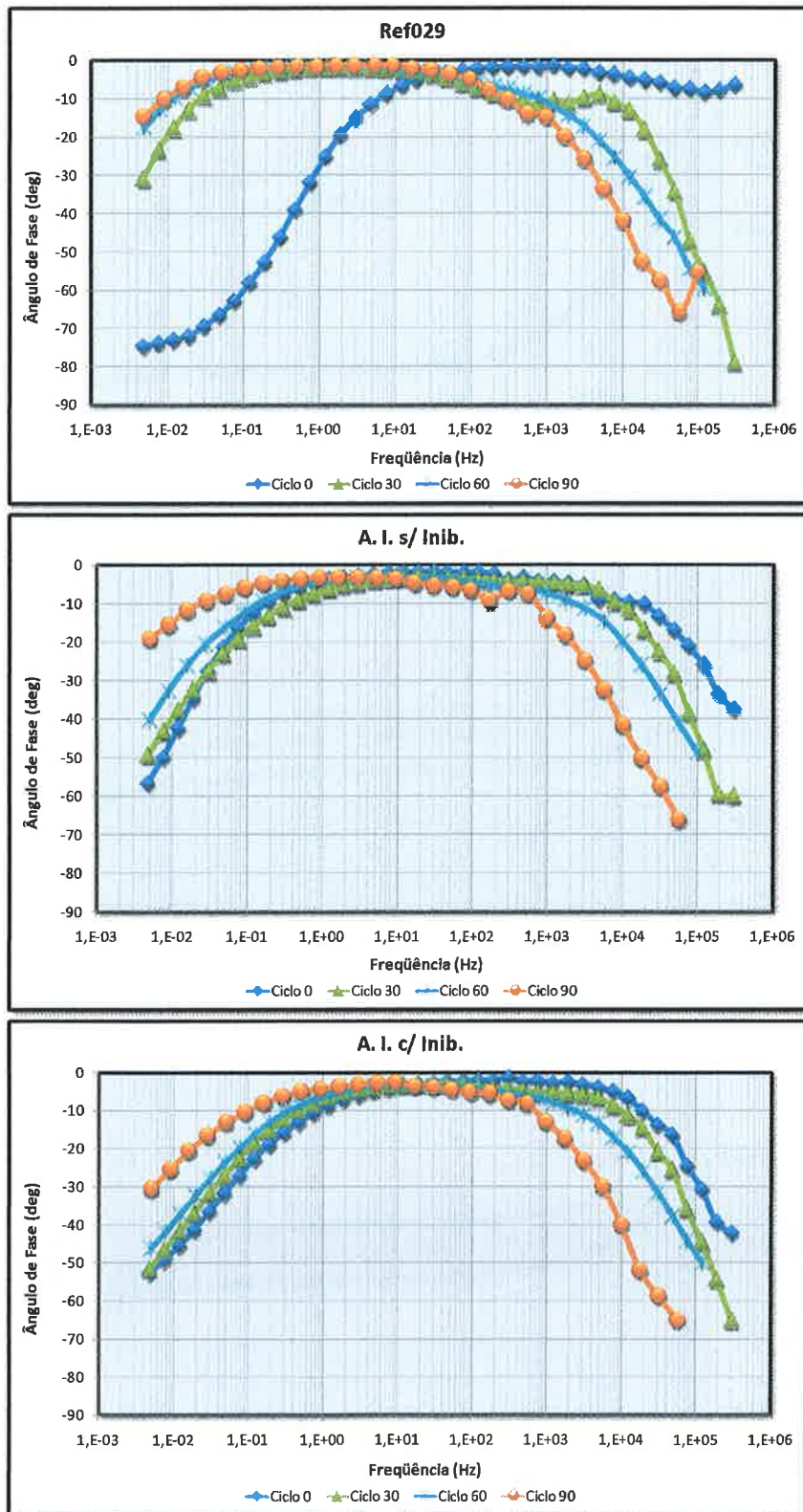


Figura 5-14 – Gráfico de Bode (ângulo de fase versus frequência) das argamassas estudadas na 1ª fase.

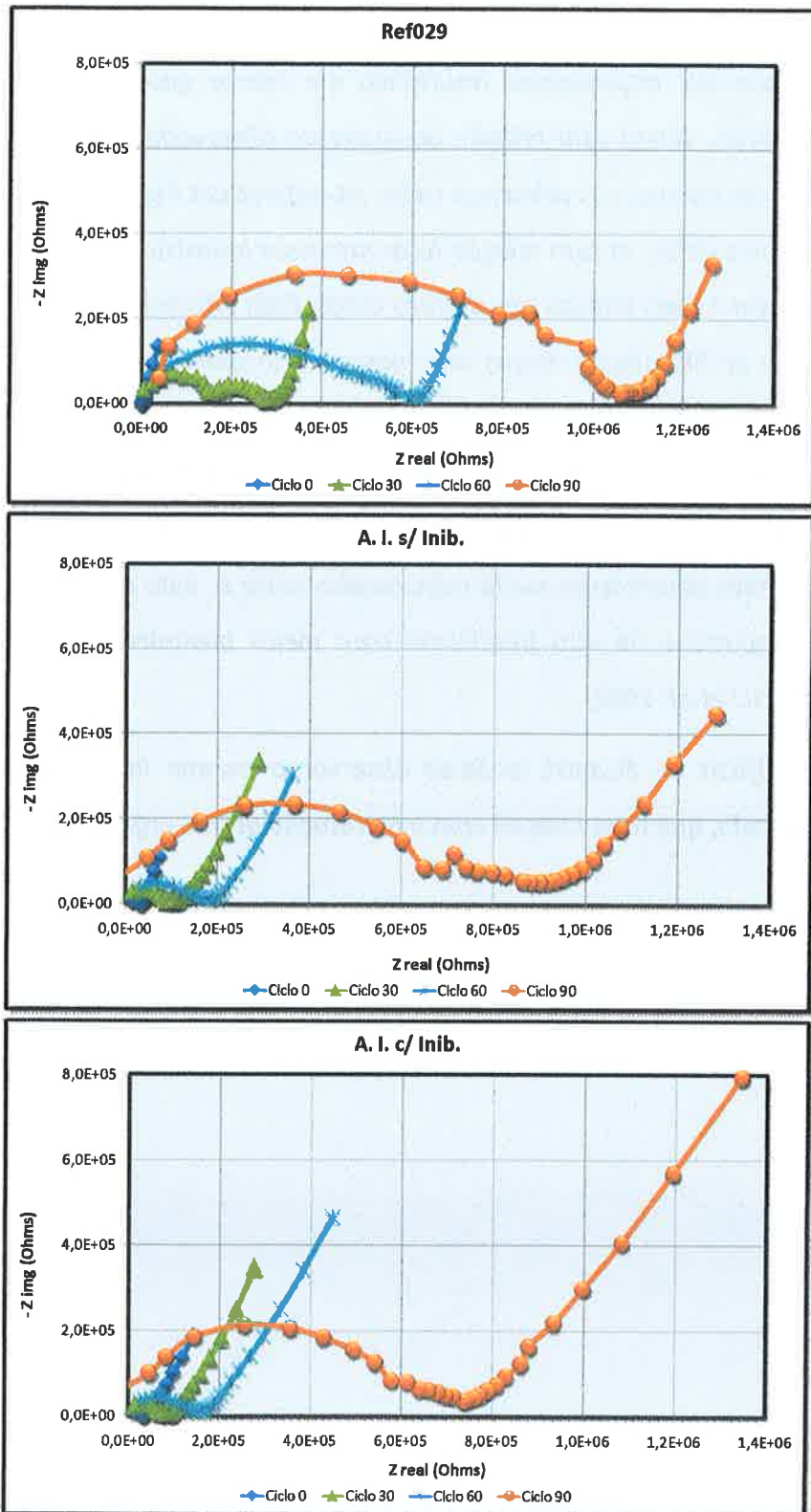


Figura 5-15 – Gráfico de Nyquist das argamassas estudadas na 1ª fase.

Como se pode observar na Figura 5-13, na Figura 5-14 e na Figura 5-15, ao longo dos ciclos de molhamento e secagem houve um aumento generalizado na impedância em todas as faixas de

freqüência para as três argamassas estudadas. Esse aumento pode ter sido provocado pelo processo de hidratação das argamassas, resultando em menor quantidade de poros e maior resistividade das mesmas. Ainda com relação ao aumento observado nas impedâncias, pode-se verificar que este é mais intenso nos primeiros ciclos na argamassa Ref029, chegando próximo da estabilização nos últimos ciclos. Já com relação às argamassas industrializadas, ocorre o inverso. O aumento na impedância é mais intenso nos últimos ciclos. Essa diferença de comportamento pode ser fruto da diferença de hidratação destas argamassas, principalmente pela presença de micro-silica nas argamassas industrializadas, o que provocaria uma hidratação maior a idades elevadas. Outro fato interessante é o deslocamento da fase capacitiva de alta freqüência para valores cada vez menores, principalmente na argamassa Ref029, com o aumento das idades dos corpos-de-prova. Essas duas últimas observações estão relacionadas entre si, indo de acordo com a literatura que fala de efeito capacitivo de alta freqüência para meios bastante resistivos (McCARTER & BROUSSEAU, 1990); (GU et al, 1992) .

Com relação aos gráficos de Nyquist, pode-se observar o mesmo incremento na impedância anteriormente observado, que teria relação com a hidratação destas argamassas.

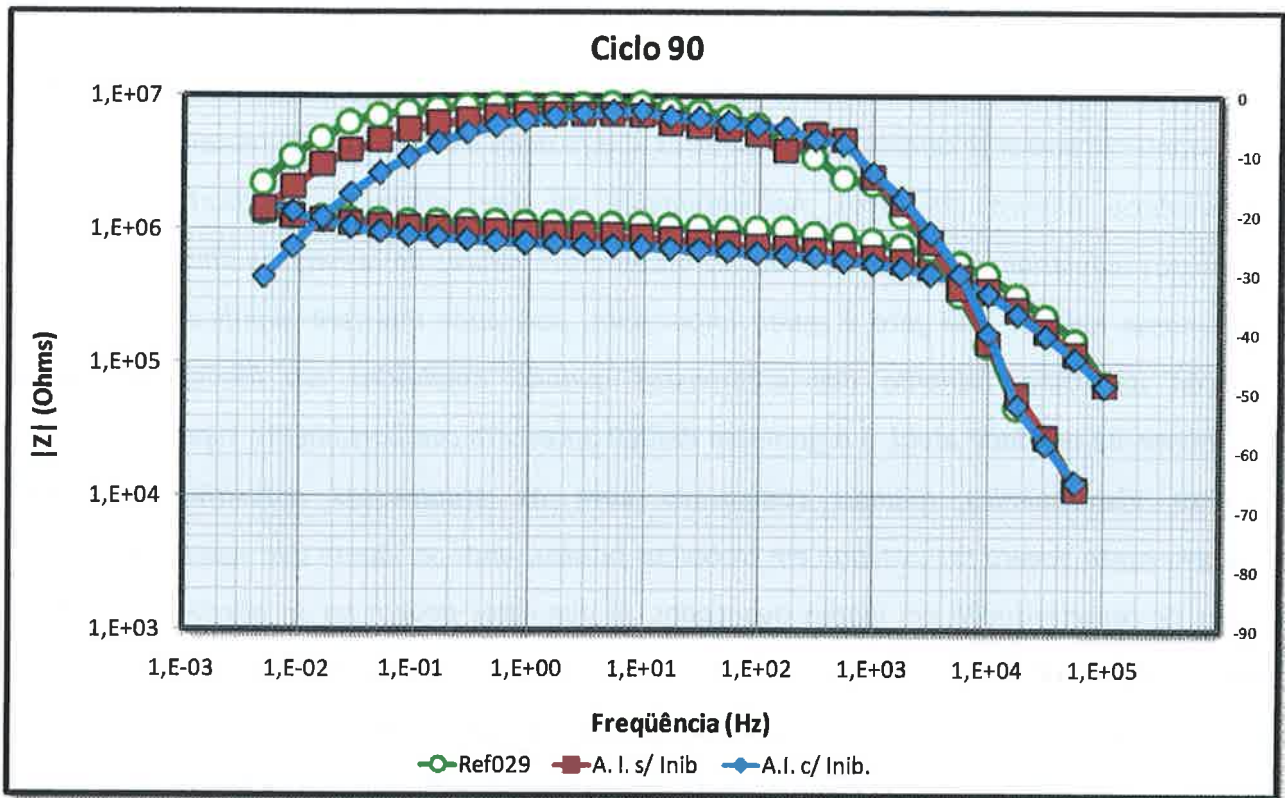


Figura 5-16 – Gráfico de Bode das argamassas estudadas na 1ª fase (leitura do 90º ciclo).

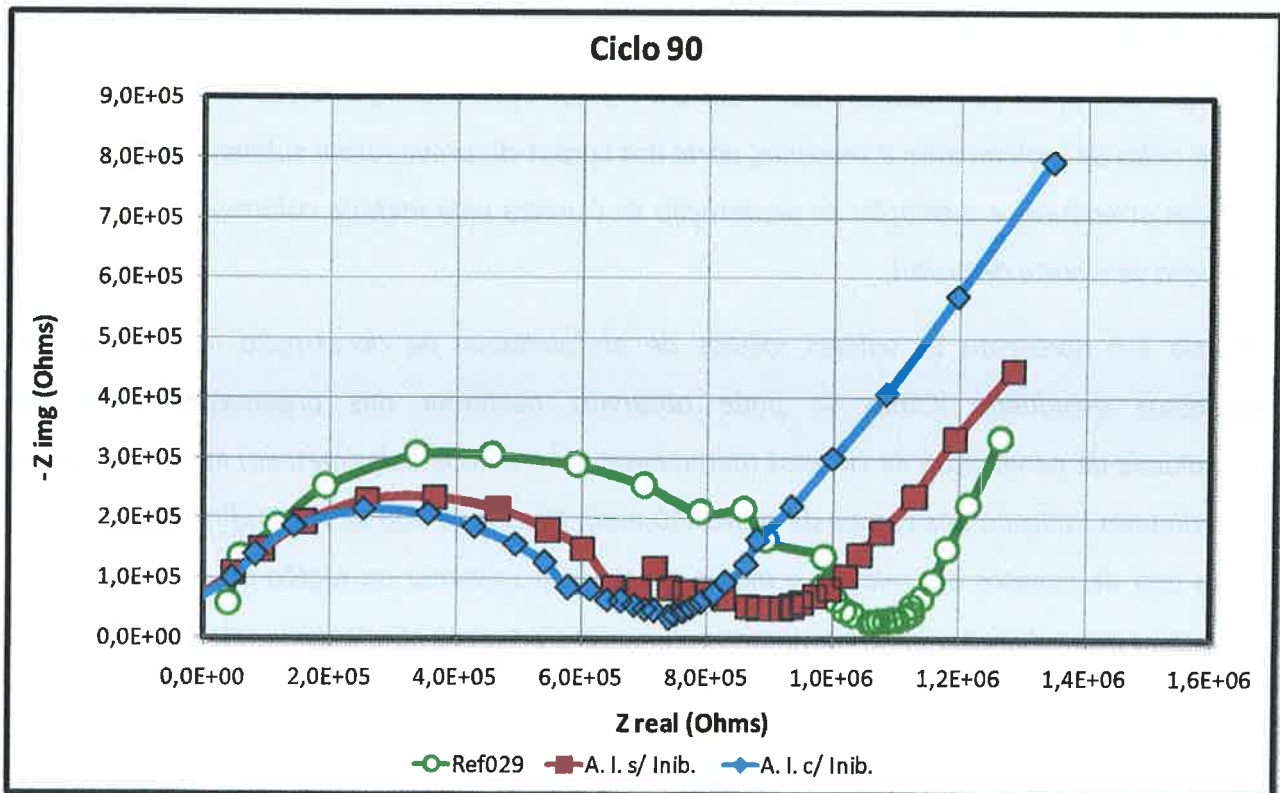


Figura 5-17 – Gráfico de Nyquist das argamassas estudadas na 1ª fase (leitura do 90º ciclo).

A Figura 5-16 e a Figura 5-17 mostram os parâmetros eletroquímicos das argamassas estudadas na 1ª fase no 90º ciclo de molhamento e secagem. Pode-se observar claramente um comportamento bastante semelhante entre estas. Outro dado interessante diz respeito aos valores de resistência ôhmica (1º arco). Aparentemente há uma diferença significativa entre as argamassas industrializadas, que por sua vez apresentam valores de resistência ôhmica inferiores à argamassa Ref029. Esse fato é muito importante, pois pode interferir significativamente na avaliação de comportamento das argamassas quando analisadas em idades avançadas. Aparentemente na idade atual, a argamassa Ref029 apresenta comportamento superior do ponto de vista eletroquímico quando comparada com as argamassas industrializadas. Esse comportamento deverá ser avaliado em trabalhos futuros, onde se sugere que sejam repetidos os ensaios de caracterização em idades avançadas, já que estes podem ter se alterado da mesma forma que observado no ensaio de impedância. Já com relação à cinética da corrosão, inferindo-se sobre os valores da resistência de transferência de carga (projeção do 2º arco) observa-se um comportamento passivo, que vai ao encontro dos resultados de potencial de corrosão destas argamassas.

5.2.1.3 Avaliação visual

De forma a confirmar os resultados que mostram a passivação das argamassas estudadas mesmo após 90 ciclos de molhamento e secagem, parte dos corpos-de-prova foram submetidos à inspeção visual das armaduras e avaliação da penetração de cloretos pelo método colorimétrico (aspersão de solução de cloreto de prata).

A Tabela 5-4 apresenta os valores médios de profundidade de penetração de cloretos nas argamassas estudadas. Como se pode observar, nenhuma das argamassas apresenta profundidade de penetração de cloretos (detectáveis pelo método colorimétrico) igual ou superior ao revestimento utilizado nos corpos-de-prova (10 mm). Apesar de não se ter confirmação do valor real do teor de cloretos em relação à massa de cimento existente na região da armadura, esse dado sugere que estas se encontram passivas, como foi observado nos ensaios eletroquímicos.

Tabela 5-4 – Profundidade média de penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase.

| Argamassa | Média (mm) | Desvio Padrão (mm) | Coefficiente de variação |
|---------------|------------|--------------------|--------------------------|
| Ref029 | 5,5 | 2,0 | 37% |
| A.I. s/ Inib. | 3,7 | 1,4 | 37% |
| A.I. c/ Inib. | 3,8 | 0,9 | 24% |

A Figura 5-18 apresenta os resultados da análise de variância realizada com os dados obtidos do ensaio de penetração de cloretos pelo método colorimétrico. Na Figura 5-19 estão representados os valores médios da profundidade de penetração e o intervalo de confiança de 95% para esses dados.

| Anova: fator único | | | | | | |
|--------------------|----------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| Ref029 | 30 | 16,5 | 0,55 | 0,040517 | | |
| A.I. c/ Inib. | 30 | 11,2 | 0,373333 | 0,019264 | | |
| A. I. s/ Inib. | 30 | 11,4 | 0,38 | 0,008552 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,601556 | 2 | 0,300778 | 13,20488 | 9,81E-06 | 3,101292 |
| Dentro dos grupos | 1,981667 | 87 | 0,022778 | | | |
| Total | 2,583222 | 89 | | | | |

Figura 5-18 – Análise de variância dos valores de penetração de cloretos das argamassas estudadas na 1ª fase.

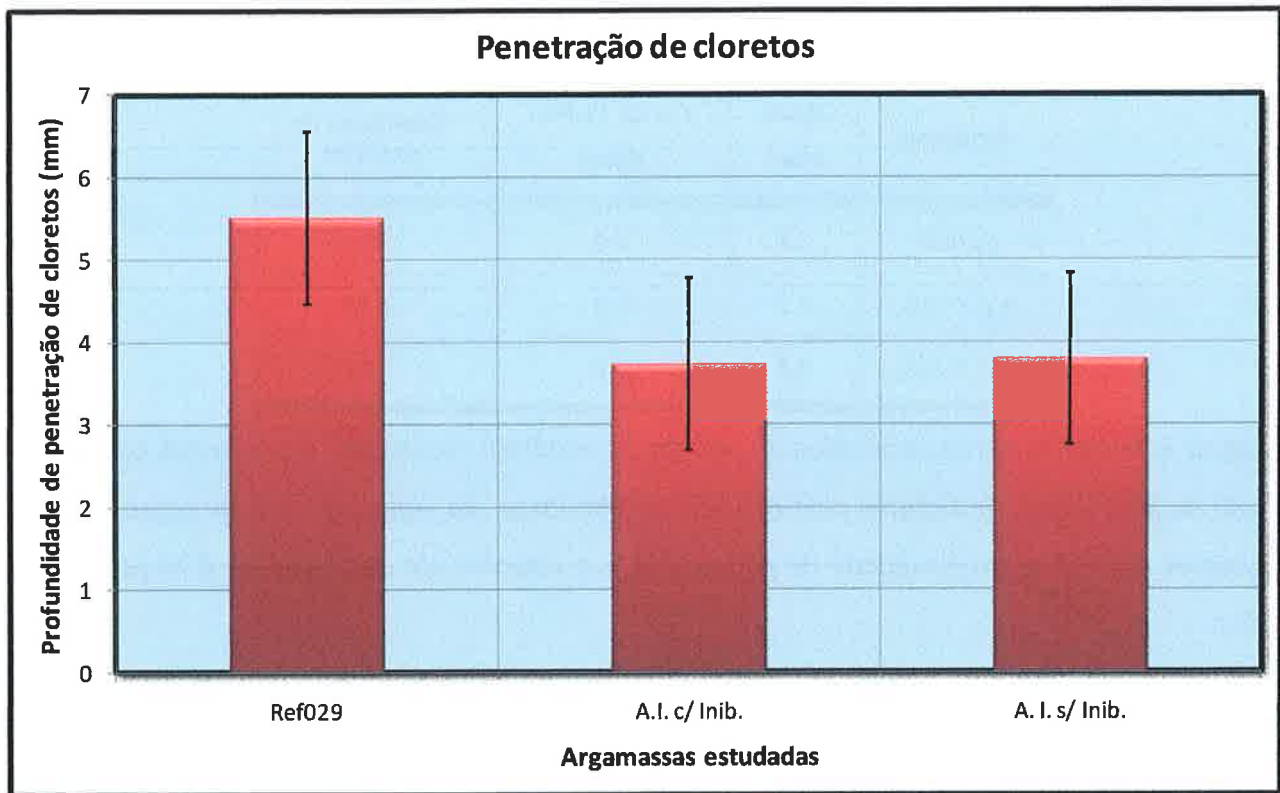


Figura 5-19 – Valores médios da penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase e intervalo de confiança de 95%.

Analisando-se os valores de profundidade de penetração de cloretos obtida pelo método colorimétrico, pode-se observar que não existe diferença significativa entre a profundidade média de penetração nas argamassas industrializadas. Já a argamassa Ref029 apresenta uma profundidade de penetração de cloretos bem superior às demais, como era esperado.

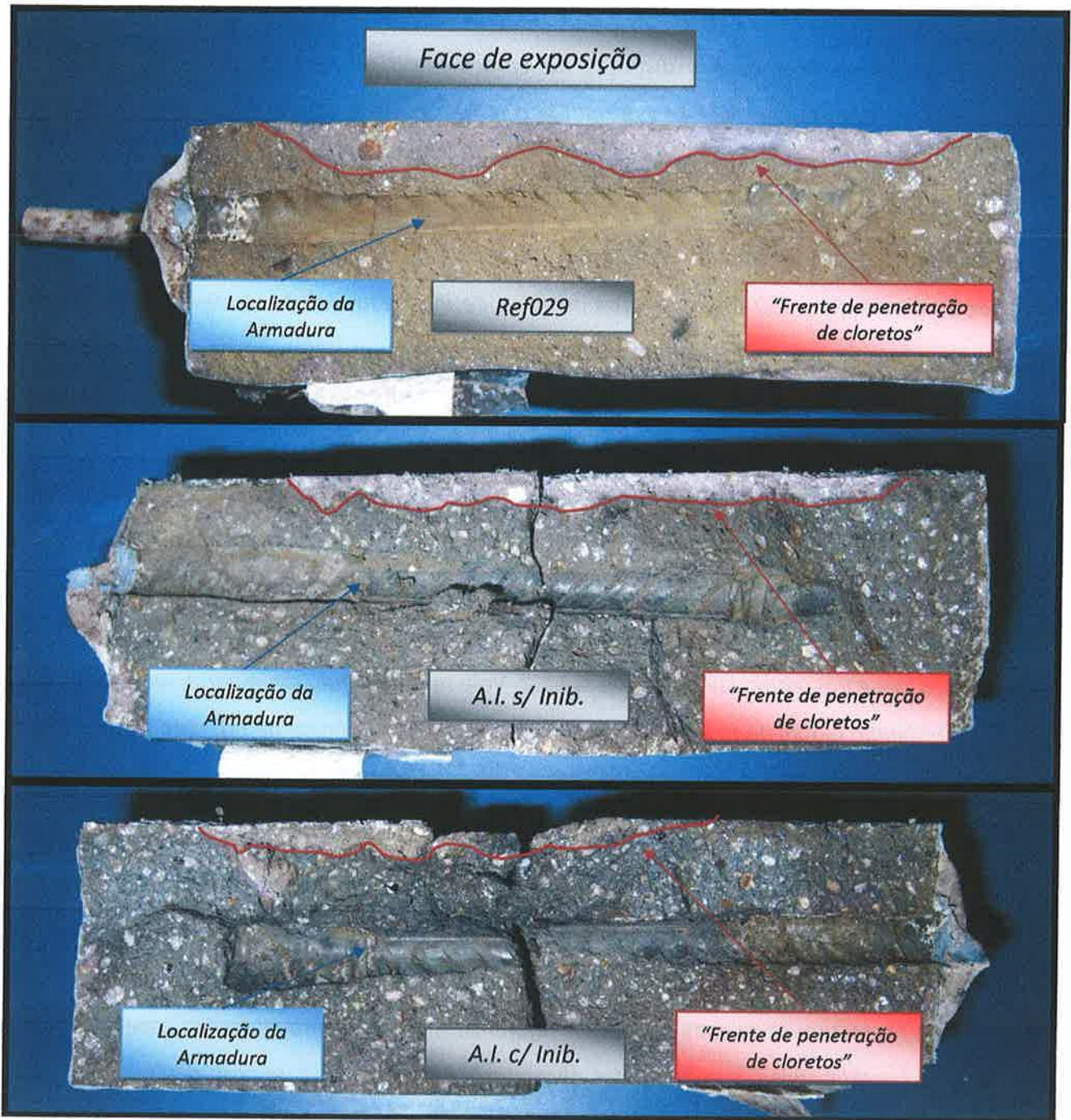


Figura 5-20 – Perfil de penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase, determinado pelo método colorimétrico.

A Figura 5-20 apresenta os perfis típicos de penetração de cloretos nas argamassas estudadas na 1ª fase. Pode-se observar claramente as diferenças na profundidade de penetração de cloretos apontadas anteriormente, bem como a posição da “frente de cloretos” com relação à armadura.

Com relação à inspeção visual das armaduras, nenhum sinal de corrosão foi encontrado, o que indica o estado de passivação destas. As fotografias das barras encontram-se no anexo.

5.2.2 Pré-contaminação com CaCl_2 – 2ª Fase

Nessa etapa têm-se dois grupos distintos de corpos-de-prova: os sãos e os contaminados. Observando-se a Figura 5-21, nota-se claramente a presença destes dois grupos. Na parte inferior do gráfico, os corpos-de-prova contaminados apresentam valores de potencial de corrosão menores que -350 mV (vs ESC) como propõem a norma americana ASTM C 876-91. Já o outro grupo apresenta alguns resultados de potencial de corrosão na faixa prevista como baixo risco de corrosão (maiores que -200 mV) e, outros na faixa de incerteza. Acerca destes valores é muito importante observar que cada sistema de reparo apresenta um potencial de corrosão próprio. Deve-se atentar para esse detalhe, uma vez que, um leigo, sem conhecer o comportamento destes sistemas de reparo, poderia interpretar erroneamente os resultados, apontando a argamassa industrializada sem inibidor como mais susceptível à corrosão do que a argamassa Ref035, o que pode não ser verdade. Acredita-se que as argamassas industrializadas apresentem desempenho superior com relação à corrosão de barras de aço embebidas exclusivamente nestas, como é o caso dos corpos-de-prova analisados. Esse desempenho seria resultado da maior resistividade apresentada por estas, como visto no item 5.2.1.2. Vale ressaltar que, em reparos reais, é possível que o desempenho global do reparo possa ser melhor para a argamassa de referência do que para as industrializadas, devido à combinação de outras propriedades não analisadas.

