



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA INDUÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS EM CONCRETOS
ARMADOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO A PARTIR DE
ENSAIOS ACELERADOS**

PABLO RAMON RODRIGUES FERREIRA

Recife, 2015.

PABLO RAMON RODRIGUES FERREIRA

**ANÁLISE DA INDUÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS EM CONCRETOS
ARMADOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO A PARTIR DE
ENSAIOS ACELERADOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Co-orientador:

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira

Recife, 2015.

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F383a Ferreira, Pablo Ramon Rodrigues.
Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados
com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados /
Pablo Ramon Rodrigues Ferreira. - Recife: O Autor, 2015.
229 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Coorientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto. 3. Resíduo de tijolo.
4. Durabilidade. 5. Corrosão por cloretos. I. Carneiro, Arnaldo Manoel
Pereira. (Orientador). II. Meira, Gibson Rocha. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-143



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DA INDUÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS EM CONCRETOS
ARMADOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO A PARTIR DE
ENSAIOS ACELERADOS**

defendida por

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

Considera o candidato APROVADO

Recife, 27 de fevereiro de 2015.

Orientadores:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira – IFPB
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Givanildo Alves Azeredo – UFPB
(examinador externo)

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto – UFPE
(examinador interno)

*A Mãe Rainha três vezes admirável de Schoenstatt, pelas incomparáveis graças.
A Zefinha e Esmeraldina Ferreira, por serem meu porto seguro.*

AGRADECIMENTOS

É com grande fervor emocional que findo mais uma etapa de minha singela vida de iniciante a pesquisador. Uma verdadeira realização pessoal e profissional que demonstra o tanto que o conhecimento e a ética profissional adquiridos no trajeto são importantes para o crescimento pessoal de um ser humano. Entretanto, tal orgulho e satisfação, na realização de um sonho, não foram atingidos sozinho, e sim, por um grupo de pessoas e instituições que acreditaram no meu potencial para desenvolver este trabalho. Aqui meus sinceros agradecimentos aqueles envolvidos diretamente na conquista desta etapa.

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu pai **Pedro Rodrigues**, por tantos anos de empenho na formação profissional e no caráter meu e de minha irmã **Rayane Kadja**;

À minha mãe **Esmeraldina Ferreira**, por sempre acreditar no potencial de seus filhos e, assim, encarar a dificuldade da vida para dar o bem mais precioso a sua prole: amor, carinho e estudo;

À minha madrinha **Zefinha Ferreira** (*in memoriam*), que foi presente durante toda minha infância e adolescência, ajudando minha mãe na criação. Sinto sua falta!

À minha irmã **Rayane Kadja**, que ajudou diretamente nesse trabalho para a confecção dos corpos de prova utilizados nesse trabalho, mesmo na dificuldade da universidade, ela arrumou um “tempinho” para colaborar, fica meu apelo para que faça seu mestrado e continue estudando;

À minha namorada **Fernanda Rayanny**, que me incentivou nos momentos mais difíceis desta pesquisas, momento esse que todo pós-graduando acha que não vai conseguir. Quem já passou por tal, sabe o que estou falando;

Ao meu cunhado **Leo Constantino**, sinônimo sempre de otimismo e parceria;

Ao meu Orientador Prof. **Gibson Meira**, principal formador da minha vida de iniciante a pesquisa científica, ao qual, dedica-me esforços desde 2007, aonde era estudante do segundo anos de Tecnologia no IFPB. Um orientador de verdade, que sempre teve presente nas dificuldades deste trabalho, direcionando e em muitas vezes pondo a “mão na massa”;

Ao meu 2^a orientador Prof. **Arnaldo Carneiro**, que acreditou nas minhas referências, me recebeu muito bem na UFPE, me ajudou nos trâmites burocráticos do programa de pós-graduação e na auxiliou na realização de ensaios;

Ao Grupo de pesquisa de Gmat do IFPB e, principalmente, as minhas parceiras de trabalho no laboratório de pesquisa **Valdith Lopes** e **Evelyne Emanuelle**, no qual compartilhamos nossas dúvidas e angústia na obtenção, cada qual de seu título;

A aluna de Tecnologia em Construção de Edifícios **Débora Dias**, braço direito em grande parte do desenvolvimento deste trabalho, aluna de grande potencial;

Aos meus parceiros de pós-graduação na UFPE, **Leandro Santus** e **Marcela Correia**;

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, no nome da Pró-reitora de pesquisa e pós-graduação Prof. **Nelma Araujo**, pelo apoio no uso dos laboratórios e espaços de tal instituição e pelo esforço na batalha de ampliar essa ajuda a mim e meus colegas do laboratório. Ainda no IFPB, aos meus colegas de trabalho do setor de fiscalização de obras (**Gevânio, Gilvan, Hillner, Joabe, José Carlos, Naiza, Renan, Sergio e Vinicius**) pela força e compreensão nos momentos conturbados;

A Universidade Federal da Paraíba, no nome dos Profs. **Givanildo Azeredo** e **Normando Perazzo**, que mesmo após o término de meus estudos na universidade, me atendeu incrivelmente bem na realização de alguns ensaios no LABEME;

A FINEP, por ser a agência nacional de fomento deste trabalho.

Obrigado meu pai e meu bom Jesus, por que se eu tenho tudo nessa vida, é pela graça e misericórdia de vossa bondade.

RESUMO

Concretos com incorporação de resíduos da indústria cerâmica vermelha apresentam-se como uma alternativa atrativa e sustentável de aplicação. Com o intuito de analisar o comportamento de concretos armados com substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM) frente à corrosão por cloretos, foram moldados corpos de prova (CPs) de 80x80x80 mm com barras de aço CA-50. As barras foram previamente limpas por polimento mecânico ou por ação química. As faixas de substituição do cimento foram de 0, 10 e 30% e a relação água/aglomerante de 0,55. Após a desmoldagem, os CPs foram submetidos à cura em câmara úmida por 7 ou 28 dias. Ao completarem 90 dias de idade, cada CP foi submetido a um dos dois tipos de ensaio acelerado de corrosão por cloretos: eletromigração e ciclos de imersão e secagem, com solução de 1 molar de NaCl. Durante todo este período, as barras foram monitoradas através de ensaios de resistência de polarização. Uma vez desencadeada a corrosão, perfis de cloretos livres e totais eram obtidos. Os resultados mostram que o teor crítico de cloretos tende a: aumentar sutilmente com o tempo de cura, motivado pelo aumento no grau de hidratação; diminuir com a substituição de cimento por RTM, motivado pela redução do pH no entorno da armadura; e a aumentar com a preferência pela limpeza química, motivada pela melhor formação e estabilidade da película passivadora.

Palavras-chave: Concreto. Resíduo de tijolo. Durabilidade. Corrosão por cloretos.

ABSTRACT

Analysis of induction of the corrosion by chlorides in reinforced concretes with addition of ground clay bricks waste from accelerated testing.

Concrete with red ceramic industry waste is an attractive and sustainable alternative of use. Aiming to analyse the behaviour of reinforced concrete with replacement of cement by ground clay bricks waste (GCBW) in relation to reinforcement corrosion by chlorides, reinforced concrete specimens with 80x80x80 mm were cast with CA-50 steel bars. Before concreting, the steel bars were cleaned by mechanical polishing or chemical action. The replacements of cement were set at 0%, 10% and 30% and the water / binder ratio at 0.55. Being demolded, the specimens were subjected to curing in a moist chamber for 7 or 28 days. With 90 days of age, each specimen was subjected to one of the two kinds of chlorides accelerated corrosion test: electromigration and wetting and drying cycles, in 1 molar sodium chloride solution. Throughout this period, the bars were monitored by means of linear polarization resistance tests. Once corrosion is triggered, total and free chloride profiles were obtained for each specimen. The results show that the critical chloride content tends: to increase lightly with curing time, due to the increase in the hydration degree; to decrease with cement replacement by GCBW, due to reduced pH near the reinforcement; and to increase with the preference for cleaning by chemical action due to better training and stability of the passive film.

Keywords: Concrete. Clay bricks waste. Durability. Chloride corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 2.1 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico (Fe – H₂O; 25°C). Fonte: POURBAIX (1974).</i>	35
<i>Figura 2.2 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado. Fonte: CASCUDO (1997).</i>	37
<i>Figura 2.3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti. Fonte: TUUTTI (1982).</i>	39
<i>Figura 2.4 - Esquema do complexo transitório. Fonte: TREADAWAY (1988)</i>	40
<i>Figura 2.5 – Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-água com Cl⁻ (335 ppm). Fonte: POURBAIX (1987).</i>	41
<i>Figura 2.6 – Forma de penetração de íons cloretos por absorção capilar. Fonte: HELENE (1993).</i>	42
<i>Figura 2.7 - Forma de penetração de íons cloretos por permeabilidade. Fonte: HELENE (1993).</i>	43
<i>Figura 2.8 - Forma de penetração de íons cloretos por migração iônica. Fonte: TREJO et al. (2009) adaptado.</i>	45
<i>Figura 2.9 - Forma de penetração de íons cloretos por difusão iônica. Fonte: HELENE (1993).</i>	46
<i>Figura 2.10 – Concentração superficial em função do tempo de exposição, do ambiente de exposição e do tipo de traço. Fonte: COSTA & APPLETON (2007).</i>	49
<i>Figura 2.11 – Coeficiente de difusão em função do tempo de exposição, do ambiente de exposição e do tipo de traço. Fonte: COSTA & APPLETON (2007).</i>	50
<i>Figura 2.12 – Influência do tipo de cimento e da relação água/cimento sobre o coeficiente de difusão. Fonte: RIZZON et al. (2006).</i>	51
<i>Figura 2.13 – Perfil de cloretos livres clássicos em função da profundidade, para concretos submetidos a ciclos de imersão e secagem. Fonte: MALHEIROS et al. (2014).</i>	52
<i>Figura 2.14 - Perfil de cloretos totais de duas zonas para concretos em zona de respingo para várias relações a/c (a) e para concretos em exposição em zonas submersas, de respingo e de atmosfera marinha (b). Fonte: SANDBERG et al. (1998).</i>	53
<i>Figura 2.15 - Perfil de cloretos totais de duas zonas para diferentes tipos de concreto (a) e para concretos em função do tempo de exposição a ciclos de imersão e secagem em docas (b). Fonte: COSTA & APPLETON (2007).</i>	54
<i>Figura 2.16 – Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário internacional. Fonte: ANGST & VENNESLAND (2009).</i>	56
<i>Figura 2.17 - Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário nacional. Baseado na bibliografia utilizada nesse trabalho.</i>	56
<i>Figura 2.18 – Características da corrosão por adição a massa: (a) Concentração de cloretos na solução do poro versus tempo de hidratação para pasta de cimento com relação água/cimento de 0,5, contaminado com 1% de NaCl. Fonte: ARYA et al. (1994). (b) detalhe das barras após 55 dias de exposição a concretos contaminados com 3% de NaCl. Fonte: LI et al. (2011).</i>	57
<i>Figura 2.19 – Configuração de ensaio de imersão e secagem - (a) imersão parcial em solução contendo cloretos, (b) imersão total em solução contendo cloretos, (c) tipos de secagem.</i>	59
<i>Figura 2.20 – Perfil de cloretos em concretos submetidos a ensaio de ciclos de imersão e secagem. Fonte: POLDER & PEELEN (2002).</i>	60
<i>Figura 2.21 - Configurações de ensaio por migração iônica - (a) método de indução usando a barra como um dos pólos. Fonte: CABRERA (1996), (b) método de indução usando malhas como pólo. Fonte: CASTELLOTE et al. (2002) (c) ACT test. Fonte: TREJO & MILLER (2003).</i>	61
<i>Figura 2.22 – Perfil de cloretos para o ensaio de eletomigração. Fonte: CASTELLOTE et al. (2002).</i>	63

<i>Figura 2.23 - Configurações de ensaio de “Ponding Test”. (a) AASHTO T259 (1980) setup test adaptado. (b) Método de indução com dois reservatórios. Fonte: JOUKOSKI et al. (2004) (c) ASTM G-109 - Modificada (2007) setup test.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 2.24 - Perfil de cloretos para o ensaio de “Ponding Test”. Fonte: CHIANG et al. (2007).</i>	<i>66</i>
<i>Figura 2.25 - Configurações de ensaio de névoa salina - desenho esquemático (a), detalhe da câmara de névoa salina (b).</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.26 - Perfil de cloretos para o ensaio de névoa salina. Fonte: MONTEIRO (2002).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 2.27 – Definição de teor crítico de cloretos baseado no modelo de Tutti (1982). Fonte: ANGST et al. (2009).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.28 – Influência da temperatura (a) e da umidade relativa (b) sobre perfis de cloretos. Fonte: OH et al. (2006).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.29 - Esquema de conexão para ensaio de Potencial de corrosão. Fonte: ELSENER et al. (2003).</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.30 - Medidas de Potencial afetadas pelo cobrimento de concreto, para um eletrodo de Cu/CuSO₄. Fonte: CASCUDO (1997).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.31 –Curva de polarização (a). Fonte: WOLYNEC (2003). Região linear da curva de polarização (b). Fonte: ANDRADE & ALONSO (2004). [Ee: potencial de corrosão livre].....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 2.32 - Esquema de conexão para ensaio de Rp. Fonte: CASCUDO (1997).</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.1 - Distribuição granulométrica dos agregados.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.2 - Distribuição Granulométrica do Cimento CPV – ARI.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 3.3 - Distribuição Granulométrica do RTM.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.4 – Características geométricas dos corpos de prova (medidas em mm).</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.5 – Detalhes da confecções dos CPs – (a) barras preparadas para moldagem, (b) moldagem dos CPs, (c) CPs prontos pra ensaio.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 3.6 - Sequência de limpeza mecânica das barras - (a) barras cortadas e chanfradas antes da limpeza, (b) limpeza por escovação mecânica com cerdas metálicas, (c) barras envolvidas em fita adesiva de PVC.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.7 - Sequência de limpeza química das barras - (a) barras cortadas e chanfradas antes da limpeza, (b) barras em solução de ácido clorídrico e de hexametilenotetramina, (c) barras em escovação, (d) barras em acetona, (e) processo de secagem das barras, (f) barras envolvidas em fita adesiva de PVC.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.8 - Barras após limpeza.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 3.9 – Configuração de ensaio por imersão e secagem – (a) secagem em estufa e (b) imersão total em solução salina.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 3.10 – Configuração de ensaio por eletromigração - (a) desenho esquemático, (b) realização do ensaio.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 3.11 - Arranjo para as medidas de resistência à polarização – (a) visão geral, (a) detalhe do eletrodo de referência.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 3.12 – Detalhamento da pulverização e da titulação – (a) retirada da barra, (b) corte das camadas, (c) pulverização manual das amostra, (d) peneiramento das amostras, (e) identificação e imersão em acetona, (f) titulação potenciométrica.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 3.13 – Leituras da água de equilíbrio com pHmetro digital.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 3.14 – Fluxogramas das atividades desenvolvidas no ensaio de polarização.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 3.15 - Fluxogramas das atividades desenvolvidas no ensaio de pH da água de equilíbrio. ..</i>	<i>104</i>

<i>Figura 3.16 – Fluxogramas das atividades desenvolvidas nos ensaios acelerados de corrosão por cloretos.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.1 – pH da água de equilíbrio versus idade.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.2 – Resistência mecânica versus adição de resíduo cerâmico.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.3 – Relação de resistência mecânica versus idade.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.4 – Índice de vazios e absorção versus percentual de resíduo.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.5 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 7 dias.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.6 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 7 dias.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.7 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 7 dias.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.8 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 28 dias.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.9 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 28 dias.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.10 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 28 dias.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.11 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.12 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 7 dias.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.13 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 7 dias.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.14 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 28 dias.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.15 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 28 dias.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.16 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 28 dias.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.17 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza mecânica.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 4.18 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza química.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 4.19 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 7 dias.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 4.20 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 7 dias.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 4.21 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 7 dias.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 4.22- Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 28 dias.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 4.23 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 28 dias.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 4.24 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 28 dias.</i>	<i>124</i>

<i>Figura 4.25 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.</i>	125
<i>Figura 4.26 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 7 dias.</i>	125
<i>Figura 4.27 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 7 dias.</i>	126
<i>Figura 4.28 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 28 dias.</i>	126
<i>Figura 4.29 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 28 dias.</i>	126
<i>Figura 4.30 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 28 dias.</i>	127
<i>Figura 4.31 – Relação Cl_{tot} x Cl_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica. ..</i>	129
<i>Figura 4.32 - Relação Cl_{tot} x Cl_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza química.</i>	130
<i>Figura 4.33 – Representação esquemática do perfil clássico (a) e do perfil de duas zonas reescalonado (b).</i>	133
<i>Figura 4.34 - Concentração superficial versus tempo de exposição.</i>	135
<i>Figura 4.35 – Coeficiente de difusão (90 dias) e o Índice de vazios (90 dias) em relação ao percentual de RTM, para ambas as limpezas da barra e tempos de cura.</i>	137
<i>Figura 4.36 – Detecção do pite de corrosão e medida da profundidade do pite em relação à superfície [Desp] (a); Cálculo do teor crítico a partir do perfil reescalonado típico dos dados apresentados neste trabalho (b).</i>	138
<i>Figura 4.37 – Teor crítico de cloretos livres em função do percentual de RTM.</i>	139
<i>Figura 4.38 - Teor crítico de cloretos totais em função do percentual de RTM.</i>	141
<i>Figura 4.39 –Potencial de corrosão (ESC) versus teor crítico de cloretos livres e totais.</i>	143
<i>Figura 4.40 – Potencial de corrosão – ESC (a) e densidade de corrente de corrosão (b) versus diferença de potencial aplicada para leitura imediata e limpeza mecânica da barra.</i>	144
<i>Figura 4.41 - Percentual relativo ao potencial de corrosão – ESC (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).</i>	147
<i>Figura 4.42 - Percentual relativo densidade de corrente de corrosão (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).</i>	148
<i>Figura 4.43 - Potencial de corrosão – ESC (a) e densidade de corrente de corrosão (b) versus diferença de potencial aplicada para leitura imediata e limpeza química da barra.</i>	149
<i>Figura 4.44 – Percentual relativo ao potencial de corrosão – ESC (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).</i>	151
<i>Figura 4.45 - Percentual relativo da densidade de corrente de corrosão (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).</i>	152
<i>Figura 4.46 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 7 dias.</i>	154
<i>Figura 4.47 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 7 dias.</i>	154

Figura 4.48 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 7 dias.....	155
Figura 4.49 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 28 dias.	155
Figura 4.50 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 28 dias.....	156
Figura 4.51 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 28 dias.....	156
Figura 4.52 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.....	157
Figura 4.53 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 7 dias.....	157
Figura 4.54 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 7 dias.....	158
Figura 4.55 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 28 dias.....	158
Figura 4.56 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 28 dias.....	159
Figura 4.57 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 28 dias.....	159
Figura 4.58 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza mecânica.	161
Figura 4.59 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza química.....	161
Figura 4.60 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 7 dias.	163
Figura 4.61 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 7 dias.	163
Figura 4.62 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 7 dias.	163
Figura 4.63 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 28 dias.	164
Figura 4.64 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 28 dias.	164
Figura 4.65 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 28 dias.	164
Figura 4.66 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 7 dias.	165
Figura 4.67 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 7 dias.	165
Figura 4.68 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 7 dias.	166
Figura 4.69 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 28 dias.	166
Figura 4.70 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 28 dias.	166
Figura 4.71 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 28 dias.	167

<i>Figura 4.72 – Relação CI_{tot} x CI_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica. ..</i>	<i>168</i>
<i>Figura 4.73 - Relação CI_{tot} x CI_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza química.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 4.74 - Concentração superficial versus tempo de exposição.</i>	<i>173</i>
<i>Figura 4.75 – Coeficiente de difusão (90 dias) e o Índice de vazios (90 dias) em relações ao percentual de RTM, para ambas as limpezas da barra e tempos de cura.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 4.76 – Teor crítico de cloretos livres em função do percentual de RTM.</i>	<i>176</i>
<i>Figura 4.77 - Teor crítico de cloretos totais em função do percentual de RTM.</i>	<i>177</i>
<i>Figura 4.78 – Teor crítico de cloretos livres e totais versus potencia de corrosão (ESC).</i>	<i>179</i>
<i>Figura 4.79 – Comparação entre os teores críticos de cloretos para cada método acelerado de corrosão – barras com limpeza mecânica.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 4.80 - Comparação entre os teores críticos de cloretos para cada método acelerado de corrosão – barras com limpeza química.</i>	<i>186</i>
<i>Figura A.1 – Ensaio de TG e DTG para pasta de referência aos 59 dias.</i>	<i>206</i>
<i>Figura A.2 – Ensaio de TG e DTG para pasta de referência aos 90 dias.</i>	<i>206</i>
<i>Figura A.3 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 10% de RTM aos 59 dias.</i>	<i>207</i>
<i>Figura A.4 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 10% de RTM aos 90 dias.</i>	<i>207</i>
<i>Figura A.5 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 30% de RTM aos 59 dias.</i>	<i>208</i>
<i>Figura A.6 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 30% de RTM aos 90 dias.</i>	<i>208</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1 – Taxa de desperdício na construção civil. Fonte: ESPINELLI (2005).</i>	26
<i>Tabela 1.2 - Dados do segmento da indústria da cerâmica vermelha. Fontes: Anuário Brasileiro de Cerâmica/ANICER; estimativa DTTM/SGM/MME para 2006, 2007, 2008 e 2009.</i>	27
<i>Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de adição a massa.</i>	58
<i>Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de ciclos de imersão e secagem.</i>	60
<i>Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de eletromigração.</i>	64
<i>Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de “Ponding Test”.</i>	67
<i>Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de “Ponding Test”.</i>	69
<i>Tabela 2.6 – Características dos métodos de ensaio acelerado empregados na indução a corrosão por cloreto.</i>	69
<i>Tabela 2.7 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretos.</i>	71
<i>Tabela 2.8 – Teor crítico de cloretos publicados na literatura. Fonte: ANGST et al. (2009) adaptado.</i>	77
<i>Tabela 2.9 - Critérios de avaliação do Potencial de corrosão. Fonte: ASTM C-876 (1991).</i>	81
<i>Tabela 2.10 - Critérios de avaliação da Corrente de corrosão. Fonte: ALONSO & ANDRADE (2004).</i>	84
<i>Tabela 3.1 – Características físicas dos agregados.</i>	87
<i>Tabela 3.2 - Características da água utilizada.</i>	87
<i>Tabela 3.3 - Características da ferragem utilizada.</i>	88
<i>Tabela 3.4 - Característica do CPV – ARI.</i>	89
<i>Tabela 3.5 - Característica do RTM.</i>	90
<i>Tabela 3.6 – Características físicas da dosagem.</i>	93
<i>Tabela 3.7 – Teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio nas pastas estudadas.</i>	103
<i>Tabela 4.1 - Características físicas e mecânicas dos concretos analisados.</i>	108
<i>Tabela 4.2 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão.</i>	109
<i>Tabela 4.3 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre a resistência à compressão.</i>	110
<i>Tabela 4.4 – Teste de Tukey para o efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão.</i>	110
<i>Tabela 4.5 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o índice de vazios.</i>	111
<i>Tabela 4.6 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o índice de vazios.</i>	111
<i>Tabela 4.7 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para a absorção.</i>	112
<i>Tabela 4.8 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre a absorção.</i>	112
<i>Tabela 4.9 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o tempo de início da corrosão.</i>	119
<i>Tabela 4.10 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o tempo de início da corrosão.</i>	119
<i>Tabela 4.11 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.</i>	129
<i>Tabela 4.12 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza química.</i>	129
<i>Tabela 4.13 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para cloretos combinados.</i>	131

<i>Tabela 4.14 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre cloretos combinados.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 4.15 – Resultados dos ajustes da Equação 4.5 aos dados de concentração superficial para os diferentes tipos de traço.</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 4.16 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com barras limpas por ação mecânica.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabela 4.17 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com barras limpas por ação química.</i>	<i>137</i>
<i>Tabela 4.18 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos livres... </i>	<i>140</i>
<i>Tabela 4.19 - Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o teor crítico de cloretos livres. .</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 4.20 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos totais... </i>	<i>141</i>
<i>Tabela 4.21 - Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o teor crítico de cloretos totais. .</i>	<i>142</i>
<i>Tabela 4.22 - Ajustes lineares aos potenciais de corrosão – ESC para cada tipos de traço para a limpeza mecânica.</i>	<i>145</i>
<i>Tabela 4.23 - Ajustes das densidade de corrente para cada tipo de traço para a limpeza mecânica. </i>	<i>145</i>
<i>Tabela 4.24 - Ajustes lineares dos potenciais de corrosão – ESC para cada tipo de traço para a limpeza química.</i>	<i>150</i>
<i>Tabela 4.25 - Ajustes das densidade de corrente para cada tipo de traço para a limpeza química... </i>	<i>150</i>
<i>Tabela 4.26 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o tempo de início da corrosão.</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 4.27 – Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o tempo de início da corrosão.</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 4.28 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.</i>	<i>168</i>
<i>Tabela 4.29 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza química.....</i>	<i>169</i>
<i>Tabela 4.30 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para os cloretos combinados.....</i>	<i>170</i>
<i>Tabela 4.31 – Teste de Tukey para o efeito isolado sobre os cloretos combinados.</i>	<i>170</i>
<i>Tabela 4.32 – Ajustes na concentração superficial para os tipos de traço.</i>	<i>173</i>
<i>Tabela 4.33 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com limpeza mecânica das barras.....</i>	<i>174</i>
<i>Tabela 4.34 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com limpeza química das barras.</i>	<i>174</i>
<i>Tabela 4.35 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos livres... </i>	<i>176</i>
<i>Tabela 4.36 - Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o teor crítico de cloretos livres.</i>	<i>176</i>
<i>Tabela 4.37 - ANOVA das variáveis independentes sobre o teor crítico de cloretos totais.</i>	<i>178</i>
<i>Tabela 4.38 - Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o teor crítico de cloretos totais.</i>	<i>178</i>
<i>Tabela 4.39 – Imapcto dos métodos acelerados sobre a capacidade de fixação de cloretos à matriz cimentícia.</i>	<i>181</i>
<i>Tabela 4.40 – Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W) para significância com distribuição normal de probabilidade, como 95% de confiança – barras com limpeza mecânica.</i>	<i>183</i>
<i>Tabela 4.41 – Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W) para significância com distribuição normal de probabilidade, como 95% de confiança – barras com limpeza química.....</i>	<i>183</i>
<i>Tabela 4.42 – Limites mínimos e máximos para teores críticos de cloretos livres e totais, como nível de confiança de 99% - Limpeza mecânica.</i>	<i>184</i>

<i>Tabela 4.43 - Limites mínimos e máximos para teores críticos de cloretos livres e totais, como nível de confiança de 99% - Limpeza química.</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 4.44 – Efeito da influência dos fatores determinantes sobre as variáveis dependentes.</i>	<i>187</i>
<i>Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>209</i>
<i>Tabela A.2 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>209</i>
<i>Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>209</i>
<i>Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>210</i>
<i>Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>210</i>
<i>Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>211</i>
<i>Tabela B.7 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>211</i>
<i>Tabela B.8 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>211</i>
<i>Tabela B.9 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>212</i>
<i>Tabela B.10 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>212</i>
<i>Tabela B.11 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>212</i>
<i>Tabela B.12 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>213</i>
<i>Tabela B.13 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>213</i>
<i>Tabela B.14 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>214</i>
<i>Tabela B.15 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>214</i>
<i>Tabela B.16 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>214</i>
<i>Tabela B.17 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>215</i>
<i>Tabela B.18 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.....</i>	<i>215</i>
<i>Tabela B.19 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>216</i>
<i>Tabela B.20 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>216</i>
<i>Tabela B.21 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.</i>	<i>216</i>

<i>Tabela C.21 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.</i>	<i>227</i>
<i>Tabela C.22 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.</i>	<i>228</i>
<i>Tabela C.23 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.</i>	<i>228</i>
<i>Tabela C.24 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.</i>	<i>229</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a/c	Relação água/cimento
a/agl	Relação água/aglomerante
C_0	Concentração inicial de cloretos no concreto
C_{crit}	Concentração crítica de cloretos
Cl_{comb}	Concentração de cloretos combinados no concreto
Cl_{LIV}	Concentração de cloretos livres no concreto
Cl_{tot}	Concentração de cloretos totais no concreto
$C_{máx}$	Concentração máxima de cloretos totais no concreto
C_s	Concentração de cloretos na superfície do concreto
CP	Corpo de prova
D	Coefficiente de difusão
D_0	Coefficiente de difusão de referência
D_{ns}	Coefficiente de difusão em regime não estacionário
E_{corr}	Potencial de corrosão
F	Constante de Faraday
F_v	Fluxo volumétrico de um fluido
UR	Umidade relativa nos poros do concreto
I_{corr}	Corrente de corrosão
i_{corr}	Densidade instantânea de corrente de corrosão
J	Fluxo de massa

K_{cs}	Coeficiente representativo da influência do material e do ambiente no crescimento de C_s
m	Parâmetro que expressa a dependência do coeficiente de difusão em relação ao tempo
R	Constante universal dos gases
R_p	Resistência de polarização
RCC	Resíduo de construção civil
RCD	Resíduo de construção e demolição
RTM	Resíduo de tijolo cerâmico moído
T	Temperatura
t	Tempo
UR	Umidade relativa
$V_{\text{útil}}$	Vida útil de uma estrutura em concreto armado
w	Teor de umidade do concreto
x	Distância em relação à superfície do concreto
z	Valência de um íon
α	Coeficiente das isotermas de Langmuir
β	Coeficiente das isotermas de Langmuir
β_a, β_b	Coeficientes das curvas de Tafel
K_p	Coeficiente de permeabilidade do material
η	Viscosidade de um fluido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	26
1.2	ORIGINALIDADE DO TEMA ABORDADO	29
1.3	OBJETIVOS	30
1.3.1	Objetivo Geral	30
1.3.2	Objetivos Específicos	31
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	CONCRETOS COM USO DE RESÍDUO CERÂMICO	33
2.2	CORROSÃO DE ARMADURAS	35
2.2.1	Passivação do aço no interior do concreto	35
2.2.2	Fundamentação, natureza e mecanismo	36
2.2.3	Períodos de iniciação e propagação da corrosão	38
2.2.4	Despassivação da armadura por ação dos cloretos	39
2.3	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE AGENTES AGRESSIVOS	41
2.3.1	Absorção capilar	42
2.3.2	Permeabilidade	43
2.3.3	Migração iônica	44
2.3.4	Difusão iônica	46
2.3.4.1	Concentração superficial	48
2.3.4.2	Coeficiente de difusão	50
2.4	PERFIS DE CLORETOS	52
2.5	TIPOS DE ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO POR CLORETOS 55	
2.5.1	Adição de cloretos à massa de concreto	57
2.5.2	Ciclos de imersão e secagem	58
2.5.3	Eletromigração	61
2.5.4	“Ponding Test”	64
2.5.5	Névoa salina	67
2.6	TEOR CRÍTICO DE CLORETOS	70
2.6.1	Influências no teor crítico ligado a armadura	72
2.6.2	Influências no teor crítico ligado ao concreto	73
2.6.3	Influências no teor crítico ligado ao ambiente de exposição	75

2.7	TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO	78
2.7.1	Potencial de corrosão	79
2.7.2	Método da Resistência de Polarização	81
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	85
3.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO	85
3.1.1	Variáveis independentes	85
3.1.2	Variáveis dependentes	86
3.2	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS	86
3.2.1	Agregados	86
3.2.2	Água	87
3.2.3	Armadura	88
3.2.4	Cimento	88
3.2.5	Resíduo cerâmico	89
3.3	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	91
3.3.1	Tipos de dosagens empregadas	92
3.3.2	Limpeza das barras	93
3.3.2.1	Limpeza mecânica	93
3.3.2.2	Limpeza química	94
3.4	ENSAIOS RELACIONADOS À DURABILIDADE	95
3.4.1	Características dos métodos acelerados de indução da corrosão por cloretos . 95	
3.4.1.1	Ciclos de imersão e secagem	95
3.4.1.2	Eletromigração	96
3.4.2	Monitoramento eletroquímico	98
3.4.3	Teor crítico de cloretos	99
3.5	ENSAIOS COMPLEMENTARES	100
3.5.1	Polarização da armadura com a aplicação do campo elétrico	100
3.5.2	pH da água de equilíbrio	101
3.5.3	Análise termogravimétrica	102
3.6	FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	103
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
4.1	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO	106
4.1.1	Alcalinidade da matriz cimentícia	106
4.1.2	Propriedades físicas e mecânicas	107
4.2	DURABILIDADE	112

4.2.1	Ensaio acelerado por imersão e secagem	112
4.2.1.1	Monitoramento eletroquímico	112
4.2.1.2	Perfis de cloretos	122
4.2.1.3	Fixação de cloretos à matriz cimentícia	127
4.2.1.4	Transporte de cloretos	132
4.2.1.5	Teor crítico de cloretos	138
4.2.1.6	Relação entre o potencial de corrosão e o teor crítico de cloretos	142
4.2.2	Ensaio acelerado por eletromigração	143
4.2.2.1	Polarização da armadura com a aplicação do campo elétrico	143
4.2.2.2	Monitoramento eletroquímico	153
4.2.2.3	Perfis de cloretos	162
4.2.2.4	Fixação de cloretos a matriz cimentícia	167
4.2.2.5	Transporte de cloretos	170
4.2.2.6	Teor crítico de cloretos	175
4.2.2.7	Relação entre o potencial de corrosão e o teor crítico de cloretos	178
4.2.3	Comparação entre os métodos acelerados de corrosão	179
4.2.3.1	Monitoramento eletroquímico	179
4.2.3.2	Tempo de ensaio	180
4.2.3.3	Perfis de cloretos	180
4.2.3.4	Fixação de cloretos à matriz cimentícia	181
4.2.3.5	Mecanismos de transporte de cloretos	182
4.2.3.6	Teor crítico de cloretos	182
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	188
5.1	CONCLUSÕES	188
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	190
5.3	TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO À COMUNIDADE ACADÊMICA	191
	REFERÊNCIAS	192
	APÊNDICE A	206
	APÊNDICE B	209
	APÊNDICE C	219

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Segundo o IBGE, em 2013, a indústria da construção civil cresceu próximo de 1,6% em 2012, sendo ela mesma responsável por 8,5% do PIB brasileiro. Para alavancar os crescimentos consecutivos dos últimos seis anos, com exceção de 2009, a indústria da construção civil necessita de matéria-prima para confecção dos mais diversos serviços, aos quais se dedica. Dentro da cadeia produtiva da construção civil, a indústria de materiais da construção foi responsável por cerca de 18% de todas as riquezas geradas pela construção civil em 2012 (ABRAMAT, 2014).

Como em todo processo industrial, o uso de insumos da construção civil gera resíduos em larga escala. No Brasil, a atividade da construção civil gera 70 milhões de toneladas de resíduos (ANFAC, 2008), sendo a maioria dos resíduos da construção civil proveniente de serviços de demolição e dos serviços de construção (CABRAL *et al.*, 2007). Além das demolições e serviços, grande parte da produção diária dos resíduos vem do desperdício de materiais em construções. A motivação para a geração dessa parcela se deve a projetos construtivos malfeitos, especificações equivocadas de materiais, à falta de planejamento da execução e ao artifício de improvisos. A Tabela 1.1 mostra as taxas de desperdício no Brasil, em função dos principais materiais empregados pela construção.

Tabela 1.1 – Taxa de desperdício na construção civil. Fonte: ESPINELLI (2005).

Materiais	Taxa de desperdício (%)		
	Mínima	Média	Máxima
Concreto usinado	2,0	9,0	23,0
Aço	4,0	11,0	16,0
Blocos e tijolos	3,0	13,0	48,0
Placas cerâmicas	2,0	14,0	50,0
Revestimento têxtil	14,0	14,0	14,0
Eletrodutos	13,0	15,0	18,0
Tubos	13,0	15,0	18,0
Tintas	8,0	17,0	56,0
Fios	14,0	27,0	35,0
Gesso	14,0	30,0	120,0

A partir de tanto desperdício gerado, faz-se necessário buscar alternativas para reduzir o acúmulo desses resíduos, começando pela melhoria na qualidade dos processos produtivos, por maior planejamento urbano, pelo incentivo à conscientização ambiental, pela ação do poder público de modo a criar medidas legislativas e pelo uso técnico-econômico da

reciclagem desses resíduos (VIEIRA *et al.*, 2004). A reutilização de resíduos pode resultar na redução de custos na produção, no volume de extração da matéria-prima e na minimização dos problemas com gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos nos municípios (LEITE, 2001). Atualmente, o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) tem sido alvo de inúmeros estudos.

Focando um pouco mais no ambiente deste estudo, temos que a indústria cerâmica é responsável pela confecção de diversos materiais, tais como: tijolos, blocos, telhas, tubos cerâmicos e argila expandida. A indústria cerâmica gera uma argila calcinada normalmente oriunda das ilitas e o processo de fabricação envolve queima e sinterização do material, podendo chegar a uma temperatura máxima entre 800 e 1000°C.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), o setor de cerâmica vermelha conta com cerca de 11 mil empresas no país, sendo a sua grande maioria de micros e pequenas empresas. O principal estado produtor é Minas Gerais, com cerca de mil cerâmicas, sendo 626 empreendimentos cadastrados (FEIMG, 2013). A Tabela 1.2 mostra os principais dados do setor. Em 2009, a indústria cerâmica vermelha brasileira apresentou um faturamento de aproximadamente sete bilhões de reais na produção de aproximadamente de 4,6 trilhões de peças por mês (DTTM/SGM/MME, 2009). A taxa de perdas do setor produtivo é alta e pode variar de 3% a 30% (DIAS, 2004).

A incorporação de resíduos da indústria cerâmica na produção de materiais cimentícios pode minimizar a emissão de gás carbônico, o consumo de energia e contribuir para a redução do impacto ambiental relacionado com a sua destinação final. A reutilização desses materiais no concreto pode gerar ganhos no desempenho mecânico e na durabilidade (GONÇALVES *et al.* 2006). A principal explicação para o aumento, em certos casos, no desempenho do material se deve ao efeito pozolânico do resíduo em finura adequada (GONÇALVES *et al.*, 2006; TOLEDO FILHO *et al.*, 2007; VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012).

Tabela 1.2 - Dados do segmento da indústria da cerâmica vermelha. Fontes: Anuário Brasileiro de Cerâmica/ANICER; estimativa DTTM/SGM/MME para 2006, 2007, 2008 e 2009.

Características analisadas	2005	2006	2007	2008	2009
Faturamento (bilhões de reais)	6,0	6,2	6,5	6,8	7,0
Número de empresas	5500	5500	5500	5500	7400
Empregos diretos (mil)	400	400	400	400	293
Produtividade (mil peças/operários/mês)	13,3	14,0	14,6	15,8	15,8

Basicamente, adições de resíduos cerâmicos ao concreto apresentam baixa atividade pozolânica se comparadas a adições minerais tradicionais. Logo, as reações pozolânicas

responsáveis pela redução da porosidade do material e, conseqüentemente, um incremento no desempenho do concreto com resíduos cerâmico moído acontecem de forma menos acentuada em comparação, por exemplo, ao metacaulim. De todo modo, os resíduos da indústria cerâmica vermelha ainda constituem uma alternativa viável e atrativa à utilização como substitutos parciais ao cimento em dosagens de argamassas e concretos. Os principais motivos para a substituição são a sua grande disponibilidade no Brasil, o caráter sustentável e os benefícios técnicos (GONÇALVES *et al.* 2006).

O efeito do resíduo de cerâmica vermelha como substituição parcial do cimento foi investigado com menos frequência se comparado aos concretos com metacaulim. Entretanto, o número de publicações aumentou consideravelmente nos últimos anos (CORDEIRO *et al.*, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2006; TOLEDO FILHO *et al.*, 2007; VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012), quase sempre voltadas para propriedades mecânicas do concreto e mecanismo de hidratação. Porém, muitos estudos ainda precisam ser realizados na área, de modo a esclarecer o comportamento de resíduo da indústria cerâmica na matriz cimentícia, principalmente voltados para a durabilidade.

Uma vez que concretos armados com substituição de cimento por resíduos cerâmicos vermelhos sejam confeccionados, os mesmos estão sujeitos a processos de degradação decorrentes da ação ambiental. Ambientes com a presença de íons cloretos caracterizam-se por forte degradação de estruturas de concreto armado, motivada por corrosão de armaduras. Nesse ambiente, a durabilidade de concretos armados com o uso de RTM está diretamente ligada à velocidade de transporte de massa no interior do concreto e ao pH da fase líquida do concreto.

Desta forma, o presente trabalho se insere nesse ambiente, atmosferas com a presença de íons cloretos, e se propõe a estudar, principalmente, a influência da substituição parcial de cimento por resíduo de tijolo moído (RTM) em estruturas de concreto armado, contribuindo para que se possa obter um melhor desempenho do material frente às condições de agressividade ambiental, atingindo assim a viabilidade técnica do material de cunho sustentável.

Como se pode observar, ainda há uma certa carência de estudos focados na durabilidade de concretos com substituição de cimento por RTM, em especial no que se refere à corrosão de armaduras. Partindo desse pressuposto e considerando a corrosão de armaduras desencadeada por cloretos, o presente trabalho pretende analisar a indução da corrosão por cloretos em concretos armados com substituição de cimento por RTM a partir de ensaios acelerados de corrosão, focando-se principalmente no comportamento eletroquímico das

armaduras, nos parâmetros de transporte, na combinação de cloretos à matriz cimentícia e no teor crítico de cloretos.

1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA ABORDADO

No Brasil, diversas pesquisas acerca da utilização de materiais não convencionais vêm sendo realizadas nas universidades e nos centros de pesquisas. O grande interesse nos últimos anos por esses novos materiais deve-se principalmente a questões de impacto ambiental e consumo de energia, a fim de baratear o custo final do produto sem comprometer a qualidade.

Anualmente, a indústria da cerâmica vermelha produz uma quantidade considerável de resíduos, conforme discutido na introdução deste trabalho. Partindo dessa premissa, isto é, geração de resíduo, da barata aquisição do resíduo e do possível efeito benéfico provocado pela atividade pozolânica do material, inúmeros estudos vêm sendo realizados com a incorporação de resíduos cerâmicos ao concreto. Estudos na área de resíduo de cerâmica vermelha como substituinte do cimento enfocam a viabilidade econômica do emprego, as propriedades mecânicas e químicas do concreto, o processo de hidratação, os fenômenos de transporte de massa envolvidos e alguns estudos de durabilidade dedicados apenas à penetração dos íons agressores.

Uma vez confeccionadas as estruturas de concreto armado com a incorporação de resíduos da indústria cerâmica, as mesmas estarão dispostas aos mais diversos ambientes de exposição. Estudos na área de corrosão por cloretos vêm sendo realizados desde a década de 50, quando os íons cloretos foram reconhecidos como agente desencadeador da corrosão (ANGST *et al.*, 2009). A grande maioria dos estudos na área de corrosão por cloretos dedica-se a analisar as variáveis que influenciam o processo corrosivo, modelar o fenômeno de transporte, caracterizar os ambientes de exposição e definir o valor-limite para iniciação da corrosão. Cada pesquisador com sua metodologia própria de ensaio e, portanto, variando caso a caso.

Tais variações nos procedimentos metodológicos de ensaio, nos materiais utilizados e na multiplicidade de fatores interagindo simultaneamente geram uma grande dispersão nos resultados de limites críticos de cloretos. Angst *et al.* (2009), em uma revisão sobre o tema, mostram que os valores do limite crítico de cloretos totais variaram entre 0,1 e 1,96% em relação à massa de cimento para estruturas em caso de exposição real e entre 0,04 e 8,34% em relação à massa de cimento para espécimes em ensaios de laboratório.

Levando em consideração a revisão bibliográfica sobre os métodos de ensaio acelerado de indução à corrosão, de modo a garantir uma configuração de ensaio concisa e uniforme, buscou-se neste trabalho analisar a viabilidade técnica do uso de RTM em concretos armados do ponto de vista do monitoramento eletroquímico das barras, do transporte de cloretos, da combinação de cloretos a matriz cimentícia e do teor crítico de cloretos.

O presente trabalho, além de analisar a indução da corrosão por cloretos em concretos com RTM, dedica-se ainda a discutir os impactos dos ensaios acelerados sobre o tempo de ensaio, a fixação de cloretos e o teor crítico de cloretos livres e totais, uma vez que empregou dois tipos de ensaio acelerado de indução à corrosão, com mecanismos de transporte bastante diferenciados. Tal discussão do impacto do ensaio sobre esses resultados foi pouco explorado internacionalmente, tendo características que o diferenciam neste ponto, como a comparação com os resultados obtidos pela literatura, tanto em exposição natural como em ambiente de laboratório.

Partindo de metodologias de ensaios acelerados configuradas a partir da revisão bibliográfica realizada, este trabalho buscou avaliar a indução da corrosão por cloretos em concretos armados com o uso de RTM em substituição ao cimento, e, examinar o impacto da metodologia de ensaio acelerado sobre parâmetros envolvidos no processo de corrosão. Esses aspectos são fatores de originalidade do trabalho aqui apresentado, uma vez que representam aspectos ainda não abordados nos cenários nacional e internacional¹.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral fazer um estudo comparativo do processo de corrosão das armaduras devido à ação de cloretos, entre concretos convencionais e concretos produzidos com resíduos da indústria de cerâmica vermelha, a partir do emprego de dois diferentes tipos de ensaio acelerado para indução da corrosão.

¹ Para todas as bibliografias analisadas neste trabalho, não se constataram, em qualquer das pesquisas, estudos de comportamento de concreto armado com uso de RTM frente à corrosão por cloretos, principalmente sobre os aspectos citados anteriormente.

1.3.2 Objetivos Específicos

Com o desdobramento do objetivo geral, os objetivos específicos envolvem os seguintes pontos:

- Analisar as propriedades mecânicas de concretos produzidos por diferentes substituições do cimento por RTM;
- Avaliar a influência do tempo de cura, do tipo de limpeza da barra e dos diferentes teores de substituição do cimento pelo resíduo sobre o comportamento eletroquímico das armaduras, a fixação de cloretos à matriz cimentícia e os teores críticos de cloretos;
- Analisar os mecanismos de transporte e os perfis de cloretos envolvidos durante todo processo de ensaio patológico;
- Estudar o efeito da polarização sobre a barra em ensaios acelerados de corrosão por cloretos com aplicação de campo elétrico;
- Verificar o impacto da metodologia de ensaio acelerado de indução da corrosão por cloretos sobre o comportamento eletroquímico das barras, a capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia, o mecanismo de transporte e os teores críticos de cloretos.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho é composto de cinco capítulos, objetivando a formação da seguinte linha de escrita: limitar a pesquisa realizada, transmitir uma fundamentação teórica concisa e focada no objetivo proposto, relatar os procedimentos experimentais empregados, apresentar e discutir os resultados obtidos e, por fim, transmitir o conhecimento à comunidade científica acerca do tema estudado.

No primeiro capítulo, encontram-se a introdução do trabalho, a importância e originalidade da pesquisa e os objetivos propostos.

No segundo capítulo, é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre o processo de confecção, dosagem e características físicas e químicas de concretos com o uso do resíduo estudado. Logo após, é apresentada a abordagem sobre o processo de corrosão, com foco no fenômeno de passivação, nos períodos de iniciação e propagação da corrosão e na despassivação provocada pela ação dos cloretos.

Ainda no capítulo dois, estão inseridos os mecanismos de penetração de cloretos no concreto com atenção especial à previsão da penetração de cloretos baseados no processo de difusão (especialmente aqueles baseados na 2ª Lei de Fick) e às variáveis que interferem no valor-limite de cloretos para iniciar o processo de corrosão. Por fim, apresentam-se as técnicas de monitoramento eletroquímico empregadas neste trabalho.

No terceiro capítulo, encontramos as variáveis envolvidas na pesquisa, as características dos materiais e os procedimentos metodológicos empregados, além do passo a passo das atividades desenvolvidas.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir dos procedimentos adotados na etapa anterior. É foco desse capítulo: características dos concretos com uso de RTM e o seu comportamento frente à corrosão por cloretos. No estudo de durabilidade, são apresentados o monitoramento eletroquímico durante todo o processo corrosivo, os perfis de cloretos livres e totais, a capacidade de fixação de cloretos à matriz, o mecanismo de transporte dos agentes agressivos e o teor crítico de cloretos para cada ensaio acelerado de corrosão por cloreto.

Ainda no capítulo quatro, empregaram-se técnicas estatísticas como análise de dados espúrios, análise de variância, teste de Tukey, inferência estatística (teste de hipótese e estimação com distribuição de probabilidade normal) e ajustes a modelos lineares e não lineares, com o objetivo de travar discussões acerca do tema e comparações com resultados apresentados pela comunidade acadêmica.

No quinto capítulo, temos as considerações finais do trabalho, onde se faz uma análise crítica dos dados obtidos e suas limitações. Neste capítulo, encontram-se a sugestão para trabalhos futuros, bem como a transferência de conhecimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETOS COM USO DE RESÍDUO CERÂMICO

A confecção de concretos com o uso de resíduos da construção civil (RCC) vem sendo estudada desde o fim da segunda guerra mundial, considerando a sua viabilidade técnico-econômica de cunho sustentável (OLORUNSOGO & PADAYACHEE, 2002; BEKTAS, 2014). Esses estudos envolvem a avaliação das propriedades mecânicas do concreto (LEVY, 2001; LEITE, 2001), a viabilidade econômica do seu emprego (OLIVEIRA, MATTOS & ASSIS, 2001; VIEIRA & DAL MOLIN, 2004), o processo de hidratação e formação de compostos do cimento com resíduos (TYDLITÁT *et al.*, 2012; VÁZQUEZ *et al.*, 2013), o transporte de massa na matriz cimentícia (TOLEDO FILHO *et al.*, 2007; ZONG; FEI; ZHANGA, 2014) e alguns estudos de durabilidade (OLORUNSOGO & PADAYACHEE, 2002; VIEIRA & DAL MOLIN, 2004; VAZQUEZ *et al.*, 2013; BEKTAS, 2014).

A composição dos resíduos da construção civil pode apresentar significativa variabilidade. Contudo, os resíduos oriundos de materiais cerâmicos representam uma grande fatia da composição do RCC, com quantitativos que assumem 26% para Porto Alegre, 48% para Maceió, 21% para Campinas e 14% para Salvador. Já em outros países essa fatia é de 32% para a Holanda e 35% para Taiwan (LEITE, 2001; VIEIRA & DAL MOLIN, 2004).