Outro dado importante observado, que pode levar a erros de interpretação nos resultados, é o fato de alguns sistemas de reparo apresentarem-se na área de incerteza, mesmo quando seu estado de corrosão é supostamente conhecido. Essa informação reforça a ressalva de cautela no uso da norma ASTM C 876-91 para avaliação do estado de corrosão das armaduras. Como a própria norma ressalta, tratam-se apenas de valores referenciais, válidos para situações específicas, não devendo ser considerados como “verdades absolutas”, principalmente no caso deste estudo onde há cloretos e carbonatação simultaneamente (HELENE, 1993).

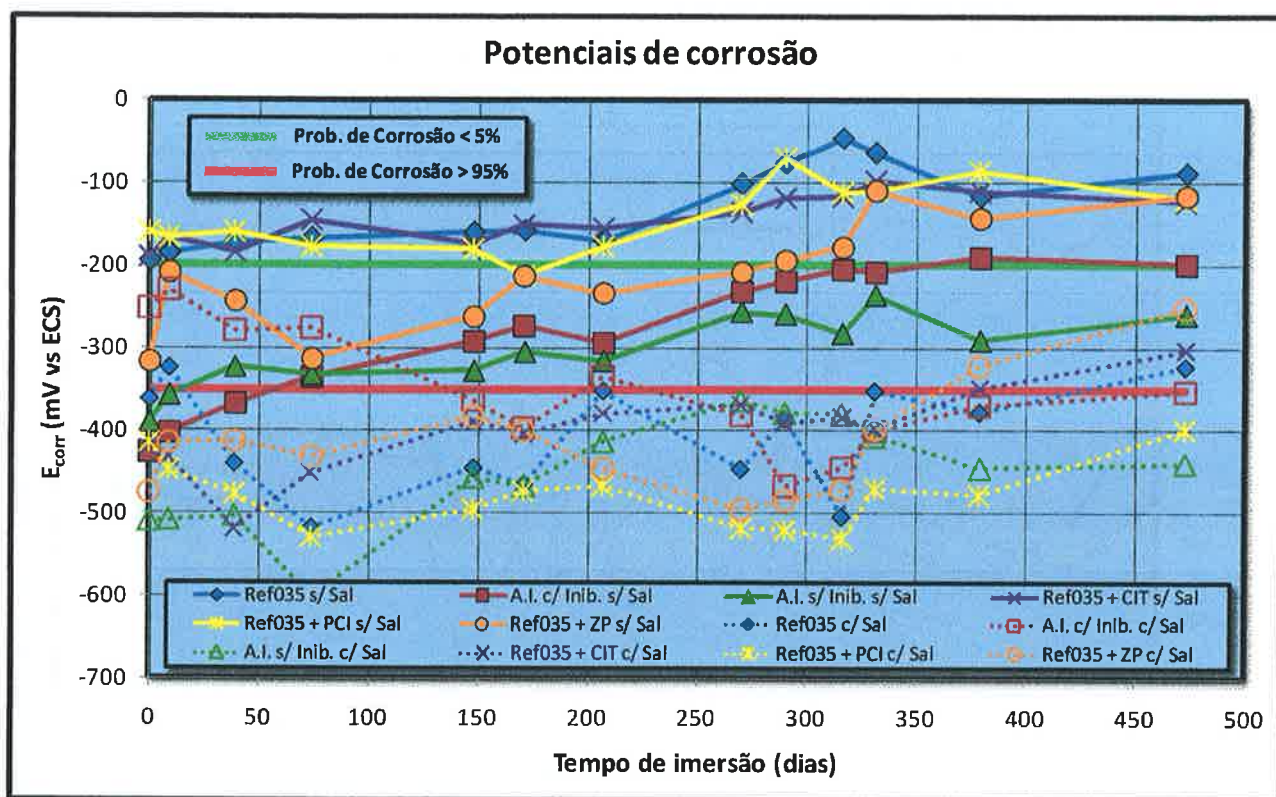


Figura 5-21 – Potenciais de corrosão médios dos sistemas de reparo pré-contaminados. Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91.

Com relação ao comportamento mais eletronegativo das argamassas industrializadas especula-se ser resultado de um menor acesso de oxigênio às barras embebidas nestas, fruto de sua microestrutura mais compacta como nos mostra os ensaios de absorção capilar e migração de íons cloreto índice de vazios (itens 5.1.2e 5.1.3).

Outro dado interessante é observado na Figura 5-22. Nesta figura estão apresentadas as diferenças entre os potenciais de corrosão médios de cada sistema na situação sem sal e na situação com o sal contaminante. Mesmo após 450 dias, a argamassa industrializada sem inibidor apresenta uma diferença entre as situações com e sem o sal contaminante pequena (da ordem de 100 mV), sendo menor inclusive, que a faixa de incerteza apresentada pela ASTM C 876-91 (150 mV), o que pode levar a erros na interpretação dos resultados. Essa diferença, no entanto, pode ser extremamente interessante no caso de reparos reais, onde pode criar uma situação de baixo risco de formação imprópria e indesejada de macro-célula (diferença de potencial entre a área reparada e a área não reparada).

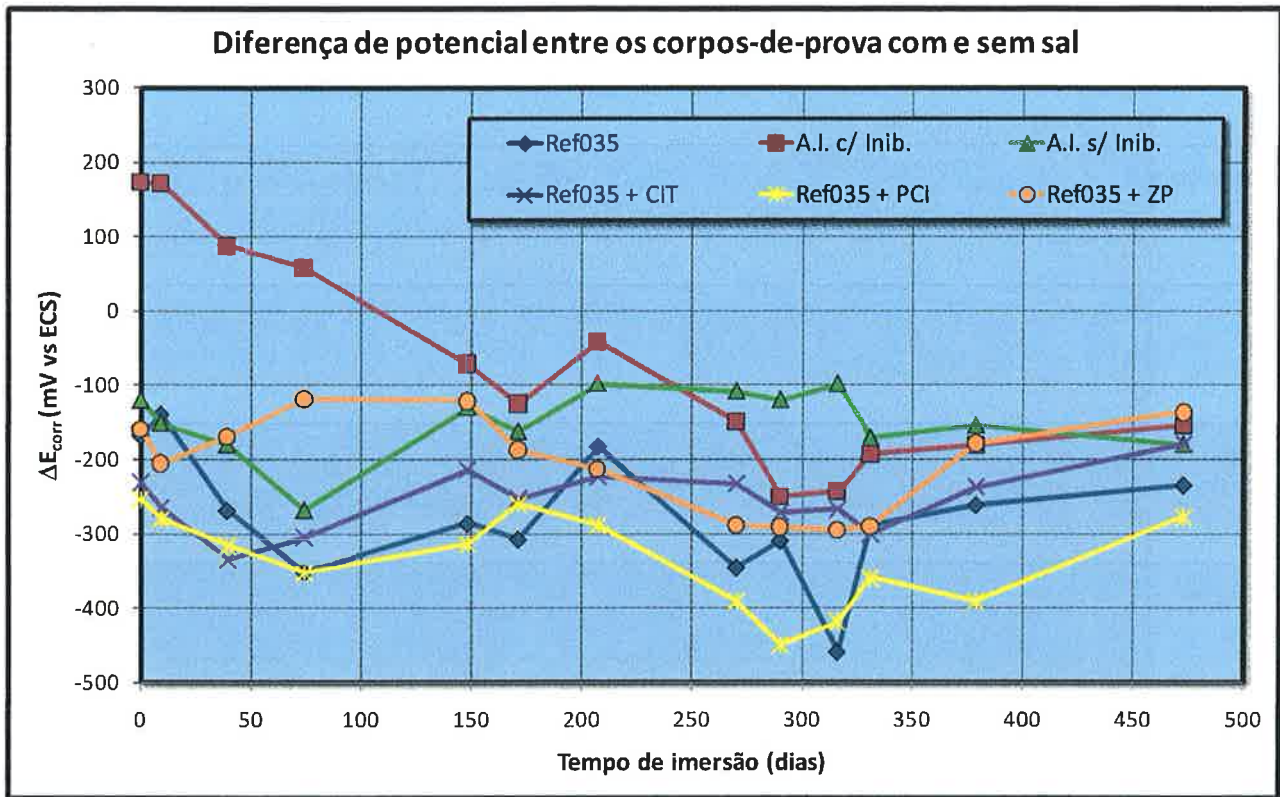


Figura 5-22 – Diferença entre as médias dos potenciais de corrosão dos sistemas de reparo com a adição de sal e sem a adição de sal.

NEPOMUCENO (1992); FIGUEIREDO (1994) estudando diferentes tipos de argamassas/sistemas de reparo verificaram que os diagramas de $E_{corr} \times I_{corr}$ variavam para cada material/sistema. Isso quer dizer que cada material/sistema tem a sua “própria” tabela de classificação quanto à corrosão, o que rejeita ainda mais a idéia de uma tabela única como a proposta na ASTM C 876:1991. Em alguns casos, devido a variabilidades de ordens diversas, nem mesmo essa correlação $E_{corr} \times I_{corr}$ era significativa. Assim, a leitura isolada do potencial de corrosão não é um bom parâmetro para avaliar o comportamento de diferentes sistemas de reparo (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994). Dessa forma entende-se que a avaliação do comportamento eletroquímico de um material deve incluir informações adicionais à leitura de potencial de corrosão, quer seja, conhecimento sobre o estado de contaminação dos materiais (situação deste experimento), conhecimento acerca de outros parâmetros eletroquímicos quando da leitura do potencial (intensidade de corrosão, por ex.), etc. No caso de somente se observar o potencial de corrosão, fazê-lo ao longo do tempo, onde a sua variação pode indicar mudanças no comportamento eletroquímico do material estudado.

5.2.3 Em solução

Observando-se a Figura 5-23 fica clara a diferença de potencial de corrosão existente entre o sistema de referência passivo (solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sem adição de NaCl) e os demais sistemas contaminados nas primeiras idades. Entre os sistemas contaminados, a diferença de potencial é pequena (aproximadamente 50 mV) e não apresenta relação direta com a intensidade de corrosão (menor potencial de corrosão, não resulta maior intensidade de corrosão) apresentada na Figura 5-24. Outro dado interessante diz respeito ao valor de potencial de corrosão da barra imersa somente em água destilada saturada em $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este sistema apresenta potencial de corrosão na faixa de incerteza da norma ASTM C 876-91, apesar desta apresentar valores de intensidade de corrosão muito baixos, típicos de metais passivos. Esse dado reforça as restrições da norma, como mostrado anteriormente.

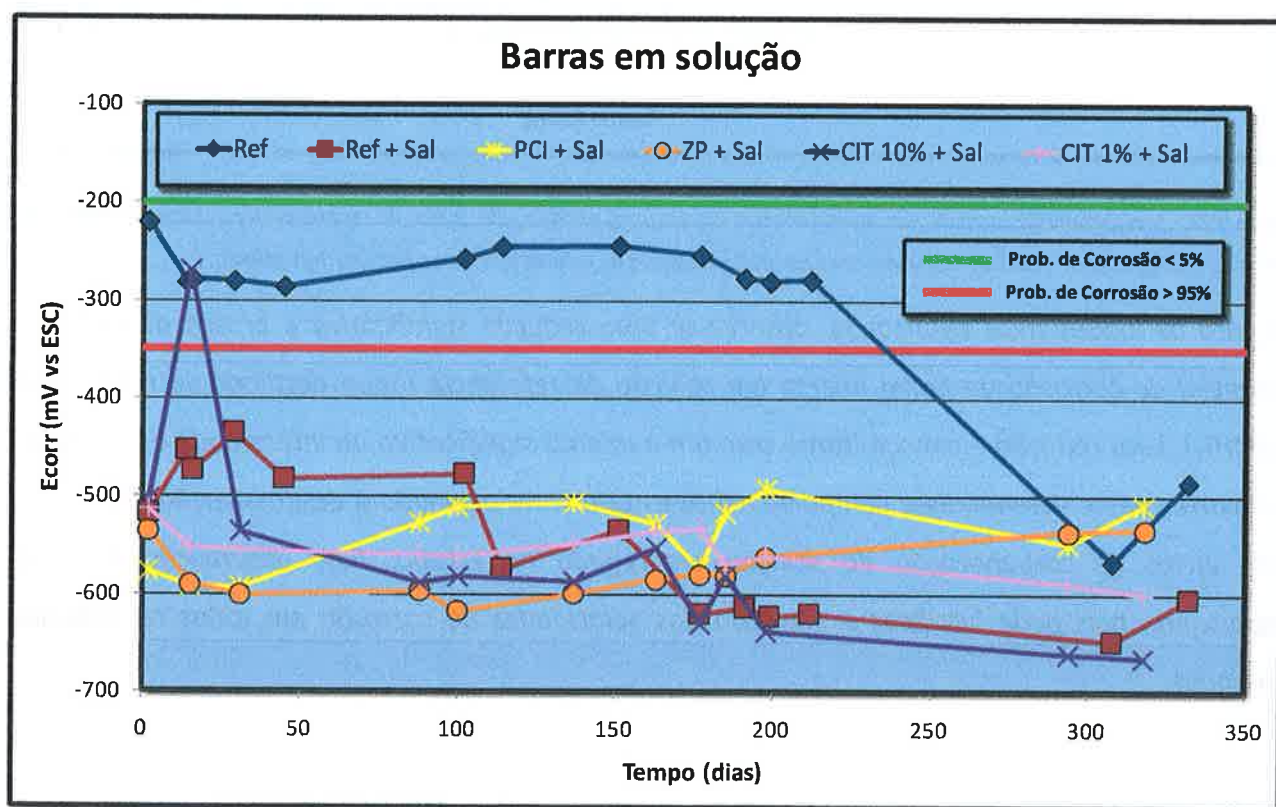


Figura 5-23 – Potencial de corrosão das barras imersas em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ c/ 2,5g/L de NaCl . Os limites representados no gráfico correspondem aos propostos na norma ASTM C 876-91.

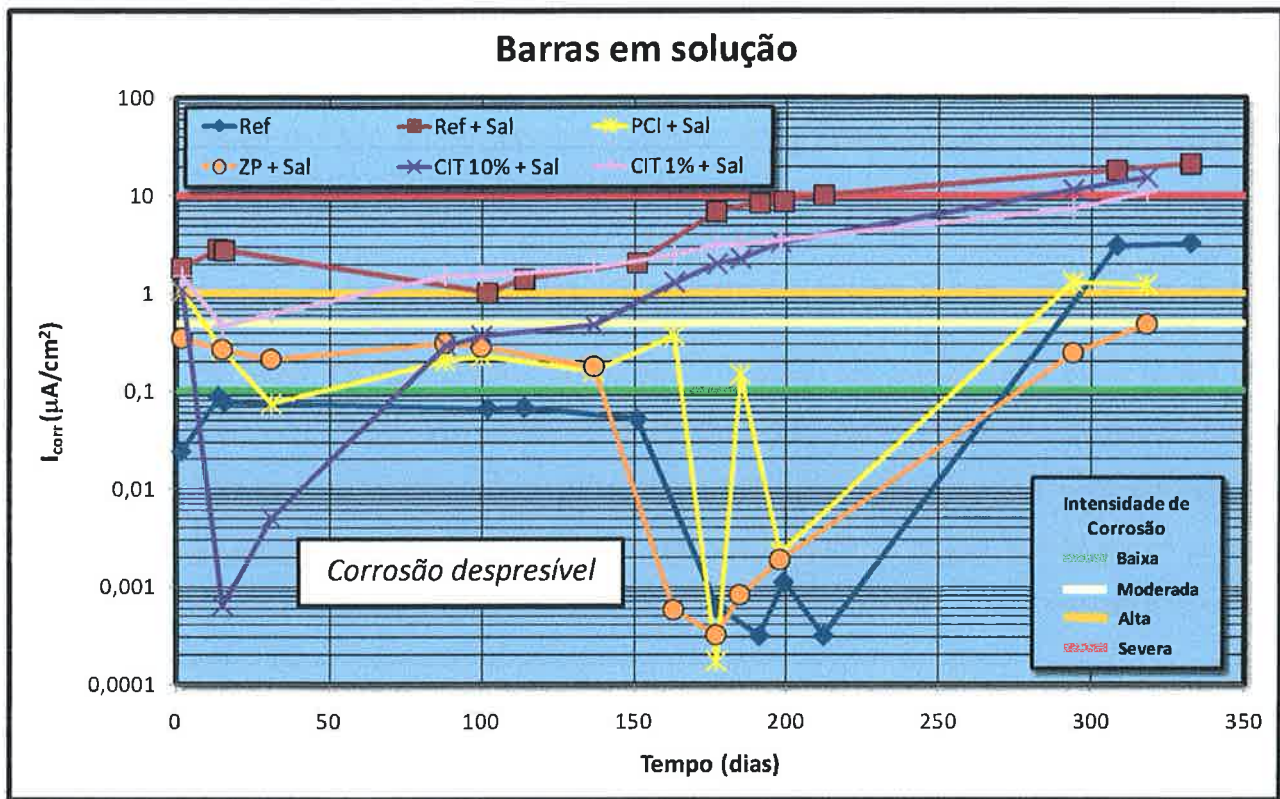


Figura 5-24 – Intensidade de corrosão das barras imersas em solução, obtidas pelo ensaio de resistência de polarização linear. As faixas de intensidade de corrosão representados no gráfico seguem os valores propostos por Andrade (1988).

Já para as idades mais avançadas, observa-se uma redução significativa e brusca do valor do potencial de corrosão da barra imersa em solução de referência (água destilada saturada com $Ca(OH)_2$). Essa redução é concomitante com um aumento significativo na intensidade de corrosão das barras neste sistema. Esse comportamento estaria correlacionado à despassivação das barras pelo efeito de carbonatação da solução empregada no estudo. Essa observação é muito importante, pois pode justificar a elevação das velocidades de corrosão em todos os sistemas avaliados.

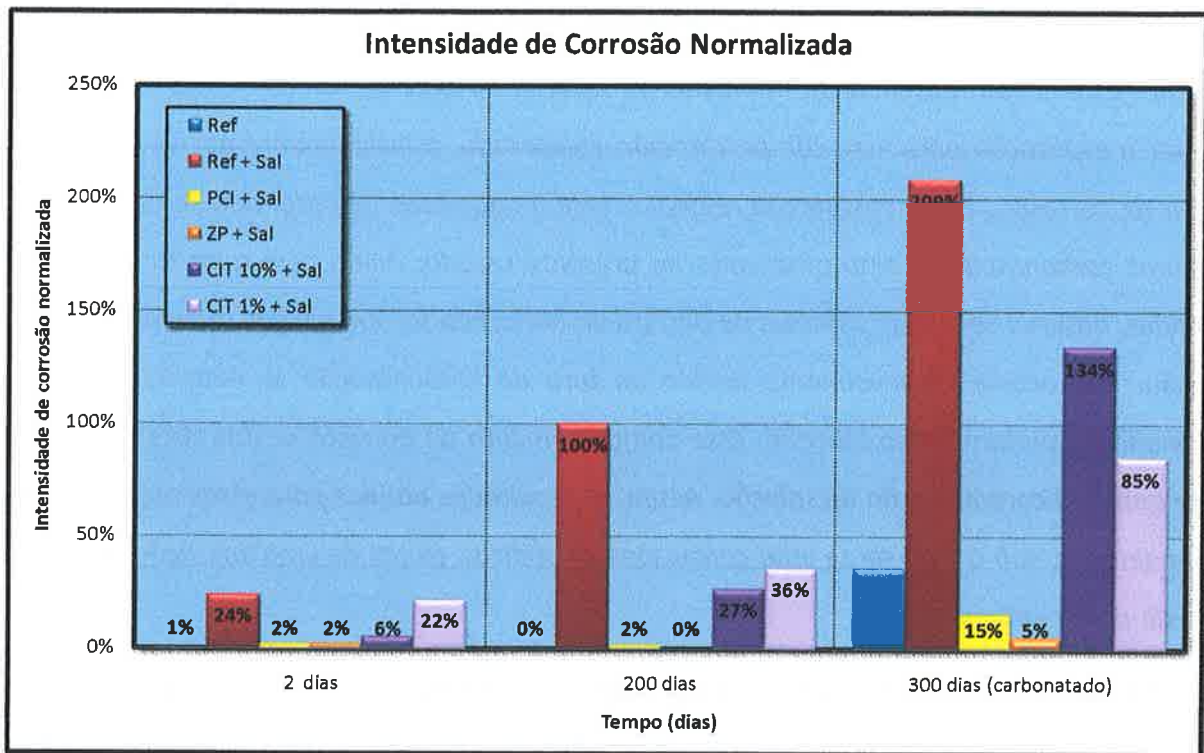


Figura 5-25 – Intensidade de corrosão normalizada com relação ao valor de corrosão da referência + sal aos 200 dias de exposição.

A Figura 5-25 apresenta os valores da intensidade de corrosão de todos os sistemas avaliados normalizadas com relação ao valor de corrosão da referência +sal aos 200 dias. O gráfico mostra que aos dois dias alguns dos sistemas ainda não atingiram o seu potencial de proteção. Já aos 200 dias pode-se observar que os sistemas de pintura da barra apresentam valores de taxa de corrosão muito próximos da referência, estando praticamente passivos. Os inibidores de corrosão por aspersão por sua vez apresentam bom desempenho, com valores de intensidade de corrosão em torno de um terço da referência + sal. Ao final dos 300 dias, com a possível carbonatação das soluções empregadas, observa-se aumento na velocidade de corrosão de todos os sistemas. A referência + sal tem sua velocidade de corrosão dobrada. Já os inibidores apresentam grande evolução na taxa de corrosão, chegando a ter seu valor quadruplicado no caso do sistema com maior teor de inibidor. Essa é uma informação bastante relevante, pois pode sugerir que o uso deste material em situações com problemas de carbonatação poderiam, além de não surtir o efeito desejado, acelerar a corrosão. Pesquisa realizada por um fabricante de inibidores de corrosão, em barras de aço imersas em solução de água destilada com 5% de NaCl, mostrou que o acréscimo do inibidor de corrosão por migração utilizado no presente estudo, aumentou a velocidade de

corrosão na barra de aço com relação à referência sem inibidor (CORTEC Laboratories, s.d.). Vale ressaltar neste caso a ausência de hidroxilas na solução na qual as barras de aço estão imersas pode ser a explicação para esse comportamento inesperado, principalmente por se tratar de um inibidor de corrosão. Essa constatação reforça a tese de que esse material não seria adequado a estruturas carbonatadas, como observado no presente estudo. Ainda com relação aos sistemas estudados, observa-se que os sistemas de pintura da barra não sofrem grande aumento na taxa de corrosão. Isso ocorre provavelmente devido ao fato da carbonatação se restringir à solução, funcionando a pintura como barreira. Esse comportamento de barreira destes sistemas também ocorre antes da carbonatação da solução. Assim, os resultados obtidos para esses sistemas têm de ser ponderados, sob o risco de se criar conclusões inverídicas, frutos de uma limitação do método/corpo-de-prova utilizado.

A Figura 5-26 e a Figura 5-27 apresentam os resultados do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica para as barras em solução, após uma semana de imersão. As curvas obtidas no ensaio apresentam as mesmas tendências observadas no ensaio de resistência de polarização linear (Figura 5-24). Outro dado interessante é a presença de um segundo arco no gráfico de Nyquist nos sistemas de reparo CIT10% e CIT1%. Isso é bastante plausível quando se observa o fato de que estes sistemas possuem inibidores de corrosão em sua composição. No caso, o inibidor de corrosão empregado funciona através do efeito barreira, adsorvendo-se na superfície do metal e impedindo as reações catódicas e anódicas. Essa camada adsorvida funciona como um capacitor adicional ao sistema, introduzindo esse novo arco.

Ainda analisando os resultados do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, observamos uma diferença na resistência ôhmica do meio de ensaio no sistema de reparo PCI. Esse fato era esperado, uma vez que se trata de um sistema de reparo (pintura) aplicado diretamente sobre a superfície do metal. Esse sistema é constituído basicamente de uma pasta de cimento modificada com polímeros, o que confere essa maior resistividade ôhmica a este sistema.

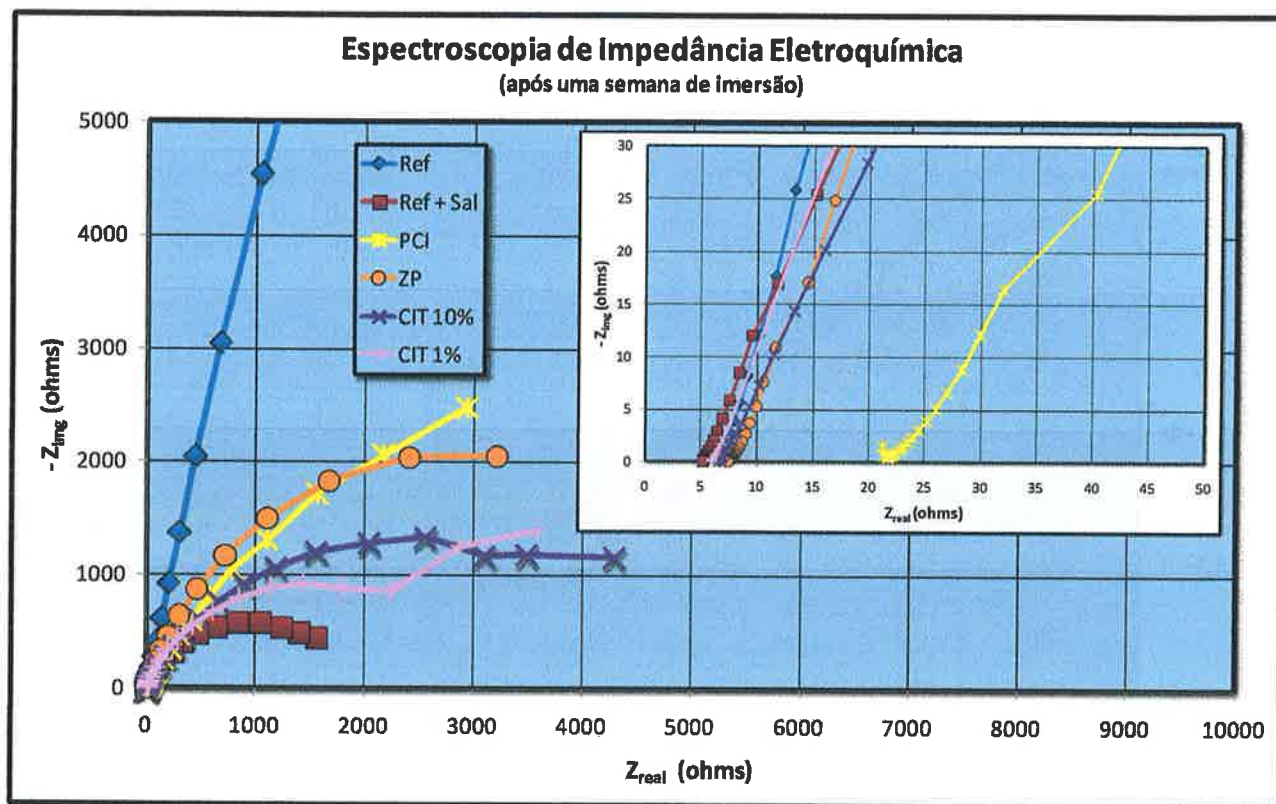


Figura 5-26 – Gráfico de Nyquist das barras imersas em solução.