A inserção desses resíduos no concreto pode se dar através da substituição dos agregados ou substituição parcial do cimento. A maior parte dos estudos se concentra na substituição de agregados naturais por agregado reciclado de RCC (LEITE, 2001; VIEIRA & DAL MOLIN, 2004; TYDLITÁT *et al.*, 2012). Estudos focados na avaliação de concretos com substituição de cimento por resíduos cerâmicos ainda são poucos (VEJMEKOVÁ *et al.*, 2012; TOLEDO FILHO *et al.*, 2007).

Levando em consideração a substituição do cimento por resíduo de tijolo moído (RTM), Toledo Filho *et al.* (2007) e Vejmelková *et al.* (2012) observaram que a resistência mecânica do material tende a aumentar até uma faixa máxima de substituição entre 10% e 20% e, em seguida, a resistência diminui consideravelmente.

Com relação à hidratação de pastas com substituição de cimento por RTM, Tydlitát *et al.* (2012) relatam que o calor de hidratação diminui significativamente com a substituição do cimento por esse tipo de resíduo reciclado, uma vez que o uso desse material retarda a hidratação do C₃S. Esses autores também concluem que as substituições estudadas têm efeito

sobre a hidratação do cimento até o limite de substituição de 20% e o percentual excedente atua essencialmente na forma de *filler*.

Considerando o comportamento do coeficiente de difusão em matrizes com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados; Zong, Fei e Zhanga (2014), estudando concretos com a incorporação de agregados de resíduos cerâmicos, obtiveram um aumento de pouca expressão nesse parâmetro, até a faixa de 30% de substituição, seguido por aumentos significativos até o nível de substituição de 50%. Por outro lado, Vejmelkova *et al.* (2012), estudando concretos com a adição de RTM em substituição ao cimento, apesar de não terem avaliado diretamente o transporte de cloretos, obtiveram um bom desempenho de concretos com níveis de substituição até 20%, quer seja em relação à resistência mecânica, quer seja em relação a ensaios relacionados à durabilidade, como absorção de água.

Sobre a alcalinidade de concretos com a incorporação RTM, percebe-se que há uma redução gradativa no pH com a adição do resíduo. Vejmelková *et al.* (2012) observaram que os concretos de referência apresentam valores de pH da água de lixiviação da ordem de 12 após 60 dias de imersão em água destilada, enquanto que concretos com substituição de 60% do cimento por RTM apresentaram pH da água de lixiviação da ordem de 11, demonstrando a redução de alcalinidade em função da incorporação do RTM.

Assim como os concretos convencionais, os concretos com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados também estão sujeitos a processos de degradação decorrentes da ação ambiental. A ação de íons cloretos representa uma importante fonte de degradação das estruturas de concreto armado devido à corrosão das armaduras. Ensaios que avaliam o transporte de cloretos na matriz cimentícia, quer seja com a aplicação de campo elétrico ou não, buscam obter parâmetros que quantifiquem esta maior ou menor habilidade de transporte e são amplamente utilizados como instrumentos de comparação entre distintas mesclas de concreto ou na avaliação do período de iniciação da corrosão (TUUTTI, 1982).

Tomando como referência que o período de iniciação da corrosão se finaliza com a despassivação da armadura (TUUTTI, 1982), a quantidade de cloretos necessária para desencadear esse processo (teor crítico de cloretos) depende das características da matriz cimentícia, em especial do pH da solução dos poros do concreto (HAUSMAN, 1967). Nesse sentido, o uso de adições minerais costuma contribuir para uma redução do teor crítico, em função do consumo de hidróxidos nas reações pozolânicas (MEIRA *et al.*, 2014). No entanto, ainda há a carência de estudos sobre o tema para matrizes que empregam materiais reciclados de resíduos cerâmicos.

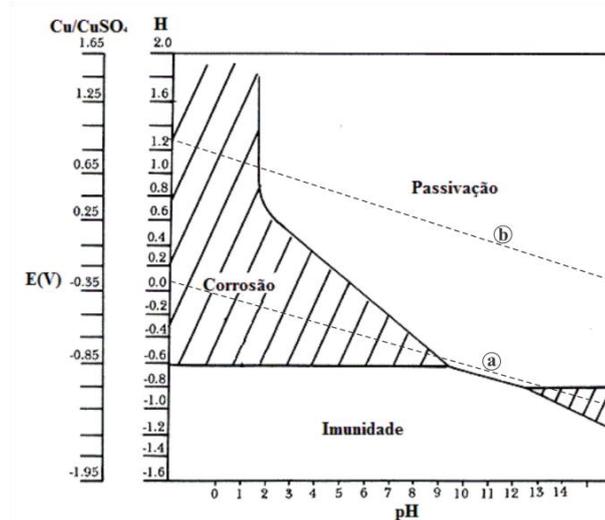
2.2 CORROSÃO DE ARMADURAS

2.2.1 Passivação do aço no interior do concreto

Segundo Pourbaix (1974), o aço no interior do concreto, pode-se encontrar em três condições distintas: imunidade, corrosão e passivação (Figura 2.1). A zona de imunidade garante ao aço um estado de estabilidade, não havendo corrosão independentemente do meio (ácido, neutro ou alcalino) em que se encontra. A zona de corrosão corresponde às condições termodinâmicas onde o aço se encontra em estado de desenvolver a corrosão. Já a zona de passivação corresponde ao estado onde acontece a formação da película passivadora. Uma fina camada de óxido que garante ao aço, não uma imunidade contra a corrosão, mas sim uma condição baixíssima taxa de corrosão, que a princípio, a aparência do metal permanece inalterada (ANDRADE, 1988).

As faixas *a* e *b* mostram as reações de liberação de oxigênio e hidrogênio que acontecem durante o processo. Abaixo da linha *a*, indica que hidrogênio é liberado, entre as linhas *a* e *b* indicam que a água encontra-se em estado estável de equilíbrio termodinâmico, por fim, acima da linha *b* indica que oxigênio é liberado.

Figura 2.1 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico (Fe – H₂O; 25°C). Fonte: POURBAIX (1974).



O concreto oferece ao aço uma alta alcalinidade, algo entre 12,5 e 14. Tal condição atrelada à leitura de potenciais de corrosão entre a faixa de 0,1 e -0,4 Volts garante ao aço a formação de uma proteção adicional, a película passivadora, além do cobrimento da armadura. A película passivadora é uma camada extremamente fina de óxido, da ordem de 1 a 100 nanômetros, transparente e fortemente aderida ao aço. Esta proteção garante ao aço uma alta resistência ôhmica e inacessibilidade à umidade, ao oxigênio e a agentes agressivos

(CASCUDO, 1997). A Equação 2.1 mostra, de forma simplificada, a reação de formação desta camada protetora (WOLYNEC, 1987).



A formação e estabilidade da película passivadora está diretamente atrelada à alta alcalinidade, garantida pelos produtos da reação de hidratação do cimento, principalmente pelo hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) e, secundariamente, pelo hidróxido de cálcio (Portlandita – $CA(OH)_2$) (CASCUDO, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008). Uma vez perdidas as condições necessárias para a estabilidade da película passivadora, o aço entra em processo de corrosão. A perda da película passivadora ocorre em decorrência da entrada de agentes agressivos no interior do concreto, tal mecanismo caracteriza-se por:

- Redução do pH na região em função da penetração de gás de carbono (CO_2) da atmosfera;
- A presença de íons cloretos em certa quantidade, provoca uma redução de pH, de modo a romper localmente a película passivadora.

Portanto, a proteção do aço é assegurada de duas maneiras, uma mecânica e outra química. A proteção mecânica é oferecida pelo cobrimento da armadura, sendo ela a primeira “barreira” contra os agentes agressivos. A proteção química pode ser assegurada pela aplicação de um potencial externo, de modo a rebaixar o potencial de corrosão da barra independentemente do pH do meio; mudando a condição para a zona de imunidade (proteção catódica) ou pela alta alcalinidade do meio, que garante a formação e a estabilidade da película passivadora na armadura.

2.2.2 Fundamentação, natureza e mecanismo

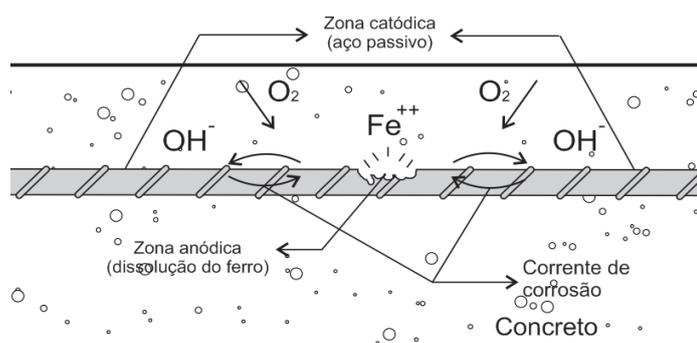
Na natureza, os metais geralmente estão associados em compostos moleculares na forma de óxidos, devido ao seu menor estado energético. Faz-se necessário o emprego de energia, principalmente na forma de calor, para transformar os íons metálicos em metal (processo de redução) e, assim, obter características como resistência mecânica, elasticidade e ductibilidade. Tais qualidades tornam útil seu emprego. De modo espontâneo e com liberação de baixos conteúdos de energia, os metais tendem a voltar ao seu estado natural, através do processo de oxidação. Dar-se a este fenômeno o nome de corrosão (GENTIL, 1996).

Segundo Cascudo (1997), uma definição bem fundamentada foi proposta por Panossian (1993), que define a corrosão como “a transformação de um metal em íons metálicos pela sua interação química ou eletroquímica com o meio que se encontra”. Devido à sua natureza, a corrosão pode ser química ou eletroquímica (GENTIL, 1996). A corrosão química ou seca caracteriza-se pelo processo de oxidação do metal com gases, formando uma película de óxidos, sendo tão deletéria quanto à agressividade do gás. A corrosão eletroquímica ocorre em meio aquoso e caracteriza-se pela presença de quatro elementos:

- **Água:** eletrólito responsável pelo fluxo iônico, o que permite a ocorrência de reações anódicas e catódicas;
- **Condutor:** a armadura do concreto;
- **Diferença de potencial:** uma diferença de potencial entre regiões distintas, de modo a formar uma zona catódica e uma anódica. Essa diferença pode ser ocasionada por diferença na composição química da superfície do aço, aeração, adensamento, umidade ou concentração salina (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993);
- **Oxigênio:** composto usado para formação dos produtos da corrosão.

O mecanismo de corrosão eletroquímica promove a formação de pilhas eletroquímicas, onde na zona anódica, há oxidação do metal em íons metálicos com liberação de elétrons para a zona catódica. Já na zona catódica, a água e o oxigênio sofrem redução. A corrosão pode se estabelecer entre dois metais distintos envoltos em uma mesma solução ou em regiões diferentes de um mesmo metal (GENTIL, 1996). Se a corrosão eletroquímica acontece em duas zonas distintas de um mesmo metal, as reações nas zonas catódicas e anódicas ocorrem simultaneamente em função do deslocamento dos elétrons gerados na reação anódica (WOLYNEC, 1987). A Figura 2.2 mostra de forma esquemática tais reações que ocorrem em ambas as regiões.

Figura 2.2 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado. Fonte: CASCUDO (1997).



A corrosão de armaduras em concretos se caracteriza por apresentar um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta alta

resistividade, devido ao seu confinamento na rede porosa (CASCUDO, 1997). A corrosão de armaduras em concretos pode ser oriunda da carbonatação ou da ação de íons cloretos. Com os elementos básicos acima discutidos, a corrosão se desenvolve, simplificadamente, com as seguintes reações:

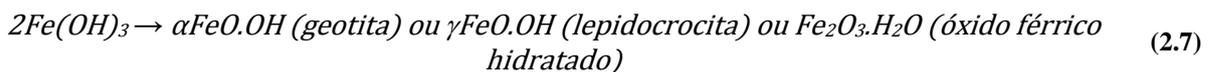
Zona anódica:



Zona catódica:



Por fluxos iônicos, os íons metálicos migram para a zona catódica e os íons hidroxila, resultante da redução na zona catódica, para a zona anódica. Numa zona intermediária esses íons se encontram e há a formação dos produtos da corrosão (CASCUDO, 1997). A formação dos produtos da corrosão é função do grau de aeração, do pH do meio, da temperatura, do potencial de equilíbrio e da relação entre os íons cloretos e hidroxilas (SAGOE-CRENTSIL & GLASSER, 1993). Abaixo algumas reações que acontecem no processo corrosivo.



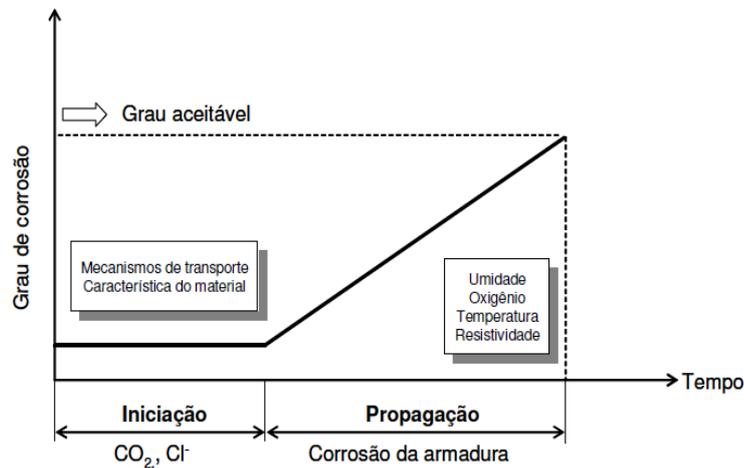
2.2.3 Períodos de iniciação e propagação da corrosão

Estruturas de concreto armado, situados em ambientes com a presença de agentes agressivos, tendem a sofrer a ação progressiva através da despassivação e posterior corrosão da armadura. O modelo mais simplificado que explica este fenômeno no interior do concreto é o modelo de Tuutti (1982) (Figura 2.3).

O período de iniciação da corrosão compreende o espaço de tempo que os agentes agressivos (CO₂ e Cl⁻, por exemplo) demoram para atravessar o cobrimento e provocar a despassivação da armadura. O tempo necessário para que se inicie a despassivação da armadura depende de muitos fatores como: o tipo de cimento, as condições iniciais da barra, a permeabilidade do concreto, do tipo de aço, etc. Com a quebra da película passivadora, inicia-se o processo de corrosão.

O período de propagação compreende o espaço de tempo em que há uma acumulação progressiva da deterioração, até que se alcance um nível inaceitável. Este período depende das variáveis que controlam a cinética das reações, principalmente influenciadas pela umidade, pela presença de oxigênio e pela resistividade do meio.

Figura 2.3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti. Fonte: TUUTTI (1982).



2.2.4 Despassivação da armadura por ação dos cloretos

Como já discutido acima, o processo corrosivo pode ser desencadeado por carbonatação ou ação dos íons cloretos. Por esse trabalho se tratar de corrosão por cloretos, será dado um maior enfoque a este tipo de agente agressivo.

Os cloretos são elementos abundantes na natureza (GENTIL, 1996). A fonte destes íons pode ser o uso de: aceleradores de pega, agregados e água contaminados, salmouras industriais, sais anticongelantes em países de inverno rigoroso, solos contaminados e zonas de atmosfera marinha (CASCUDO, 1997; MEIRA, 2004; ANGST *et al.* 2009).

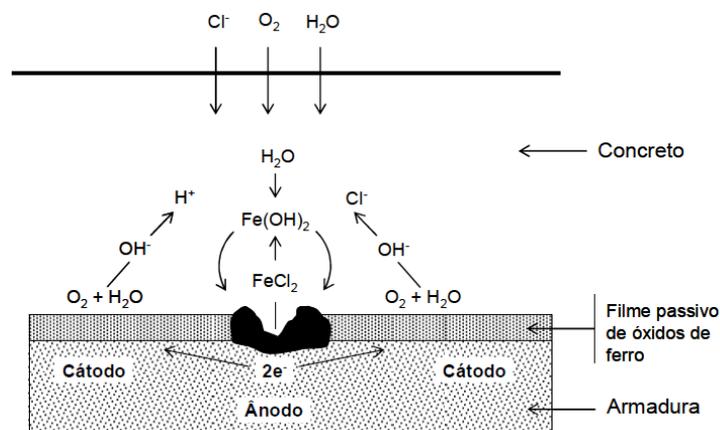
Segundo Angst *et al.* (2011), depois que os íons cloretos foram reconhecidos como agentes desencadeadores da corrosão, grandes esforços em pesquisas têm sido feitas a este respeito. O enfoque principal dos estudos são: analisar as características que influenciam no processo (JAEGERMANN, 1990; THOMAS *et al.*, 1990; TUUTTI, 1982; PAGE *et al.*, 1981), modelar o fenômeno de transporte e processo de corrosão (GUIMARÃES, 2000; TANG & NILSSON, 1996; SAETTA *et al.*, 1993) e caracterizar os níveis de presença salina em zona de atmosfera marinha (MEIRA *et al.*, 2005; MORCILLO *et al.*, 2000; GUSTAFSSON & FRANZÉN, 1996). Dos estudos relacionados a cloretos, a grande maioria consiste em ensaios de laboratório com metodologias próprias, variando caso a caso.

Os íons cloreto (Cl^-) podem penetrar através da rede porosa do concreto por diversos mecanismos de transporte, conforme discutidos no item a seguir (seção 2.1.5). Tais íons, em

conjunto com outros elementos, como a água e o oxigênio, provocam em certas quantidades destabilizações pontuais na película passivadora. O processo de despassivação por cloretos é cercado de muitas incertezas, algumas teorias tentam explicar como esse fenômeno acontece. As principais teorias são:

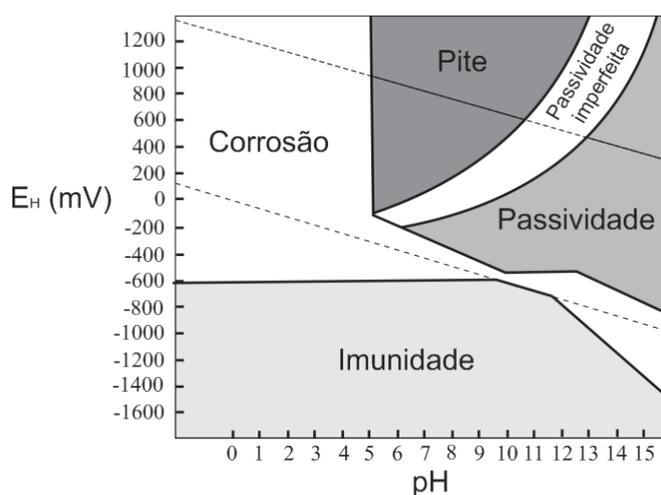
- **Teoria da adsorção:** a adsorção de íons cloreto e oxigênio ou íons hidroxila na superfície metálica promovem uma competição. Os íons cloreto promovem a hidratação dos íons metálicos, facilitando a dissolução (CASCUDO, 1997);
- **Teoria do filme de óxido:** os poros ou falhas na película passivadora facilitam a penetração dos íons cloretos mais do que outros íons, a penetração de cloretos também é facilitada pelas dispersões coloidais no filme de óxido (CASCUDO, 1997);
- **Teoria do complexo transitório:** uma vez que os íons cloretos cheguem à película passivadora, em certas quantidades, os mesmos competem com os íons hidroxilas para produção de íons ferrosos. O acúmulo de cloretos metálicos (FeCl_2), formados pelo complexo solúvel e transportados por difusão a partir das áreas anódicas, quebra a película passivadora e permite a continuação do processo. A certa distância do eletrodo, o complexo é rompido através de hidrólise, precipitando-se em hidróxido de ferro (Fe(OH)_2), liberando H^+ e reciclando os íons cloretos para novas reações. A liberação de H^+ faz com que haja uma redução de pH (acidez) e potenciais mais eletronegativos na área anódica. Nas regiões catódicas, a formação de OH^- eleva o pH dessas áreas, dificultando a chance de futuros ataques dos cloretos nessas regiões. Os novos cloretos que chegaram à armadura, unidos aos cloretos reciclados na etapa anterior permitem a continuação do processo de corrosão (TREADAWAY, 1988) (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Esquema do complexo transitório. Fonte: TREADAWAY (1988)



Fica evidente a ação deletéria dos íons cloretos sobre a armadura, tendo em vista que os cloretos aumentam substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo corrosivo. Por acidificar localmente a armadura, a ação por cloretos caracteriza-se por apresentar corrosão localizada por *pite*, processo ainda mais deletério para as estruturas de concreto (CASCUDO, 1997). Nesse sentido, Pourbaix (1987) estudou o equilíbrio termodinâmico para o sistema ferro-água com Cl⁻ (335 ppm) (Figura 2.5). Os resultados mostram uma redução significativa da zona protetora de passivação do aço, se comparados com a Figura 2.1 (Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico para o sistema ferro-água, sem cloreto), motivada por um acréscimo da zona de corrosão com a inclusão da zona de corrosão por pites.

Figura 2.5 – Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-água com Cl⁻ (335 ppm). Fonte: POURBAIX (1987).



2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE AGENTES AGRESSIVOS

Há várias maneiras dos agentes agressivos penetrarem o concreto a partir do meio externo (ANGST *et al.*, 2009). Os mecanismos de transporte dessas substâncias dependem das características físicas e químicas dos agentes agressivos, das condições ambientais do meio agressivo (temperatura, umidade, concentração dos agentes agressivos e concentração de oxigênio), da microestrutura dos poros do concreto (tamanho, tipo e distribuição dos poros), da presença de fissuras no concreto, das características químicas do concreto, do grau de saturação dos poros (GUIMARÃES, 2000).

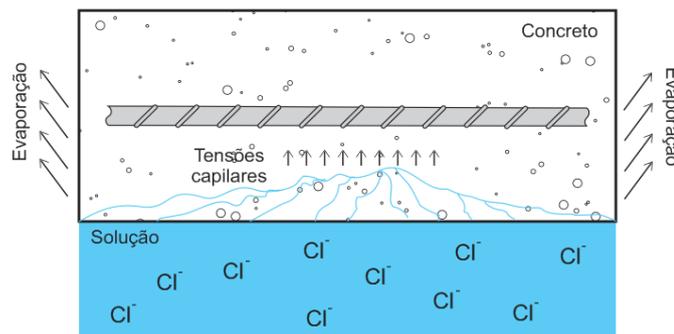
Os mecanismos de transporte no interior do concreto atuam na maioria das vezes em conjunto, ou seja, a junção de vários mecanismos de transporte na penetração dos agentes agressivos (KRÖPP *et al.*, 1995 *apud* MEIRA, 2004). Em condições naturais, na maioria das

vezes, os mecanismos de transporte dos íons cloreto no interior do concreto são a absorção capilar e a difusão iônica (ANDRADE, 2001).

2.3.1 Absorção capilar

O mecanismo de transporte por absorção capilar baseia-se na penetração de um líquido, contendo íons cloretos, através de um fluxo provocado pela tensão superficial nos poros capilares do concreto. A tensão superficial provoca o surgimento de forças capilares que, por sua vez, gera a ascensão do líquido através dos poros (Figura 2.6). A absorção capilar depende da viscosidade do líquido, da tensão superficial, da densidade do líquido, do diâmetro do poro e da distribuição desses mesmos poros. Estudo sobre a ação de cloretos com mecanismo de absorção capilar, observou que a velocidade de transporte do líquido interferiu nos resultados de fixação de cloretos à matriz cimentícia (SANJUÁN, 2000). A teoria mais adequada ao fenômeno de transporte por absorção capilar em materiais porosos é a lei de Darcy ampliada (HALL, 1989). Ver as Equações 2.8 e 2.9.

Figura 2.6 – Forma de penetração de íons cloretos por absorção capilar. Fonte: HELENE (1993).



$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

Onde:

q é o volume de água transportado, em m^3 ;

$D(\theta)$ é a difusividade hidráulica, em m^2/s ;

$k(\theta)$ é a condutividade hidráulica, em m/s ;

ϕ é o potencial capilar que depende do teor de umidade do concreto (θ), e

x é a profundidade em relação à superfície do concreto, em metro.

Por fim, a partir do fluxo volumétrico do líquido transportado, pode-se determinar o fluxo mássico da substância agressiva transportada no líquido, em função da concentração do agente agressivo no fluido (NILSSON e TANG, 1996). Ver Equação 2.10.

$$j = C_v \times F_v \quad (2.10)$$

Onde:

j é o fluxo de massa da substância, em $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$;

C_s é a concentração da substância no fluido, em quilograma de agentes agressivos por metro cúbico de líquido, e

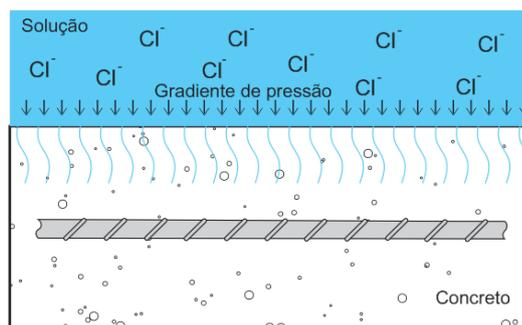
F_v é o fluxo volumétrico do fluido, em $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$.

O mecanismo de transporte de íons cloretos por absorção capilar é mais importante em caso de estruturas expostas a zonas de flutuação das marés e/ou em zonas de respingo; onde acontecem molhagens e secagens dos elementos estruturais. Nestes tipos de ambientes, durante a molhagem, os íons cloreto dissolvidos na água tendem a penetrar nos poros do concreto, prevalecendo à absorção capilar. Uma vez que os poros atinjam a condição de saturação, o mecanismo de absorção capilar cessa e o transporte dos agentes agressivos passa a ser regido pela difusão. O efeito puramente da absorção capilar no transporte de íons cloretos até a armadura, objetivando conseguir a despassivação, só acontece em concretos de baixa qualidade e/ou em pequenos cobrimentos.

2.3.2 Permeabilidade

O mecanismo de transporte por permeabilidade consiste no fluxo de um fluido pela rede porosa de um material, influenciada por um gradiente de pressão. A ação desse tipo de transporte só acontece em casos específicos, como em acúmulos ou contenções de água em solos contaminados (CASCUDO, 1997). A Figura 2.7 ilustra o mecanismo de transporte por permeabilidade.

Figura 2.7 - Forma de penetração de íons cloretos por permeabilidade. Fonte: HELENE (1993).



A permeabilidade do concreto está diretamente ligada à rede porosa do material. Portanto, fatores como o diâmetro e a conectividade dos poros capilares do concreto são imprescindíveis. Sendo assim, em concreto, a permeabilidade é influenciada pela relação água/cimento, pelo consumo de cimento, pela distribuição granulométrica dos agregados, pelo emprego de adições minerais, pelo grau de hidratação, entre outros (HELENE, 1993).

A lei física que governa esse fenômeno de mecanismo de transporte é a lei de Darcy em fluxo laminar, regime estacionário e não turbulento. Porém, os pesquisadores abordam a problemática através da equação geral de transporte de massa (NILSSON & TANG, 1996). Ver a Equação 2.11.

$$j = -\frac{K_p}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.11)$$

Onde:

j é o fluxo de massa da substância, em $\text{kg/m}^2\text{s}$;

η é a viscosidade do fluido, em Ns/m^2 ;

$\frac{\partial p}{\partial x}$ é o gradiente de pressão, em $\text{N/m}^2\text{m}$, e

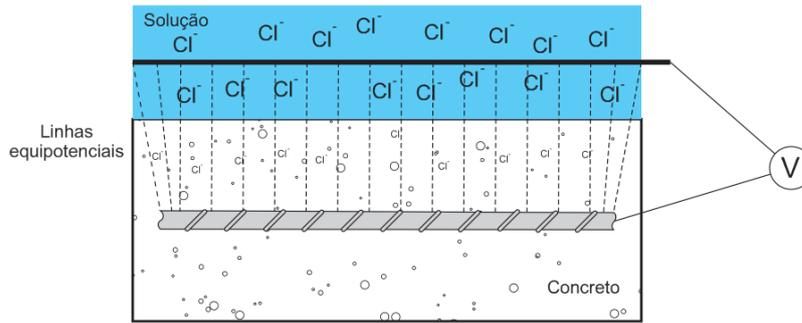
K_p é o coeficiente de permeabilidade do material, em m/s .

2.3.3 Migração iônica

A migração iônica é o mecanismo de transporte baseado no deslocamento de íons com aplicação de campo elétrico (TREJO *et al.* 2009) (Figura 2.8). Por ser um processo de transporte artificial, diferentemente dos demais mecanismos (absorção capilar, permeabilidade e difusão), a migração iônica é empregada em processos de tratamento de estruturas (extração e realcalinização eletroquímica), em estruturas submetidas a proteção catódica, em ensaios acelerados para avaliar a resistência à penetração dos íons cloreto (ASTM C1202) e em metodologias de ensaios semelhante a proposta por Castellote *et al.* (2002), objetivando calcular o coeficiente de difusão e obter um prognóstico sobre a vida útil do material.

A lei física que governa esse mecanismo de transporte foi proposta por Andrade (1993), a partir da utilização da equação de movimentação íons em um eletrólito proposta por Nernst-Plank, adicionada os efeitos da difusão pura e da convecção (Equação 2.12 e 2.13).

Figura 2.8 - Forma de penetração de íons cloretos por migração iônica. Fonte: TREJO *et al.* (2009) adaptado.



$$\text{Fluxo} = \text{difusão pura} + \text{convecção} + \text{eletromigração} \quad (2.12)$$

$$-j(x) = D_j \frac{\partial C(x)}{\partial x} + C_j V(x) + \frac{zF}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (2.13)$$

Onde:

$j(x)$ é o fluxo de massa da espécie iônica, em $\text{kg/m}^2\text{s}$;

D_j é o coeficiente de migração, em m^2/s ;

R é o coeficiente universal dos gases, 8.3144 J/mol.K ;

T é a temperatura do ambiente, em graus Kelvin;

z é a valência do íon, para cloretos é -1 ;

F é a constante de Faraday, $96485,33 \text{ J/V.mol}$;

∂E é a variação do campo elétrico, em V ;

∂x é a variação da distância, em m , e

$V(x)$ é a velocidade de convecção, em m/s .

Partindo do pressuposto de que não há convecção no interior do concreto, ou seja, não existem gradientes de pressão ou umidade, e que o efeito de difusão pura é desprezível em relação ao efeito de migração, devido a diferença de potencial ser suficientemente alta (10 a 15 V) (ANDRADE, 1993), a Equação 2.13 pode ser expressa assim:

$$j(x) = -\frac{zF}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (2.14)$$

Onde:

$j(x)$ é o fluxo de massa da espécie iônica, em $\text{kg/m}^2\text{s}$;

D_j é o coeficiente de migração, em m^2/s ;

C_j é a concentração dos íons a serem transportado, em %;

R é o coeficiente universal dos gases, 8.3144 J/mol.K;

T é a temperatura do ambiente, em graus Kelvin;

z é a valência do íon, para cloretos é -1;

F é a constante de Faraday, 96485,33 J/V.mol;

∂E é a variação do campo elétrico, em V, e

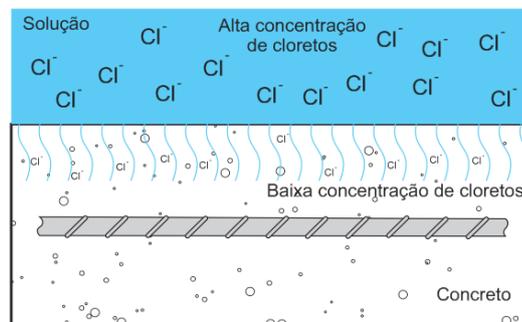
∂x é a variação da distância, em m.

2.3.4 Difusão iônica

É o mecanismo de transporte baseado na diferença de concentração entre duas regiões interconectadas. Os cloretos em regiões de maiores concentração movem-se para regiões de menores concentrações por surgimento de um gradiente de concentração iônico. Sendo assim, a difusão é um processo espontâneo de transporte de massa (CASCUDO, 1997) (Figura 2.9). Independentemente do meio (líquido ou gasoso), o mecanismo de difusão iônica pode acontecer. Assim, tanto os íons cloretos dissolvidos em um líquido, quanto o gás carbônico, podem ser transportados no interior do concreto até as armaduras do concreto. Além disso, a penetração do oxigênio ocorrer por esse mesmo fenômeno.

Como o mecanismo de transporte por absorção capilar é tipicamente limitado a uma região superficial do revestimento, em ambientes de pressão normal. Assim, pode-se afirmar que a difusão iônica é o mecanismo, predominante, de penetração de agentes agressivos. A lei física que governa esse tipo de mecanismo de transporte no estado estacionário é a 1ª Lei de Fick (Equação 2.15).

Figura 2.9 - Forma de penetração de íons cloretos por difusão iônica. Fonte: HELENE (1993).



$$j(x) = -D_j \frac{\partial C(x)}{\partial x} \quad (2.15)$$

Onde:

$j(x)$ é o fluxo de massa da espécie iônica, em $\text{kg/m}^2\text{s}$;

D_j é o coeficiente efetivo de difusão ou difusividade, em m^2/s , e

$\frac{\partial C(x)}{\partial x}$ é o gradiente de concentração, em $\text{Kg/m}^3\text{.m}$.

A primeira Lei de Fick considera apenas o fluxo unidirecional, despreza a ação do tempo e assume que a concentração é diretamente proporcional ao módulo do gradiente de concentração. Assim, o fluxo de massa tende a reduzir o gradiente de concentração. Levando-se em consideração o efeito do tempo no balanço de massa e que o coeficiente de difusão não varia com o tempo e com a distância, obtemos a 2ª Lei de Fick (Equação 2.16).

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D_j \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

De uma maneira geral, o transporte por difusão de líquidos e gases no concreto depende, principalmente, da concentração destas substâncias na superfície do concreto, do tempo de exposição, da variação da temperatura, do grau de saturação dos poros, da microestrutura do concreto, dos produtos da hidratação e das interações entre essas substâncias e os constituintes do concreto (HELENE, 1993).

Uma das soluções para a Equação 2.16 é obtida através da Transformada de Laplace, considerando-se material sólido, semifinito e a concentração da solução externa constante. Além disso, já se assumi que o coeficiente de difusão é constante ao longo do material e que durante o processo de ingresso dos cloretos, esses íons não interagem com a matriz de cimento (Equação 2.17). Vários pesquisadores têm empregado essa simplificação em seus estudos, com o objetivo de estudar a influência das variáveis sobre o transporte de cloretos no concreto (ANDRADE, 1988; CASTELLOTE, 2002; MEIRA, 2004; TREJO & MONTEIRO, 2004; RIZZON *et al.*, 2006; COSTA & APPLETON, 2007; CHIANG *et al.*, 2009; ROMANO, 2009; entre outros).

Segundo Costa & Appleton (2007), verificou-se que os ajustes a 2ª lei de Fick representaram com uma boa aproximação os perfis de cloretos em concreto submetidos a vários ambientes com exposição natural, isso para cada intervalo de tempo de exposição. Porém, os autores não recomendam a utilização deste tipo de ajuste em previsão de penetração de cloretos em longo prazo, tendo em vista que o coeficientes de difusão e a concentração superficial não são constantes com tempo. De modo a evitar erros consideráveis na avaliação do mecanismo de transporte, faz-se importante considerar a variação com o tempo.

$$C(x, t) = C_s + (C_0 - C_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \quad (2.17)$$

Onde:

$C(x,t)$ é a concentração dos cloretos na profundidade x e no tempo t , em %;

x é a profundidade paralela ao fluxo de ingresso dos cloretos, em cm;

t é o tempo, em segundos;

C_0 é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto, em %,

C_s é a concentração de cloretos na superfície do concreto, em %

erf é a função de erro de Gauss, e

D_{ns} é o coeficiente difusão no estado não-estacionário no tempo t , em cm^2/s .

2.3.4.1 Concentração superficial

Estudos na área mostram que a concentração superficial é fortemente influenciada pelas condições de exposição (CASTRO *et al.*, 2001; HELENE, 2003; COSTA & APPLETON, 2007), pelo tempo de exposição (COSTA *et. al.*, 1999; CASTRO *et al.*, 2001; MEIRA, 2004; COSTA & APPLETON, 2007; ROMANO, 2009), pela concentração dos íons cloretos em contato com o concreto (COSTA *et. al.*, 1999; HELENE, 2003; COSTA & APPLETON, 2007; ROMANO, 2009), pela microestrutura do concreto (HELENE, 2003; MEIRA 2004; COSTA & APPLETON, 2007) e pelo tipo de cimento empregado (HELENE, 2003; MEIRA, 2004).

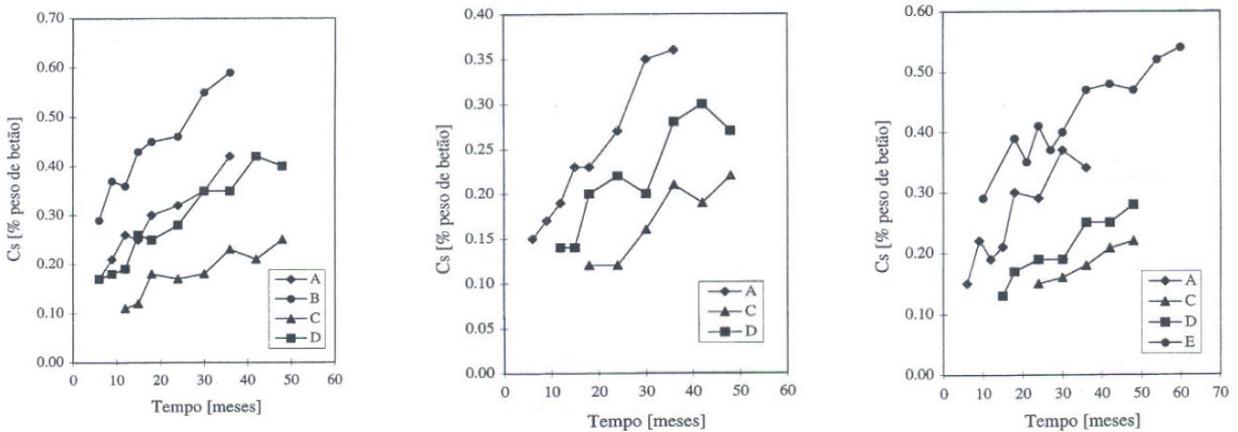
De modo a exemplificar tais influências sobre a concentração superficial (C_s), a Figura 2.10 mostra o estudo realizado por Costa & Appleton (2007) em concretos moldados com cimento Portland tipo I. Os espécimes foram analisados em função do ambiente de exposição, do tempo de exposição e dos tipos de traços empregados. A partir dos resultados obtidos, percebe-se a resposta da variável sobre a concentração superficial. Logo, concretos na zona de arrebentação de maré (imersão sobre pressão e secagem) tiveram maiores valores de concentração superficial, motivada pela ação da água do mar sobre pressão. Seguidos pela zona flutuação de maré, pelo interior das docas (imersão e secagem) e pela atmosfera marinha.

Para o consumo de cimento, fator preponderante nas dosagens, os autores perceberam uma pequena influência do consumo de cimento na concentração superficial (C_s). Sendo

assim, quanto menor o consumo de cimento, maior a concentração superficial. Já em relação ao tempo de exposição, percebe-se um crescimento do C_s com o tempo de exposição em todos os tipos de traço e ambientes de exposição. Segundo Romano (2009), com o passar do tempo, os valores de C_s tendem a aumentar numa taxa mais elevada e em seguida reduzir até atingir aproximadamente a concentração do ambiente; isso para estudos realizados em obras com elevado tempo de exposição, algo em torno de 20 anos. Esses mesmos autores, em outro estudo propuseram um modelo utilizado para relacionar essa variável dependente (C_s) com o tempo (Equação 2.18) (COSTA & APPLETON, 1999).

Figura 2.10 – Concentração superficial em função do tempo de exposição, do ambiente de exposição e do tipo de traço. Fonte: COSTA & APPLETON (2007).

A – Zona de arrebentação de maré; B – Zona de flutuação de maré; C – Zona de atmosfera marinha;
D – Zona de interior de doca I; E – Zona de interior de doca II (mais intensa).



(a) - Consumo de cimento de 300 Kg/m³ e relação a/agl 0,5;

(b) - Consumo de cimento de 425 Kg/m³ e relação a/agl 0,3;

(c) - Consumo de cimento de 500 Kg/m³ + 21,5 Kg/m³ de microsílca e relação a/agl 0,35;

O modelo representa com certa facilidade e de forma empírica, o comportamento da concentração superficial com o tempo. Apesar da simplificação levar em consideração a atenuação da variável em questão com o tempo, é importante reconhecer que há a necessidade de mais estudos baseados em estruturas reais. Com o intuito de compreender melhor os efeitos predominantes sobre a concentração superficial (C_s). Conseguindo assim, uma melhor aproximação entre o modelo adotado e os fenômenos que representam.

$$C_s(t) = K_s \times t^n \quad (2.18)$$

Onde:

$C_s(t)$ é a concentração superficial em um determinado tempo t , em % em relação à massa de aglomerante;

K_s é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao material e a zona de exposição;

t é o tempo de exposição ao ambiente, em dias, e

n é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao tempo.

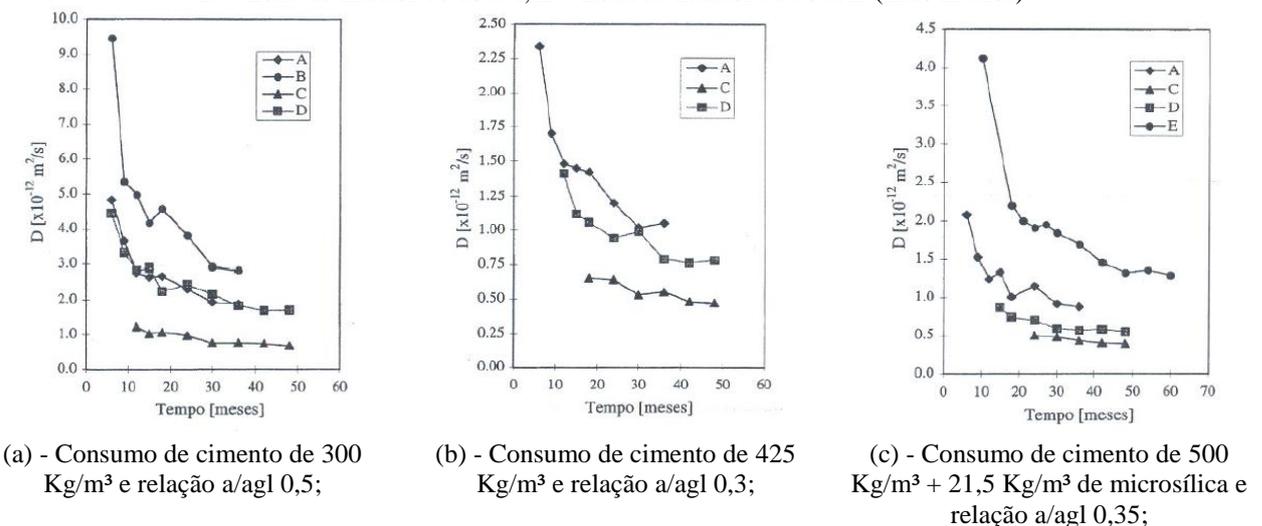
2.3.4.2 Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão é fortemente influenciado pelas condições de exposição (HELENE, 2003; COSTA & APPLETON, 2007), pelo grau de hidratação, pelo tipo de cimento (COSTA et. al, 1999; COSTA E APPLETON, 2007), pelo uso de adições (COSTA E APPLETON, 2007), pela relação água/aglomerante (RIZZON *et al.*, 2006; COSTA & APPLETON, 2007), pela relação água/aglomerante (MEIRA, 2004; RIZZON *et al.*, 2006; COSTA & APPLETON, 2007), pelo grau de saturação dos poros (GUIMARÃES, 2000) e pela idade do material (CASTRO *et al.*, 2001; HELENE, 2003; COSTA & APPLETON, 2007).

As condições de exposição mostram que o coeficiente de difusão tende a reduzir na seguinte sequência: concretos submersos (MEIRA, 2004), concretos em zonas de arrebentação, concretos em zona de flutuação de marés e concretos em zona atmosférica (COSTA & APPLETON, 2007), conforme se pode observar na Figura 2.11. Este fato é explicado pela influência de outros mecanismos de transporte que atuam em conjunto com a difusão.

Figura 2.11 – Coeficiente de difusão em função do tempo de exposição, do ambiente de exposição e do tipo de traço. Fonte: COSTA & APPLETON (2007).

A – Zona de arrebentação de maré; B – Zona de flutuação de maré; C – Zona de atmosfera marinha;
D – Zona de interior de doca I; E – Zona de interior de doca II (mais intensa).

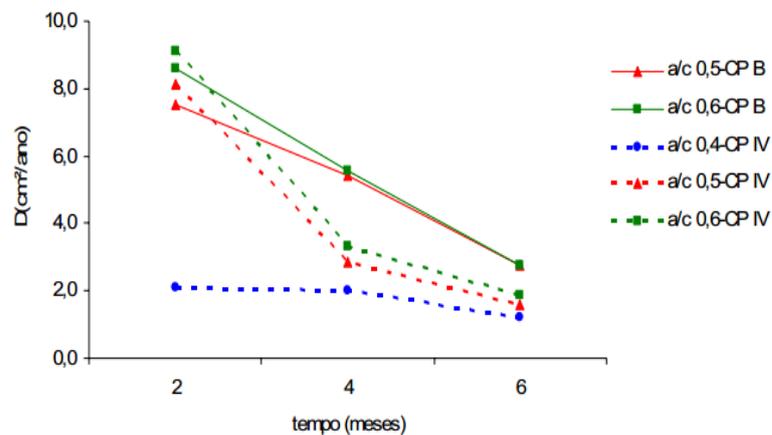


Guimarães (2000) ao estudar a influência do teor de umidade sobre o coeficiente de difusão de íons cloreto em pastas com cimento Portland V-ARI, observou que quanto maior o grau de saturação, maior o coeficiente de difusão de íons cloreto. Esse comportamento é

justificado pelo fato de que a presença de água nos poros facilita a difusão dos íons cloretos através do concreto.

O grau de hidratação, o tipo de cimento, o uso de adições e a relação água/cimento influenciam diretamente na porosidade do material; logo, quanto menos poroso é o concreto, menor será o seu coeficiente de difusão. A Figura 2.12 mostra a influência do tipo de cimento e da relação água/cimento. O tipo de cimento está diretamente relacionado ao grau de hidratação e a combinação de cloretos com a matriz cimentícia (COSTA *et. al.*, 1999; HELENE, 2003; COSTA & APPLETON, 2007).

Figura 2.12 – Influência do tipo de cimento e da relação água/cimento sobre o coeficiente de difusão. Fonte: RIZZON *et al.* (2006).



Segundo Costa & Appleton (2007), o coeficiente de difusão é fortemente influenciado pela idade do concreto, por três motivos: a hidratação do cimento, que com o passar do tempo reduz a porosidade do concreto; a formação de uma camada de hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$) na superfície do concreto, que reduz a penetração de cloretos e a combinação de íons cloretos presente na água do mar com produtos de hidratação do cimento, sendo essas reações responsáveis pela redução do tamanho dos poros do concreto. As Figura 2.13 e 2.14 mostram essa relação do coeficiente de difusão em concretos com o tempo. O modelo empírico usado para representar o coeficiente de difusão em função do tempo foi proposto por Mangat & Molloy (1994), sendo mais conhecida como “Aging Factor”. A Equação 2.19 expressa matematicamente a relação.

$$D(t) = D_0 \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-m} \quad (2.19)$$

Onde:

$D(t)$ é o coeficiente de difusão em um determinado tempo t , em cm^2/s ;

D_0 é o coeficiente de difusão em um determinado tempo t_0 , em cm^2/s ;

t é o tempo desejado, em segundos;

t_0 é o tempo de referência, em segundos, e

m é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao tempo.

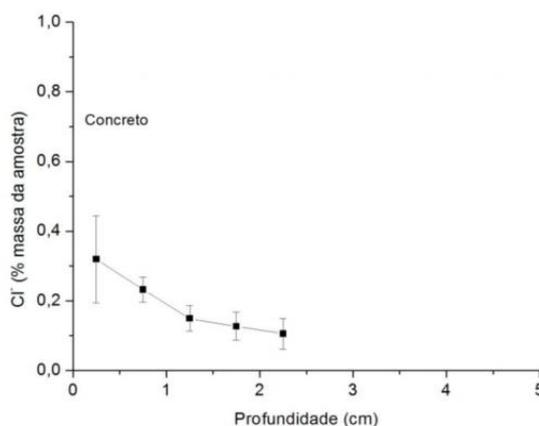
Estudos empregando este tipo de relação, mostram que os valores do parâmetro m variam em função da relação água/cimento e do emprego de adições. Stanish & Thomas (2003), empregando em seus dados a relação entre o coeficiente de difusão e o tempo, observaram valores de 0,32, 0,66 e 0,79 para concretos sem adições, com 25% e com 56% de cinza volante, respectivamente. Já Mangat & Molloy (1994), observaram, em seu estudo com diversas relações água/cimento e adições, um comportamento diretamente influenciada pela relação a/c. A Equação 2.20 mostra a relação obtida.

$$m = 2,5 \times a/c - 0,6 \quad (2.20)$$

2.4 PERFIS DE CLORETOS

Perfis de cloretos são gráficos que mostram as concentrações do agente agressivo, em relação à massa de aglomerante ou a hidroxilas, ao longo da profundidade em uma peça de concreto submetida à penetração de um contaminante, neste caso os íons cloretos (Figura 2.13) (CASCUDO, 1997). Os perfis podem ser expressos para cloretos livres e totais. A análise comparativa entre perfis de cloretos permitem a obtenção de informação sobre a evolução da penetração de cloretos ao longo do tempo, levando em consideração a influência da qualidade do concreto e das condições de exposição (COSTA & APPLETON, 2007).

Figura 2.13 – Perfil de cloretos livres clássicos em função da profundidade, para concretos submetidos a ciclos de imersão e secagem. Fonte: MALHEIROS *et al.* (2014).