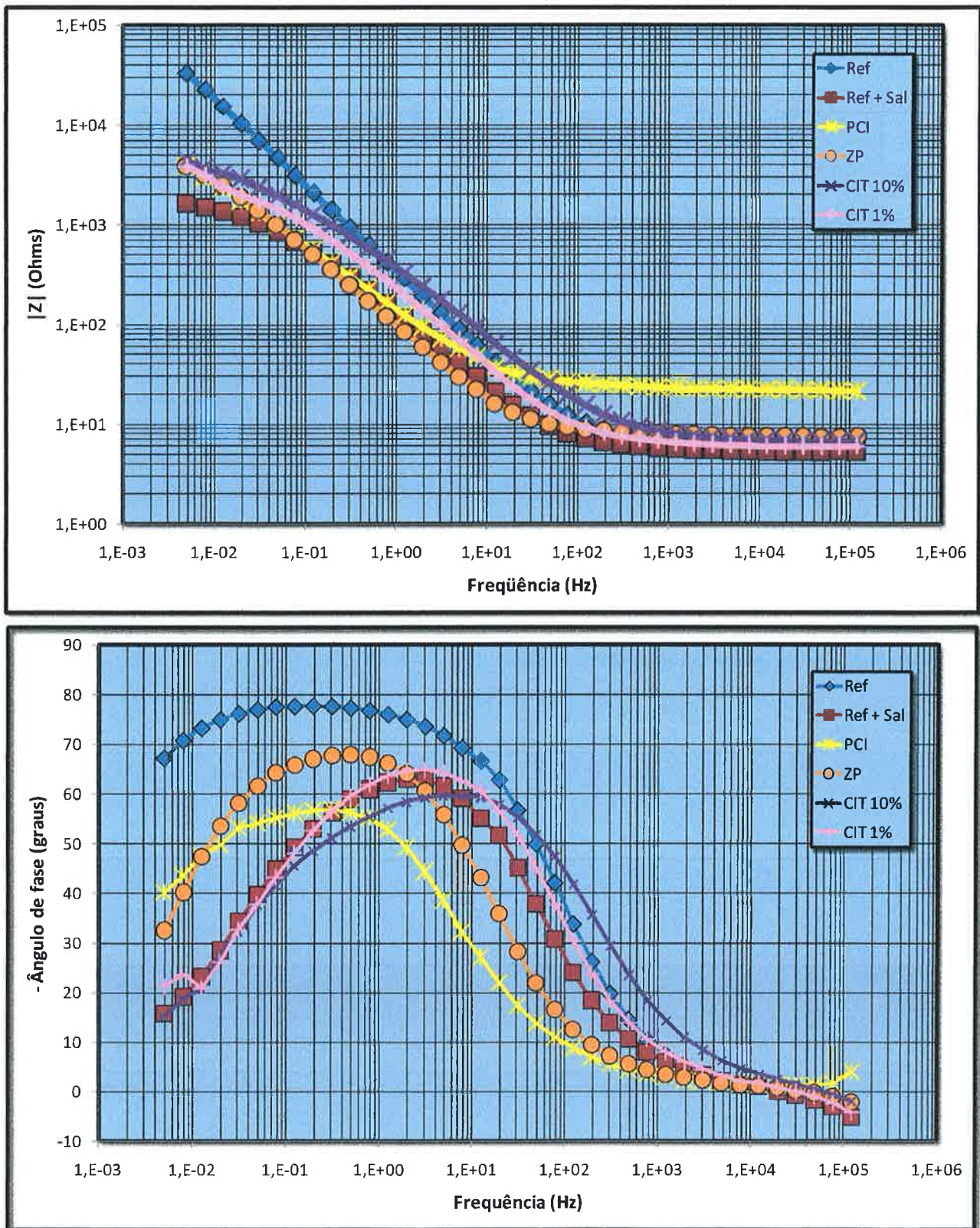


Figura 5-27 – Gráfico de Bode das barras imersas em solução.

5.3 Ensaios realizados em campo

A Figura 5-28 apresenta os dados climáticos da região onde se encontra o protótipo estrutural, obtidos através de uma estação meteorológica existente na cobertura do Edifício da Engenharia Civil da EPUSP, distante cerca de 50 metros do local onde está situado o protótipo estrutural.

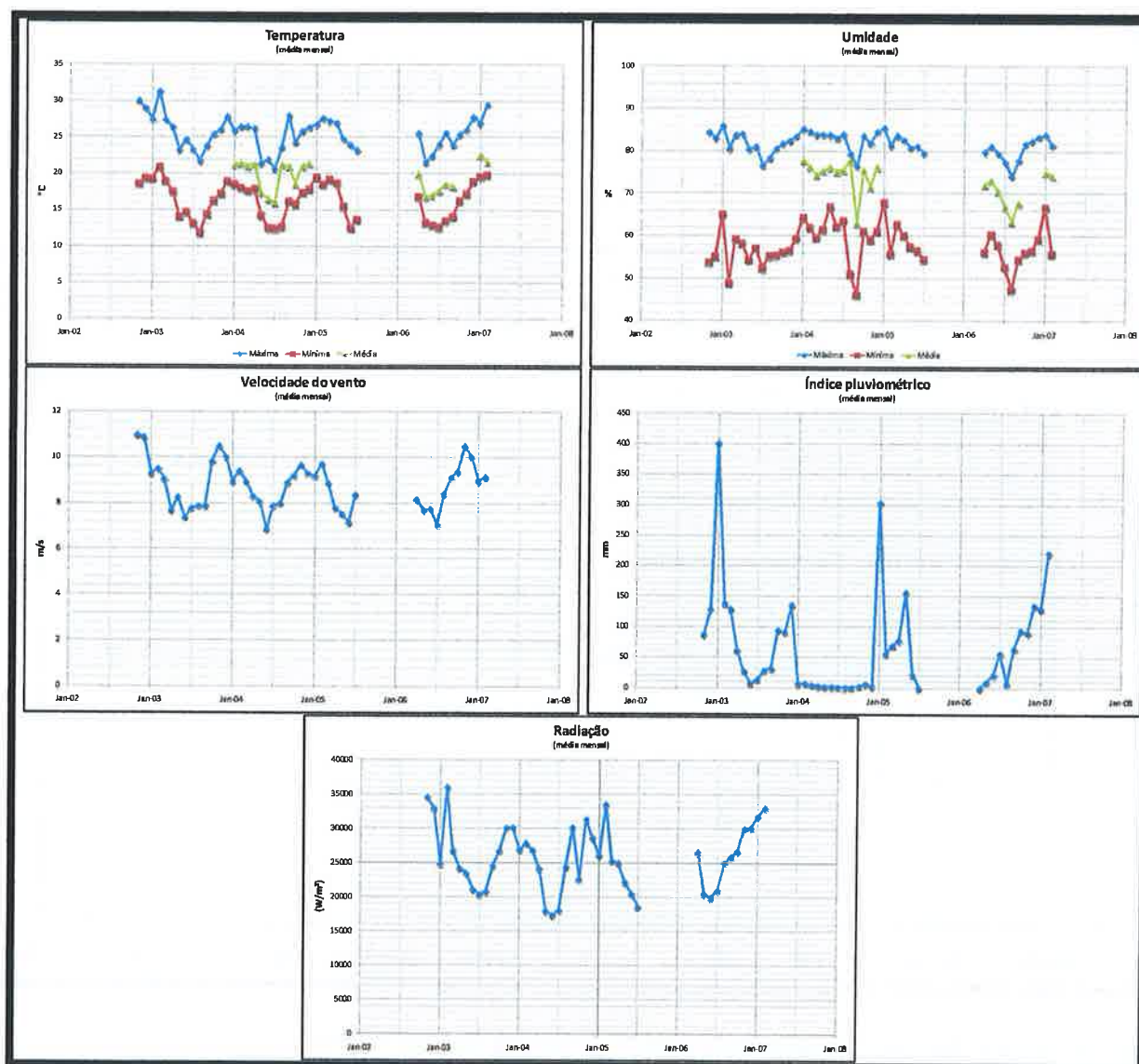


Figura 5-28 – Dados climáticos da região onde se encontra o protótipo estrutural.

Analisando-se os gráficos acima, pode-se observar uma variação média de 15°C entre a temperatura máxima e a mínima recorrente na região. Além disso, outro fato importante é a sazonalidade dos parâmetros climáticos, onde a maior severidade do ponto de vista da corrosão ocorre no período do verão (de dezembro a março), com os picos de temperatura, umidade, índice

pluviométrico e radiação solar. O oposto ocorre no inverno (de junho a setembro), onde há longos períodos de seca e fica desfavorecido o processo eletroquímico.

Para a análise dos resultados foi feita uma avaliação conjunta de todos os dados medidos para cada sistema e tipo de ponto de leitura, sem se considerar os diferentes micro-climas. Esse tipo de análise se justifica pois os resultados de análises preliminares da região de controle, considerando-se separadamente a face norte e a face sul (presumidamente micro-climas de características bastante distintas) não apresentou diferenças significativas, como se pode observar na Figura 5-29 e na Figura 5-30.

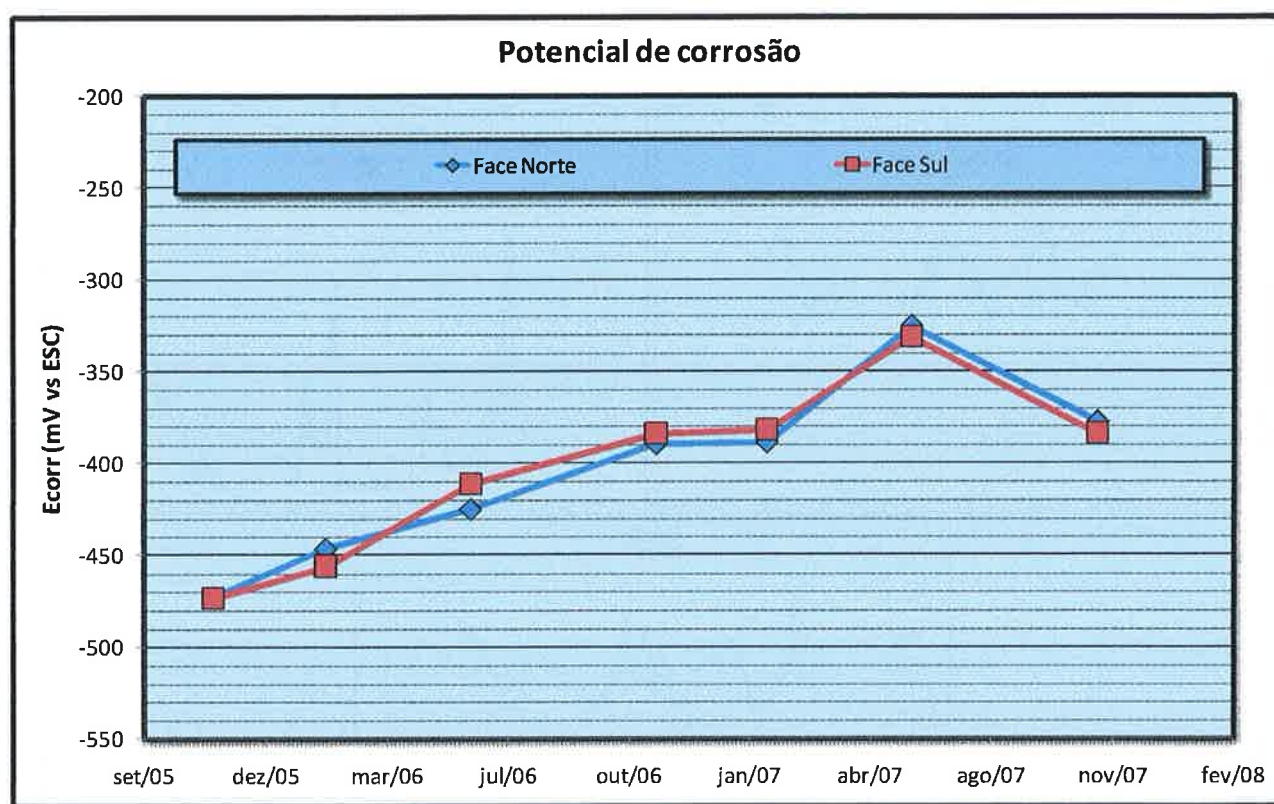


Figura 5-29 – Evolução do potencial de corrosão da região de controle segundo a sua orientação.

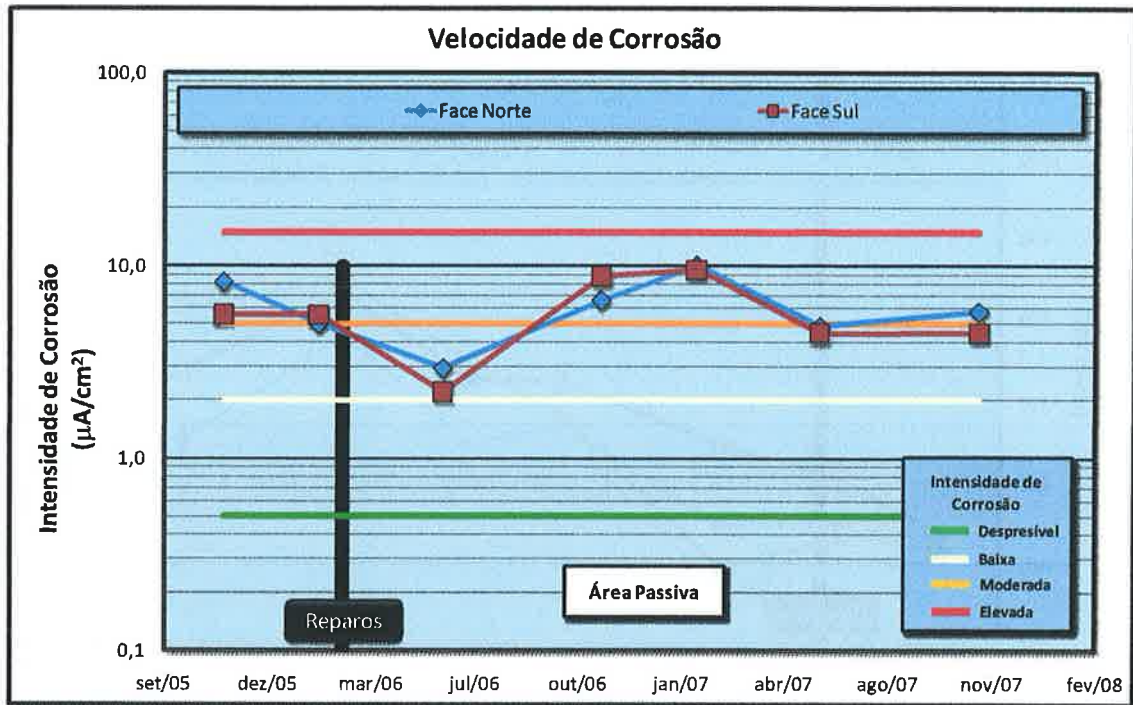


Figura 5-30 – Evolução da intensidade de corrosão da região de controle segundo sua orientação. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

5.3.1 Argamassa de referência (Ref035)

Observando-se a Figura 5-31 nota-se uma tendência clara de elevação dos valores de potencial de corrosão para o primeiro ano do estudo. Esse fenômeno ocorre com todos os sistemas de reparo, como mostram os itens subseqüentes, e inclusive para a região de controle (área não reparada). Já no segundo ano de monitoramento, existe uma tendência de estabilização do potencial de corrosão, que passa a oscilar em torno de determinado valor, segundo efeito da sazonalidade (variação do macro-clima).

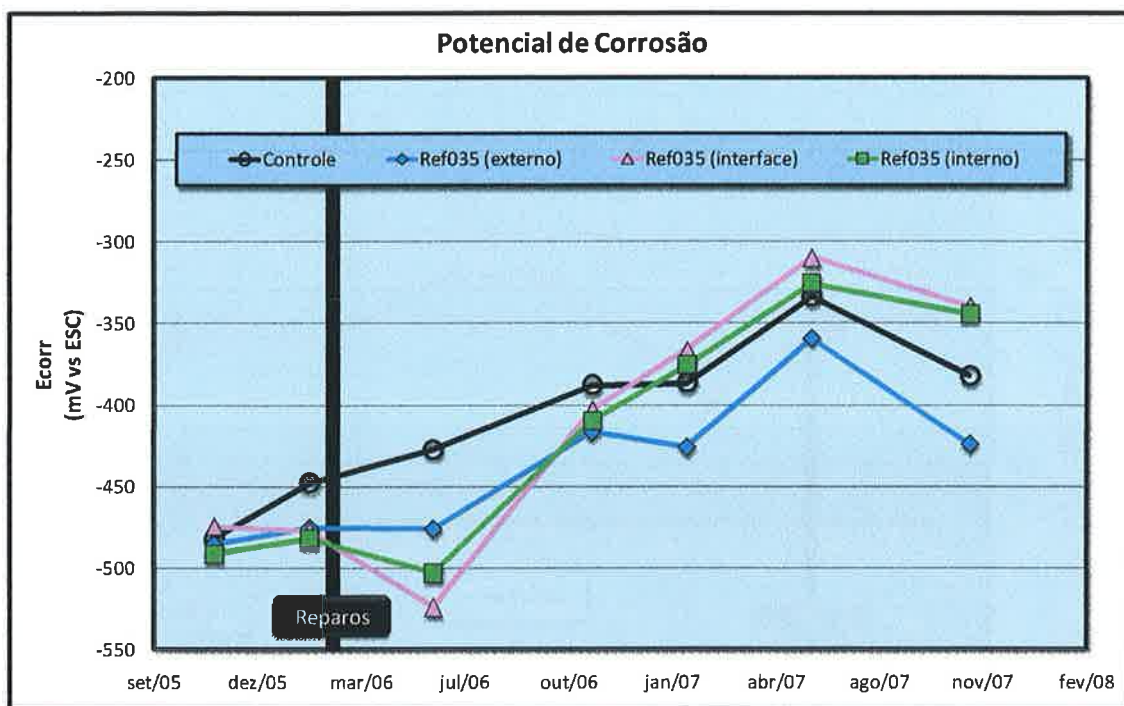


Figura 5-31 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035.

Limitando-se os valores de potencial de corrosão aos referentes aos meses de novembro, fica mais clara essa tendência de estabilização do potencial de corrosão para a região de controle no último ano do experimento, como mostra a Figura 5-32.

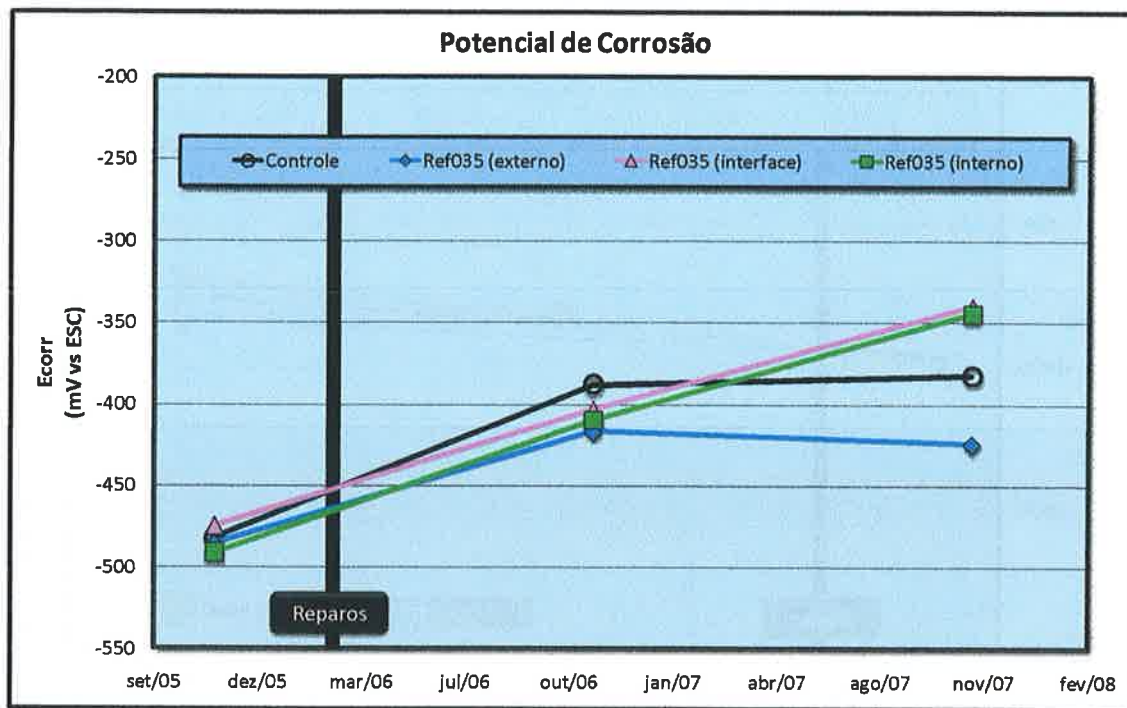


Figura 5-32 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035.

Com relação aos valores de potencial de corrosão para a área reparada com o sistema Ref035, observa-se que a área externa apresenta uma tendência semelhante à área de controle, porém com uma leve tendência a redução dos valores no último ano. Já a região da interface do reparo, bem como a área interna a este, apresentam melhorias significativas com relação à área de controle. Essas tendências ficam bem claras quando se observa a Figura 5-33.

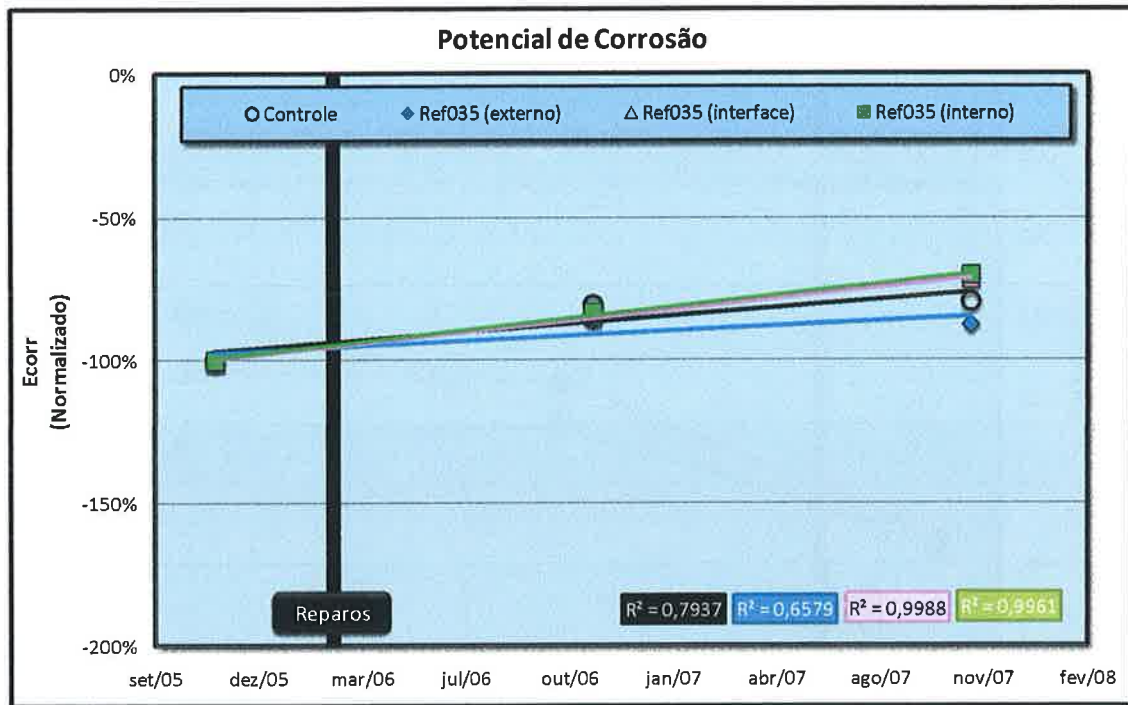


Figura 5-33 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035.

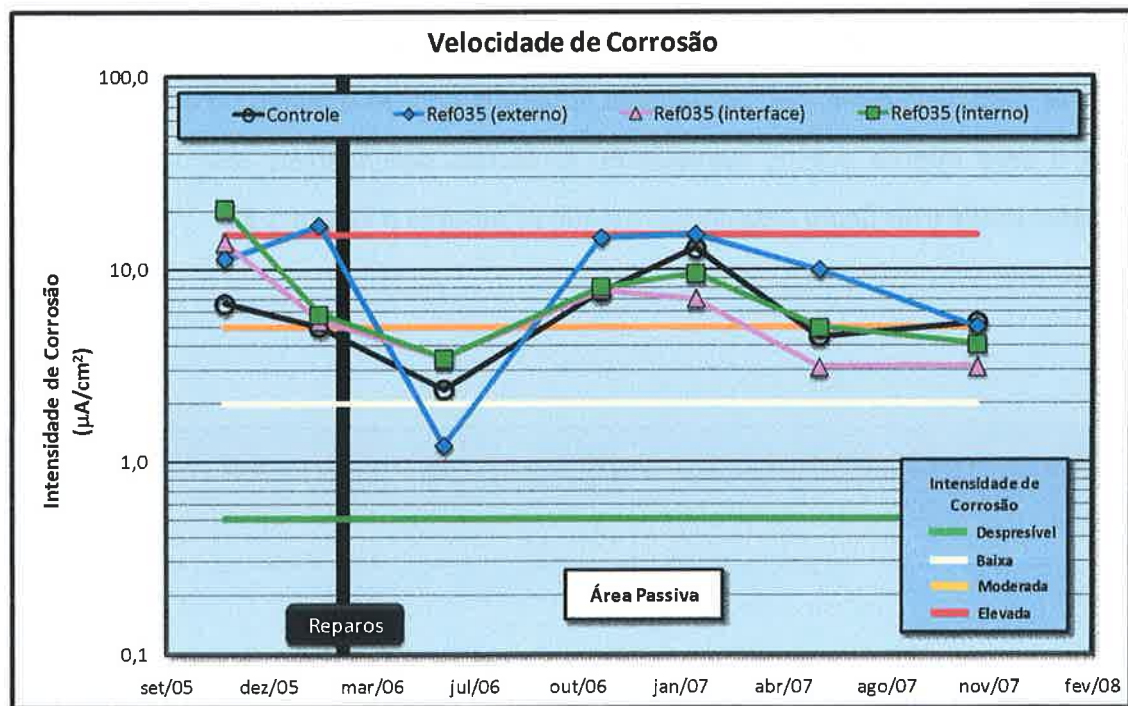


Figura 5-34 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

A Figura 5-34 apresenta a evolução da intensidade de corrosão para a região reparada com o sistema Ref035. Pode-se observar neste caso, assim como nos potenciais de corrosão, o efeito da sazonalidade na intensidade de corrosão. Além disso, a intensidade de corrosão da região de controle apresenta ligeira tendência de redução, correspondente ao aumento do potencial de corrosão verificado anteriormente. Isso fica bem claro quando observamos a Figura 5-35 e a Figura 5-36.