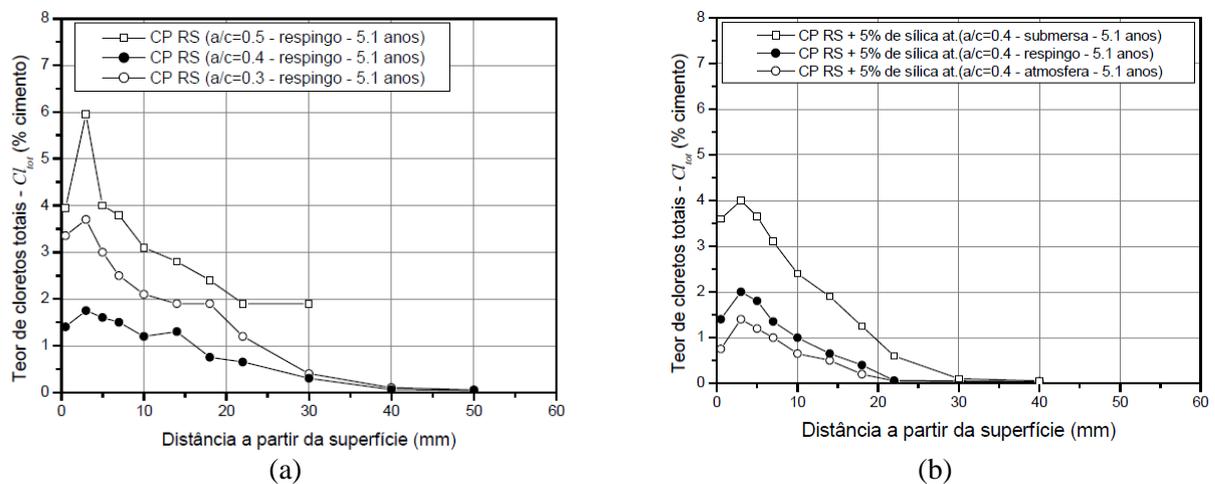


Avaliando as características dos concretos sobre a formação dos perfis de cloretos, percebe-se a influência clara da relação água/cimento, do uso de adições e do consumo de

cimento no concreto. Portanto, concretos com maior relação a/c, apresentam maiores concentrações de cloretos ao longo da profundidade para um mesmo tempo de exposição, esse comportamento é explicado pela porosidade do material, maior em concretos com maiores relações a/c (Figura 2.14 (a)). A porosidade explica o comportamento do uso de adições e do consumo de cimento. Assim, concretos com maiores consumos de cimento e uso de adições tendem a apresentar menores concentrações de cloretos, para um mesmo tempo de exposição (Figura 2.15 (a)).

Em relação ao ambiente de exposição, Sandberg *et al.* (1998) estudando concretos expostos a diversas zonas de agressividade na Suécia, observaram que as maiores concentrações de cloretos se dava em concretos submersos, seguidos por concretos em zona de respingo e, por fim, em concretos na zona de atmosfera marinha (Figura 2.14 (b)). Este comportamento também foi observado por Costa & Appleton (2007). Já o tempo de exposição influencia diretamente na concentração de cloretos. Então, concretos com maiores tempos de exposição tendem a apresentar maiores concentrações de cloretos em uma mesma profundidade e zona de exposição (Figura 2.15 (b)).

Figura 2.14 - Perfil de cloretos totais de duas zonas para concretos em zona de respingo para várias relações a/c (a) e para concretos em exposição em zonas submersas, de respingo e de atmosfera marinha (b). Fonte: SANDBERG *et al.* (1998).



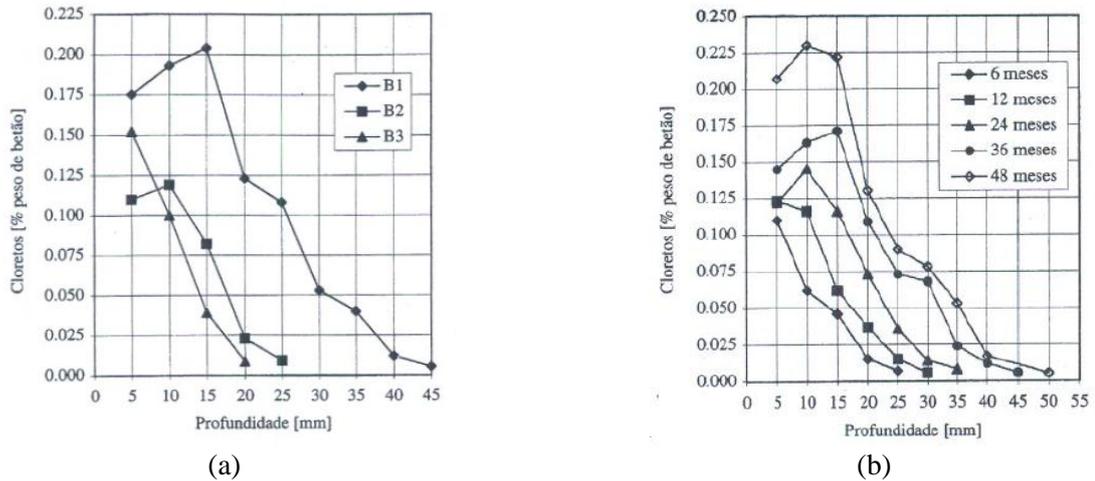
Os perfis de cloretos podem apresentar-se de duas maneiras distintas, os perfis clássicos (típicos) e os perfis de duas zonas. O perfil clássico de cloretos, caracteriza-se por apresentar a concentração máxima na camada mais superficial do concreto; logo, a concentração superficial (C_s) encontra-se na primeira camada (Figura 2.13) (GUIMARÃES *et al.*, 2007). Já o perfil de duas zonas tem sua concentração máxima a alguns milímetros após a superfície do concreto, delimitando-se, assim, uma zona superficial onde a absorção capilar é o principal mecanismo de transporte e uma zona mais interna, após o pico de concentração,

onde prevalece o mecanismo de transporte por difusão (Figura 2.14 (a) e (b)) (CASTRO *et al.* 2001).

Figura 2.15 - Perfil de cloretos totais de duas zonas para diferentes tipos de concreto (a) e para concretos em função do tempo de exposição a ciclos de imersão e secagem em docas (b). Fonte: COSTA & APPLETON (2007).

B1 - Consumo de cimento de 300 Kg/m³ e relação a/agl 0,5; B2 - Consumo de cimento de 425 Kg/m³ e relação a/agl 0,3;

B3 - Consumo de cimento de 500 Kg/m³ + 21,5 Kg/m³ de microsíllica e relação a/agl 0,35;



A formação de perfis de cloretos clássicos tende a acontecer principalmente em concretos de baixa qualidade (Figura 2.14 (b)), com pequenos tempos de exposição (Figura 2.15(b)) e em ambientes aonde os concretos estejam sempre submersos (COSTA & APPLETON, 2007). Já o perfil de duas zonas é principalmente influenciado pelo ambiente e o tempo de exposição do concreto. Segundo Costa & Appleton (2007), nas zonas de flutuação de maré e arrebentação, as camadas mais superficiais do concreto estão sujeitas a ciclos de molhagem e secagem pela água do mar. Portanto, estes tipos de ambiente conduzem a um aumento do teor de cloretos nessa zona e a formação de picos de concentração no interior do concreto que tendem a avançar com a profundidade ao longo do tempo.

Nestes tipos de perfis (perfil de duas zonas) acontecem nas camadas mais superficiais em virtude do favorecimento de troca de umidade mais intensa em ambientes com imersão e secagem (CASTRO *et al.*, 2001; MEIRA *et al.*, 2007), da ação da lixiviação pela águas pluviais (CASCUDO, 1997) e da ação da carbonatação que favorece a liberação de cloretos fixados quimicamente aos produtos hidratados (COSTA & APPLETON, 2007). A formação de perfis de cloretos de duas zonas é relativamente comum e foi observada por diversos autores (CASTRO *et al.*, 2001; LEVY, 2001; MEIRA *et al.*, 2007; SANDBERG *et al.*, 1998; ANGST *et al.*, 2011, entre outros).

Sabendo que, o estudo desse tipo de perfil, no que se refere ao transporte de íons de cloretos, enseja num estudo de caso de cunho específico, este trabalho se dedicou ao estudo

das camadas mais internas do concreto, ou seja, aquelas após a zona de convecção. Nesse sentido, assume-se que o mecanismo de transporte que prevalece é a difusão (CASTRO *et al.* 2001; MEIRA, 2004; COSTA & APPLETON, 2007). Portanto, é possível analisar o comportamento desses perfis a partir da zona mais interna, onde prevalece o transporte por difusão, considerando o perfil reescalonado, conforme discutido no item 4.2.1.4 (ANDRADE & ALONSO, 1997; MEIRA *et al.*, 2010). Com base no perfil reescalonado, a concentração máxima observada nas camadas internas, passa a ser a nova concentração superficial do perfil reescalonado, mantendo-se os demais pontos internos do perfil, com o novo referencial de profundidade, a partir do ponto de concentração máxima.

2.5 TIPOS DE ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO POR CLORETOS

Pesquisas em corrosão de estruturas de concreto armado têm algumas dificuldades inerentes a cada caso. Primeiro, o processo de corrosão é complexo, demorado e cheio de incertezas. Segundo, varias metodologias experimentais têm sido utilizadas para simular os ambientes deletérios. Terceiro, a utilização de diferentes técnicas de monitoramento e avaliação do estado da corrosão, cada uma apresentando suas limitações e aplicação. Por fim, cada material apresenta respostas diferenciadas em função da idade, do ambiente de exposição, do modo de confecção e aplicação (TREJO *et al.*, 2009).

Diferentes abordagens foram utilizadas por pesquisadores em ambiente de laboratório, objetivando simular as condições reais de exposição. Partes desses estudos foram realizadas dispondo a armadura em solução alcalina, de modo a modelar o meio no qual a armadura está envolvida no concreto. Logo, este tipo de ambiente pode apresentar facilmente o pH e a concentração de cloretos alteradas com precisão, a critério do pesquisador (ANGST *et al.* 2009; TREJO *et al.*, 2009). Quando se utiliza pasta de cimento, argamassa ou concreto, a penetração de cloreto em espécimes endurecidos se torna mais demorada e a quantificação da concentração de cloretos presente na superfície do aço mais difícil e trabalhosa (ANGST *et al.*, 2009). Estes estudos tentam acelerar a corrosão, com precisão e qualidade, para obter resultados mais rápidos em comparação com os métodos de exposição natural.

Na literatura, há diversos métodos de ensaio para estudo da corrosão por cloretos. Todos estes métodos de ensaio acelerado consistem em variações dos tipos de mecanismos de transporte dos íons cloretos no interior do concreto, como exceção a adição de cloretos misturados ao concreto fresco e em soluções simuladoras de concreto (ANGST *et al.*, 2009). As Figuras 2.16 e 2.17 mostram as formas de como os cloretos tem sido introduzidos em ensaios acelerados de corrosão, considerando os cenários internacional e nacional,

respectivamente. Nesse levantamento, foram consideradas 39 publicações internacionais e 16 publicações nacionais.

Figura 2.16 – Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário internacional.
Fonte: ANGST & VENNESLAND (2009).

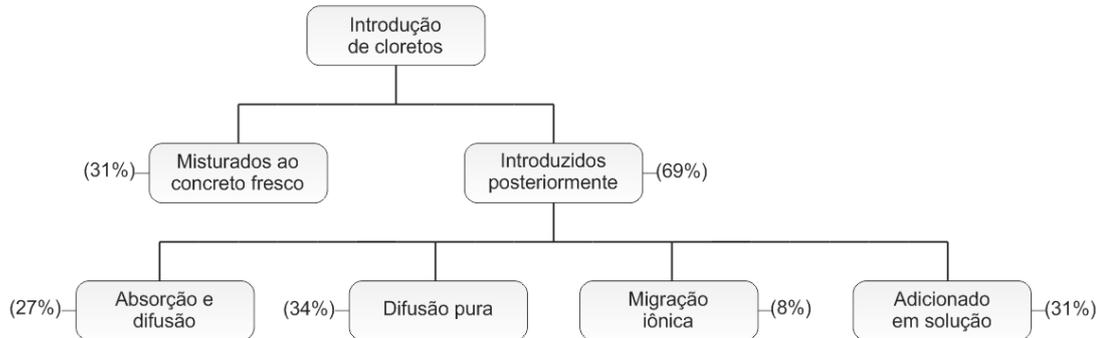
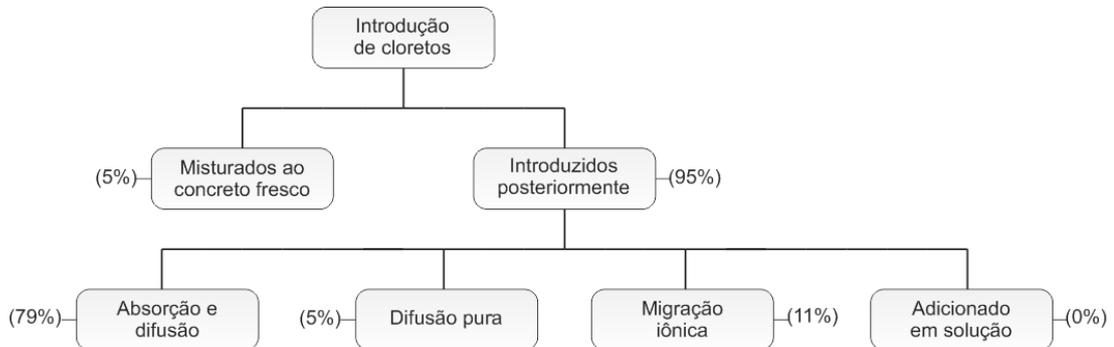


Figura 2.17 - Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário nacional. Baseado na bibliografia utilizada nesse trabalho.



Os pesquisadores estão empregando diferentes métodos para acelerar a corrosão, como a adição de cloretos a água de amassamento do concreto (ARYA *et al.* 1994; PAGE *et al.*, 2002; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007; entre outros); aplicação de um campo elétrico para acelerar a penetração de cloretos no concreto (CASTELLOTE *et al.*, 2002; TREJO & PILLAI, 2003); disposição de concretos em ciclos de secagem e umedecimento (GLASS *et al.*, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006; entre outros) e a disposição de concretos a difusão pura através do ensaio de “*Ponding Test*” (JOUKOSKI *et al.*, 2004; CHIANG *et al.*, 2007). No entanto, o emprego desses métodos carecem de ser comparados com espécimes expostos a situações reais, conforme realizado por Meira *et al.* (2014).

No cenário internacional, o método acelerado mais empregado é a adição salina a massa de concreto, seguido pelo que empregam difusão pura, como o “*Ponding Test*” (Figura 2.16). Já no cenário nacional, o método disparado de emprego é ensaios com mecanismo de transporte por ação conjunta de absorção e difusão, com os ciclos de imersão e secagem (Figura 2.17). A variação nos procedimentos de ensaio para indução da corrosão por cloretos podem influenciar no tempo para despassivação, no mecanismo de transporte, no

comportamento eletroquímico da barra e no teor crítico de cloretos (ANGST *et al.*, 2009). A seguir, os principais métodos acelerados de corrosão em concretos armados.

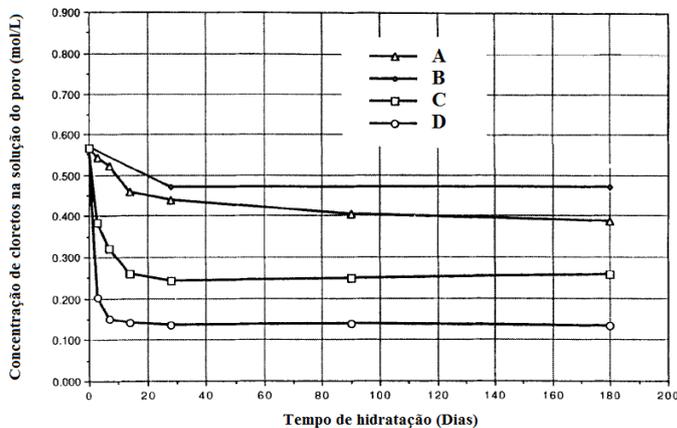
2.5.1 Adição de cloretos à massa de concreto

Esta metodologia acelerada de indução a corrosão por cloretos consiste em adicionar certas quantidades preestabelecidas de íons cloretos ao traço do concreto e, em seguida, os concretos são dispostos a uma dessas quatro condições: em ambiente de laboratório, em câmara climática, em ciclos de imersão e secagem em água destilada ou em migração iônica contendo apenas água destilada na solução. Os principais sais empregados são o cloreto de sódio (ARYA *et al.* 1994; PAGE *et al.*, 2002; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007; ANN, 2010; entre outros) e o cloreto de cálcio (MONTEIRO *et al.* 1985; ALONSO & ANDRADE, 1993).

Este tipo de ensaio foi muito empregado na década de noventa por sua praticidade, velocidade no desencadeamento da corrosão e homogeneidade da concentração de cloretos no interior do concreto. O objetivo dessa técnica é encontrar o teor crítico de cloretos por tentativa num rápido espaço de tempo. Por não envolver nenhum mecanismo de transporte de massa, esta metodologia impede o monitoramento eletroquímico durante o ingresso dos agentes agressivos, afeta porosidade do material, provoca a formação de outros compostos na fixação de cloretos e é questionável a formação da camada passivadora da armadura (ANGST *et al.* 2009).

Figura 2.18 – Características da corrosão por adição a massa: (a) Concentração de cloretos na solução do poro *versus* tempo de hidratação para pasta de cimento com relação água/cimento de 0,5, contaminado com 1% de NaCl. Fonte: ARYA *et al.* (1994). (b) detalhe das barras após 55 dias de exposição a concretos contaminados com 3% de NaCl. Fonte: LI *et al.* (2011).

A – 100% de Cimento Portland I; B – 90% de Cimento Portland I + 10% de sílica ativa; C - 65% de Cimento Portland I + 35% de cinza volante; D - 35% de Cimento Portland I + 65% de escoria de alto forno.



(a)



(b)

A Figura 2.18 (a) mostra a tendência de comportamento das concentrações de cloretos em concretos contaminado com 1% de cloreto de sódio. A partir dela, percebe-se uma tendência de redução na concentração de cloretos livres da solução dos poros do concreto, nas primeiras idades de hidratação. A medida que se passa, essas concentrações foram se estabilizando, mostrando a homogeneidade na solução dos poros (ARYA *et al.*, 1994). Ainda na Figura 2.18 (a), percebe-se a influência das adições na redução das concentrações com o uso de adições, motivado pela combinação de cloretos a matriz cimentícia. Já a Figura 2.18 (b) mostra a superfície da barra após esse tipo de ensaio, não se percebe a corrosão localizada e, sim, áreas com maiores dissolução do metal, descaracterizando assim a corrosão por *pite* (ANGST *et al.*, 2009).

Este método de ensaio simula a contaminação de concretos por utilização de agregados rolados ou com o uso de aceleradores de pega. Em tempos atuais, esses tipos de contaminação são praticamente improváveis pelas limitações impostas pelas normas (ANDRADE, 2001). Por se tratar de um método de ensaio que não representa a nenhuma fenomenologia de transporte existente na realidade, a contaminação de concretos com cloretos apresenta vantagens e desvantagens, conforme mostrado na Tabela 2.1.

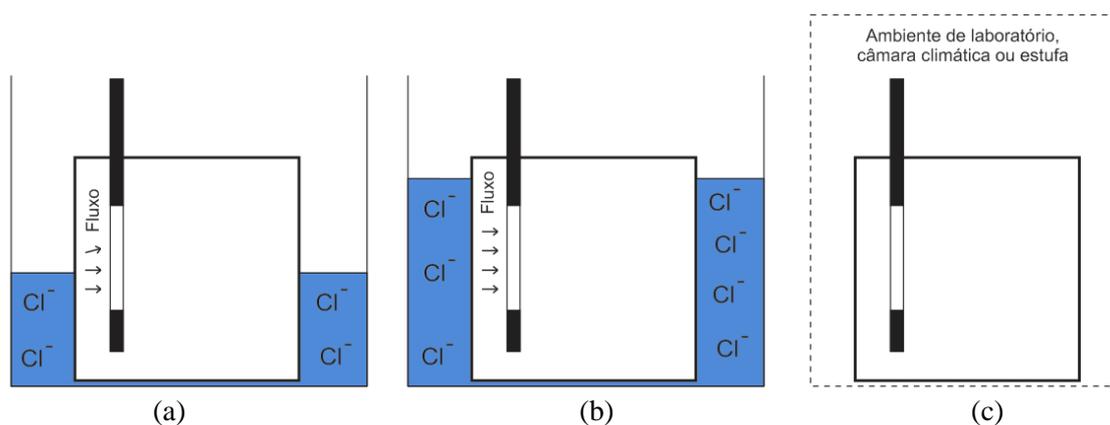
Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de adição a massa.

Vantagens	Desvantagens
Velocidade de ensaio;	Questionável a formação da película passivadora;
Homogeneidade de concentração;	Homogeneidade de concentração;
Precisão na determinação da concentração de cloretos.	Possibilidade de diferentes tipos de ligação entre a matriz cimentícia e os cloretos;
-	Porosidade a afetada;
-	Não envolve nenhum mecanismo de transporte.

2.5.2 Ciclos de imersão e secagem

Esse tipo de ensaio, caracteriza-se por submeter os corpos de prova a períodos de imersão (parcial ou total) (Figura 2.19 (a) e (b)) em solução agressiva e posterior secagem (em ambientes de laboratório, câmara climática ou estufas) (Figura 2.19 (c)). São variáveis desse tipo de ensaio que influenciam na resposta das concentrações de cloretos no concreto: tempo de exposição, concentração da solução, tipo de cátion associado aos íons cloretos, período para renovação da solução, tempo de imersão, tipo de imersão (total ou parcial), tempo de secagem, tipo de secagem (em ambientes de laboratório, câmara climática ou estufas) e condições de secagem (temperatura, umidade e ventilação).

Figura 2.19 – Configuração de ensaio de imersão e secagem - (a) imersão parcial em solução contendo cloretos, (b) imersão total em solução contendo cloretos, (c) tipos de secagem.



Na literatura, a solução mais empregada é a cloreto de sódio a 1M (GLASS *et al.*, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006). Quanto aos ciclos, os períodos de imersão/secagem mais empregados são de 3 dias para imersão e 4 dias para secagem ou de 2 dias para imersão e 5 dias para secagem (GJØRV & VENESLAND, 1979; CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST *et al.*, 2011). No que se refere à forma de secagem, há na literatura, um certo equilíbrio entre a secagem em ambiente de laboratório (WHEAT, 2002; TAVARES *et al.*, 2006; ANGST *et al.*, 2011) e a secagem em estufa com temperatura variando entre 40 e 50°C (VIEIRA, 2003; TAVARES *et al.*, 2006; KISHIMOTO, 2010).

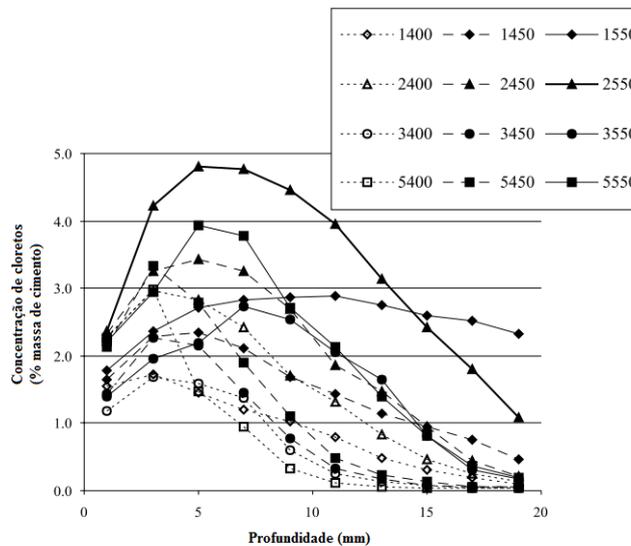
Nesse método de ensaio acelerado a sucção capilar, que se caracteriza pela penetração dos íons cloretos na rede porosa do material por tensões capilares, prevalece nas camadas superficiais do concreto (ANGST & VENNESLAND, 2009). No entanto, nas camadas mais profundas, onde a perda de água não é tão acentuada durante a secagem, ocorre a difusão (COSTA & APPLETON, 2007; MEIRA *et al.*, 2010). Por isso, esse método de ensaio apresenta enorme afinidade com a realidade (ANGST *et al.* 2009).

O emprego de ciclos de imersão e secagem favorece o monitoramento eletroquímico durante todo processo corrosivo. Logo, durante todo o fenômeno da corrosão, pode-se ter as condições do estado da barra. Porém, durante o monitoramento, pode-se verificar curtos ciclos de passivação e repassivação até a consolidação do início do processo corrosivo, motivado pelas mudanças bruscas de ambiente em curto espaço de tempo (MEIRA *et al.* 2014). Alterações microestruturais podem acontecer durante o ensaio, não só motivadas pela idade; mas, sim, alterações micro-estruturais relacionadas as pequenas curas do concreto, durante as imersões, e a temperatura que se empregue na secagem.

A Figura 2.20 mostra os perfis de cloretos de concretos com diversos tipos de cimento e relação água/cimento, submetidos a ensaio de imersão total, em solução de 3% de NaCl por 24 horas e secagem em câmara climática (U.R.=50% e T=20°C). Os ciclos de

imersão e secagem se deram durante 26 semanas. Já na Figura 2.13, os concretos foram submetidos à imersão total em solução de 1M de NaCl, durante três dias e secagem em ambiente de laboratório (U.R.=68 ±5% e T=26±3°C), durante 4 dias, os ciclos de imersão e secagem se deram durante 7 semanas. A partir dos dados mostrados, percebe-se que as combinações de tipos diferenciados de mecanismos de transporte, aliada a qualidade do material e as configurações de ensaio podem influenciar na resposta do material ao ambiente deletério.

Figura 2.20 – Perfil de cloretos em concretos submetidos a ensaio de ciclos de imersão e secagem. Fonte: POLDER & PEELEN (2002).



Diferentemente dos ensaios de adição a massa, aqui o concreto apresenta concentrações variando com a profundidade, isso dificulta a precisão nas leituras de concentração de cloretos, mas por se introduzir os agentes agressivos após a concretagem, têm-se a certeza de que há a formação da película passivadora e a corrosão tende a acontecer por *pites*. A Tabela 2.2 mostra as vantagens e desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

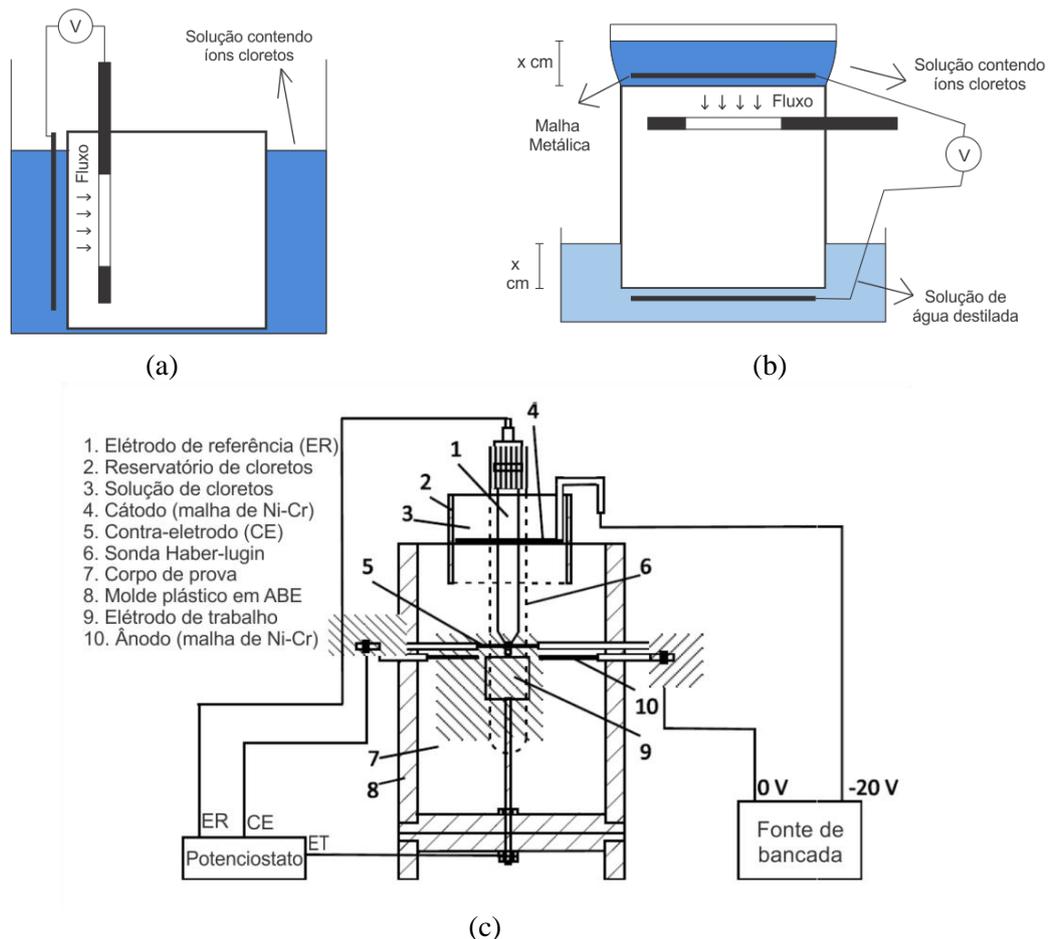
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de ciclos de imersão e secagem.

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão;	Tempo relativamente alto para realização do ensaio;
Afinidade com a realidade;	A secagem pode interferir na rede porosa;
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte;	Controle parcial das principais variáveis que envolvem o transporte de cloretos;
Praticidade e simplicidade de execução do ensaio.	Dificuldade na precisão das leituras das concentrações de cloretos;
-	Curtos ciclos de passivação e repassivação até sua consolidação do início do processo corrosivo.

2.5.3 Eletromigração

A eletromigração é um conjunto de configurações de ensaio acelerado de corrosão baseada na penetração de cloretos pela aplicação de um campo elétrico. O mecanismo de transporte preponderante é a migração iônica (CASCUDO, 1997; MIETZ, 1998). Em um curto espaço de tempo, os íons cloreto migrar sob o efeito de um campo elétrico para a superfície do aço, ao em vez de se difundirem lentamente no interior do concreto, devido a diferenças de concentração (TREJO *et al.*, 2003). As configurações de ensaio são as mais diversas e variam desde os tipos de solução empregada, passando pelas formas de montagem do ensaio, até tempo de aplicação de um determinado campo elétrico. As configurações de ensaio mais utilizadas estão apresentadas na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Configurações de ensaio por migração iônica - (a) método de indução usando a barra como um dos pólos. Fonte: CABRERA (1996), (b) método de indução usando malhas como pólo. Fonte: CASTELLOTE *et al.* (2002) (c) ACT test. Fonte: TREJO & MILLER (2003).



Na literatura, o sal mais empregado é o cloreto de sódio (AUSTIN, 2009; PRABAKAR *et al.*, 2009; TREJO, 2009; SPAINHOUL *et al.*, 2008; AHMAD *et al.*, 2005; CABRERA, 1996; CASTELLOTE *et al.*, 2002; PAGE *et al.*, 2001; entre outros). Já as concentrações de cloretos empregadas nas soluções estão entre 3% e 1M ($\approx 3,54\%$)

(ASBORRA *et al.* 2011; TREJO, 2003; CASTELLOTE *et al.*, 2002; LEE *et al.*, 2002; ALONSO *et al.*, 1998; TORRES, 2006; entre outros).

A diferença de potencial recomendada varia de autor para autor, porém, há uma tendência a aplicação de baixas diferenças de potencial. Trejo & Pillai (2003) recomendam 10V. Castellote *et al.* (2002) recomenda entre 10 e 13V. Os principais motivos para a aplicação de uma diferença de potencial tão baixa se deve, principalmente, as alterações nos perfis de cloretos com o aumento da tensão aplicada (TREJO & PALLAI, 2003) e ao efeito da polarização. Quanto maior a aplicação do campo elétrico, maior a polarização e o tempo necessário para a barra voltar à configuração original (CASTELLOTE *et al.*, 2002; TREJO *et al.* 2003). Para maiores detalhes sobre o efeito da polarização, consultar o item 4.2.2.1 desse trabalho.

No geral com pequenas variações, o tipo de configuração mostrado na Figura 2.21 (a) é a mais empregada (CABRERA, 1996; HUANG & YANG, 1996; ALONSO *et al.*, 1998; PAGE & HAVDAHL, 2001; TORRES, 2006; SPAINHOUR *et al.*, 2008; AUSTIN, 2009; entre outros). Porém, esse tipo de configuração, apesar de ser a mais simples das três, caracteriza-se por uma forte polarização na barra, tendo em vista que um dos polos é a própria armadura (TREJO *et al.*, 2009).

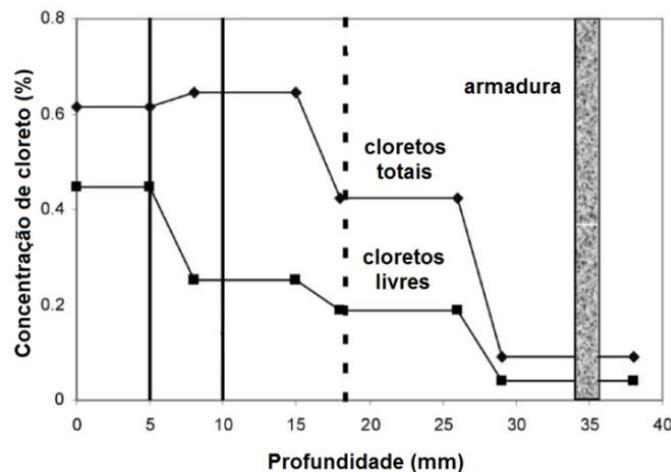
A Figura 2.21 (b) mostra o esquema de montagem proposto por Castellote *et al.* (2002), que consiste no emprego de uma diferença de potencial entre duas malhas metálicas submersas em soluções distintas, a primeira contendo íons cloretos e, a segunda, contendo apenas água deionizada. Por não empregar a barra com pólo negativo, a polarização na barra é reduzida. Porém, tal configuração de montagem repercute em um maior tempo de ensaio, quando comparados as configurações mostrada na Figura 2.21 (a), devido à maior resistividade do material provocado pela distância entre os polos.

Já na Figura 2.21 (c), temos o ensaio *Accelerated Chloride Threshold Test* (ACT) proposto por Trejo & Miller (2003), um ensaio complexo que consiste na confecção de corpos de prova de argamassa cilíndricos (Figura 2.21 (c-7)) (75 x 150 mm) com armadura embutida. Acima do CPs, são dispostos reservatórios (Figura 2.21 (c-2)) contendo uma solução com 3,5% de cloreto de sódio (Figura 2.21 (c-3)). A diferença de potencial aplicada por uma fonte de bancada entre o cátodo (Figura 2.21 (c-4)) e o ânodo (Figura 2.21 (c-10)) é de 20 volts. Logo, a barra não é usado como pólo para aplicação da tensão. A armadura é ligada um “terra”, minimizando drasticamente o efeito da polarização. O campo elétrico é aplicado em intervalos de 6 horas e as medidas eletroquímicas são realizadas duas horas após o emprego do campo. A corrosão da armadura é monitorada constantemente através de potenciostato,

usando a técnica de resistência a polarização (ver item 2.6.2). Embutidos no espécime estão o contra-eletródo (Figura 2.21 (c-5)) e a sonda de Haber-Luggin (Figura 2.21 (c-6)) que contém um elétródo de referência (eletrodo de calomelano saturado), de modo a executar os ensaios de resistência de polarização. O ensaio prossegue até a detecção da despassivação da armadura.

A aplicação de campo elétrico para acelerar a migração de cloreto gera outro problema, como a migração iônica de íons hidroxila (OH^-), assim, o pH da matriz cimentícia na região sofre alteração. Angst *et al.* (2009) mostram que os valores limites de cloreto para despassivação da armadura muda proporcionalmente com a concentração de íons hidroxila (OH^-) do ambiente. Logo, uma vez reduzida a concentração de OH^- , também, é reduzida a concentração de íons cloretos para provocar o início da corrosão. Castellote *et al.* (2000) e Trejo & Pillai (2003) relataram que o pH do ambiente em volta da armadura diminui com o aumento do campo elétrico aplicado e/ou do aumento do tempo de aplicação (carga passante), devido à oxidação de íons hidroxila no ânodo. De modo a minimizar essa ação, Castellote *et al.* (2002) recomenda a adição de ácido clorídrico (HCl) à solução de cloreto para neutralizar o ambiente em volta da armadura. Os mesmos autores relataram que íons hidroxila eram gerados no cátodo pela redução das moléculas de água, e, posteriormente, eram migrados para o ânodo, aumento do pH do ambiente.

Figura 2.22 – Perfil de cloretos para o ensaio de eletromigração. Fonte: CASTELLOTE *et al.* (2002).



A Figura 2.22 mostra o perfil de cloretos livres e totais em argamassa (traço em peso de 1:1,75:0,37) após a técnica de indução a corrosão proposta por Castellote *et al.* (2002). A configuração de ensaio utilizada é a mesma da Figura 2.21 (b). A solução empregada é de 1 molar de NaCl, as diferenças de potenciais aplicadas entre as malhas metálicas variam com o tempo (3V durante 3 dias, 10V durante 6 dias, 13V durante 14 dias, 0V durante 30 dias (solução contendo apenas água, UR=95%), 13 V durante 5 dias e, por fim, 0V durante 15 dias

(solução contendo apenas água, UR=95%). As barras verticais localizadas nas profundidades de 5 e 10 mm são sensores de prata/cloreto de prata, já a barra tracejada é a frente calorimétrica. Os resultados mostram uma redução as concentrações de cloretos livres e totais com a profundidade e valores críticos para cloretos totais de 0,152 em relação a massa de cimento. A literatura reporta valores de teores críticos bem superiores, quando se emprega outra metodologia de ensaio (Tabela 2.9).

Assim como nos ensaios de imersão e secagem, neste ensaio os concretos apresentam concentrações variando com a profundidade, isso dificulta a precisão nas leituras de concentração de cloretos. A Tabela 2.3 mostra as vantagens e desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

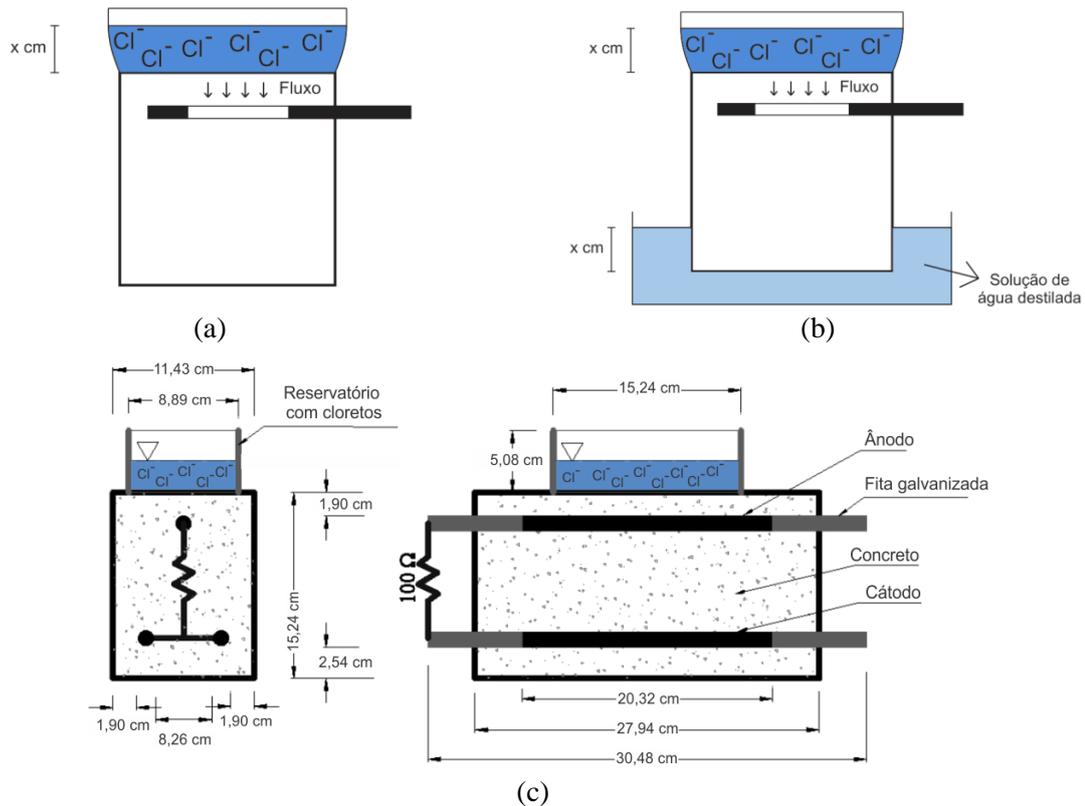
Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de eletromigração.

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão;	Desafinidade com a realidade;
Tempo de ensaio;	Pode ter uma configuração complexa;
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte;	Polarização da barra;
-	Dificuldade na precisão das leituras das concentrações de cloretos;
-	Diminuição do pH na região da armadura, devido a migração dos íons hidroxilas;
-	Limitação de oxigênio, devido aos poros estarem sempre saturados.

2.5.4 “Ponding Test”

Os ensaios acelerados de corrosão usando as configurações com reservatórios contendo cloretos na superfície de concretos são denominadas de “*Salt Ponding Test*”. O ensaio consiste basicamente da confecção de uma piscina aderida à superfície do concreto com solução de cloretos. A diferença de concentração entre a piscina e o interior do concreto gera um gradiente de concentração perpendicular a área de exposição da barra, tendo como consequência, o ingresso de massa (CASCUDO, 1997). No caso, aonde os espécimes ficam submetidos sempre a exposição da solução do reservatório, o mecanismo de transporte predominante é a difusão pura propriamente dita. Alguns autores defendem que há uma ínfima parte de transporte por absorção capilar, motivada pela diferença de umidade entre a face saturada e a face seca, essa diferença de umidade gera vapor de água e conseqüentemente um gradiente de pressão, que por sua vez induz uma maior penetração de solução (STANISH *et al.*, 1997).

Figura 2.23 - Configurações de ensaio de “Ponding Test”. (a) AASHTO T259 (1980) setup test adaptado. (b) Método de indução com dois reservatórios. Fonte: JOUKOSKI *et al.* (2004) (c) ASTM G-109 - Modificada (2007) setup test.



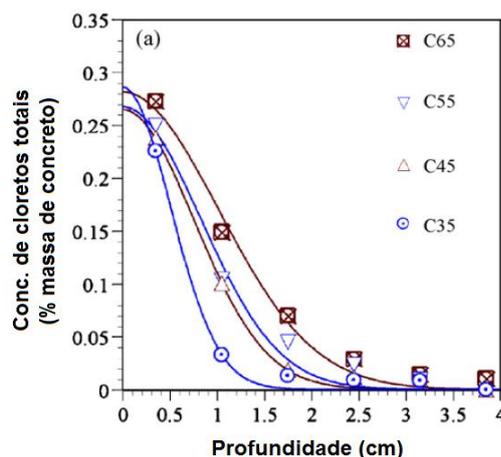
São variáveis deste ensaio a configuração de montagem (Figura 2.23 (a, b, c)), a altura da solução (Figura 2.23 (a, b)), a concentração da solução deletéria e o tempo de exposição à solução. Alguns trabalhos empregam ciclos de exposição ao reservatório contendo cloretos e secagem, deste modo, há uma sobreposição de mecanismos de transporte (absorção capilar + difusão) descaracterizando a difusão pura citada acima (ASTM G109-M, 2007; OTIENO *et al.*, 2009). Em todos os casos analisados, o sal empregado foi o cloreto de sódio, já as concentrações da solução variaram entre 3 e 5% (OTIENO *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2003; JOUKOSKI *et al.*, 2004; PILLAI & TREJO, 2012). Os ensaios que empregam este tipo de configuração caracterizam-se pelo elevado tempo de ensaio até a despassivação da armadura. Esse elevado tempo de ensaio se deve principalmente ao mecanismo de transporte de massa e a falta de oxigênio nos poros, uma vez que os poros estão sempre saturados (ANGST *et al.*, 2009).

A Figura 2.23 (a) mostra a configuração de ensaio semelhante da norma AASHTO T259 (1980), o ensaio consiste no emprego de espécimes com armadura embutida submetidos a fluxo unidirecional da solução com umidade controlada, as alturas do reservatório e as concentrações da solução variaram de trabalho para trabalho. Chiang *et al.* (2007) usou uma solução de 3% de NaCl com altura da solução de 13 mm e OTIENO *et al.* (2009) usou uma

solução de 5% de NaCl com altura da solução de 25 mm. Na Figura 2.23 (b) temos a configuração de ensaio proposta por Joukoski *et al.* (2004), o ensaio consiste na confecção de dois reservatórios fechados um contendo água destilada e outro contendo uma solução com íons cloretos. O uso do reservatório contendo água destilada, aumenta o gradiente de concentração e minimiza os efeitos de vaporização de água no interior do concreto, conforme citado no primeiro parágrafo desse item. Esta configuração de ensaio atrelada a uma pré-saturação dos poros com água destilada, antes do ensaio acelerado, devem garantir a difusão pura.

Por fim, a Figura 2.23 (c) mostra a configuração de ensaio proposto pela norma internacional ASTM G-109 (2007), o ensaio consiste no emprego de espécimes de concreto com dimensões predeterminadas, após condições de confecção e cura, a ciclos de exposição à solução com íons cloretos (3% de NaCl) contida num reservatório, durante duas semana, e secagem, durante duas semana. Aos espécimes, são adicionadas 3 barras de aço conectadas a um resistor de 100Ω. O monitoramento eletroquímico é feito sempre após a exposição à solução deletéria. O processo de exposição e secagem se repete até a detecção da corrosão. Este tipo de ensaio é amplamente utilizado em estudos para avaliar vários métodos de proteção contra corrosão, incluindo diferentes propriedades do concreto, materiais complementares de cimentação, inibidores de corrosão e aços de estruturas de concreto resistentes à corrosão (TREJO et al, 2009).

Figura 2.24 - Perfil de cloretos para o ensaio de “Ponding Test”. Fonte: CHIANG *et al.* (2007).



A Figura 2.24 mostra os perfis de cloretos para concretos submetidos a ensaio conforme a norma AASHTO T259 (1980) após noventa dias de exposição a solução de 3% de NaCl. Os concretos foram confeccionados com diversas relações água/cimento (0,65, 0,55, 0,45 e 0,35) e cimento Portland tipo I. Desmoldados com 24 horas e curados em imersão total em água com temperatura ambiente. Os resultados mostram concentrações de cloretos totais

variando com a profundidade, o que caracteriza a formação de perfis de cloretos clássicos, aonde o mecanismo de transporte preponderante é a difusão. Além disso, há a influência da porosidade do material, traduzida através das relações água/cimento, nos perfis de cloretos. A Tabela 2.4 mostra as vantagens e desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de “*Ponding Test*”.

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão;	Tempo de ensaio;
Afinidade com a realidade;	Pode ter uma configuração complexa;
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte;	Dificuldade na precisão das leituras das concentrações de cloretos;
-	Limitação de oxigênio, devido aos poros estarem sempre saturados.

2.5.5 Névoa salina

O ensaio acelerado de corrosão por névoa salina caracteriza-se por representar um típico ambiente de atmosfera marinha, onde à estrutura de concreto armado sofre respingo de água contendo íons cloretos (Figura 2.25 (a)). O ensaio consiste na colocação de corpos de prova em câmara pré-fabricadas (Figura 2.25 (b)) com ambiente controlado (pH, temperatura e pressão), onde os CPs são aspergidos constantes de água salina vaporizada. Os principais mecanismos de transporte envolvidos são a absorção/capilar e a difusão.

Existem normas de padronização que empregam névoa salina para testar a resistência à corrosão de superfícies metálicas, como ASTM B-117 (1995), ISO 9227 (2012) e a NBR 8094 (1983). Alguns autores empregam essas normalizações de modo a balizar esses estudos, Castro *et al.* (1997) utilizou as recomendações da norma ISO 9227 (2012), Portella *et al.* (2006) e Monteiro (2002) utilizaram as recomendações da norma ASTM B-117 (1995), já Santos (2010) usou a utilizaram as recomendações da norma brasileira NBR 8094 (1983).

Figura 2.25 - Configurações de ensaio de névoa salina - desenho esquemático (a), detalhe da câmara de névoa salina (b).

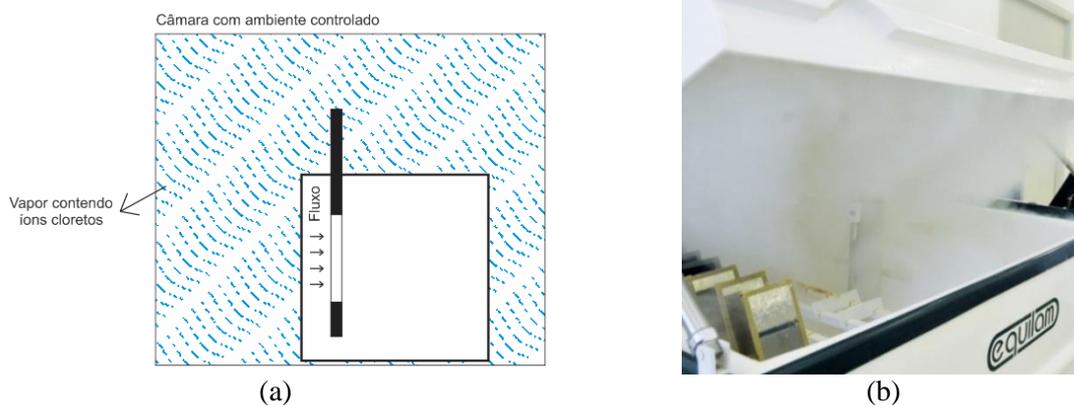
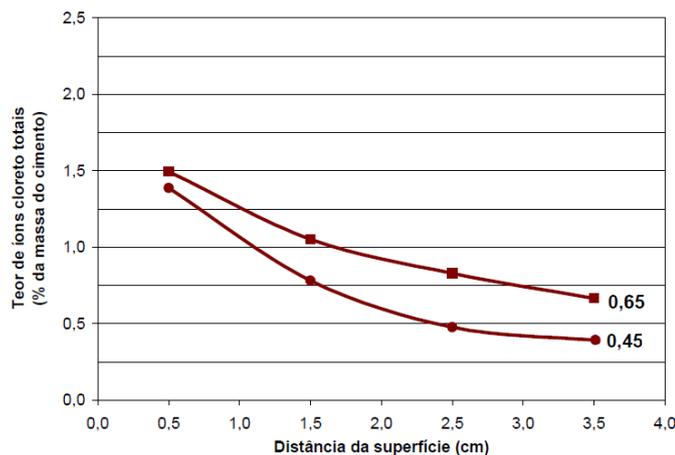


Figura 2.26 - Perfil de cloretos para o ensaio de névoa salina. Fonte: MONTEIRO (2002).