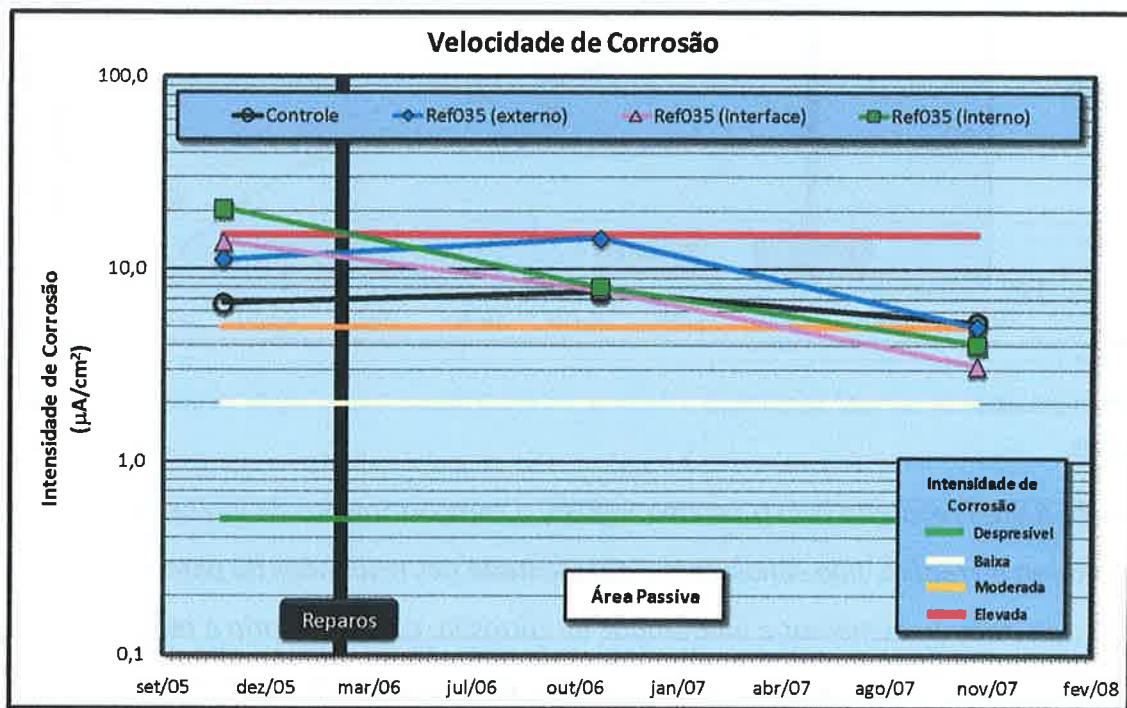


Figura 5-35 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

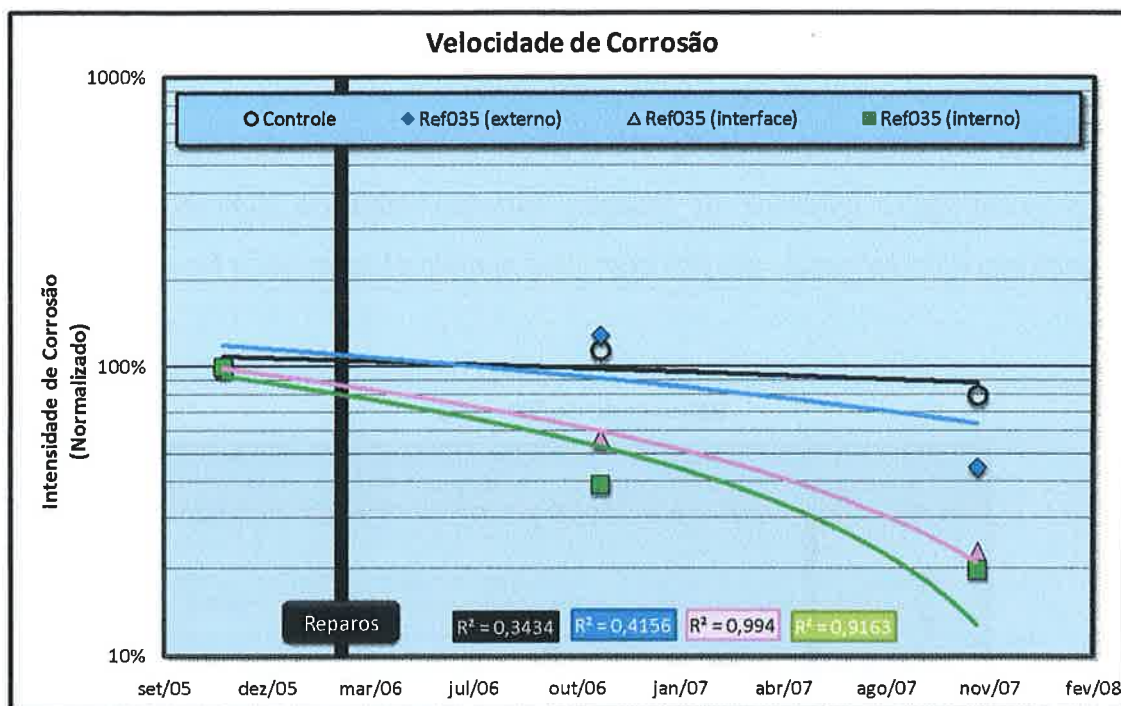


Figura 5-36 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035.

Com relação à área reparada com o sistema Ref035, o comportamento da intensidade de corrosão da área externa ao reparo, não condiz com o apresentado nos resultados do potencial de corrosão. Neste caso, ao invés de aumentar a intensidade de corrosão, como sugeriria a redução nos valores de potencial de corrosão, o que ocorre é o inverso. No entanto vale lembrar que essa variação pode ser fruto da dispersão do ensaio que é bastante elevada. Observando-se na Figura 5-36 a região interna ao reparo e a região de interface deste com o substrato antigo, nota-se uma grande tendência de melhora destas. De fato, no início do experimento, estas regiões apresentavam taxas elevadas/moderadas de corrosão, e depois de 2 anos essas taxas já são consideradas baixas, fruto de uma redução de quase 80% no seu valor. Essas informações levam a crer que esse sistema, apesar de ainda apresentar taxas de corrosão baixas, possui grande potencial de êxito.

5.3.2 Argamassa industrializada sem inibidor (A.I. s/ Inib.)

A Figura 5-37 mostra a evolução do potencial de corrosão para a região do protótipo estrutural recuperada com o sistema de argamassa industrializada sem inibidor (A.I. s/ Inib.). Nota-se na figura a mesma tendência de elevação dos potenciais observada na região de controle, além do efeito da sazonalidade, que é mais proeminente na segunda metade do estudo. Outro fato

interessante é a grande elevação nos valores de potencial de corrosão para a região interna ao reparo com relação às demais, o que fica bem claro na Figura 5-38 e na Figura 5-39.

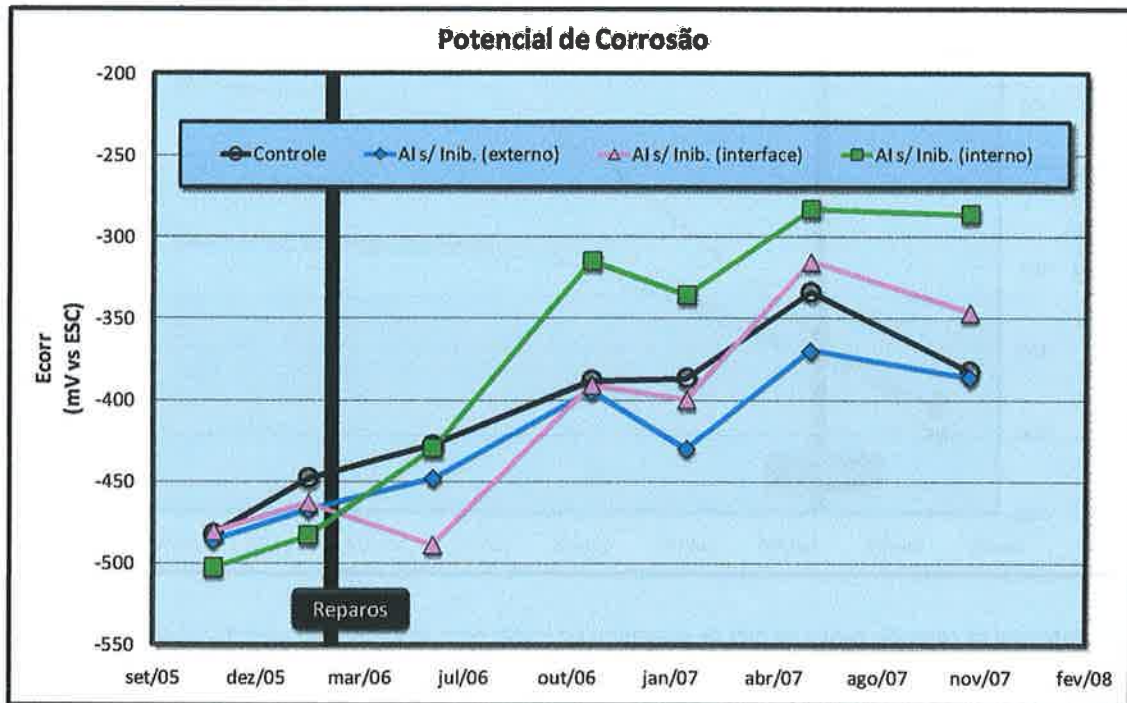


Figura 5-37 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. s/ Inib.

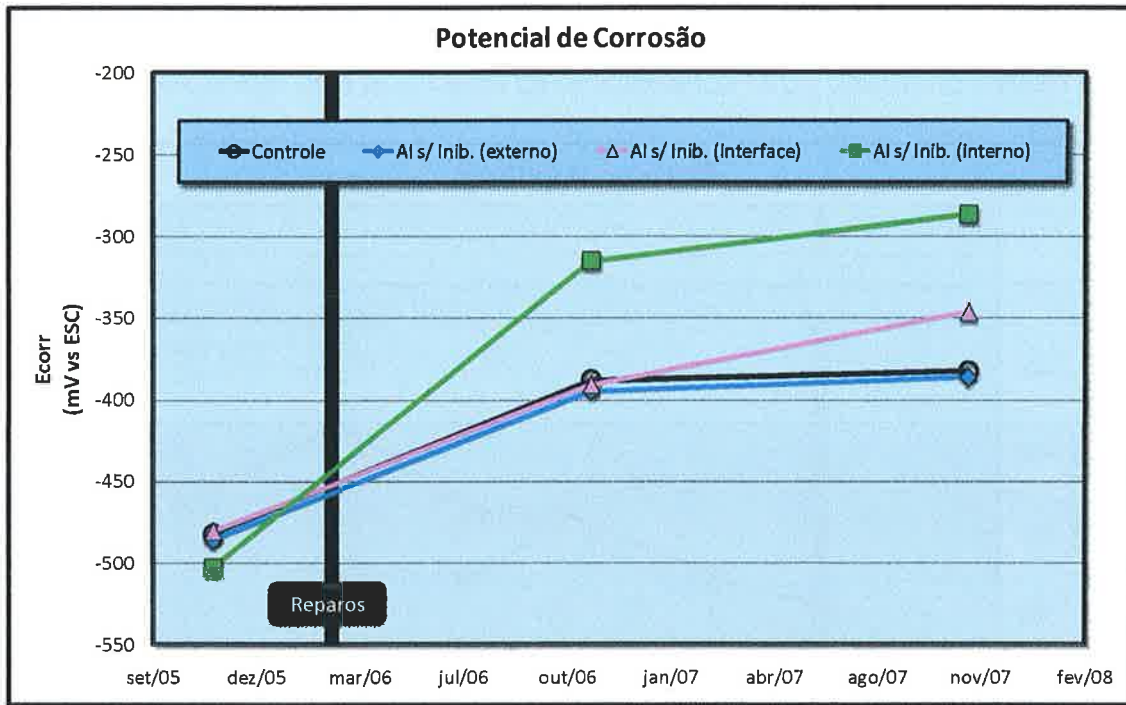


Figura 5-38 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema A.I. s/ Inib.

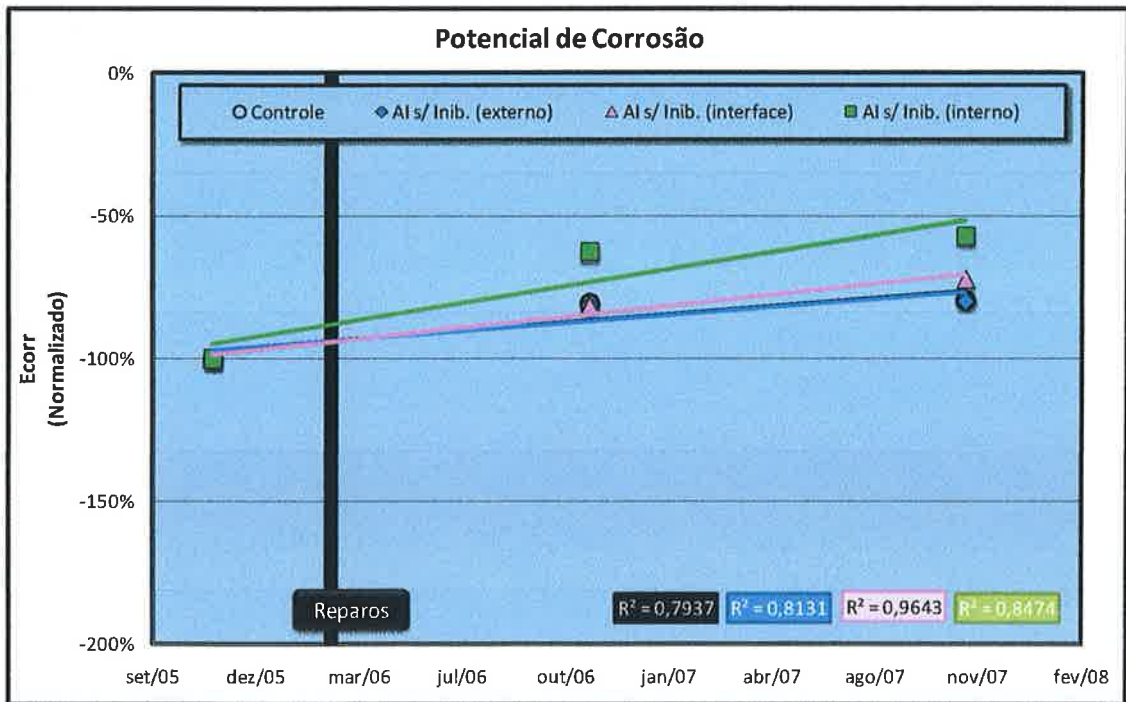


Figura 5-39 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. s/ Inib.

Observando-se somente os resultados de evolução do potencial de corrosão, aparentemente pode-se concluir que o sistema A.I. /a Inib. apresenta resultados muito promissores, pois os potenciais de

corrosão da área reparada apresentam grande melhoria, ao passo que as demais áreas analisadas apresentam comportamento semelhante, ou até ligeiramente superior à região de controle.

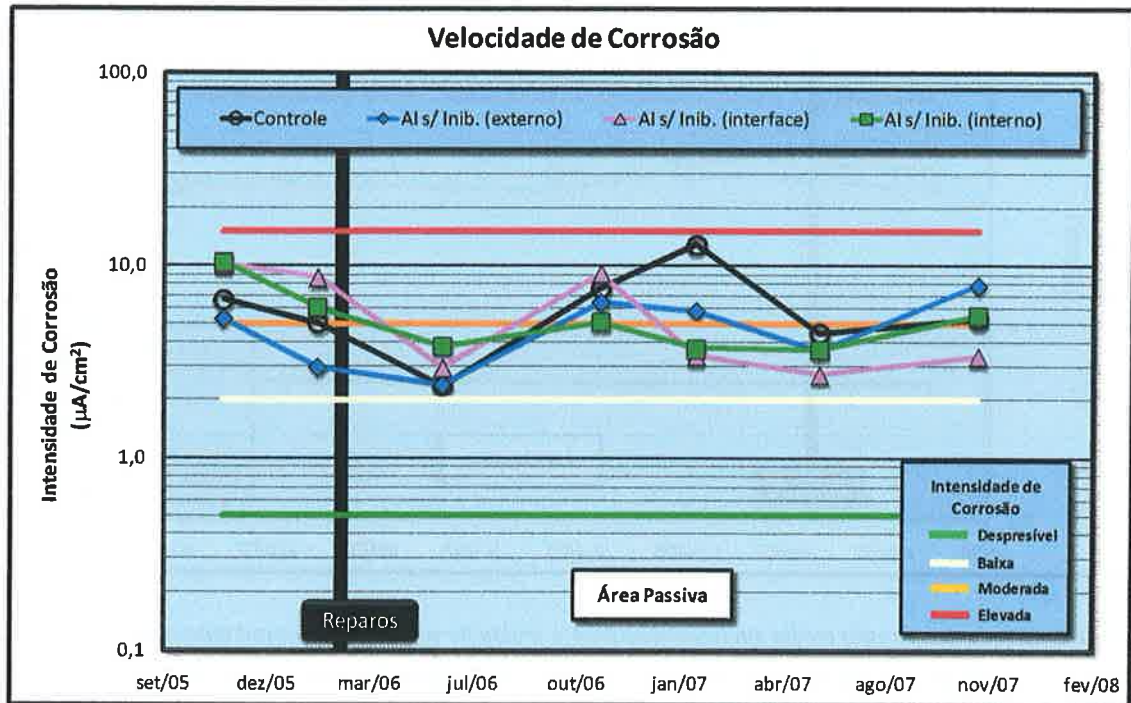


Figura 5-40 – Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema A.I. s/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

A Figura 5-40 mostra a evolução da intensidade de corrosão na região reparada com o sistema de reparo A.I. s/ Inib. Pode-se observar claramente o efeito da sazonalidade nos valores medidos. Observando-se os valores anuais, apresentados na Figura 5-41, vê-se que a intensidade de corrosão na área interna ao reparo e na interface deste com o substrato antigo apresentam redução ao longo do tempo, passando de um estado de corrosão moderado para moderado/baixo, chegando até a uma situação clara de baixa intensidade no caso da interface. Essas tendências de redução estão bem claras como mostra a Figura 5-42.

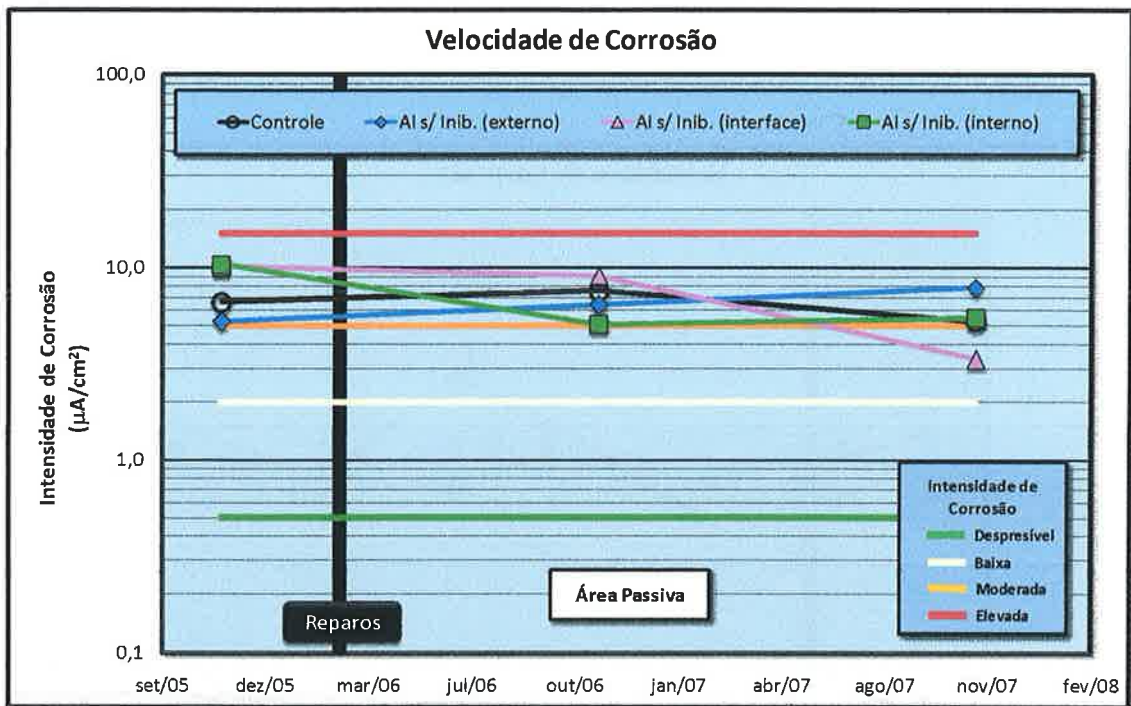


Figura 5-41 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. s/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

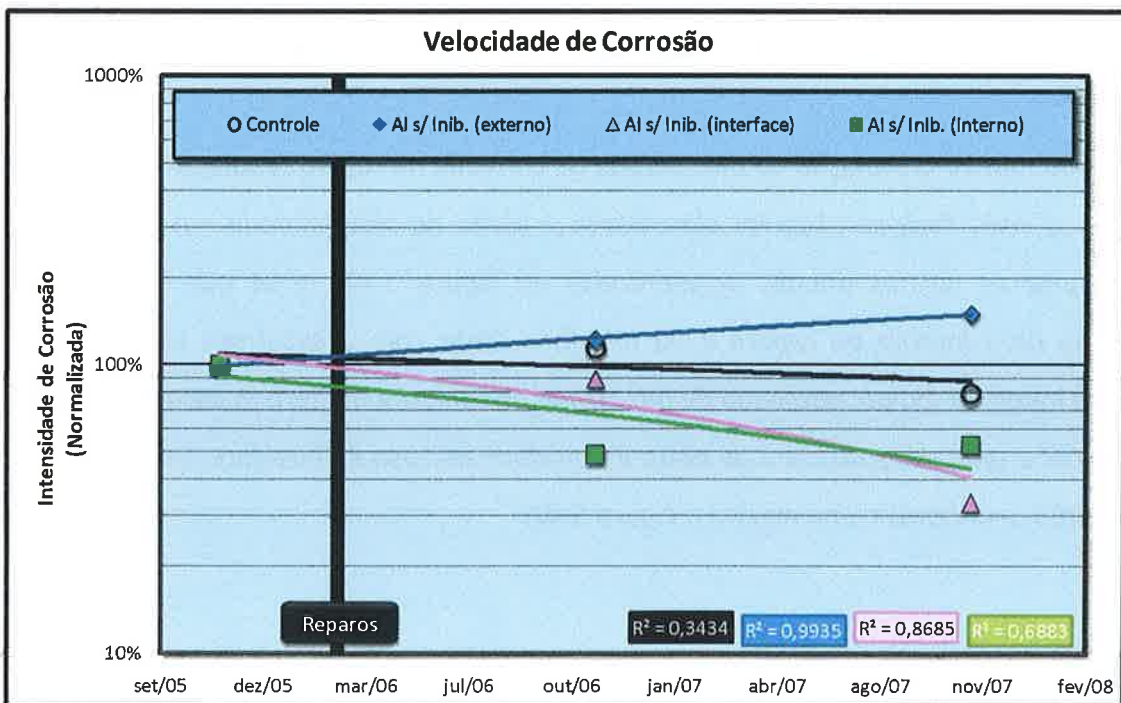


Figura 5-42 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. s/ Inib.

Com relação à área externa ao reparo, esta apresenta uma tendência clara de elevação. Essa tendência, no entanto, é contrária à observada nos valores do potencial de corrosão, onde havia uma estabilidade na região externa ao reparo. É muito importante observar que a análise única dos valores de potencial neste caso pode levar a erros na avaliação do comportamento eletroquímico destes e da sua efetividade. Avaliando-se somente baseado na informação obtida do ensaio de potencial de corrosão, o sistema em questão apresenta desempenho bastante satisfatório, com grande melhoria na área reparada e sem comprometimento na área externa e interface. Já utilizando-se dos dados referentes à intensidade de corrosão, a avaliação do referido sistema é oposta. Neste caso, o comportamento não é o desejado, uma vez que apesar da tendência de redução do processo corrosivo na região reparada e na sua interface com o substrato antigo, o aumento do processo corrosivo na região externa ao reparo compromete o desempenho deste, podendo até condená-lo neste caso (em outras situações de aplicação, o sistema pode ser viável).

5.3.3 Argamassa industrializada com inibidor (A.I. c/ Inib.)

A Figura 5-43 apresenta a evolução do potencial de corrosão da região reparada com o sistema de argamassa industrializada com inibidor (A.I. c/ Inib.). Como se pode observar, o aumento nos valores dos potenciais de corrosão na primeira metade do estudo e a estabilização na metade restante se repete da mesma forma que nos outros sistemas de reparo estudados. Do mesmo jeito, o efeito da sazonalidade está também bem definido, principalmente na metade final do estudo.

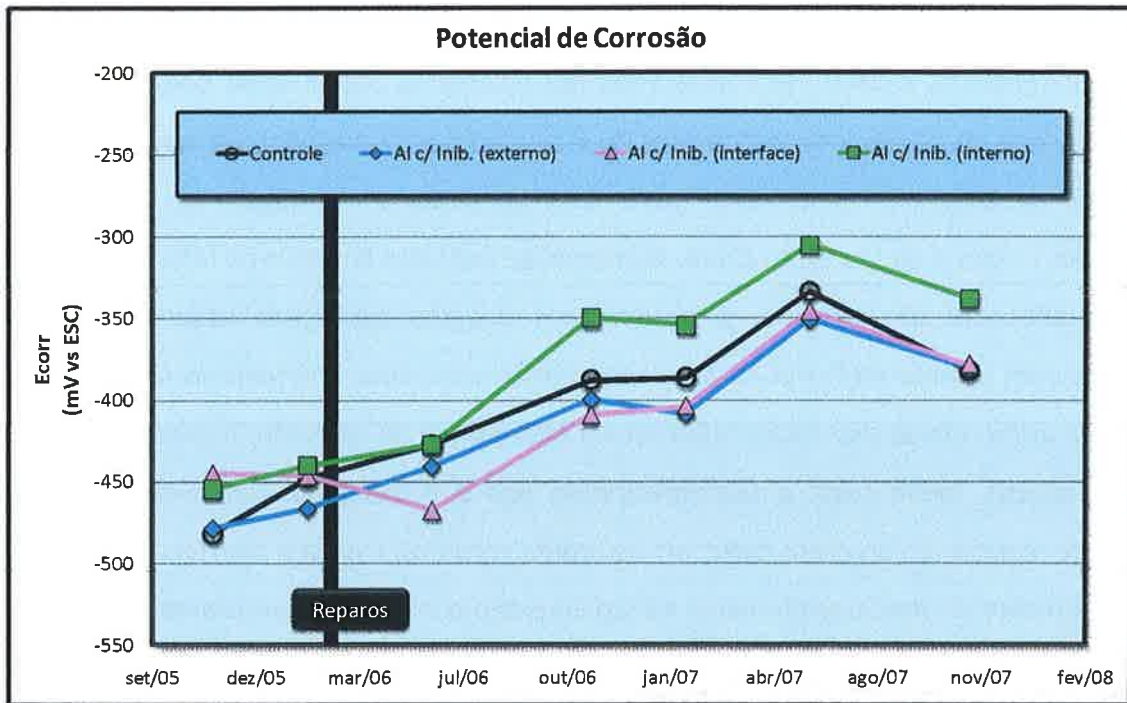


Figura 5-43 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I. c/ Inib.

Observando-se a Figura 5-44 verifica-se um comportamento bastante semelhante entre as regiões analisadas. A única diferença fica restrita a uma pequena redução do valor do potencial de corrosão na interface do reparo. No entanto, essa diferença é bastante incipiente, como mostra a Figura 5-45. Dessa forma, pode-se, de maneira simplista, intuir que o reparo não alterou o comportamento eletroquímico da região, no que diz respeito ao potencial de corrosão.

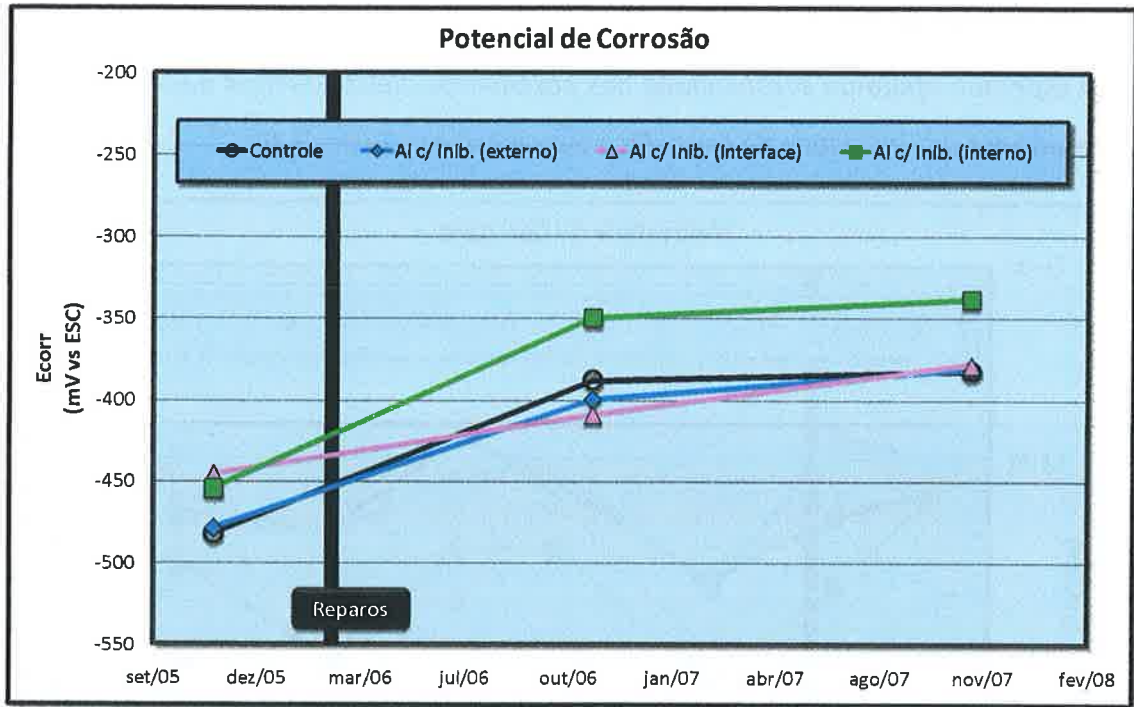


Figura 5-44 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema A.I. c/ Inib.