São variáveis deste tipo de ensaio: o tipo de sal empregado, a concentração da solução vaporizada, temperatura, pressão, pH do ambiente, o fluxo de nevoa salina e o tempo de aspersão. O sal empregado em todos os trabalhos analisados foi o cloreto de sódio (CASTRO *et al.*, 1997; LEVY, 2002; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006; SANTOS, 2010). A concentração mais empregada foi a de 5% (CASTRO *et al.*, 1997; LEVY, 2002; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006). O pH da câmara variaram entre neutro ($6,5 \leq \text{pH} \leq 7,2$) (MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006) e o alcalino ($\text{pH}=12$) (SANTOS, 2010). A temperatura foi bastante homogêneas entre os trabalhos, algo entrono de 35°C (CASTRO *et al.*, 1997; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006; SANTOS, 2010). Os tempos de ensaio foram bastante heterogêneos, Levy (2001) empregou a câmara durante 75 dias, Portella *et al.* (2006) empregou a câmara por cerca de 145 dias, Monteiro (2002) e Santos (2010) empregaram a câmara durante 90 dias, Castro *et al.* (1997) empregou o ensaio durante o período da iniciação da corrosão de cada barra.

Devido ao mecanismo de transporte, principalmente a absorção/sucção que governa a velocidade de transporte, o tempo para despassivação pode não ser satisfatório se comparado aos ensaios de eletromigração, mesmo tendo em vista as condições de controle da câmara. Com esse tipo de ensaio, pode-se avaliar o comportamento eletroquímico durante todo o ensaio, estudar e modelar o fenômeno de transporte. Além de se obter o teor crítico de cloretos livres e totais.

A Figura 2.26 mostra os perfis de cloreto totais para concretos moldados com Cimento Portland II-E e relação água/cimento de 0,45 e 0,65. Os ensaios se procederam em câmara salina (5% de NaCl) por 90 dias, com aspersão durante 16 horas contínuas por dias, temperatura de $35 \pm 2^\circ\text{C}$ e pH entre 6,5 e 7,2. Os resultados mostram perfis de cloretos típicos, com redução gradativa da concentração de cloretos totais com o aumento da profundidade. Mais uma vez, percebemos a influência da porosidade do material nos perfis de cloretos; logo,

quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade e, conseqüentemente, maior as concentrações de cloretos para cada profundidade. A Tabela 2.5 mostra as vantagens e desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de “Ponding Test”.

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão;	Tempo de ensaio;
Afinidade com a realidade;	Pode ter uma configuração complexa;
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte;	Dificuldade na precisão das leituras das concentrações de cloretos;
-	-

Por fim, a Tabela 2.6 faz uma breve análise dos principais métodos acelerados de indução do transporte e da corrosão por cloretos em concretos armados, dando a eles adjetivos de intensidade que indique sua aplicação.

Tabela 2.6 – Características dos métodos de ensaio acelerado empregados na indução a corrosão por cloreto.

Características analisadas	ACM	I/S	EM	PT	NS	SS
Tempo de ensaio	○○	-	○	●	-	○○
Simplicidade de procedimento	●●	-	○○	-	○	●●
Afinidade com a realidade	○○	●	○	●	●●	○○
Facilidade de leituras de concentração de cloretos	●●	-	-	-	●	●●
Possibilidade de monitoramento eletroquímico durante o ingresso de cloretos	N	●●	●	●●	●●	●●
Alterações no concreto com a aplicação do ensaio	●	○○	●●	○○	○○	●

Onde:

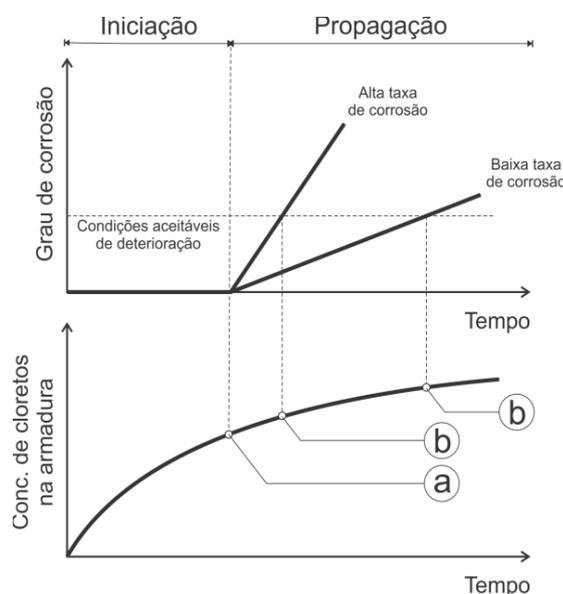
Abreviação	Significado	Simbologia	Significado
ACM	Adição de cloretos a massa	●●	Altíssimo
I/S	Ciclos de imersão e secagem	●	Alto
EM	Eletromigração	-	Médio
PT	“Ponding Test”	○	Baixo
NS	Névoa salina	○○	Baixíssimo
SS	Simulação em solução	N	Não se aplica

2.6 TEOR CRÍTICO DE CLORETOS

Estruturas de concreto apresentam comportamentos variados em função de suas características iniciais e do ambiente ao qual estão submetidos (MEHTA & MONTEIRO, 2008; CASCUDO, 1997). Depois que os íons cloretos foram reconhecidos como agente desencadeador da corrosão, a partir da segunda metade do século passado, grandes esforços em pesquisa têm sido feitos a este respeito. Enquanto as normalizações modernas impõem restrições sobre a quantidade de cloreto que podem ser introduzidos no concreto fresco, a penetração de cloreto em concreto endurecido é hoje a principal causa de corrosão em estruturas de concreto (ANGST *et al.*, 2009).

Os enfoques principais dos estudos nessa área são: analisar as características que influenciam no processo (JAEGERMANN, 1990; THOMAS *et al.*, 1990; TUUTTI, 1982; PAGE *et al.*, 1981), modelar o fenômeno de transporte e processo de corrosão (GUIMARÃES, 2000; TANG & NILSSON, 1996; SAETTA *et al.*, 1993) e a caracterizar os níveis de presença salina em zona de atmosfera marinha (MEIRA, 2004; MORCILLO *et al.*, 2000; GUSTAFSSON & FRANZÉN, 1996). Dos estudos relacionados a cloretos, a grande maioria consiste em ensaios de laboratório com metodologias próprias, variando caso a caso.

Figura 2.27 – Definição de teor crítico de cloretos baseado no modelo de Tutti (1982). Fonte: ANGST *et al.* (2009)



O conceito fundamental de teor crítico de cloreto no concreto armado é a quantidade de íons cloretos que chegou a armadura e provocou a despassivação do aço (Figura 2.27 (ponto “a”)). Na literatura, esse valor também pode se denominar de valor limite de cloreto. De mãos de tal valor, pode-se estimar a vida útil da estrutura e as condições atuais de serviço (HAUSMANN, 1967). Entretanto, nem sempre a despassivação da armadura induz

necessariamente em uma deterioração visível, sendo assim, faz-se necessário que mais íons cloretos adentrem o concreto, de modo a atingir níveis aceitáveis de degradação (Figura 2.27 (ponto “b”). Essa definição foi proposta por Schiessl & Lay (2005).

Geralmente, o teor crítico de cloreto é expresso pela relação entre a concentração de cloreto total, no entorno da armadura, e a massa de cimento. Porém, alguns autores calculam o teor crítico em relação à massa de concreto, tendo em vista que é de difícil obtenção a massa de cimento no concreto endurecido. Já para cloretos livres, aqueles que são efetivamente transportados e responsáveis pelo início e propagação da corrosão, podem ser expressos em relação à massa de cimento, a massa de concreto ou em relação à concentração dos íons hidróxilas contidos no poro. Glass & Buenfeld (1997) entende que a melhor forma de expressar o teor crítico de cloretos é a relação entre a concentração de cloretos totais e a massa de cimento, partindo do pressuposto que os cloretos inicialmente ligados podem vir a participar do processo de corrosão e que a concentração de hidroxilas não é o único parâmetro que representa as propriedades inibidoras do cimento.

No interior do concreto, os cloretos se apresentam de três formas distintas: quimicamente ligado a matriz cimentícia, principalmente ao aluminato tricálcico (C_3A); adsorvido na superfície dos poros e sobre a forma de íons-livres. São exatamente esses, os íons livres, que em certa quantidade desencadearam o processo de despassivação e dão início a propagação corrosão. No que refere à quantidade limite de cloretos ou teor crítico para iniciação da corrosão, o mesmo depende de vários fatores, conforme apresentado na Tabela 2.7 (ANGST *et al.*2009). A influência conjunta de todas essas variáveis gera uma enorme gama de valores limites, a Tabela 2.8 mostra os valores críticos de cloretos e os procedimentos adotados para obtenção.

Tabela 2.7 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretos.

Ligados armadura	Ligados ao concreto		Ligados ao ambiente de exposição
	Fatores químicos	Fatores físicos	
Processo de fabricação	pH da solução do poro	Cobrimento	Temperatura
Composição do aço	Composição química do cimento	Porosidade	Teor de umidade
Barras lisas ou rugosas	Consumo de cimento	Relação A/C	Teor de oxigênio
Oxidação prévia	Uso de adições	Resistividade elétrica	Cátion associado aos íons cloretos
Potencial prévio	Grau de Hidratação	-	-
Falhas/vazios na interface aço/concreto	Presença de inibidores de corrosão	-	-

2.6.1 Influências no teor crítico ligado a armadura

Segundo Cascudo (1997), a composição química do aço atrelada ao processo de fabricação influencia diretamente na resposta ao tempo de despassivação. Logo, aços com maiores teores de carbono e fabricação com tratamento a frio (trefilação ou encruamento) são mais suscetíveis a corrosão, para as mesmas condições de ambiente agressivo e confecção de corpo de prova. Portanto, a ordem de suscetibilidade dos aços empregados em estruturas de concreto armado seria CA-60, CA-50 e CA-25. Outro fator ligado ao processo de fabricação é a rugosidade do aço, Alonso *et al.* (2000) observaram que houve uma tendência das barras corrugadas serem mais facilmente corroídas do que as barras lisas.

A oxidação prévia das barras de aço é um dos fatores que apresenta influência sobre o teor crítico, tendo em vista que limita a formação da proteção da película passivadora. Tal oxidação atua como um ponto de falha, já que a formação da película é inibida (GONZALES *et al.*, 1996). Logo, os valores limites seriam reduzidos, mostrando uma maior suscetibilidade do material. Contudo, ponderações devem ser levadas em consideração, já que a pré-oxidação do aço com cloretos afeta o processo de formação da película, gerando falhas (ANGST *et al.* 2009).

Angst *et al.* (2009) relatam que a condição da zona interfacial aço-concreto tem efeito importante sobre o valor limite de cloretos, tanto sobre um nível microscópico, como um nível macroscópico. A nível microscópico, a interface aço-concreto é fortemente influenciada pela formação da camada passivadora. Tal região é densamente rica em hidróxido de cálcio e atuar como uma barreira física contra agentes agressivos. Além disso, a película restringe as reações de transferência de carga e limita difusão de cloreto de forma mais eficaz (PAGE, 1975). Portanto, falhas na formação da película repercutem em menor teor crítico de cloretos. Em relação a nível macroscópico, a interface aço-concreto tem influência sobre o teor crítico de cloretos, quando se encontra vazios ou fissuras, tais imperfeições reduzem as concentrações de compostos alcalinos no entorno da interface (ANGST *et al.*, 2009).

Por fim, o potencial do aço apresenta relação com o teor crítico de cloretos. Poucos trabalhos mostram tal relação, um dos mais completos trabalhos sobre o tema foi realizado por Izquierdo *et al.* (2004), apresentando como resultado após tratamento estatístico:

- Uma faixa de potenciais entre -250 e -150 mV (SCE), onde o teor crítico de cloretos apresenta significativa flutuação, com tendência de se manter dentro de uma faixa constante.

- Uma faixa de potenciais mais eletronegativos que -200 mV (SCE), onde há um contínuo crescimento do limite crítico de cloretos em função do aumento, em módulo do potencial elétrico.

As faixas usuais de potenciais de aço em concretos variam em função do ambiente de exposição, para estruturas expostas a atmosfera marinha, o potencial da armadura é geralmente entre $+100$ e -200 mV (SCE), enquanto que para estruturas submersas, esse potencial varia entre -400 a -500 mV (SCE), portanto maiores valores de concentração de cloretos podem ser aceitáveis (BERTOLINI *et al.*, 2004 apud ANGST *et al.*, 2009).

2.6.2 Influências no teor crítico ligado ao concreto

A influência da matriz do concreto nos valores limites de cloretos está intimamente ligada ao potencial alcalino, à porosidade do material e a capacidade de fixação de cloretos a matriz (MEIRA, 2004). Do ponto de vista do potencial alcalino, a corrosão por cloretos tem forte relação com a formação e estabilidade da película passivadora, já a película está relacionada diretamente à alcalinidade oferecida pelo meio. O concreto oferece a armadura um pH próximo a 12,5, podendo esses valores chegarem a 13,5, dependendo da concentração de outros produtos hidratados, além da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), como os hidróxidos de sódio e potássio (CASCUDO, 1997; ANGST *et al.*, 2009). Tais condições garantem ao aço a formação de uma proteção química, capaz de manter o aço em condições de passividade. Portanto, quanto maior o pH da solução dos poros, maiores as concentrações de cloretos necessárias para “quebrarem” a película passivadora e iniciarem a corrosão. O pH da solução dos poros do concreto depende principalmente do tipo de cimento, do consumo de cimento, do uso de adições e do grau de hidratação (ANGST *et al.*, 2009).

O tipo de cimento, o grau de hidratação e o consumo cimento no concreto colaboram em conjunto ou individualmente em menores proporções para determinar o pH da solução dos poros, a formação de uma microestrutura mais densa, aumentar a resistividade elétrica, melhorar a interface aço-concreto e aumentar a fixação de cloretos a matriz (MEIRA, 2004).

A capacidade de fixação de cloretos a matriz do concreto afeta principalmente o teor crítico de cloretos totais, já que essa concentração relaciona os cloretos fixados e livres. A fixação de cloretos depende de vários fatores como a temperatura, o equilíbrio químico e o teor de C_3A e C_4AF , principais fases hidratadas que são responsáveis pelas ligações entre os cloretos. O gel de CSH também colabora em menores proporções para a fixação de cloretos, o mecanismo de ligação é a adsorção. Portanto, uma vez que o equilíbrio químico seja

quebrado, os cloretos fixados a matriz estão livres para atuar na corrosão (TANG & NILSSON, 1993).

Trabalhos publicados com o uso de adições mostram uma redução nas concentrações limites de cloretos, motivados pela redução do pH da solução dos poros, porém, o uso de adição colabora para a formação de uma estrutura mais densa em comparação com concretos contendo apenas cimento, tornando seu uso benéfico ao concreto armado. Com relação à capacidade de fixação de cloretos a matriz cimentícia, o uso de adições apresenta comportamentos diferenciados com o tipo de adição. O uso de sílica ativa reduz a fixação de cloretos, motivada pelo consumo das fases dos aluminato, principais responsáveis pela fixação de cloretos. Já a escoria de alto forno e a cinza volante contribuem para a formação de mais aluminatos e melhora quimicamente a ligação entre eles (ANGST *et al.* 2009).

A relação água/cimento (a/c) está associada ao teor crítico de cloretos e a duração para o período de iniciação da corrosão. Portanto, quanto menor a relação água/cimento, maior o teor crítico de cloretos e maior o período de iniciação da corrosão. A explicação para esse comportamento, deve-se as menores alterações de umidade próximas a armadura, impedindo ou dificultando o surgimento de diferenças de potenciais na região. O cobrimento atua de modo semelhante à relação a/c , sendo assim, quanto maior o cobrimento maiores o período de iniciação da corrosão e o teor crítico, esse comportamento é explicado pela menor variação na umidade (SANDBERG, 1999).

A porosidade tem relação direta com a velocidade de transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto, esta variável está intimamente ligada à relação a/c e ao consumo de aglomerante, portanto, quanto maior a porosidade, menor o tempo de iniciação a corrosão e, conseqüentemente, menor o teor crítico de cloretos (MEIRA, 2004). Já a resistividade elétrica é um parâmetro que depende porosidade, do grau de ionização do eletrólito e da umidade no interior do concreto, tal variável controla diretamente a taxa de corrosão e a condutibilidade elétrica (CASCUDO, 1997), conseqüentemente o teor crítico é menor em concretos com maior resistividade (ANGST *et al.*, 2009).

Por fim, temos o uso de inibidores de corrosão. Tais compostos químicos são misturados a massa de concreto fresco, objetivando a formação de uma película resistente à corrosão, que adere à superfície do metal fisicamente e/ou quimicamente, de modo a evitar as reações anódicas e catódicas. Os inibidores de corrosão podem ser compostos inorgânicos ou orgânicos. Compostos inorgânicos incluem nitrito de sódio, cromato de potássio, benzoato de sódio, cloreto de estanho, o ácido dinitrobenzóico, o molibdato de sódio, entre outros. Inibidores orgânicos incluem as aminas, ésteres e sulfonatos (TREJO *et al.*, 2009). Estudos na

área mostram desempenhos diferenciados em função do inibidor utilizado. Cabral (2000) observou que a adição de 2% de nitrito de sódio sobre a massa do cimento em argamassas armadas, proporcionou uma redução do coeficiente de difusão e do teor de cloretos em 42,3% e 14,4%, respectivamente, todos referentes ao sistema de reparo de referência. Ann *et al.* (2006), em estudos com argamassa armada, observaram que o uso de inibidores a base de nitrito de cálcio reduziu a taxa de corrosão e aumentou os valores limites de cloretos.

2.6.3 Influências no teor crítico ligado ao ambiente de exposição

As condições de exposição de estruturas de concreto armado também têm relação com o ambiente de exposição. As principais variáveis que influenciam os valores limites de cloretos são a temperatura, a umidade relativa, o teor de oxigênio e o cátion associado ao íon cloreto.

A temperatura tende a influenciar dois parâmetros relacionados ao teor crítico de cloretos, a primeira, é a velocidade de penetração e, a segunda, é a quantidade de íons hidroxila. Logo, quanto maior a temperatura, maior a velocidade de penetração (TANG & NILSSON, 1996, OH *et al.*, 2006) e menor a quantidade de íons hidroxilas na solução dos poros (HUSSAIN *et al.*, 1995 apud MEIRA 2004). Com relação a velocidade de penetração, as concentrações de cloretos em cada profundidade não aumentam com a temperatura para um mesmo tempo de exposição (Figura 2.28 (a)). Do ponto de vista do teor crítico, o tempo para iniciação da corrosão é muito menor e os valores limites também, motivado pela redução de OH⁻ (HUSSAIN *et al.*, 1995 apud MEIRA 2004).

A umidade relativa regula a disponibilidade de água e de oxigênio na superfície do aço, sendo esses elementos fundamentais para as reações de corrosão. No caso de concreto saturado de água, bem como em concreto seco, concentrações de cloreto mais elevadas são necessários para iniciar a corrosão, a situação mais favorável para a iniciação de corrosão é da ordem de 90-95% (ANGST *et al.* 2009). A Figura 2.28 (b) mostra a relação entre as concentrações de cloreto em cada profundidade com o aumento da umidade relativa, em concretos com reação a/c de 0,5 e exposição natural num estuário na Coréia do Sul.

Em relação ao cátion associado ao íon cloreto é praticamente um consenso que o cloreto de cálcio facilita a fixação de cloretos e aumenta a taxa de corrosão (ANGST *et al.* 2009). Andrade & Page (1986) mostram que o cloreto de cálcio (CaCl₂) facilita a fixação dos cloretos e reduz a concentração de OH⁻ na solução dos poros, em função da formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), a taxa de corrosão, também, é mais acentuada do que o NaCl e

KCl. Portanto o cloreto de cálcio reduz o tempo para iniciação da corrosão e provoca aumento nos teores críticos de cloretos totais.

Figura 2.28 – Influência da temperatura (a) e da umidade relativa (b) sobre perfis de cloretos. Fonte: OH *et al.* (2006).

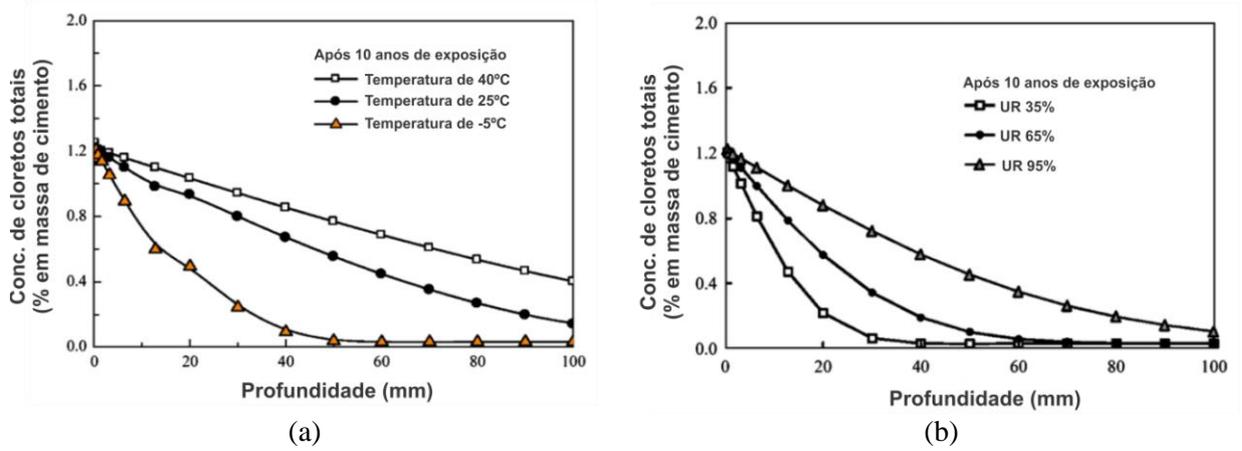


Tabela 2.8 – Teor crítico de cloretos publicados na literatura. Fonte: ANGST *et al.* (2009) adaptado.

Teor crítico de cloretos			Detalhes experimentais								Publicação	
Cl-totais	Cl-livres	Cl/OH ⁻	Ensaio	Cátion	Penet. de cloretos	CPs (A/C)	Tipo de cimento	Condições da barra	Técnica de Mont.	Obs.	Ano	Referência
-	-	0,25-0,8	Solução	Na, Ca	-	-	-	P, L	RPL	pH 11,64 - 13,22	1990	Goni e Andrade
-	0,056	0,26	Solução	Na	-	-	-	L	PO	pH 13,5	1998	Briet
0,2-1,4	-	-	Natural	Na	CAP+DIF	Conc. (NR)	NR	NR	Epot	-	1975	Stratfull <i>et al.</i>
0,4-1,5	-	-	Natural	Água do mar	DIF	Conc. (0,3 a 0,75)	CPRS, CV, AS, EAF	CR	RPL, Epot	-	1998	Sandberg
0,72	-	-	Natural	Água do mar	CAP+DIF	Conc. (NR)	NR	NR	IV	-	2001	Fluge
0,32	-	-	Laboratório	Ca	Adição	Conc. (NR)	NR	ABR, L	PG, IV	Imergida	1959	Kaesche
0,45	-	-	Laboratório	Na	Adição	Conc. (0,6)	CP I	Barra lisa, P, L	PG	-	1970	Gouda e Halaka
0,2-0,68	-	-	Laboratório	Na, Ca	DIF	ARG (0,4 a 0,6)	CP I, CPRS, CPPR, CV, AS	Barra lisa	RPL, Epot, P	0V SCE	1990	Hansson e Sorensen
-	0,44-0,65	-	Laboratório	Na	CAP+DIF	ARG (0,75)	CP I	NR	Epot	-	1997	Elsener <i>et al.</i>
0,735	0,51	1,67±0,3	Laboratório	Na	CAP+DIF	ARG (0,5)	CP I, CPRS, CV	BN	PO	E>-0,2V (SCE) E<-0,2V (SCE)	2002	Alonso <i>et al.</i>
0,62	0,36 mol/l	1,5	Laboratório	Na	CAP+DIF	ARG (0,5)	CPRS	BN	RPL, Epot	95% UR	2002	Castellote <i>et al.</i>
0,42	0,33 mol/l	2	Laboratório	Na	MIG	ARG (0,5)	CPRS	BN	RPL, Epot	95% UR	2002	Castellote <i>et al.</i>
0,04-0,24	-	0,09-0,62	Laboratório	NR	MIG	ARG (0,5)	CP I	L	RPL	Imergida	2003	Trejo e Pillai
-	0,4 – 0,8%	-	Laboratório	Água do mar	CAP+DIF	Conc. (0,45)	CP I	P, PP, ENF	RPL, Epot	Ao ar livre	2006	Mohammed e Hamada
0,4-1,3	-	-	Laboratório	Na, Água do mar	Adição, CAP+DIF	Conc. (0,4-0,6)	CP I	NR	RPL, Epot	Imergida, ao ar livre	2004	Morris <i>et al.</i>

Onde:

Abreviação	Significado	Abreviação	Significado
Na	Sódio (Na ⁺)	EAF	Escoria de alto forno
Ca	Cálcio (Ca ²⁺)	P	Polida
CAP	Indução de cloretos por absorção capilar	L	Limpa/desengordurada
DIF	Indução de cloretos por difusão	ABR	Como recebida
MIG	Indução de cloretos por migração	PP	Pré-passivada
CONC.	Concreto	ENF	Enferrujada
ARG	Argamassa	RPL	Resistência a polarização linear
CPI	Cimento Portland tipo I	E _{pot}	Potencial
CPRS	Cimento Portland resistente a sulfatos	PO	Curva de polarização
CPPR	Cimento Portland de pega rápida	PG	Pulso galvanostático
CV	Cinza volante	NR	Não relatada
SA	Sílica ativa		

2.7 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

Dentre as técnicas comumente utilizadas para a avaliação e o monitoramento do processo corrosivo em estruturas de concreto armado, temos as Curvas de polarização, a Impedância eletroquímica, o Pulso galvanostático, a Resistência elétrica (que não avalia quantitativamente ou qualitativamente a taxa de corrosão, mas é um dado controlador do

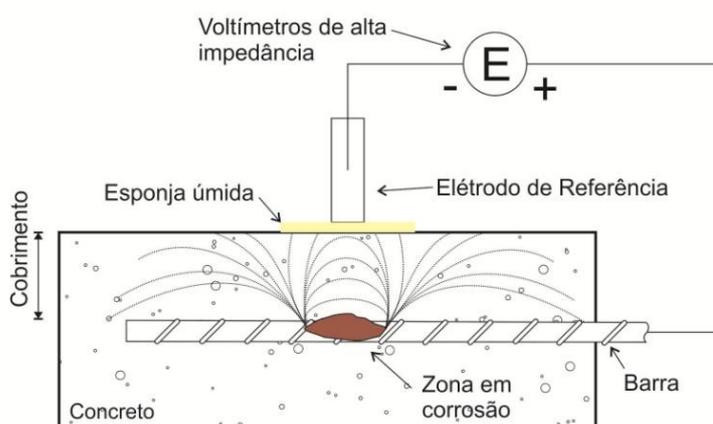
processo de corrosão), a Resistência de polarização e os Ruídos eletroquímicos. Para este trabalho, apenas serão discutidos as técnicas empregadas na avaliação na nossa pesquisa.