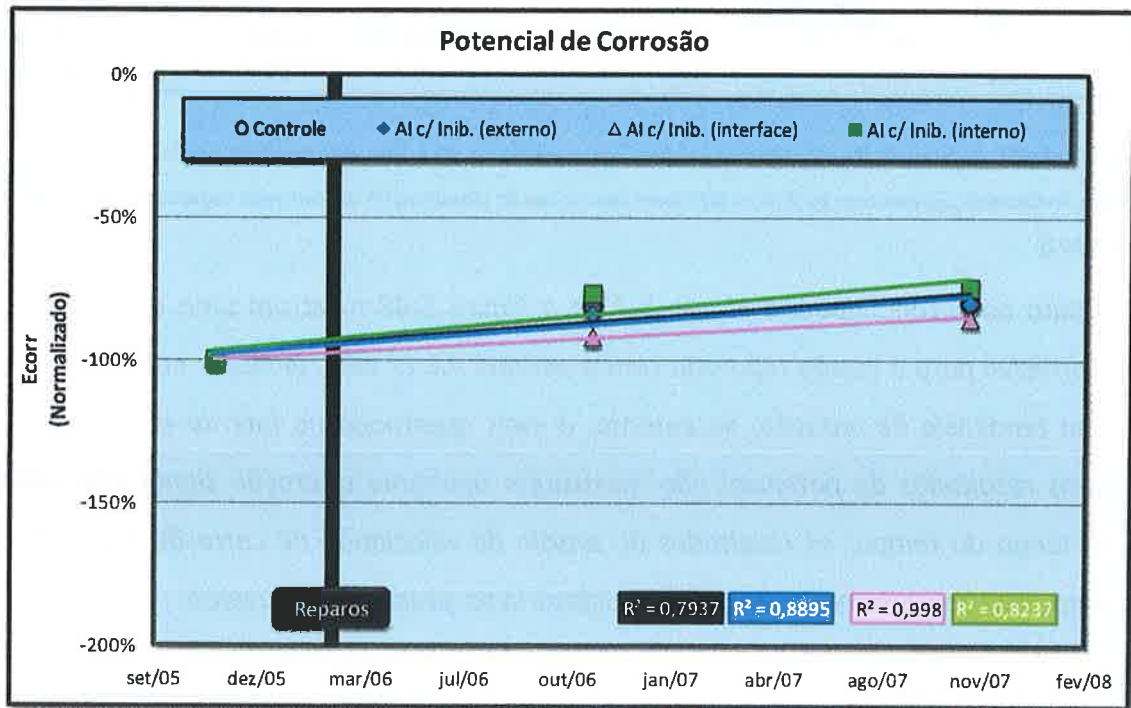


Figura 5-45 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. c/ Inib.

Do mesmo modo que nos demais sistemas estudados, bem como nos resultados de potencial de corrosão, o esperado efeito da sazonalidade nos parâmetros eletroquímicos da região é bastante claro nos resultados da velocidade de corrosão, como mostra a Figura 5-46.

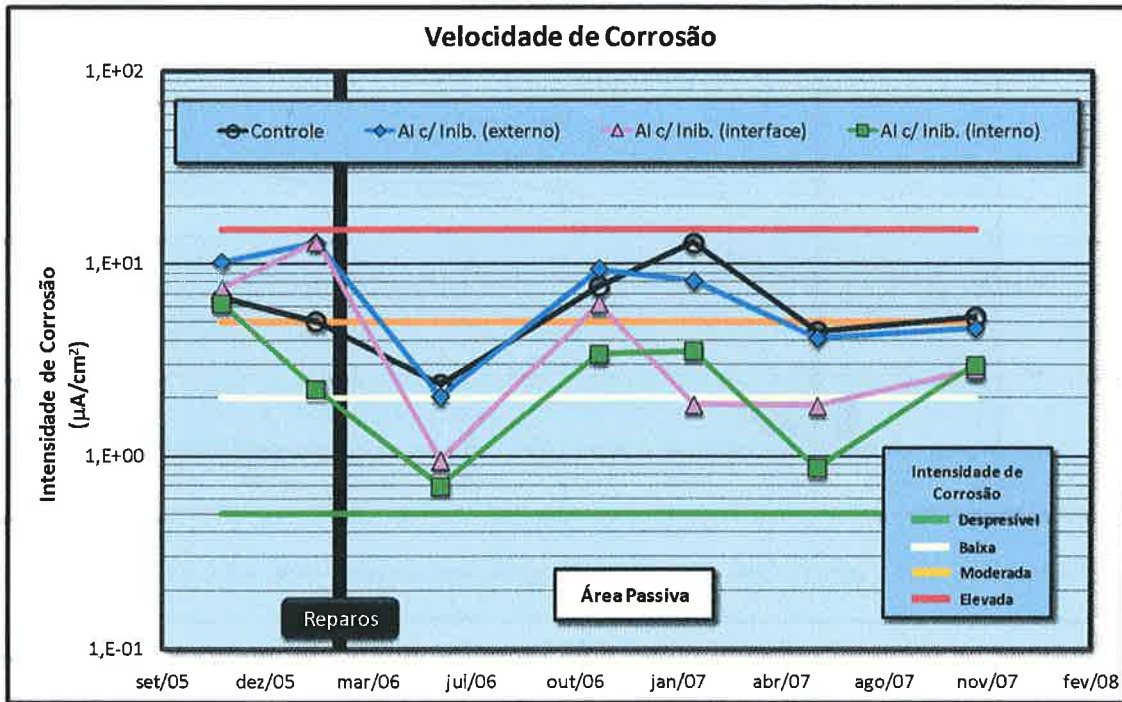


Figura 5-46 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema A.I. c/ Inib.. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

Além do efeito da sazonalidade, a Figura 5-47 e a Figura 5-48 mostram uma clara redução no processo corrosivo para a região reparada com o sistema A.I. c/ Inib., inclusive na área externa ao reparo. Essa tendência de redução, no entanto, é mais acentuada no interior do reparo. Assim, apesar de os resultados de potencial não mostrarem nenhuma alteração significativa entre as regiões ao longo do tempo, os resultados do ensaio de velocidade de corrosão sugerem que o reparo apresenta comportamento bastante satisfatório na situação em questão.

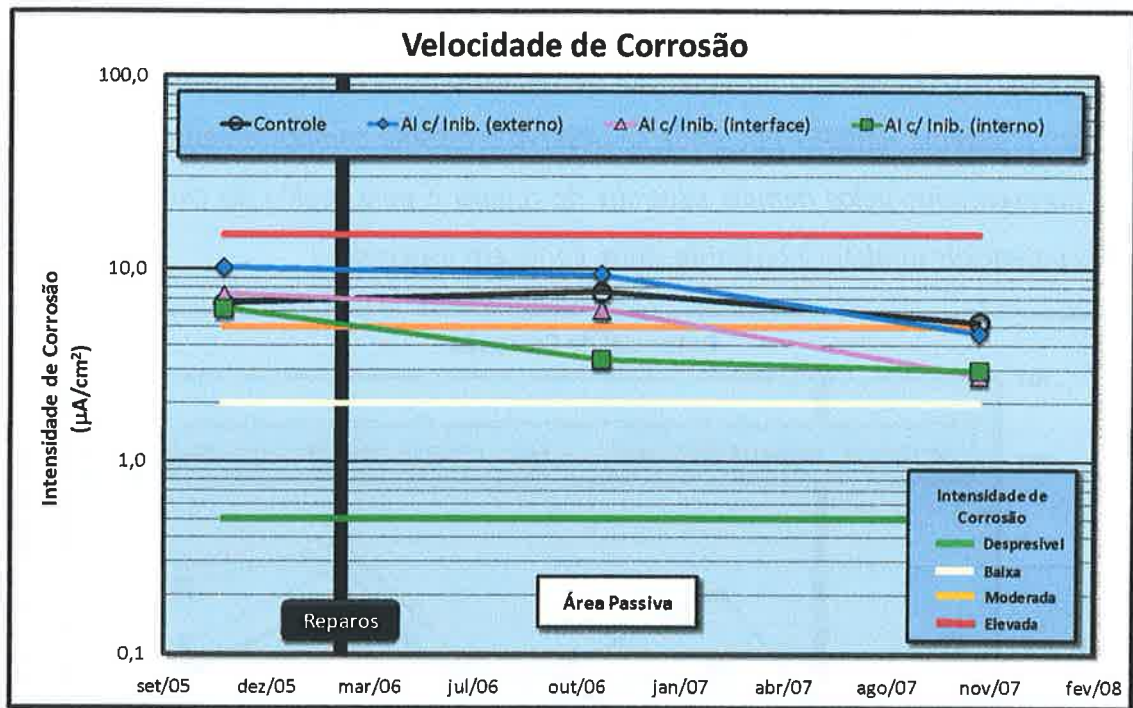


Figura 5-47 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema A.I c/ Inib. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

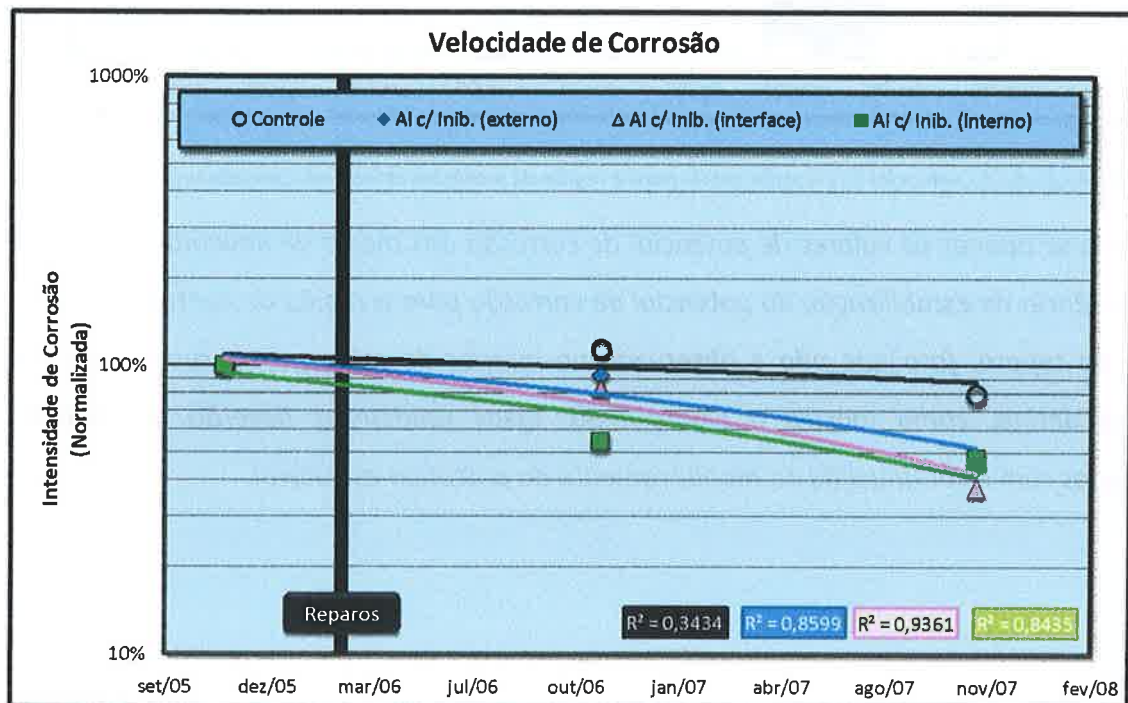


Figura 5-48 - Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema A.I. c/ Inib.

5.3.4 Argamassa de referência + primer cimentício rico em inibidor de corrosão (Ref035 + PCI)

A Figura 5-49 mostra a evolução do potencial de corrosão para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+ PCI, onde se observa o mesmo comportamento de elevação dos potenciais apresentados pelos demais sistemas de reparo e pela região de controle. A variação sazonal dos potenciais também é bastante clara, como era esperado.

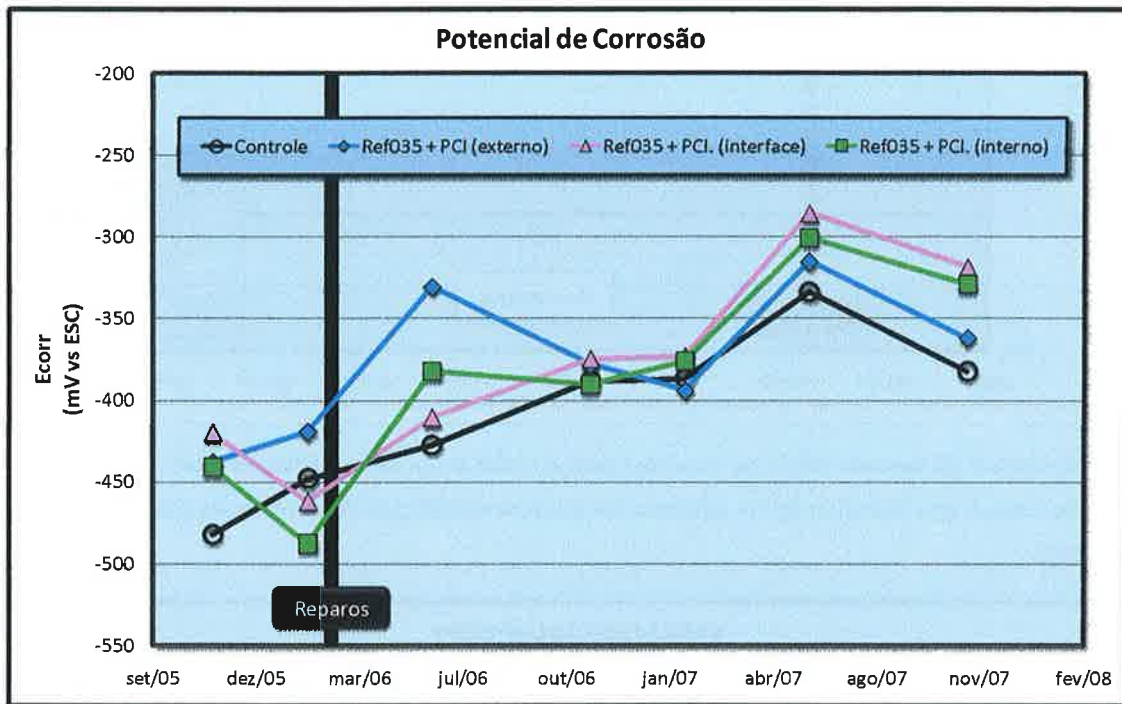


Figura 5-49 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+PCI.

Analisando-se apenas os valores de potencial de corrosão dos meses de novembro, pode-se notar certa tendência de estabilização do potencial de corrosão para a região de controle e para a área externa ao reparo, fato que não é observado no interior do reparo e na sua interface com o substrato antigo, como mostra a Figura 5-50. Essas tendências deverão, no entanto, ser confirmadas com a continuação do monitoramento do protótipo estrutural.

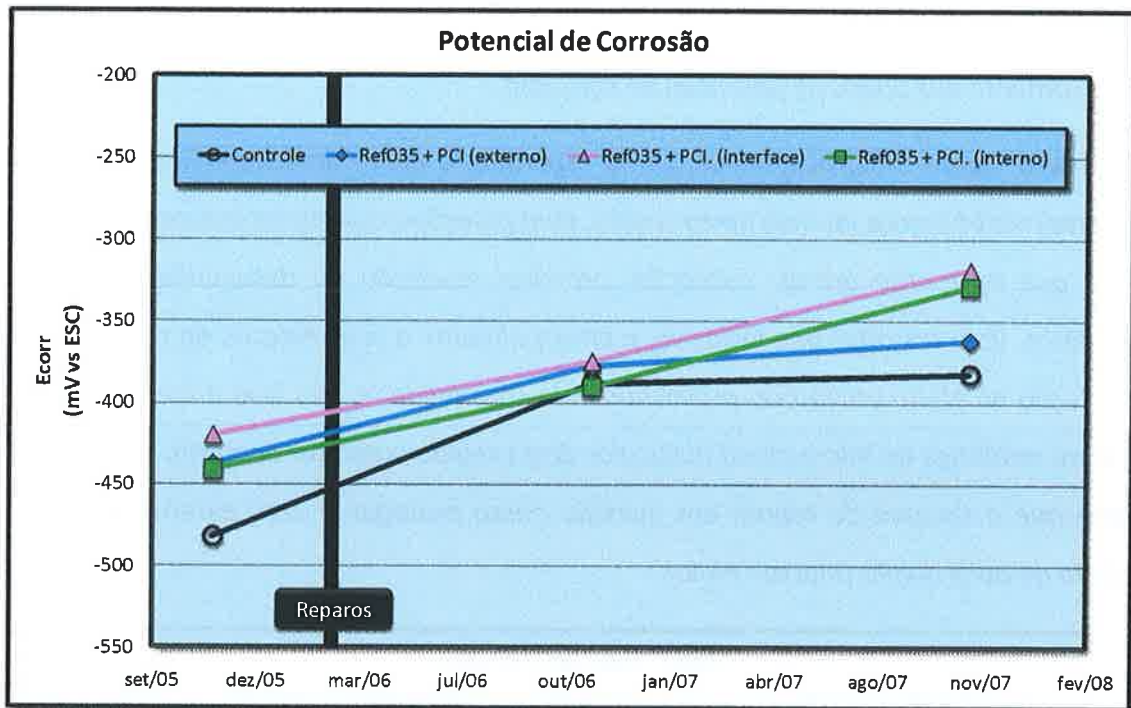


Figura 5-50 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+PCI.

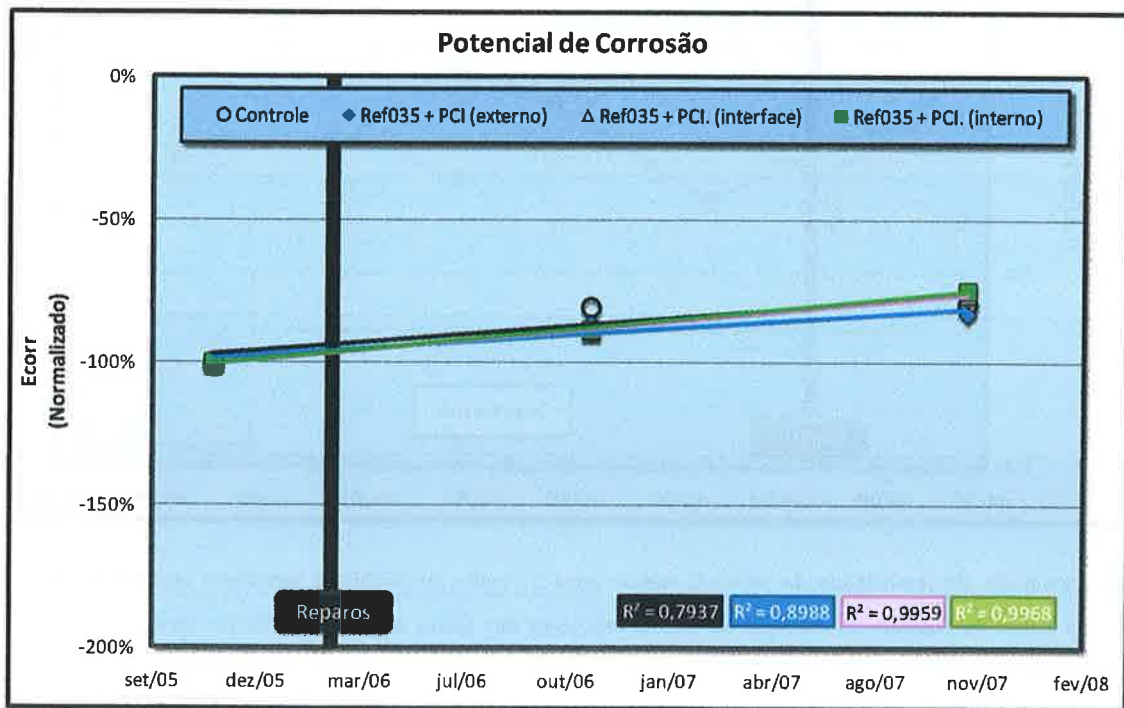


Figura 5-51 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+PCI.

Tomando-se as variações percentuais dos potenciais de corrosão e admitindo-se que a evolução destas é linear, não se observa diferença significativa entre as regiões estudadas (Figura 5-51).

Dessa forma fica muito complicado inferir sobre o comportamento/desempenho deste sistema através unicamente dos dados de potencial de corrosão.

Analisando-se a Figura 5-52, observa-se, como esperado, o efeito da sazonalidade. Todavia este efeito é visivelmente menos intenso nesta região, com exceção da primeira leitura após a execução do reparo, que apresenta grande oscilação, provável resultado do desequilíbrio causado pela execução deste. Vale ressaltar que inclusive, e principalmente a área externa ao reparo, apresenta grande redução no efeito oscilatório provocado pela sazonalidade. Isto leva a crer que algum erro de leitura, ou mudança no micro-clima particular desta região possa ter ocorrido, uma vez que não se acredita que o sistema de reparo em questão possa proteger a área externa ao reparo por algum efeito de polarização (macro-célula).

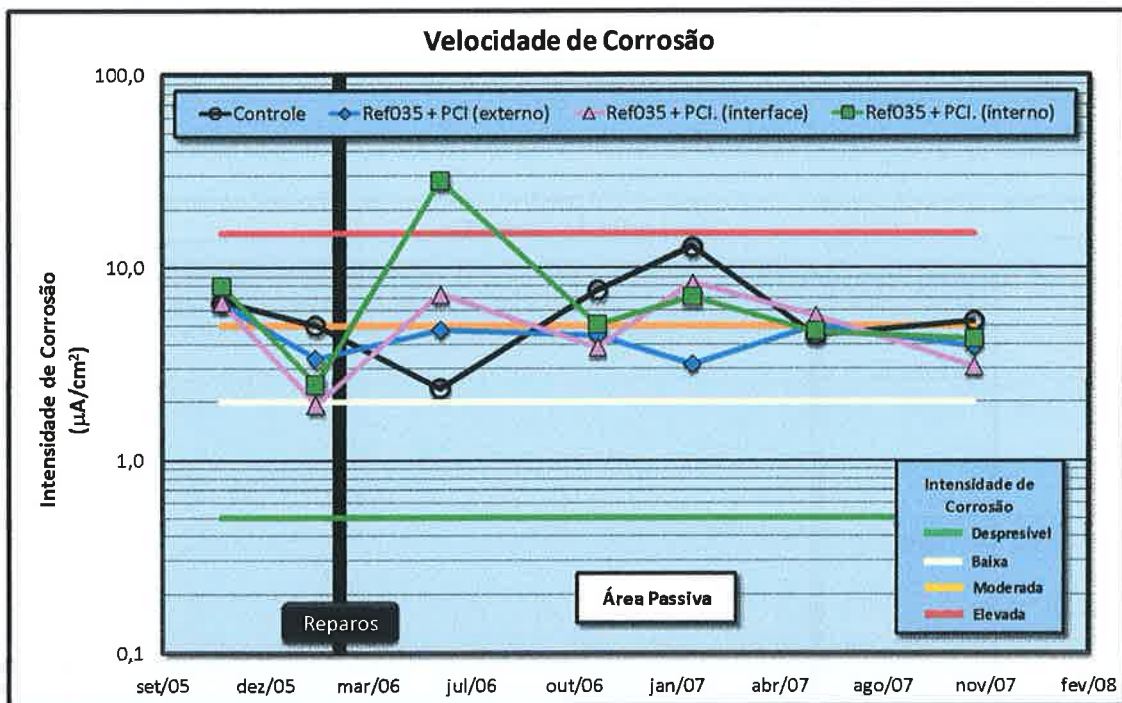


Figura 5-52 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+PCI. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

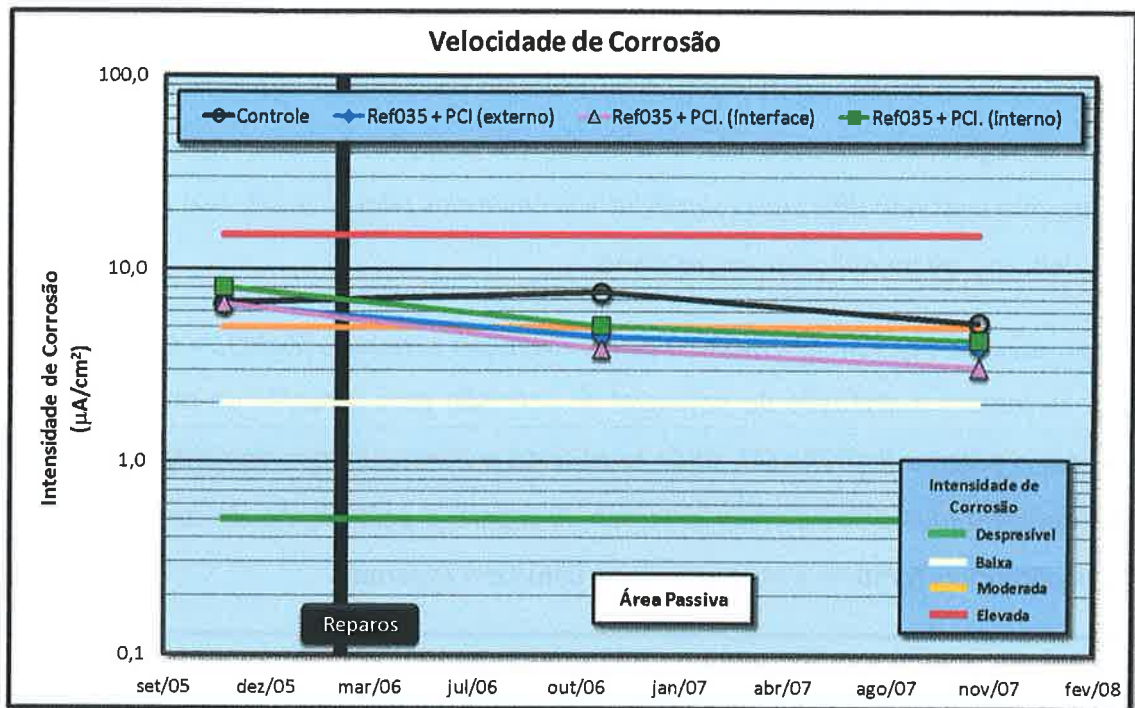


Figura 5-53 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+PCI. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

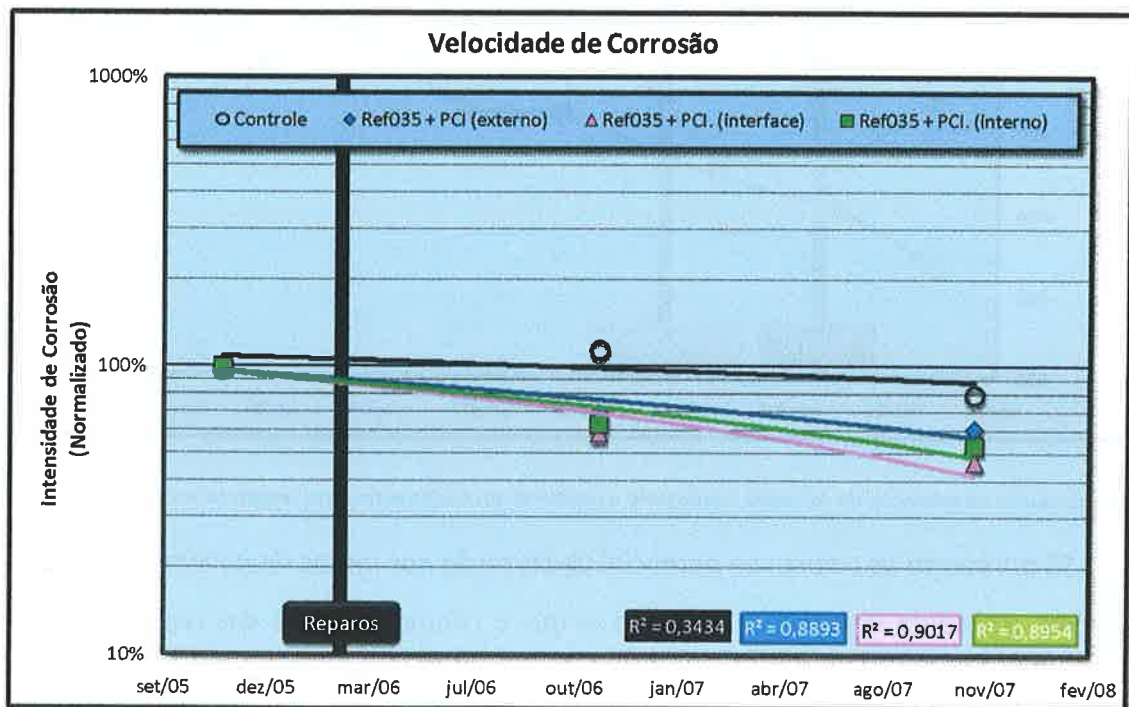


Figura 5-54 – Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+PCI.

Observando-se somente os valores da intensidade de corrosão para os meses de novembro (Figura 5-53), verifica-se certa tendência de redução no processo corrosivo para a toda a região reparada em relação à região de controle. As tendências de redução inclusive apresentam-se muito semelhantes, não existindo diferenças significativas entre elas (Figura 5-54). Isso reforça a hipótese de erro nas leituras, ou mudança no micro-clima.

5.3.5 Argamassa de referência + inibidor de corrosão por aspersão (Ref035 + CIT)

A Figura 5-55 mostra a evolução do potencial de corrosão para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+ CIT, onde se observa o mesmo comportamento de elevação dos potenciais apresentados pelos demais sistemas de reparo e pela região de controle. A variação sazonal dos potenciais também é bastante clara, como era esperado.

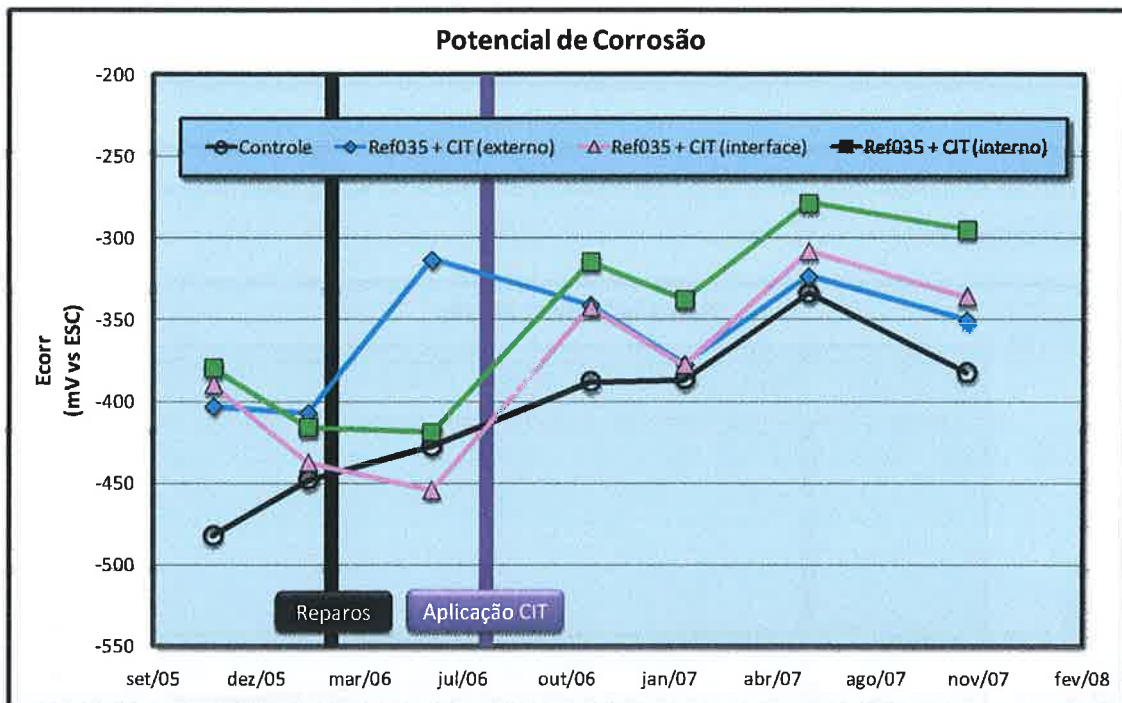


Figura 5-55 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+CIT.

A Figura 5-56 apresenta os valores de potencial de corrosão nos meses de novembro para a região reparada com o sistema Ref035+CIT. Observa-se que o comportamento das regiões analisadas é bastante semelhante, com as regiões de interface e externa ao reparo apresentando ligeira redução na evolução dos potenciais em relação à região de controle. Essa constatação fica mais clara na Figura 5-57.

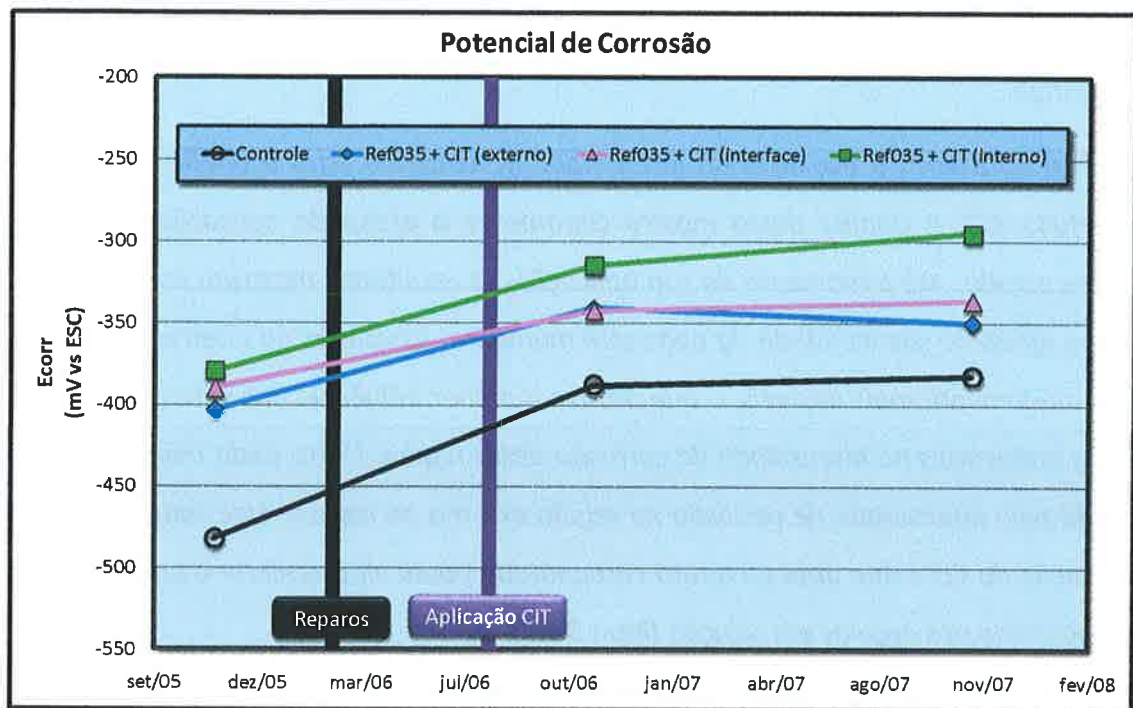


Figura 5-56 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+CIT.

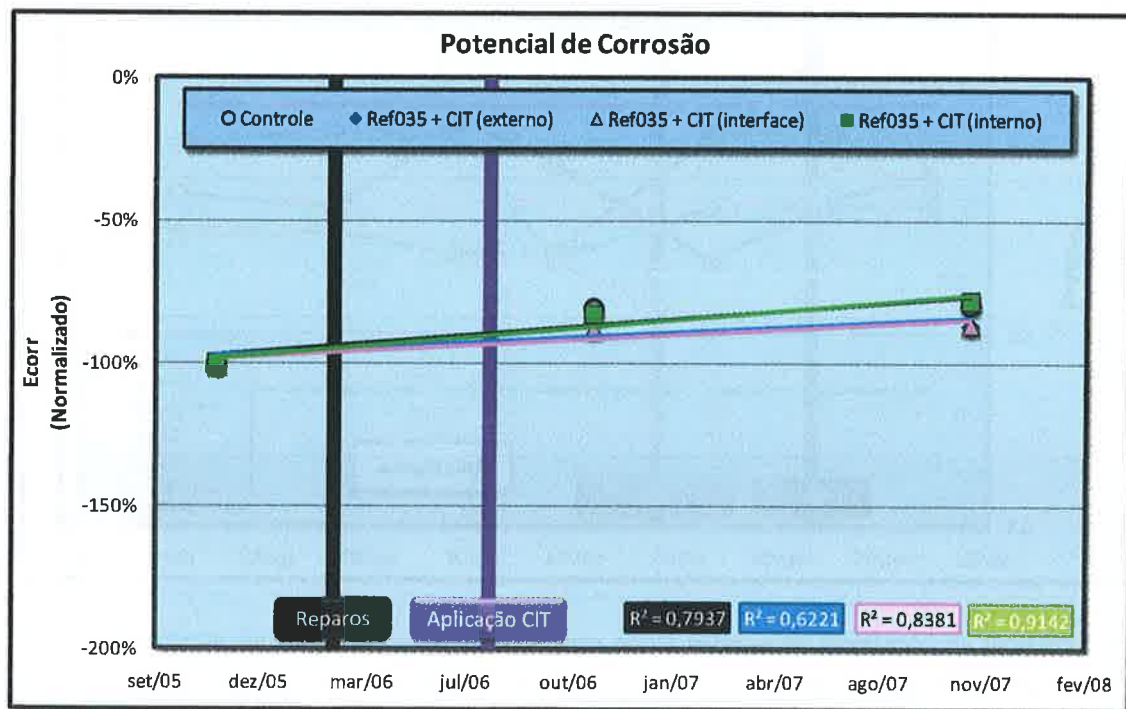


Figura 5-57 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+CIT.

É importante ressaltar que apesar da pequena diferença nas tendências, há um indício de que o sistema possa não apresentar resultado satisfatório, uma vez que viria a promover o incremento

da probabilidade de corrosão na área externa ao reparo, bem como na interface deste com o substrato antigo.

A Figura 5-58 apresenta a evolução da intensidade de corrosão para a região reparada com o sistema Ref035+CIT. A análise desta mostra claramente o efeito da aplicação do CIT sobre a superfície de estudo. Até o momento da sua aplicação, os resultados mostram bastante oscilação, referente ao efeito da sazonalidade. Já após este momento, os valores da intensidade de corrosão tornam-se nitidamente mais estáveis, o que mostra a menor influência das variações sazonais dos parâmetros ambientais na intensidade de corrosão desta região. Outro dado importante é o salto apresentado pela intensidade de corrosão na região externa ao reparo. Esse salto traz indícios de que a aplicação do CIT sobre uma estrutura carbonatada possa vir a acelerar o processo corrosivo, como foi mostrado nos ensaios em solução (item 5.2.3).

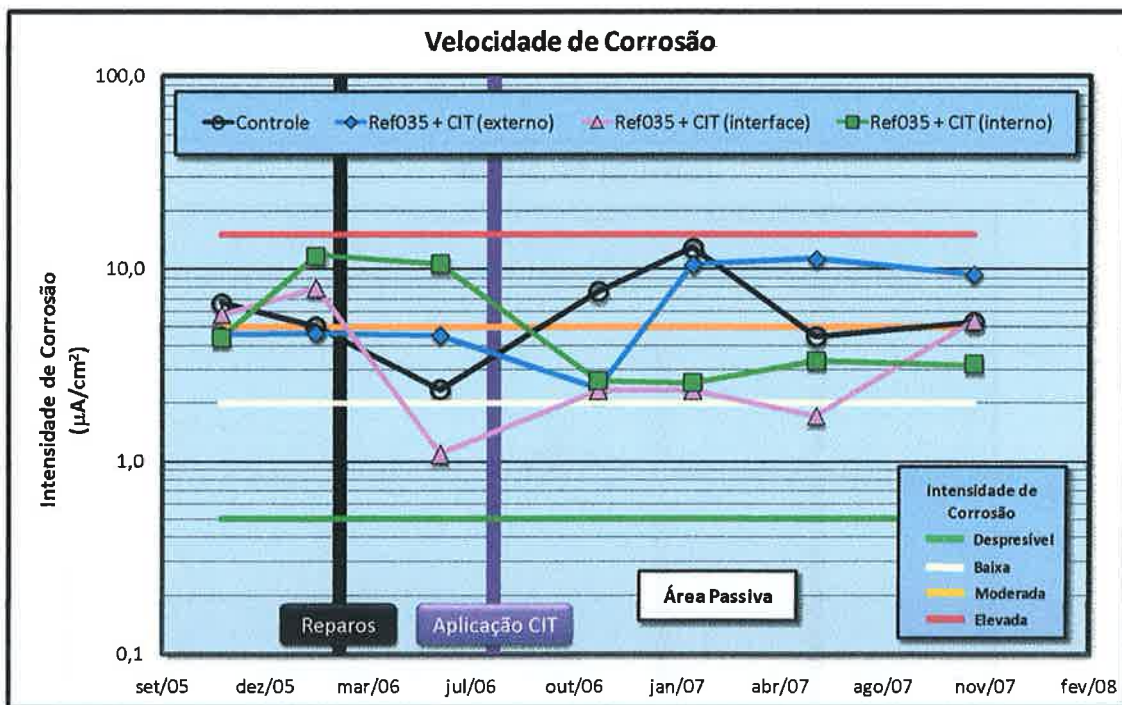


Figura 5-58 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+CIT. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

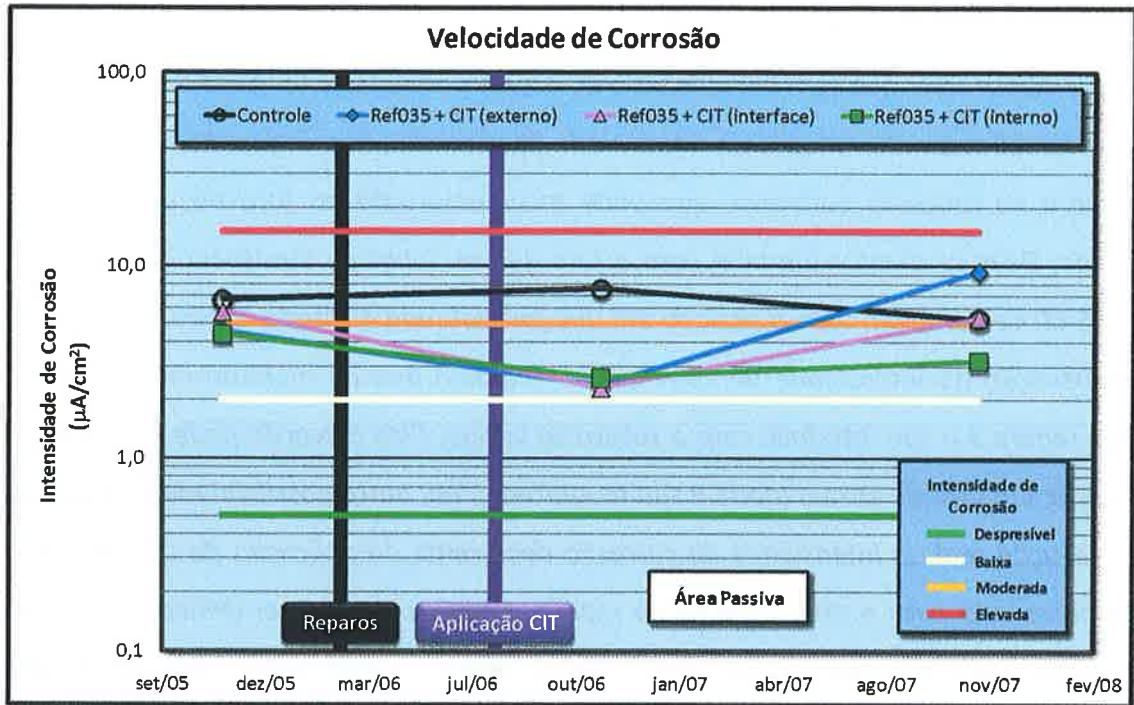


Figura 5-59 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+CIT. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

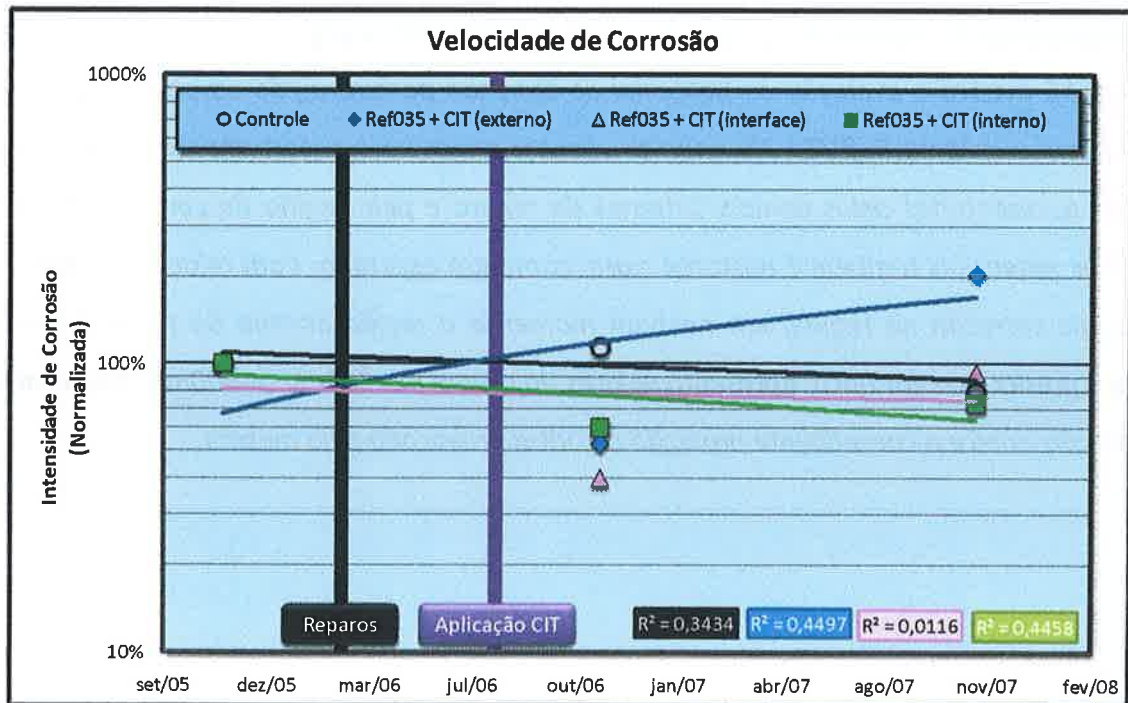


Figura 5-60 - Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+CIT.

A Figura 5-59 e a Figura 5-60 mostram as tendências de evolução da intensidade de corrosão nesta região. Pode-se observar que com exceção da área externa ao reparo, todas as demais apresentam tendências semelhantes de redução da intensidade de corrosão. Já a área externa apresenta uma sensível piora no processo corrosivo, que pode estar associada ao fato da estrutura já estar carbonatada. Deve se atentar também para o fato que as linhas de tendência lineares propostas na Figura 5-60 contemplam todo o período em que foi realizado o estudo. Existe, no entanto, uma pequena elevação na intensidade de corrosão no segundo ano de monitoramento para a área interna ao reparo e a sua interface com o substrato antigo. Esta elevação pode ser simplesmente decorrente de um erro de ensaio (dado à sua magnitude), ou, outra possibilidade é de que se trate de uma elevação real da intensidade de corrosão decorrente da aplicação do CIT, assim como a elevação observada para a área externa ao reparo. Neste caso, o desempenho deste sistema é ainda pior do que o encontrado. Essa possibilidade deve ser verificada com a continuidade do monitoramento nos próximos anos. De qualquer forma, a elevação significativa da intensidade de corrosão na área externa ao reparo com relação à região de controle, indica a inadequação deste sistema de reparo para a situação em estudo.

5.3.6 Argamassa de referência + primer rico em zinco (Ref035 + ZP)

A Figura 5-55 mostra a evolução do potencial de corrosão para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+ ZP, onde se observa o mesmo comportamento de elevação dos potenciais apresentados pelos demais sistemas de reparo e pela região de controle. A variação sazonal dos potenciais também é bastante clara, como era esperado. Com relação aos valores do potencial de corrosão na região, em nenhum momento a região interna do reparo, onde está aplicado o primer rico em zinco, apresenta valores da ordem de -500mV a -600mV, o que indicaria a corrosão do zinco e a conseqüente proteção catódica provocada pelo mesmo.

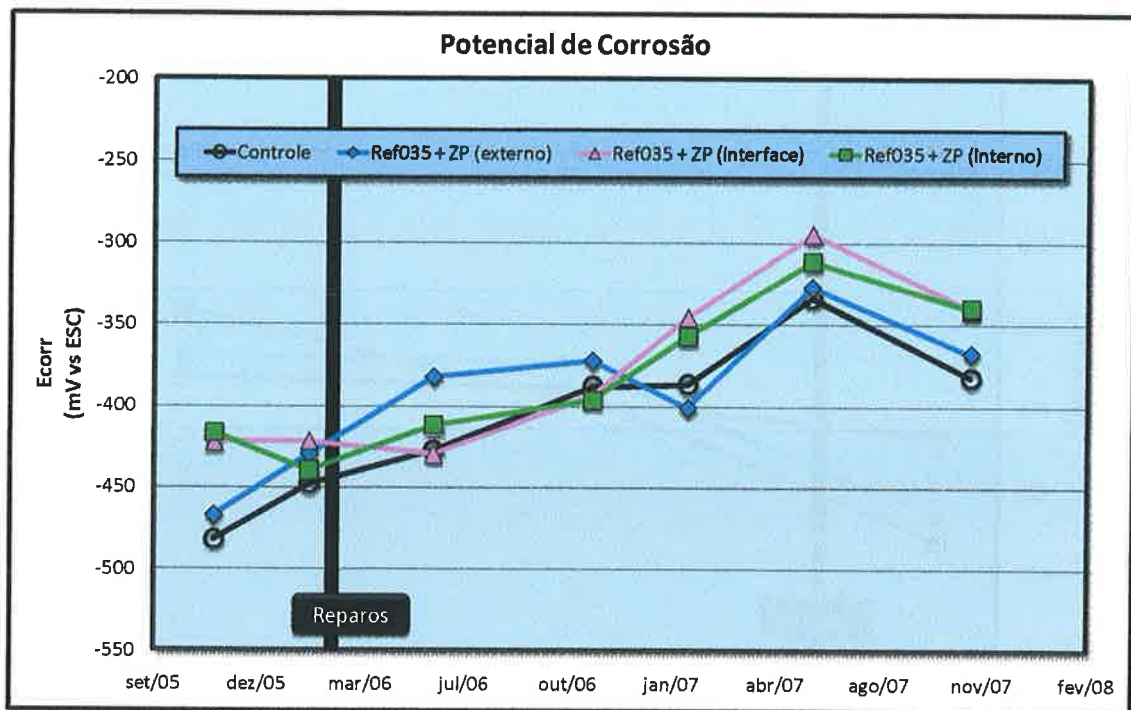


Figura 5-61 – Evolução do potencial de corrosão médio para a região do protótipo estrutural reparada com sistema Ref035+ZP.

A Figura 5-62 mostra os valores de potencial de corrosão para os meses de novembro na região reparada com o sistema Ref035+ZP. Pode-se observar que a região externa ao reparo tem comportamento bastante semelhante à região de controle, apresentando certa estabilidade na segunda metade do estudo. Já a área interna ao reparo e a sua interface com o substrato antigo se comportam de maneira uniforme, apresentando uma evolução nos potenciais de corrosão praticamente constante no período estudado, o que fica claro quando se observa o alto valor do índice de regressão apresentado por estas (Figura 5-63).

Observando-se as tendências lineares apresentadas na Figura 5-63, nota-se que as taxas de evolução são bastante similares. Dessa forma, através dos dados de potencial de corrosão, até o presente momento, muito pouco se pode concluir acerca da evolução processo corrosivo na região em questão.

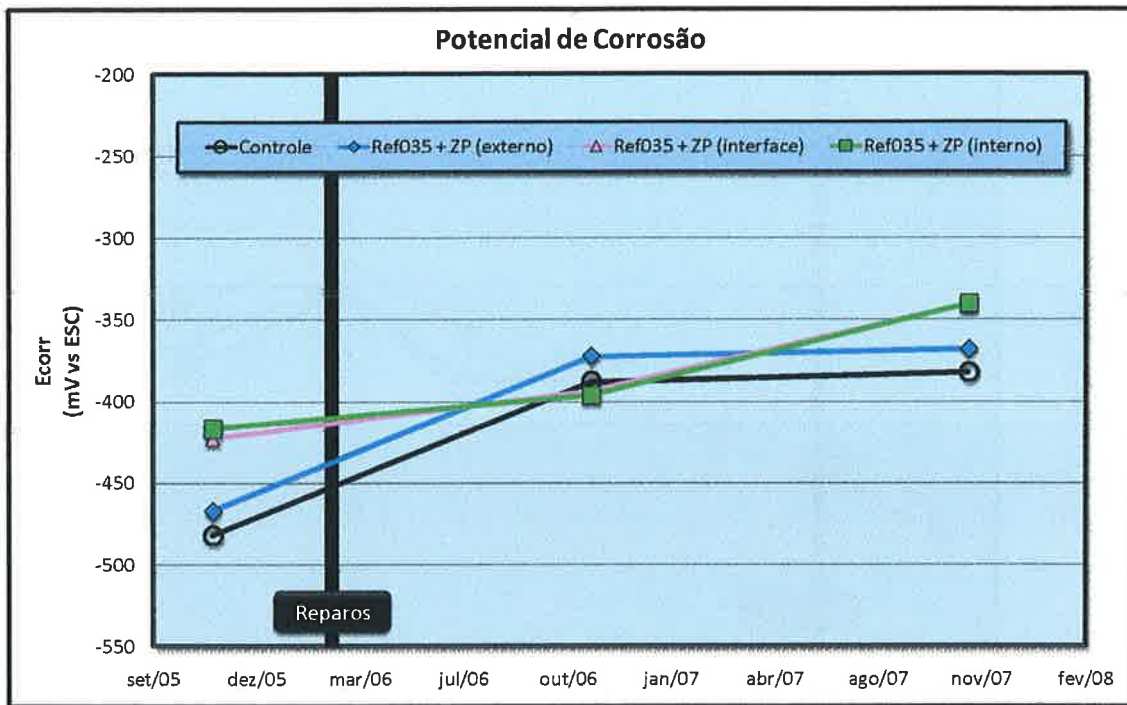


Figura 5-62 – Potencial de corrosão médio no mês de novembro na região reparada com o sistema Ref035+ZP.

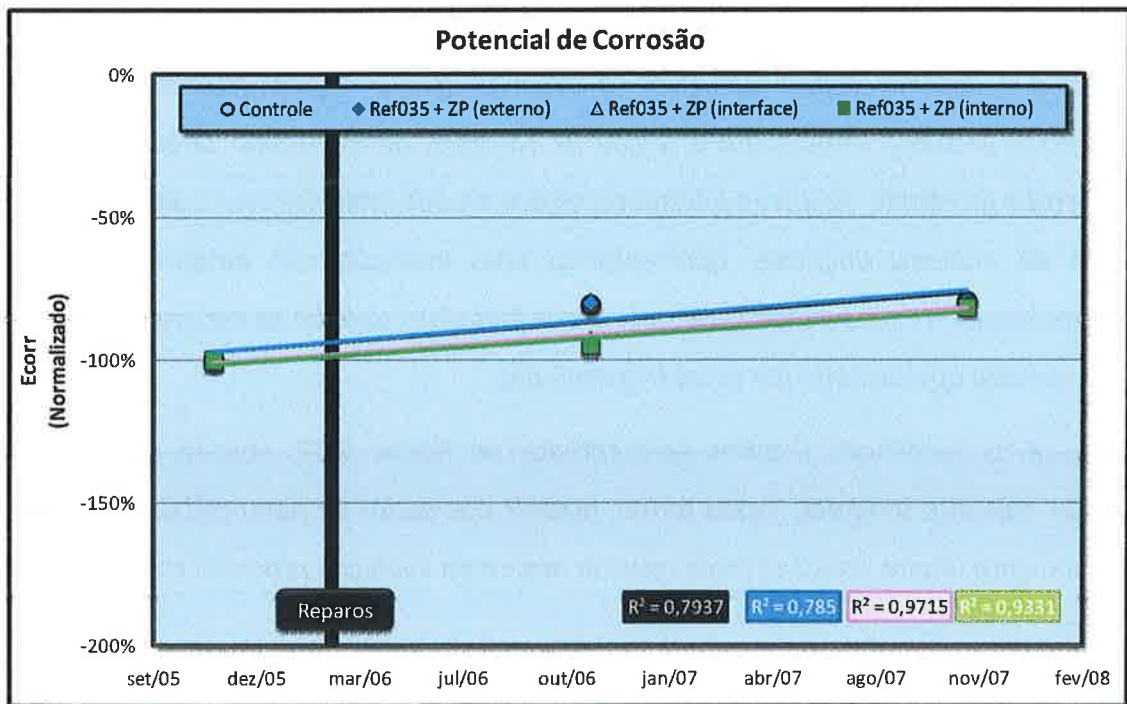


Figura 5-63 – Potenciais de corrosão normalizados e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+ZP.

Analisando-se a Figura 5-64, observa-se, como esperado, o efeito da sazonalidade na evolução da intensidade de corrosão. Além disso, observa-se certa estabilização nos valores de intensidade de corrosão da área interna ao reparo.

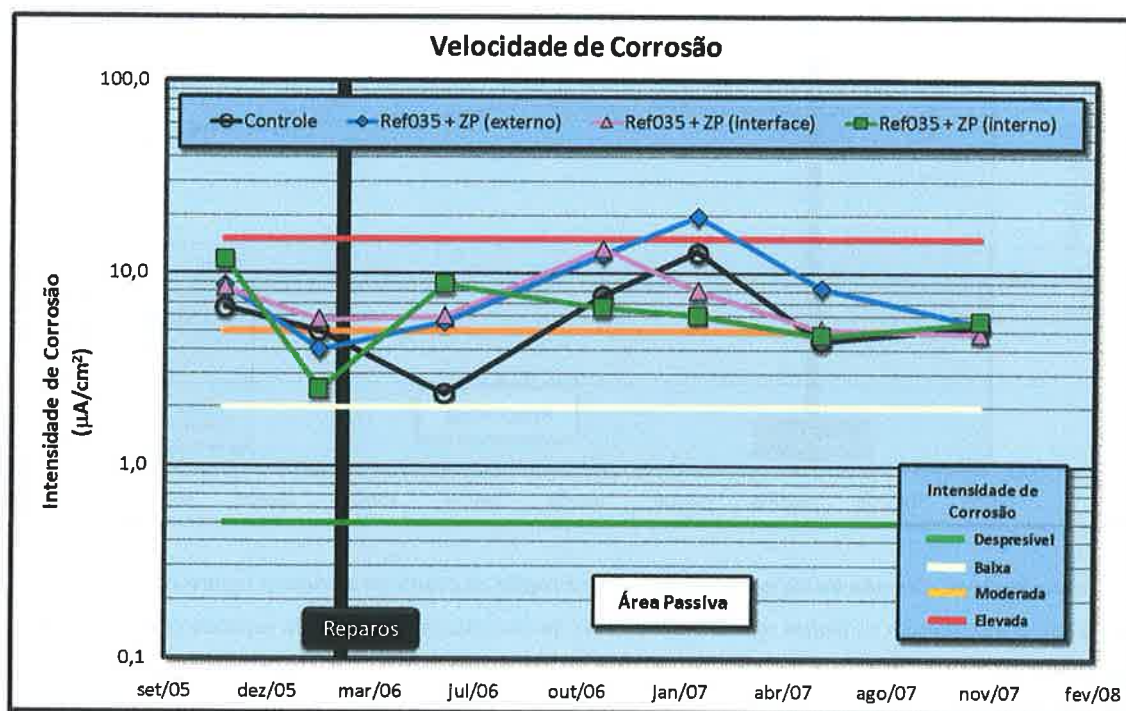


Figura 5-64 - Evolução da intensidade de corrosão média para a região do protótipo estrutural reparada com o sistema Ref035+ZP. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

No entanto, analisando-se a Figura 5-65, onde estão representados os valores da intensidade de corrosão para os meses de novembro, observa-se uma tendência clara de redução para a região interna ao reparo, enquanto na interface e na área externa, nota-se uma oscilação dos valores, que no primeiro ano aumentam, e logo depois decaem, ficando em torno de uma média. Na Figura 5-66, a área interna ao reparo apresenta uma tendência de redução bastante acentuada, e as demais uma ligeira tendência de redução, ficando, contudo, muito próxima ao comportamento apresentado pela região de controle. Diante destes fatos, pode-se concluir que o sistema de reparo em questão apresenta resultados bastante satisfatórios para a situação em questão. Vale ressaltar, porém, que esse desempenho pode ser devido unicamente ao uso da argamassa Ref035, uma vez que não existe indícios de uma possível proteção catódica proporcionada pelo primer de zinco (ZP).

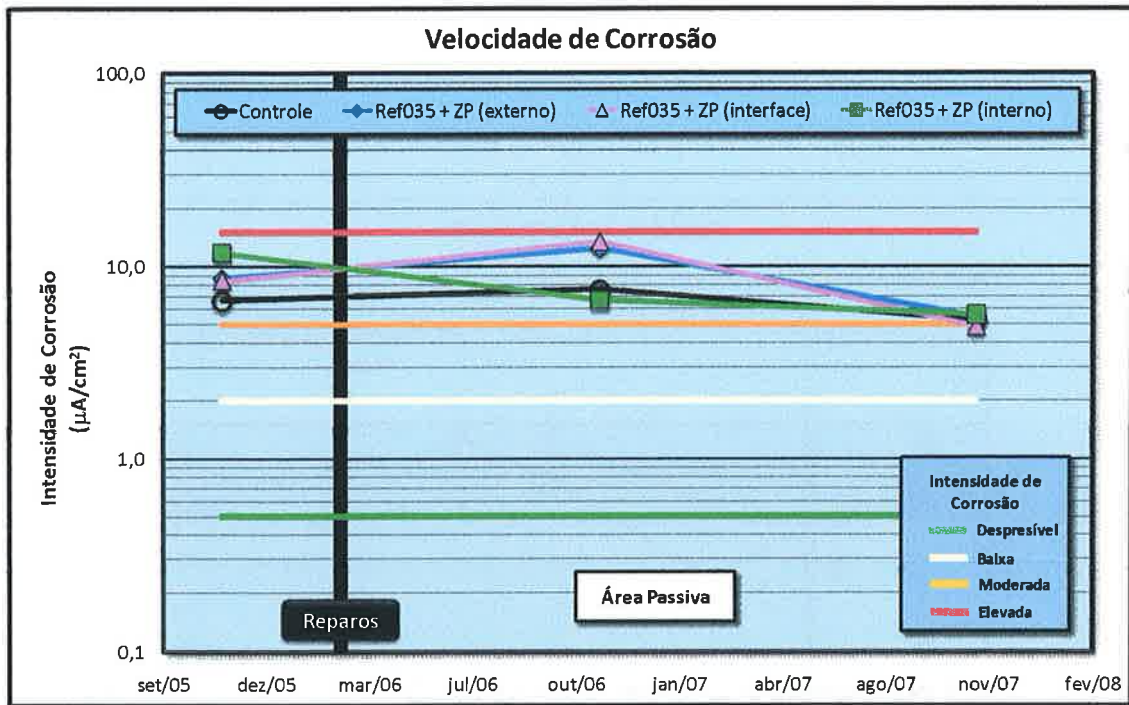


Figura 5-65 - Intensidade de corrosão média em novembro para a região do protótipo estrutural repara com sistema Ref035+ZP. As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002).

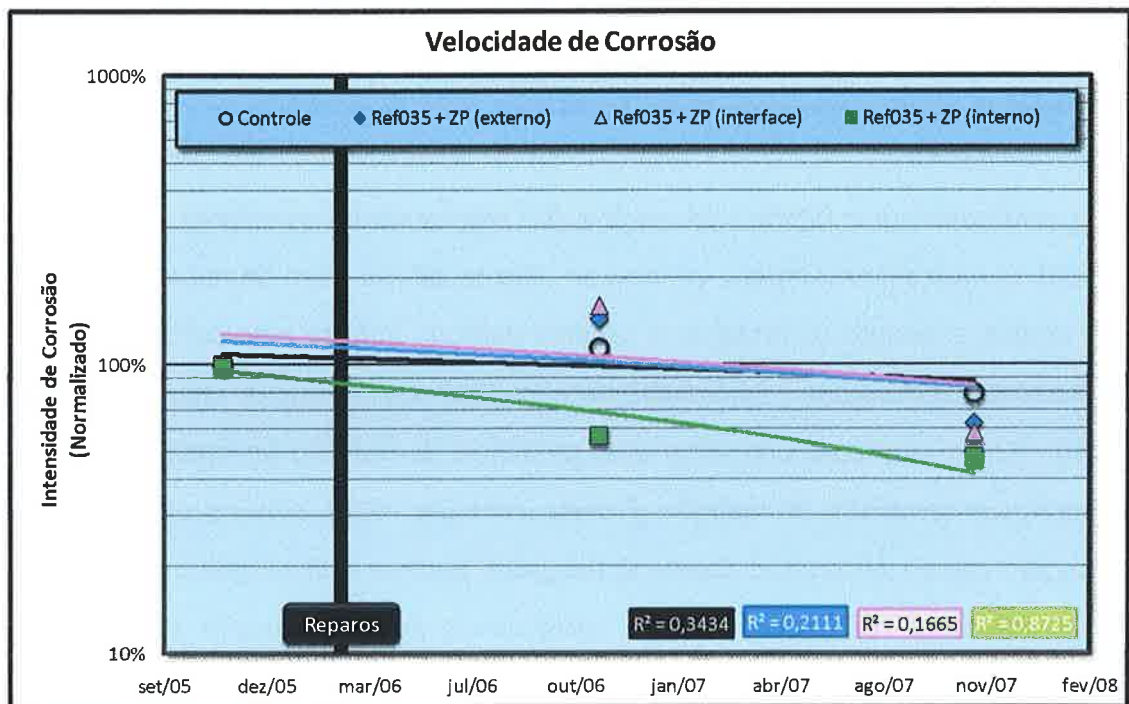


Figura 5-66 - Intensidade de corrosão normalizada e linhas de tendência lineares para a região do protótipo reparada com o sistema Ref035+ZP.

5.3.7 Análise comparativa entre sistemas

Um dos principais objetivos de se avaliar o comportamento eletroquímico dos sistemas de reparo em campo é poder estabelecer comparações entre sistemas distintos, de forma a se criar subsídios para a escolha do mais adequado para cada situação. Logicamente cada análise tem validade exclusiva para a situação estudada, devendo ser repetida cada vez que se necessite esse tipo de informação.

Para se estabelecer alguma comparação entre os sistemas duas análises distintas foram realizadas: comparação dos valores finais relativos e comparação dos valores finais absolutos.

A Figura 5-67 mostra a comparação dos valores finais do potencial de corrosão em relação ao valor inicial. Com relação a estes valores, consideram-se como satisfatórios aqueles que apresentarem aumentos significativamente superiores ao ocorrido na região de controle. Deve-se lembrar que se alguma das regiões do reparo apresentar valores significativamente inferiores à região de controle, o sistema de reparo é considerado potencialmente insatisfatório, salvo algumas exceções como a presença de inibidores, proteção catódica, polímeros etc, que possam provocar redução no potencial de corrosão. Vale ressaltar que esta é uma avaliação do potencial do sistema. Para uma avaliação definitiva, deve-se comparar o desempenho nesta análise com o obtido na comparação dos valores absolutos e nas análises da intensidade de corrosão.

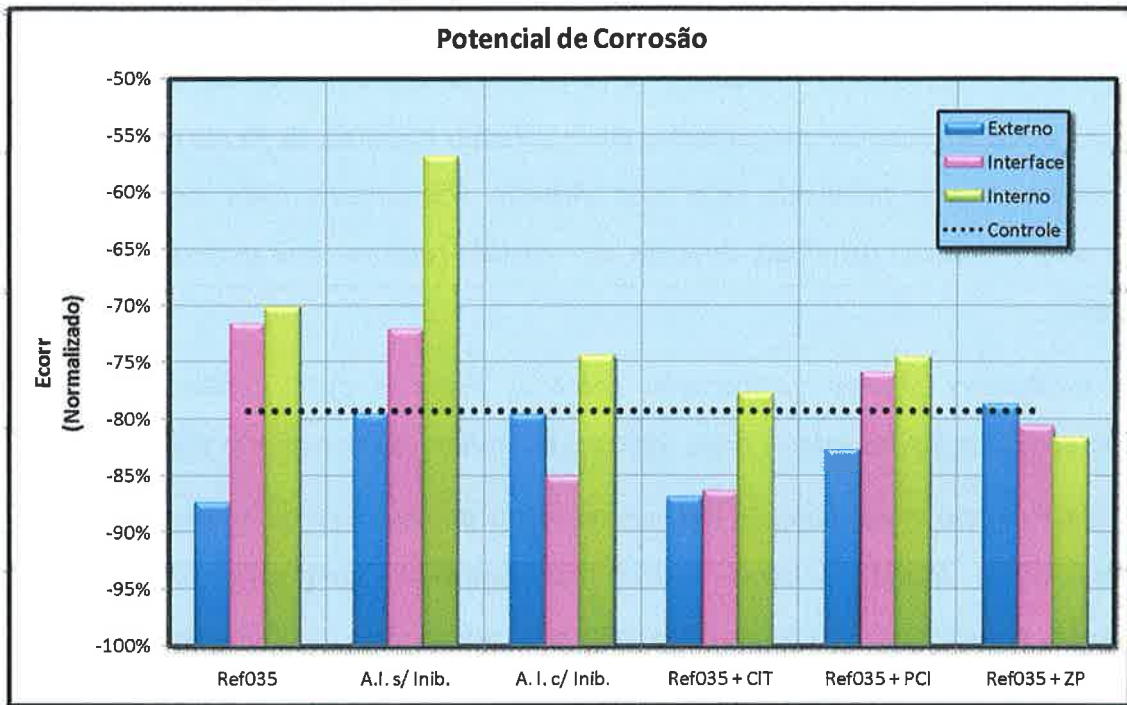


Figura 5-67 – Relação entre o valor do potencial de corrosão médio obtido na última leitura (Nov/2007) e o valor obtido na leitura inicial (Nov/2005 [-100%]). A linha pontilhada representa a relação obtida para a região de controle.

Observando-se os dados da Figura 5-67, verifica-se que apenas o sistema A.I. s/ Inib. apresenta o desempenho potencialmente satisfatório. Os sistemas A.I. c/ Inib. e Ref035+ZP podem também ser considerados potencialmente satisfatórios considerando-se que as menores variações no potencial de corrosão encontradas nestes são fruto da composição dos mesmos (inibidores, zinco). Os demais não podem ser considerados satisfatório, pois provocam reduções nos potenciais de corrosão da área externa ao reparo com relação à região de controle.

Analogamente a mesma análise pode ser realizada para os valores de intensidade de corrosão, apenas que os valores satisfatórios neste caso são os menores. Dessa forma, com exceção do sistema A.I. s/ Inib. e do sistema Ref035+CIT, todos os demais apresentam desempenho potencialmente satisfatório.

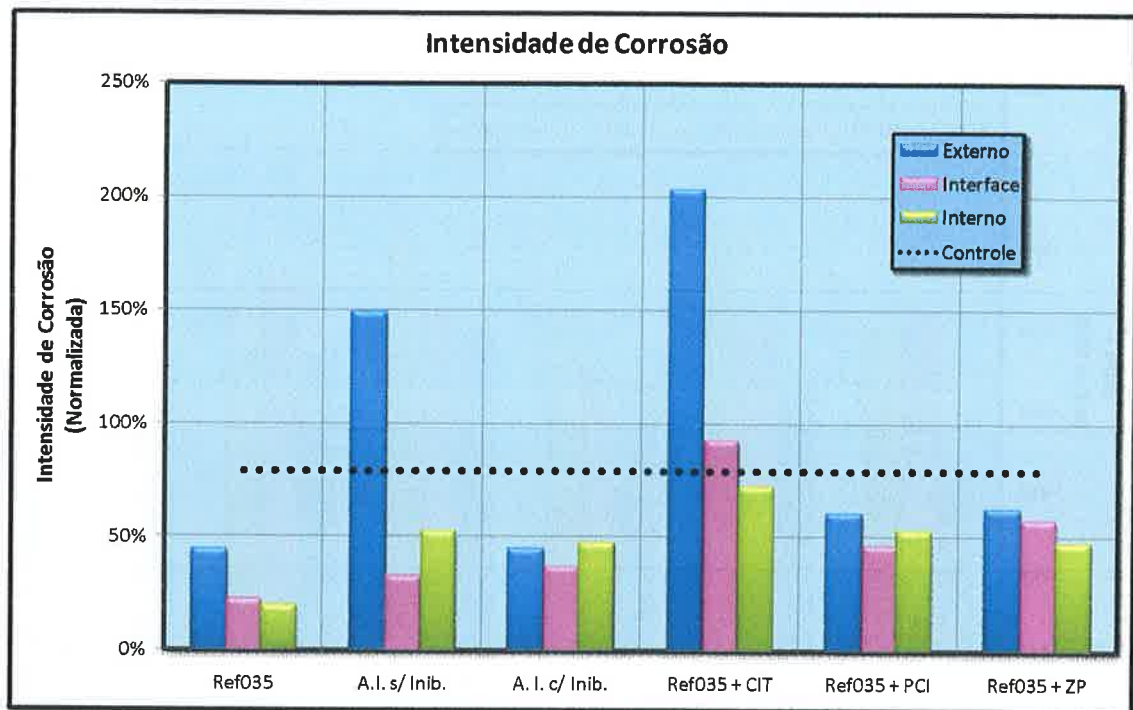


Figura 5-68 – Relação entre o valor da intensidade de corrosão média obtido na última leitura (Nov/2007) e o valor obtido na leitura inicial (Nov/2005). A linha pontilhada representa a relação obtida para a região de controle.

Deve-se atentar também para o fato do desempenho contraditório de alguns sistemas. Essa inversão de comportamento pode estar relacionada a 2 fatores. Apesar de acreditar-se que maiores aumentos relativos no potencial de corrosão com relação ao ocorrido na região de controle possam ser indicativos de melhor desempenho do ponto de vista eletroquímico, a grande diferença entre os aumentos ocorridos nas áreas de estudo (interna ao reparo, interface e externa ao reparo) podem provocar formação de macro-célula e conseqüente queda no desempenho eletroquímico do referido sistema. Essa pode ter sido a causa do grande aumento na taxa de corrosão verificada na área externa ao reparo no sistema A.I. s/ Inib.

Outro ponto importante de ser observado é o valor absoluto do potencial de corrosão e da intensidade de corrosão. A Figura 5-69 mostra os valores absolutos dos potenciais de corrosão dos sistemas estudados. Neste caso, deve-se observar os valores de potencial com relação à região de controle. Além disso, grandes diferenças de potencial de corrosão entre área reparada, a interface do reparo e a área externa, devem ser tomadas com cautela, uma vez que podem significar a formação de macro-células de corrosão.

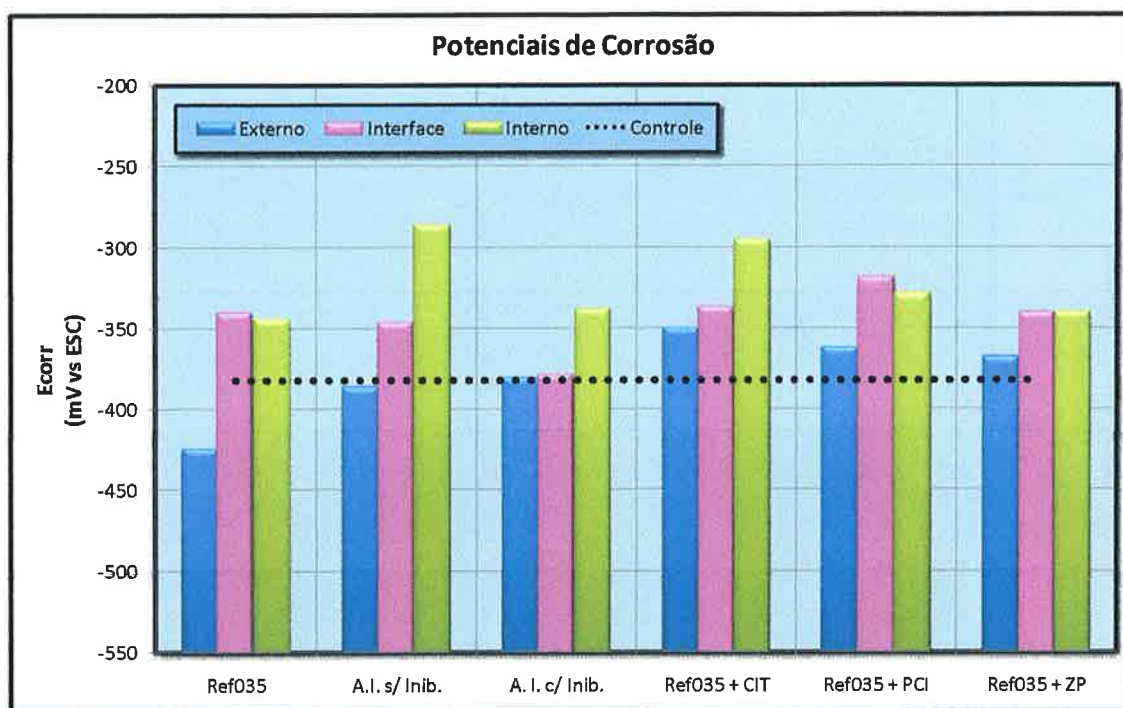


Figura 5-69 – Potenciais de corrosão médios medidos após 2 anos do início do monitoramento do protótipo (Nov/2007). A linha pontilhada representa o valor médio na região de controle.

Observando-se a Figura 5-69, nota-se que todos os sistemas avaliados possuem valores de potencial de corrosão na área reparada, maiores que na área externa ao reparo, como era esperado. Além disso, com exceção do sistema Ref035, todos apresentam valores de potencial na área externa ao reparo, próximos ou ligeiramente superiores ao valor de potencial na região de controle, o que indicaria que a área externa ao reparo possivelmente não foi afetada negativamente. Outro ponto importante é a grande diferença de potencial entre a área reparada e a área externa ao reparo nos sistemas Ref035 e A.I. s/ Inib., que podem levar à formação de macrocélulas de corrosão. No caso do sistema A.I. s/ Inib., esta observação vem ao encontro dos resultados obtidos na análise dos valores relativos.

Comparando-se os valores absolutos de potencial de corrosão obtidos neste estudo, com outros disponíveis na literatura (QIAN & CUSSON, 2004; CUSSON & QIAN & HOOGVEEN, 2006; BROOMFIELD & DAVIES & HLADKY, 2002), observa-se que estão todos na mesma ordem de grandeza. Outro dado importante é o fato de nenhum sistema de reparo avaliado nesses trabalhos apresentar valores de potencial de corrosão iguais, ou superiores à -200mV, limite inferior da faixa de baixa probabilidade de corrosão da ASTM C 876-91. Uma vez que acredita-se que esses reparos

não apresentam corrosão, esses resultados servem ainda mais para corroborar com a tese de inadequação desses limites de referência, como têm-se discutido ao longo do presente trabalho.

Observando-se os dados de intensidade de corrosão, análise semelhante pode e deve ser feita. Neste caso, os critérios a serem utilizados são os propostos por FRØLUND ET AL. (2002). Adicionalmente temos a possibilidade de comparar o valor da intensidade de corrosão na região de controle com as regiões reparadas.

Analisando-se a Figura 5-70 observa-se que todos os sistemas apresentam taxas de corrosão baixas, com exceção do A.I. s/ Inib. e do sistema Ref035+ZP, que apresentam valores de intensidade de corrosão na região interna ao reparo próximos do limite, porém já na faixa de corrosão moderada. Além disso, o sistema A.I. s/ Inib. e o sistema Ref035+CIT são os únicos que apresentam valores de intensidade de corrosão na área externa ao reparo superiores à região de controle, o que a princípio indica um comportamento indesejado por parte destes (intensificação da corrosão na área externa ao reparo – macro-célula).

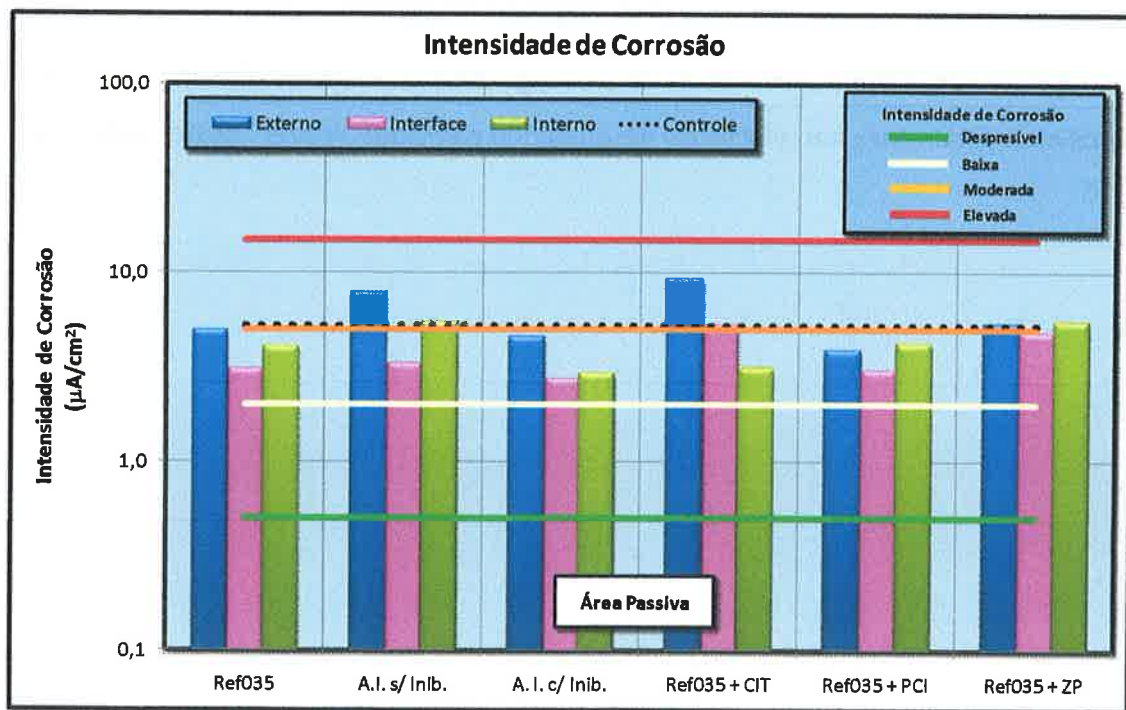


Figura 5-70 – Valores de intensidade de corrosão médios medidos após 2 anos do início do monitoramento do protótipo (Nov/2007). As linhas horizontais apresentam os limites inferiores das faixas de classificação da corrosão segundo critério apresentado por Frølund (2002). A linha pontilhada representa o valor médio na região de controle.

Tabela 5-5 – Resumo da avaliação dos sistemas reparo, suas características principais de desempenho e sua adequabilidade à situação em estudo.

| <i>Sistema de Reparo</i> | <i>Particularidades</i> | <i>Parecer</i> |
|--------------------------|---|---|
| Ref035 | <ul style="list-style-type: none"> Grande potencial de redução da intensidade de corrosão Diferença significativa entre o potencial de corrosão na área externa ao reparo e as demais | Deve ser utilizado com cautela! |
| A.I. s/ Inib. | <ul style="list-style-type: none"> Grande incremento na intensidade de corrosão na área externa ao reparo. | Não adequado para a situação em questão. |
| A.I. c/ Inib. | <ul style="list-style-type: none"> Grande potencial de redução da intensidade de corrosão Melhores valores absolutos de intensidade de corrosão, porém ainda consideráveis | Aparentemente a melhor opção a situação em questão. |
| Ref035 + CIT | <ul style="list-style-type: none"> Grande incremento na intensidade de corrosão na área externa ao reparo. | Não adequado para a situação em questão. |
| Ref035 + PCI | <ul style="list-style-type: none"> Grande potencial de redução da intensidade de corrosão Valores de intensidade de corrosão melhores que a região de controle, porém ainda consideráveis | Pode ser uma opção ²¹ . |
| Ref035 + ZP | <ul style="list-style-type: none"> Grande potencial de redução da intensidade de corrosão Valores de intensidade de corrosão melhores que a região de controle, porém ainda consideráveis | Pode ser uma opção. |

A Tabela 5-5 mostra o resumo das principais características do comportamento eletroquímico dos sistemas de reparo estudados. Vale ressaltar que devido ao pouco tempo disponível para o estudo, as informações obtidas, bem como o parecer elaborado, referem-se ao desempenho potencial desses materiais. O presente estudo deve ter prosseguimento por mais alguns anos a fim de se obter dados mais concretos com relação ao desempenho eletroquímico real destes sistemas.

²¹ Deve-se esclarecer melhor a origem da melhora nos parâmetros eletroquímicos apresentada na área externa ao reparo, como discutido no item 5.3.4.

6 Conclusões

6.1 Conclusões propriamente ditas

Durante a realização desta tese, várias conclusões puderam ser obtidas a cerca dos materiais e métodos de ensaio empregados. Com relação aos resultados obtidos nos ensaios de campo, estes nos permitem traçar as seguintes conclusões:

- O método de avaliação de sistemas de reparo em campo se mostrou bastante promissor. Foi possível se obter tendências sobre o comportamento eletroquímico dos reparos, criando subsídios para a seleção do sistema mais adequado à situação em análise. O método, não só pode, como deve ter seu uso expandido para avaliação de outros sistemas de reparo;*
- O tempo de duração do ensaio em campo se mostrou limitado, sendo recomendável o prosseguimento dos estudos a fim de se obter parâmetros mais definitivos acerca do comportamento eletroquímico destes sistemas;*
- Dos ensaios para avaliação dos parâmetros eletroquímicos em campo, o potencial de corrosão apresentou boa recorrência estatística. No entanto, seu uso deve ser feito por profissionais capacitados e experientes, capazes de interpretar corretamente seus resultados. A falta de experiência na interpretação destes resultados pode acarretar no falso diagnóstico do estado eletroquímico da armadura, levando a avaliações incorretas dos sistemas de reparo;*
- O ensaio de velocidade de corrosão através do método do pulso galvanostático apresentou resultados bastante satisfatórios, apesar da maior dispersão nos resultados quando comparado ao ensaio de potencial de corrosão. No entanto, os valores apresentados neste ensaio diferem dos usuais para a medida de velocidade de corrosão através da avaliação da resistência de polarização linear. O seu uso qualitativo se mostrou muito satisfatório, porém avaliações quantitativas devem ser melhor estudadas;*

Já com relação aos ensaios realizados em laboratório podemos obter as seguintes conclusões:

- Os ensaios de caracterização física dos materiais de reparo apresentam uma boa correlação com o seu comportamento eletroquímico.*

- *A resistência à compressão, apesar de ser bastante utilizada como dado de referência para a avaliação e seleção de sistemas de reparo (argamassas e grautes), não é o único parâmetro que deve ser observado.*
- *O ensaio de absorção capilar apresenta boa correlação com o comportamento eletroquímico dos sistemas de reparo (principalmente das argamassas) e por se tratar de um ensaio bastante simples e rápido é extremamente recomendado para a avaliação e seleção destes sistemas;*
- *A espectroscopia de impedância eletroquímica apresentou resultados fundamentais para a avaliação do comportamento eletroquímico das argamassas. Entre outras coisas, os resultados permitiram observar a hidratação das argamassas ao longo do tempo de ensaio.*
- *O ciclo de molhamento e secagem utilizado nesta pesquisa para o ensaio de corrosão em laboratório não é o mais indicado para avaliação de comportamento eletroquímico dos materiais e sistemas de reparo, devendo ser pesquisado um novo ciclo mais agressivo, capaz de apresentar resultados satisfatórios em períodos mais curtos;*
- *O método de contaminação prévia dos materiais com CaCl_2 se mostrou bastante satisfatório, oferecendo resultados significativos em tempo bastante reduzido. No entanto alguns sistemas devem ser analisados com cautela, como, por exemplo, no caso do inibidor de corrosão por aspersão utilizado neste estudo, onde parte do seu desempenho, segundo o fabricante, está atribuído à sua capacidade de reter o ingresso de agentes agressivos (situação distorcida pelo método).*

Com relação aos materiais estudados pode-se concluir:

- *As argamassas industrializadas, quando analisadas isoladamente, isto é, sem ser em um reparo, apresentaram comportamento eletroquímico bastante superior à argamassa de referência. No entanto esse comportamento se altera quando o reparo no protótipo é avaliado. Neste caso específico, a argamassa industrializada com inibidor apresenta o melhor desempenho entre os sistemas estudados. A argamassa de referência apresenta desempenho satisfatório e a argamassa industrializada sem inibidor, mostra-se inadequada para essa situação específica de aplicação;*

- *O sistema de proteção catódica através do primer rico em zinco não apresentou o resultado esperado, que mostrasse o efeito de polarização e a efetiva ação da proteção catódica. Apesar disto, o sistema como um todo apresentou resultado satisfatório em campo, muito provavelmente fruto da argamassa de referência que é usada em conjunto;*
- *O inibidor de corrosão por aspersão mostrou-se inadequado para situações onde ocorre a carbonatação. Tanto em campo, quanto em laboratório, os resultados mostram que nessa situação (pH mais baixo – estrutura carbonatada) o inibidor em questão provoca aumento na intensidade de corrosão.*

6.2 Transferência dos resultados ao meio

Esta etapa é fundamental em um projeto de pesquisa, uma vez que o mais importante é que o conhecimento gerado através desta pesquisa, seja disseminado para todo o meio técnico. Assim, durante o período de realização deste trabalho o pesquisador teve a oportunidade de transferir estes conhecimentos para a sociedade de diversas formas.

Durante o período de realização da presente pesquisa, foram ministradas palestras sobre o tema, podendo-se destacar: curso de Patologia e Recuperação de Estruturas realizado no Instituto de Engenharia, em São Paulo; e durante o evento de lançamento do livro “Manual de Reparo e Recuperação de Estruturas” da Red Rehabilitar.

Outra forma bastante utilizada para a transferência dos conhecimento foi através de aulas de graduação e pós-graduação ministradas na Universidade de São Paulo, onde o pesquisador participou do programa PAE (Programa de Aperfeiçoamento do Ensino), tendo colaborado como professor assistente na disciplina PCC 2526 – Patologia e Recuperação das Estruturas de Concreto. Foram ministradas também aulas em cursos de especialização na UPE – Universidade de Pernambuco, em Recife-PE.

Durante boa parte do tempo de realização do presente trabalho, o pesquisador esteve envolvido diretamente com alunos de graduação que realizavam estudos e pesquisas no laboratório de corrosão da EPUSP, tendo a oportunidade de co-orientar um trabalho de iniciação científica nesta instituição. Desse trabalho surgiu um artigo publicado no Simpósio de Iniciação Científica da USP (MACHADO, G. M.; GROCHOSKI, M.; HELENE, P. Avaliação em Laboratório do Comportamento de Sistemas de Reparo para Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras. In: 13 Simpósio

Internacional de Iniciação Científica, 2005, São Carlos. 13 Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2005.).

Outra forma de divulgação dos conhecimentos adquiridos foi a participação em comitês técnicos internacionais e nacionais. No exterior, o pesquisador é membro da Red Rehabilitar (grupo de pesquisa Ibero-Americano no âmbito do programa CYTED) e do comitê de durabilidade do CEB-fib (Federation Internationale du Beton). No Brasil, participa do comitê de durabilidade do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto), do qual é atualmente secretário.

Foram também publicados diversos artigos técnicos e científicos durante o tempo de realização da tese. Esses artigos envolvem diretamente o tema da presente pesquisa, bem como temas correlatos, que são de suma importância no completo entendimento do tema. A lista abaixo apresenta a relação destes artigos.

- *HELENE, P.; GROCHOSKI, M. Evolución de los Criterios de Introducción de la Durabilidad en el Diseño de Estructuras de Concreto.. In: Raymundo Rivera - International Symposium on Durability of Concrete, 2005, Monterrey N. L.. Raymundo Rivera - International Symposium on Durability of Concrete. San Nicolás de los Garza, N. L: Imprenta Universitaria de La universidad Autónoma de Nuevo León, 2005. p. 18-43.*
- *CASTRO-BORGES, P.; HELENE, P.; PEREIRA, F.; GROCHOSKI, M. Manual on rehabilitation of concrete structures REHABILITAR Network XV.F of the Iberoamerican Program for Science and Technology (CYTED). In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofit, 2005, Cape Town, South Africa, 2005.*
- *SEILER, P.; GRANATO, J. E.; GROCHOSKI, M. Durabilidade de Concreto Uma visão dos sistemas atuais contra a corrosão de armaduras.. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003, São Paulo. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.*
- *MACHADO, G. M.; GROCHOSKI, M.; HELENE, P. Avaliação em Laboratório do Comportamento de Sistemas de Reparo para Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras. In: 13 Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2005, São Carlos. 13 Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2005.*
- *GROCHOSKI, M.; GRULLÓN, M.; HELENE, P. Inspeção no complexo das químicas da USP: potencial de eletrodo vs. resistividade elétrica. In: IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007, Quito. Anais do IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007. v. único*
- *MEDEIROS, M.; GROCHOSKI, M.; Marqueses: por que algumas caem? Revista IBRACON, v. 46, p. 95-103, 2007.*
- *HELENE, P.; GROCHOSKI, M.; SBRIGHI NETO, C. Fundações em concreto: projeto, execução e patologia. In: V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2004, São*

Paulo. V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2004. v. 1. p. 553-579.

- GROCHOSKI, M.; TULA, L.; HELENE, P. Contribuição ao estudo de aditivos à base de éter de polipropileno glicol e látex de estireno-butadieno no combate à retração. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003, São Paulo. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.
- GROCHOSKI, M.; GRULLÓN, M.; FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. Influência da Fibra de Polipropileno na Retração de Argamassas.. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, 2003, Vitória - ES. 45º Congresso Brasileiro do Concreto, 2003.
- GROCHOSKI, M.; GRULLÓN, M.; HELENE, P.; TULA, L. Pueden los agentes reductores de retracción actuar en morteros de alta resistencia?. In: 15ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón., 2003, Santa Fé - Argentina. 15ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón., 2003.
- MEDEIROS, M. H. F.; GROCHOSKI, M.; HELENE, P. Influência da adição de metacaulim no controle da reação álcali-agregado (RAA) do concreto. In: IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007, Quito. Anais do IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007. v. único. p. 1-8.
- GROCHOSKI, M.; MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. O efeito do metacaulim na reação entre módulo de deformação e resistência à compressão de concretos. In: IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007, Quito. Anais do IX Congresso Latinoamericano de Patologia, 2007. v. único. p. 1-9.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, várias indagações a respeito de temas que fogem do escopo deste surgiram. Estas indagações sugerem e propõem novos temas que poderão ser desenvolvidos futuramente em outros trabalhos. Destas indagações pode-se relacionar as seguintes propostas para futuros trabalhos:

- Avaliação do método do pulso galvanostático sob o ponto de vista da análise quantitativa dos seus dados;
- Comparação de eficiência em campo entre os métodos de polarização linear (GECORR) e pulso galvanostático (GalvaPulse);
- Avaliação em laboratório da influência da temperatura e umidade nos diversos sistemas de reparo;
- Estudo de um novo método de envelhecimento, que seja efetivo para materiais de reparo com baixo índice de absorção/difusão;

7 Referências Bibliográficas

- AL-ZARAHNI, M. M. et al. Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials. **Cement & Concrete Composites**, 25 (2003) P.527–537
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. Standard test method for field measurement of resistivity using the Wenner four-electrode method. ASTM G 57-95. Philadelphia, In: Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02, 1998.
- ____; Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C 876-91. Philadelphia, In: Annual Book of ASTM Standards, 1999.
- ____; Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM C 348-97. Philadelphia, USA, (1997).
- ____; Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). ASTM C 349-97. Philadelphia, USA, (1997).
- ____; Standard Test Method For Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. ASTM C 157-93. Philadelphia, USA, (1993).
- ____; Standard practice for preparing, cleaning and evaluating test specimens. ASTM G1-90. Philadelphia, 1990. (Reapproved 1994).
- ____; Standard Test Method For Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration ASTM C 1202-07. Philadelphia, USA, (2007).
- ANDRADE, C. Monitoring Techniques. In: P. Schiessl, ed. Corrosion of steel in concrete. RILEM Report of Technical Committee 60-CSC. London, Chapman & Hall, p. 79-94, 1988.
- ANDRADE, C.; GONZALEZ, 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.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Ed. PINI, 1992.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica.** Porto Alegre-RS, 1994. 120 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ARAÚJO, A. **Estudo para o estabelecimento de metodologia de avaliação de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos.** São Paulo. 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

ARAÚJO, F. W. C **Contribuição à Viabilização da Técnica de Realcalinização do Concreto Carbonatado Através da Absorção/Difusão de Soluções Alcalinas.** Goiânia, 2004. 204 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS; NBR 12654/1992 **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.**

___; NBR 5738/1994 **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.**

___; NBR 5739/1994 **Concreto – Ensaio de resistência a compressão de corpos-de-prova cilíndricos.**

___; NBR 7222/1994 **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.**

___; NBR 8522/1984 **Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – Tensão-deformação.**

___; NBR 9778/1995 **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.**

___; NBR 9779/1995 **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.**

___; NBR 9833/1987 **Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico.**

___; NBR 13276 /1995 **Argamassa para Assentamento em Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos - Determinação do Teor de Água para Obtenção do Índice de Consistência-Padrão - Método de Ensaio.**

- BABOIAN, R. "Corrosion – a problem of international importance". **Corrosion Testing and evaluation: Silver anniversary volume ASTM STP 1000**, Philadelphia, p. 7-13, 1990.
- BASHEER, L.; CLELAND, D. J.; LONG, A. E. Protecion provided by surface treatments against chloride induced corrosion. **Materials and Structures**, v. 31, p. 459-464. , 1998.
- BASTOS, E. J. O. **Propedêutica para o Estudo da Corosão de Armaduras em Estruturas de Concreto**. São Paulo. 2005. 272 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo-SP, 1995. 236p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- BERTOLO B., R. S. **Contribuição ao Desenvolvimento de Programas sobre a Durabilidade de Reparos de Argamassa, em Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras**. São Paulo. 2006. 237 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BRITO, N. E. D. **Avaliação do grau de corrosão das armaduras em estruturas com concreto carbonatado**. São Paulo. 1997. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BROCKRIS, J. O' M & SUBRAMANYAN, P. K. Contribution to the electrochemical basis of the stability of metals – review article. **Corrosion Science**. V. 10, p. 435-466, 1970.
- BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of Steel in Concrete. Understanding, investigation and repair**. London: E & FN SPON, 1997. p. 104 e 105.
- BROOMFIELD, J. P.; DAVIES, K.; HLADKY, K. The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, 24 (2002) P.27–34.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto armado**. São Paulo: Pini, 1997.
- CORTEC Laboratories. **Evaluation of the Corrosion inhibiting properties of MCIs vs. Protectosil CIT**. 7p. Disponível em: <http://www.cortecvci.com/Publications/Reports/05-107-1425.pdf> Acesso em: 08 ago. 2006.

- CUSSON, D.; QIAN, S.; HOOGEVEEN, T. "Field Performance of Concrete Repair Systems on Highway Bridge." *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 5, pp.366-373. Setembro-Outubro, 2006
- DEVALAPURA, K. R.; KAMEL, M. R.; ARUMUGASAAMY, P. Nondestructive techniques for corrosion evaluation of steel in concrete. In: *International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*. July, 1994. **Proceedings**. Edited by R. N. Swamy. University of Sheffield
- ELSENER, B. *Elektrochemische Methoden zur Bauwerksüberwachung, Zerstörungsfreie Prüfung an Stahlbetonbauwerken, SIA Dokumentation D020*, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 1988, 27.
- ELSENER, B. ET AL. **Assessment of Reinforcement Corrosion by Means of Galvanostatic Pulse Technique**. In: *Proceedings of International Conference "Repair of Concrete Structures"*. Slovaer, Norway, 1997.10p.
- FERREIRA, A. A.; STOLFO, R. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da penetração de íons cloreto em concreto com adições minerais. In: *1st International Congress of Concrete Technology, Buenos Aires*, June 1-4, 1998. **Anais**. p. 351-364.
- FIGUEIREDO, E. et al. *Corrosion inhibitors behavior of NaNO₂ and amine-based products in the prevention and control of corrosion in reinforced concrete. Rehabilitation of Corrosion Damaged Infrastructures*, NACE Internacional, 1998.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimento para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo. 1994. 423p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 1987.
- FRØLUND, T.; JENSEN, F. M.; BASSLER, R **Determination of reinforcement corrosion rate by means of the galvanostatic pulse technique**. *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona*, 14-17 July, 2002
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Almeida Neves ,1987. 372 p.

- GEOCISA. *Medida de la velocidad de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón. Geocisa-Auscultación de Estructuras.* Coslada, Madrid: 1990.
- GONZÁLEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. *Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. Materials and Structures.* Vol. 29 January-February, 1996a, p. 40-46.
- GONZÁLEZ, J. A. *Control de la corrosion: estudio y medida por tecnicas electroquimicas.* Ed. CSIC. Madrid, 1989. Capitulo V.
- GONZÁLEZ, J. A.; OTERO, E.; FELIU, S.; BAUTISTA, A.; RAMÍREZ, E. RODRÍGUEZ, P.; LÓPEZ, W. *Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures. Magazine of Concrete Research,* Vol. 50, Nº 3, p. 189-199, 1998.
- GOWERS, K. R. & MILLARD, S. G. *Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. ACI Materials Journal.* p. 536-541, Sept/Oct,1999.
- GRAN, H. C. *Measurement of chlorides in concrete: an evaluation of three different analysis techniques.* Norwegian Building Research Institute (NBI), 21 p., 1992.
- GRULLÓN PEÑA, M. R. *Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto.* São Paulo. 2004. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- GU, P.; XIE, P.; BEAUDOIN, J. J.; BROUSSEAU, B. R. *AC impedance spectroscopy: I. A new equivalent circuit model for hydrated portland cement paste. Cemente and Concrete Research,* 22 (1992) 833± 840.
- HELENE, P. *Corrosão em armaduras para concreto armado.* São Paulo, PINI, IPT, 1986. 45p.
- HELENE, P. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.* São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.; PEREIRA, F. (Org.). *Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto.* São Paulo: Cargraphics, 2007, 598p.

- JACOB, T.; HERMANN, K. *Protección de las superficies de concreto: Impregnaciones hidrófobas. Construcción y Tecnología*, p. 17-23, 1997.
- JOHN, D. G. *Corrosion of steel in concrete*. Manchester: Capcis Ltk, 1996.
- KLINGHOFFER, O. *Nordic Concrete Research*, Publication No. 16 (1995) 1
- LACERDA, C. S. *Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos*. São Paulo. 2005. 258 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LIMA, M.G. *Inibidores de corrosão: avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos*. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. p. 34-36
- MARTIN, B. L. e KOVATCH, W. A. *Cathodic protection for viaduct: ACI compilation. Repair and rehabilitation of concrete structures*. Detroit, Mich, 1989. p. 67.
- MCCARTER, W. J.; BROUSSEAU, R. *The AC response of hardened cement paste. Cemente and Concrete Research*, 20 (1990) 891± 900.
- MEDEIROS, M. H. F. ; HELENE, P. . *Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete. Materials and Structures*, v. 41, p. 59-71, 2007.
- MEDEIROS, M. H. F. *Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras por Carbonatação: Comparação de Argamassas de Reparo quanto a Proteção do Aço*. São Paulo. 2002 193 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- MEDEIROS, M.; GROCHOSKI, M.; *Marquises: por que algumas caem? Revista IBRACON*, v. 46, p. 95-103, 2007.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994. p. 128, 159, 169.
- MIETZ, J.; ISECKE, B. *Electrochemical Potential Monitoring on Reinforced Concrete Structures using Anodic Pulse Technique*, in: *Non destructive Testing in Civil Engineering*. Ed. H. Bungey, The British Institute of NDT, 1993, 2, 567.

- MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de Cloretos para Reabilitação de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão de Armaduras.** São Paulo. 2002. 211 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a La carbonatacion y La penetracion de cloruros em estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante La técnica de resistência de polarizacion.** Madrid, 1992. Tese (doutorado). Universidad Politecnica de Madrid. 371p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.
- NINCE, A. A. & CLIMACO, J. C. T. S. **Levantamento de Dados sobre Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste do Brasil.** In: **International Congress on High – Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures.** Proceedings. Florianópolis. jun. 1996. p. 414-424.
- OHAMA, Y. **Polymer-based materials for repair and improved durability: Japanese experience.** *Construction and Buildings Materials*, v. 10, n. 1, 1996. Pp. 77-82.
- OKBA, S. H.; EL-DIEB, A. S.; REDA, M. M. **Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete (LMC).** *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 6, 1997. P. 861-868.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas.** São Paulo, v. 1, 1ª ed., IPT, 1993.
- QIAN, S.; CUSSON, D. **“Electrochemical evaluation of the performance of corrosion-inhibiting systems in concrete bridges.”** *Cement and Concrete Composites* 26 (2004) pp.217–233.
- RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle.** hemus, s.d.
- RED REHABILITAR. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto.** Editores: P. Helene & F. Pereira. São Paulo, 2003.
- RINCÓN, O.; RINCÓN, A.; MÓRON, O.; VILLASMIL, M.; FERNÁNDEZ, R. **Use of epoxy portland cement mortars to repair reinforced concrete structures.** *Materials Performance*, Vol. 35, Nº 10, p. 55-59, 1996.

- RILEM. "Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion." **Materials and Structures**, 1994: 415-436.
- RINCÓN, I. T. et. al. **Manual de Inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado**. Rio de Janeiro, CYTED, 1998. p. 13.
- RODRÍGUEZ, J. S; ORTEGA, L. M. B. & GARCÍA, A. M. G. Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón, mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU – 401. **Hormigon y Acero**, 4º trimestre, 1993. p. 79-91.
- RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J. A. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 46, Nº 167, 1994. p. 81-90.
- SCHIESSEL, P. Repair Strategies for Concrete Structures Damaged by Steel Corrosion, rehabilitation of Concrete Structures. **Proceedings of international RILEM/CSIRO/ACRA Conference**, Maelbourne, Australia. 1992. p. 1-21.
- SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. São Carlos. 2006. 220 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical Polarization. 1. a Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. **Journal of the Electrochemical Society**, Vol. 104, No. 1, p. 56-63, 1957.
- UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structural Engineering International**, v. 4, p. 359-366, 2007.
-

ANEXO

A. Protótipo estrutural

A.1 Preparação da estrutura



Figura A-1 – Corte do protótipo estrutural para fins de sua adequação ao espaço físico a ele destinado.



Figura A-2 – Detalhe da execução da limpeza do protótipo estrutural com jato d'água quente sob pressão para remoção de fuligem, mofo, concreto destacado etc, deforma a melhorar a visualização das áreas deterioradas.



Figura A-3 – Foto do protótipo estrutural antes (a) e depois (b) da limpeza com água sob pressão.

A.2 Recuperação da estrutura



Figura A-4 – Limitação da área de reparo com disco de corte.



Figura A-5 – Remoção do concreto deteriorado.



Figura A-6 – Situação ilustrativa da área de reparo após remoção do concreto deteriorado. Detalhe para o espaçamento sob a armadura, necessário para a correta execução do reparo.



Figura A-7 – Limpeza das barras com jato de areia seca.



Figura A-8 – Lavagem da área com água a 80°C para a remoção dos cloretos.



Figura A-9 – Aplicação dos sistemas de reparo constituídos por primers (quando fosse o caso).



Figura A-10 – Aplicação da argamassa de reparo com as mãos.



Figura A-11 – Cura úmida com auxílio de manta geotêxtil.

B. Laboratório

B.1 Avaliação visual das armaduras dos CPs utilizados na 1ª Fase

B.1.1 Ref029



Figura B-1 – CP22



Figura B-2 – CP32



Figura B-3 – CP37

B.1.2 A.I. s/ Inib.



Figura B-4 – CP18



Figura B-5 – CP55



Figura B-6 – CP72

B.1.3 A.l. c/ Inib.



Figura B-7 – CP74



Figura B-8 – CP77

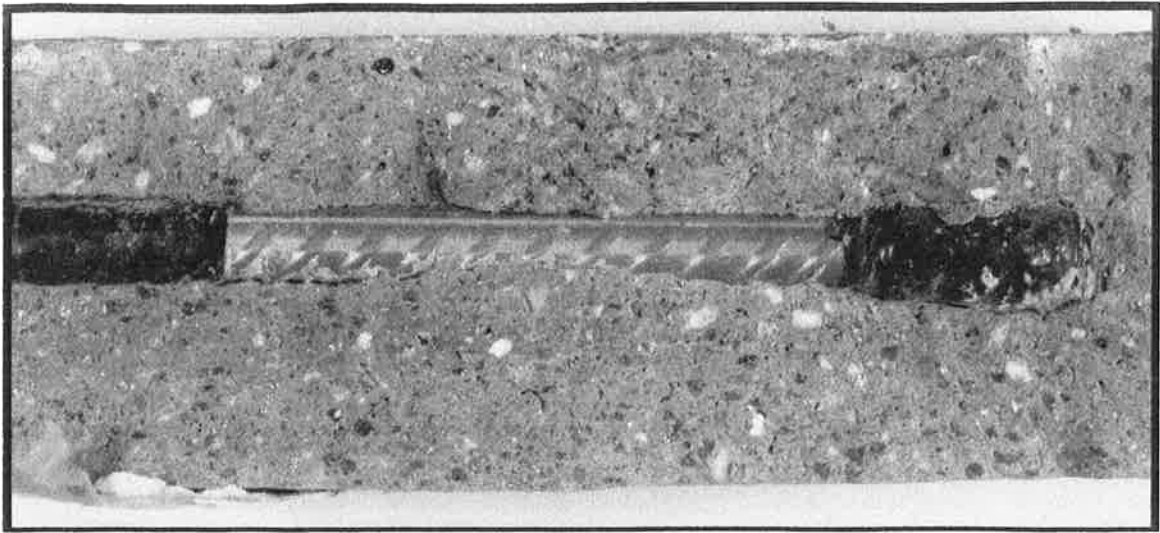


Figura B-9 - CP97