2.7.1 Potencial de corrosão

O potencial de corrosão em circuito aberto é uma técnica não destrutiva utilizada para mensurar diferença de potencial entre a barra de aço e um eletrodo de referência (ELSENER *et al.*, 2003). Das técnicas de avaliação da corrosão, ela é a de mais fácil aplicação e seus resultados mostram apenas um estado qualitativo das condições de corrosão da barra, isto é, os dados não refletem a taxa de corrosão (NYGAARD, 2008; DAWSON *et al.*, 1983 *apud* CASCUDO, 1997).

Essa técnica apresenta recomendações da RILEM TC 154-EMC/2003 “Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion (Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures)” e é normalizada pela ASTM C-876/1991 “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”. A técnica consiste em conectar o lado positivo de um voltímetro de alta impedância na barra de aço e no lado negativo um eletrodo de referência (Figura 2.29).

Figura 2.29 - Esquema de conexão para ensaio de Potencial de corrosão. Fonte: ELSENER *et al.* (2003).

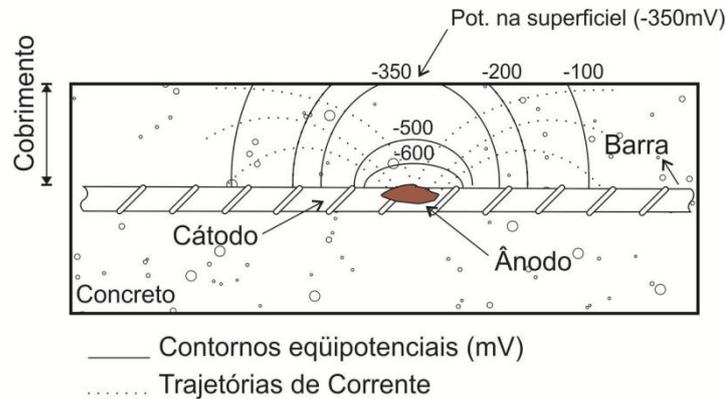


Vale salientar que, segundo a ASTM C-876 (1991), é de imprescindível recomendação o pré-umedecimento da superfície do concreto e a utilização de uma esponja de alta condutibilidade elétrica, de modo a possibilitar um meio de condução entre o eletrodo de referência e eletrodo de trabalho (barra de aço). A técnica é influenciada por vários fatores, entre eles destacamos:

- **Adição de escória:** segundo Elsener *et al.* (2003), pesquisas mostram que a adição de escória ao cimento interfere negativamente na leitura do potencial de corrosão;

- **Cobrimento:** o cobrimento do concreto influencia as medidas de potencial de modo a detectar potenciais mais positivos na superfície do que na barra de aço (CASCUDO, 1997; ELSENER *et al.*, 2003). A Figura 2.30 mostra a influência do cobrimento;

Figura 2.30 - Medidas de Potencial afetadas pelo cobrimento de concreto, para um eletrodo de Cu/CuSO₄.
Fonte: CASCUDO (1997).



- **Corrente de fuga:** a corrente de fuga tende a provocar leituras mais eletropositivas, dificultando uma conclusão sobre o desencadeamento da corrosão. Esta problemática é corriqueira em estruturas próximas de redes ferroviárias (CASCUDO, 1997);
- **Corrosão localizada:** quando o processo corrosivo gera micro-pilhas, não é possível medir o potencial do eletrodo no ânodo ou no cátodo separadamente, logo o “verdadeiro” potencial de corrosão não é realmente medido e sim um potencial misto que é influenciado tanto pela resistividade quanto pelo cobrimento (CASCUDO, 1997; ELSENER *et al.*, 2003; NYGAARD, 2008);
- **Presença de cloretos:** a penetração de cloretos no concreto tende a potenciais de corrosão mais eletro negativos que os valores reais, ou seja, de mostrar uma tendência de corrosão sem realmente acontecer (CASCUDO, 1997);
- **Resistividade do concreto:** a umidade e/ou com baixo fator água/cimento faz com que o concreto apresente alta resistividade, essa situação provoca uma leitura de potencial mais eletropositivo, ou seja, não se identifica uma região com tendência ao processo de corrosão (ELSENER *et al.*, 2003). A carbonatação comata os poros, o que tem como consequência um aumento da resistividade (CASCUDO, 1997; NYGAARD, 2008).

Segundo Wolynech (2003), as medidas de potencial são totalmente dependentes do eletrodo de referência que se está utilizando. Eles podem ser confeccionados de:

- **Calomelano saturado:** constituído de mercúrio, coberto por uma pasta de cloreto de mercúrio (Hg_2Cl_2) e imerso normalmente em uma solução de cloreto de potássio (KCl), sendo necessária em vários casos a utilização de uma ponte salina;
- **Prata/cloreto de prata:** constituída de uma haste de prata envolto em cloreto de prata (AgCl), sendo dispensável a utilização de ponte salina se houver cloretos livres. É bastante utilizado para tamanhos reduzidos;
- **Cobre/sulfato de cobre:** consiste em uma barra de cobre envolto numa solução saturada de sulfato de cobre (CuSO_4). Bastante utilizado para leituras de potencial de estruturas envolta por materiais porosos, como oleodutos, aquedutos e concreto.

A Tabela 2.9 mostra os critérios para avaliação das medidas do potencial de corrosão, segundo os critérios de Van Daveer contidos na ASTM C-876/91.

Tabela 2.9 - Critérios de avaliação do Potencial de corrosão. Fonte: ASTM C-876 (1991).

Potencial de corrosão (mV) para um eletrodo de cobre/sulfato de cobre	Potencial de corrosão (mV) para um eletrodo de calomelano saturado	Probabilidade de corrosão (%)
> -200	> -126	90
$-200 \leq E_{\text{corr}} \leq -350$	$-126 \leq E_{\text{corr}} \leq -276$	Incerta
< -350	< -276	10

2.7.2 Método da Resistência de Polarização

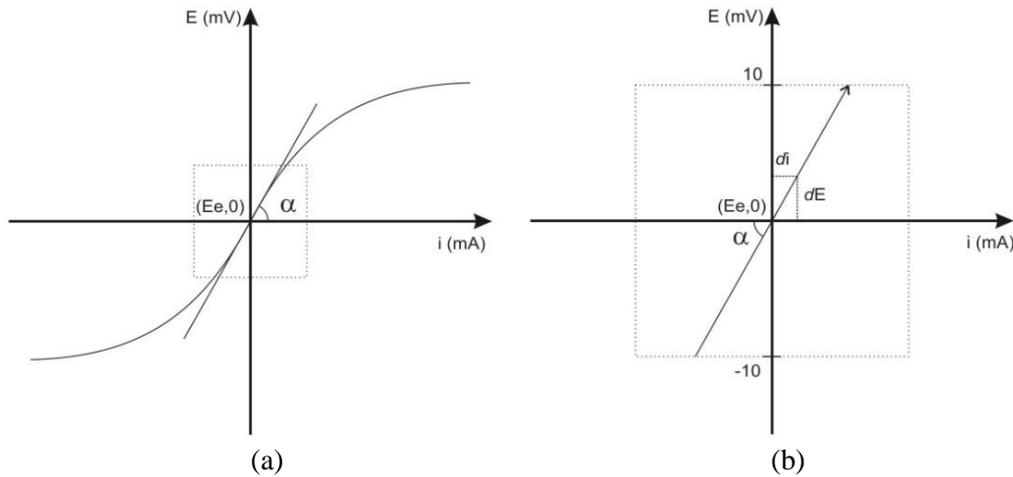
O método de resistência de polarização é uma técnica não destrutiva, largamente utilizada para a determinação da curva de polarização e taxa de corrosão de metais (WOLYNEC, 2003). A técnica é amplamente aplicada a estruturas de concreto armado. Esses dados são de fácil interpretação e obtenção, além de oferecer valores quantitativos sobre a cinética do fenômeno, tendo como consequência uma melhor conclusão sobre o estado do aço incorporada ao concreto (CASCUDO, 1997; VAGHETTI, 2005).

A resistência de polarização (R_p) ou Resistência faradaica ou Resistência de reação é definida como a inércia que um eletrodo envolto em uma solução apresenta de modo a não desenvolver um processo de transferência de carga propiciada por uma energia de ativação imposta (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; WOLYNEC, 2003), ou seja, uma dificuldade a mudança do potencial de equilíbrio que tendo como consequência uma corrente.

A partir da curva de polarização, como mostrada na Figura 2.31 (a), pode-se obter o valor da R_p , matematicamente falando, a R_p é a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva (Figura 2.31 (b)) (ANDRADE & ALONSO, 2004). A Resistência de

polarização é dada pela relação entre uma variação de potencial aplicado ΔE e a leitura do passo obtido para a corrente ΔI , num instante em que o potencial tende ao potencial de equilíbrio ($\Delta E \rightarrow 0$), veja a equação diferencial abaixo. Esta definição de R_p foi proposta por Stern (1958) (WOLYNEC, 2003; CASCUDO, 1997; ANDRADE & ALONSO, 2004).

Figura 2.31 –Curva de polarização (a). Fonte: WOLYNEC (2003). Região linear da curva de polarização (b).
Fonte: ANDRADE & ALONSO (2004). [E_e : potencial de corrosão livre].



$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} = \left(\frac{dE}{di} \right)_{\Delta i=0} \quad (2.21)$$

Onde:

R_p é a Resistência de polarização, em $\Omega \cdot m^2$;

E é o potencial do eletrodo, em mV;

I_{corr} é a densidade de corrente de corrosão, em mA/m².

É a partir da resistência de corrosão que se determina a corrente de corrosão (I_{corr}). Quanto maior seu valor menor a taxa de corrosão do aço. Esse cálculo é feito através da equação proposta por Stern & Geary em 1957. A equação abaixo mostra a forma simplificada.

$$B = \frac{b_a \cdot |b_c|}{2,303 \cdot (b_a + |b_c|)} \quad (2.22)$$

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.23)$$

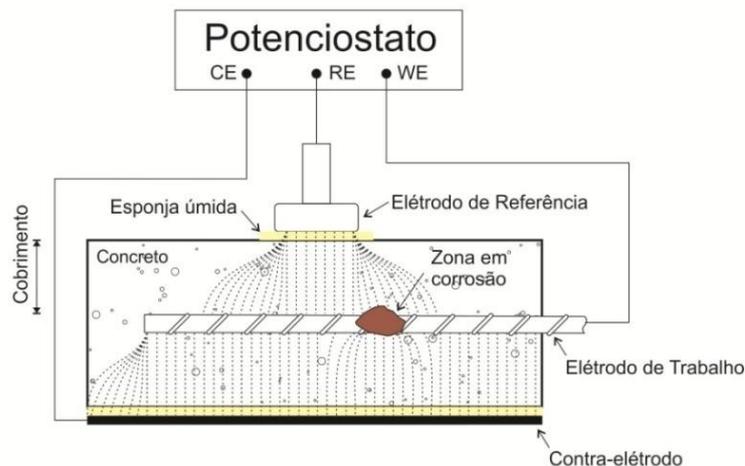
Onde:

B é a constante de corrosão, em mV, seu valor pode ser de 26 mV para armadura ativas (ANDRADE & ALONSO, 2004) e 56 mV para armaduras passivas (GONZÁLES *et al.*, 1985);

b_a e b_c são as inclinação da reta de Tafel, em mV, adotadas para nosso estudo como sendo $b_a = b_c = 120\text{mV}$.

Esse método de ensaio apresenta recomendações da RILEM TC 154-EMC/2004 “Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion” (Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method) e pode ser utilizado em qualquer tipo de estrutura de concreto armado, sobre qualquer clima desde que a temperatura do concreto esteja acima de 0°C , em qualquer idade do tempo de vida útil da estrutura. Superfície muito seca, resistividades acima de $1000\ \Omega\text{m}$, dificulta as leituras, sendo necessário umedecer-las (ANDRADE & ALONSO, 2004). A técnica é simplória e consiste primeiramente na leitura do potencial de corrosão livre (E_{pot}) da barra, seguido da aplicação de uma diferença de potencial (ΔE) pelo eletrodo de referência em passos predeterminados, a cada passo é registrado o incremento na corrente (ΔI) que passa pelo aço e é captada pelo eletrodo de trabalho (CASCUDO, 1997; WOLYNEC, 2003; VAGHETTI, 2005; NYGAARD, 2008).

Figura 2.32 - Esquema de conexão para ensaio de R_p . Fonte: CASCUDO (1997).



A medida de R_p pode ser feita através de um potenciostato que dispõem do uso de três eletrodos diferentes, o primeiro é o eletrodo de trabalho (WE) conectado ao aço incorporado ao concreto, responsável pelas medidas de corrente na barra. O segundo é o contra-eletródo (CE) que é uma placa com o poder de dispersar a polarização, com tendo mínimo do mesmo tamanho da malha de ferro. Já o terceiro é o eletrodo de referência (RE) que cabe a induzir a variação do potencial da região catódica para a anódica (ANDRADE & ALONSO, 2004) (Figura 2.32).

Após a obtenção da R_p e em seguida o cálculo da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), mostrada a baixo, vários pesquisadores adotaram critérios para sua avaliação. Entre

eles, o mais utilizado é o critério proposto por Alonso & Andrade (2004) e mostrado na tabela a baixo.

$$i_{corr} = I_{corr}/A \quad (2.24)$$

Onde:

i_{corr} é a densidade instantânea de corrente de corrosão, em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;

A e a área de exposição da armadura, em cm^2 .

Alguns pontos do método causam questionamentos de vários pesquisadores, os principais são: a consideração de uma aproximação linear, já que modelos mais precisos consideram a curva uma exponencial. Outros questionamentos são os erros devido ao desconhecimento das constantes de Tafel, já que pelo método não são calculados (CASCUDO, 1997; WOLYNEC, 2003). Por fim, elencamos a queda ôhmica propiciada pela resistividade, essa queda impossibilita a formação de uma região com tendência linear nas proximidades do ponto de inflexão da curva. A compensação da queda ôhmica é feita através de modelos matemáticos ou eletronicamente em equipamentos modernos (WOLYNEC, 2003).

Tabela 2.10 - Critérios de avaliação da Corrente de corrosão. Fonte: ALONSO & ANDRADE (2004).

Grau de corrosão	Taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Desprezível	≤ 0.1
Baixo	0,1-0,5
Moderado	0,5-1
Alto	>1

Para os demais pesquisadores, a preocupação se encontra no monitoramento da corrosão. Segundo Wolyneec (2003), é pouco significativo saber precisamente o valor da taxa de corrosão, já que os erros são minimizados devido à faixa de análise da curva de polarização ($E_e \pm 12\text{mv}$), o que causa menores perturbações no sistema e problemas de queda ôhmica acentuadas. Na prática, o valor da R_p pode ser obtido por um ponteciostato, um galvaniostato ou um polarizador potencio-dinâmico (NYGAARD, 2008).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi construído a partir de uma busca bibliográfica nas literaturas nacional e internacional, nas quais se identificam as variáveis influentes no processo corrosivo e as metodologias mais empregadas nos ensaios para indução da corrosão. São itens desta etapa: a definição das variáveis de estudo, a caracterização dos materiais empregados, a confecção dos corpos de prova e os ensaios complementares.

3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

3.1.1 Variáveis independentes

Entende-se, neste trabalho, por variáveis independentes aquelas que influenciam as variáveis dependentes, tendo como base o alvo de estudo, isto é, os objetivos a serem atingidos. Para este trabalho, as variáveis independentes são:

- **Tipo de limpeza da barra:** mecânica e química;
- **Teor de substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído:** 0 (REF), 10 e 30% de RTM;
- **Tempo de cura:** 7 e 28 dias;
- **Procedimentos de ensaio acelerado de corrosão por cloretos:** migração iônica e ciclos de imersão e secagem.

Com o propósito de padronizar as características geométricas dos corpos de prova, optou-se pela geometria prismática em virtude da manutenção de um fluxo unidirecional dos agentes agressivos e da maior aplicação pela comunidade científica (ANGST *et al.*, 2011; AUSTIN, 2009; PRABAKAR *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2009; TORRES, 2006; AHMAD *et al.*, 2005; CABRERA, 2005; CASTELLOTE *et al.*, 2002, PAGE *et al.*, 2001; dentre vários outros). O revestimento da armadura foi fixado em dois centímetros motivado pelo tempo hábil para a realização da pesquisa.

Para as dosagens empregadas, fixaram-se o *slump* em 20 ± 2 cm, de modo a não se empregar aditivos modificadores de consistência nas concretagens; a relação água/aglomerante de 0,55 em função da consistência e do tempo para realização da pesquisa; a relação aglomerante/agregados de 1:4 por ser um traço intermediário; o emprego do Cimento Portland CPV-ARI, em virtude das baixas adições na fabricação e as substituições de

cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído de 0 (referência), 10 e 30%, atingindo uma faixa de baixa e alta substituição de cimento.

Os tipos de limpeza da armadura foram definidos pela maior empregabilidade no cenário internacional (ANGST *et al.* 2009). Os tempos de cura em câmara úmida foram de sete e vinte e oito dias de modo a coincidir com as idades padronizadas para ensaio de resistência a compressão. Os métodos de ensaio acelerado foram definidos pelo tipo de mecanismo de transporte dos agentes agressivos, pela introdução de cloretos após a confecção dos corpos de prova e pela maior empregabilidade nos cenários nacional e internacional.

3.1.2 Variáveis dependentes

Consideraram-se variáveis dependentes aquelas que são influenciadas diretamente pelas variáveis independentes (acima listadas), cujo intuito é observar e avaliar suas variações. São variáveis dependentes deste trabalho:

- Potencial de corrosão – ESC (E_{corr}), em mV;
- Densidade instantânea de corrente de corrosão (i_{corr}), em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;
- Os tipos de perfis de cloretos, em % da massa de aglomerante *versus* mm;
- Concentração superficial (C_s), em % da massa de aglomerante;
- Coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}), em cm^2/s ;
- Teor crítico de cloretos livres (solúveis em água), em % da massa de aglomerante;
- Teor crítico de cloretos totais (solúveis em ácido), em % da massa de aglomerante.

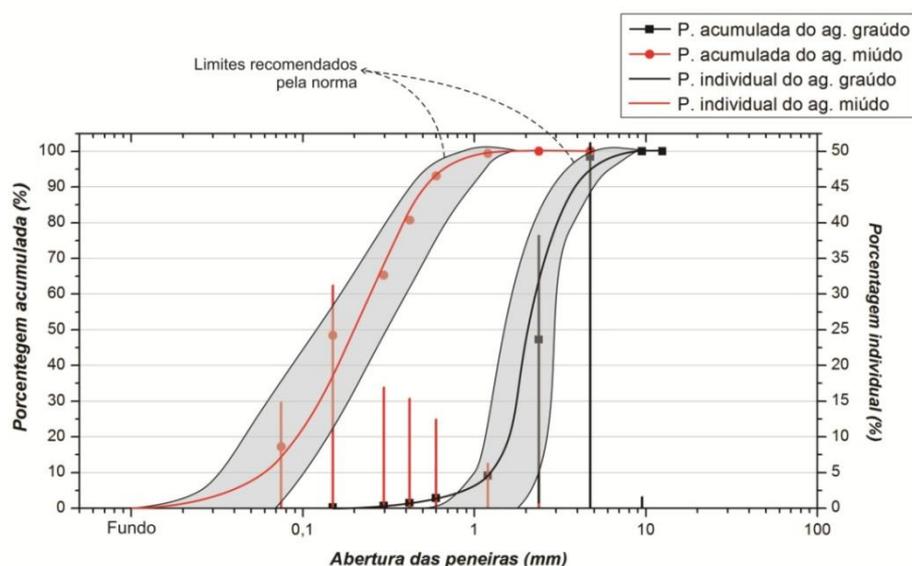
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS

3.2.1 Agregados

Propriedades do concreto como massa unitária, módulo de elasticidade, estabilidade dimensional, durabilidade, porosidade, permeabilidade, trabalhabilidade e resistência mecânica são influenciadas pelos agregados, daí a importância da caracterização dos mesmos (MEHTA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997). A caracterização dos agregados seguiu as recomendações das normas brasileiras vigentes. A Tabela 3.1 e a Figura 3.1 mostram os resultados de caracterização física dos agregados. À Figura 3.1, foram adicionados os valores-limites recomendados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 3.1 – Características físicas dos agregados.

Características analisadas	Ag. miúdo	Ag. graúdo
Massa específica real (g/cm ³) – NBR 9776/87	2,64	2,72
Massa específica em estado solto (g/cm ³) – NBR 7251/82	1,76	1,45
Coefficiente de inchamento (%) – NBR 6467/09	1,29	-
Dimensão máxima característica (mm) – NBR NM 248/03	4,8	9,5
Modulo de finura (%) – NBR NM 248/03	3,06	6,87

Figura 3.1 - Distribuição granulométrica dos agregados.

Os agregados empregados são de origem granítica, sendo o agregado graúdo britado e o agregado miúdo uma areia média de cava lavada. Estando aptos, nos aspectos analisados, para a sua utilização. Todos os agregados foram lavados e secos antes das moldagens.

3.2.2 Água

A água utilizada no programa experimental foi obtida da rede de abastecimento local, apresentando, assim, condições adequadas para o consumo. A Tabela 3.2 apresenta a caracterização da água empregada.

Tabela 3.2 - Características da água utilizada.

Características analisadas	NOV/12	DEZ/12	Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (2011)
Ph	6,5	6,5	6-9
Cor (uH Pt-Co/L)	2,4	5,1	≥15
Turbidez (UT)	1,4	2,2	≥5
Cloro (mg/L)	1,5	1,1	0,5-2
Coliformes Totais	Ausente	Ausente	Ausente

3.2.3 Armadura

A armadura utilizada nesta pesquisa foi o aço CA-50 na bitola de 6.3 mm, fabricada pela Gerdau Aço-norte S. A. em Recife/PE, sendo todas as barras de um mesmo lote. A Tabela 3.3 mostra a composição química e as características mecânicas do aço empregado.

Tabela 3.3 - Características da ferragem utilizada.

Características analisadas		Aço CA-50	Limite (NBR 7480/07)
Composição química (%)	Fe	98,483	-
	Ca	0,481	-
	P	0,017	-
	S	0,015	-
	Si	0,223	-
	Mg	0,760	-
	Outros	0,021	-
Massa (kg/m)		0,247	0,228 a 0,262
Resistência característica ao escoamento - f_y (MPa)		500	500
Limite de resistência (MPa)		≈540	540
Modulo de elasticidade (GPa)		298,7	-

3.2.4 Cimento

Para esta pesquisa, foi empregado o cimento do tipo CPV – ARI, em sacos de 40 kg, fabricado pela Mizu Cimentos na cimenteira de Baraúnas/RN. A utilização desse tipo de cimento se deu em função das baixas adições no seu processo de fabricação, se comparado aos demais tipos comercialmente fabricados.

A Figura 3.2 mostra a granulometria a *laser* do cimento, realizada no equipamento da *Malvern Instruments Ltd.*, modelo *Mastersize 2000 V5.60²*. Já a Tabela 3.4 mostra as propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento empregado. A caracterização química do cimento foi realizada através de ensaio de fluorescência de raios X, empregando o espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku equipado com tubo de Rh, modelo RIX 3000. A preparação da amostra para o ensaio de fluorescência se deu da seguinte forma: a amostra foi seca em estufa a 110°C, colocada em cápsula, prensada em prensa hidráulica a 25 tf e analisadas semiquantitativamente para alguns elementos leves e pesados.

² Os parâmetros de ensaio para granulometria a laser: modelo de análise geral, faixa de identificação de 0,2 a 2×10^7 μm , índice dispersante da água 1,33, índice de obscuração 11%, potência ultrassom a 50%, $d(0,1)=4,394$ μm , $d(0,5)=16,672$ μm e $d(0,9)=41,140$ μm .

Outros ensaios de caracterização foram empregados, como o tempo de pega conforme a NBR NM 65 (ABNT, 2003), o cálculo da área específica (Blaine) conforme a NBR NM 76 (ABNT, 1998), a perda ao fogo conforme diretrizes da NBR 5743 (ABNT, 1977); além da massa específica do material, seguindo as recomendações da norma NBR NM 23/01.

Figura 3.2 - Distribuição Granulométrica do Cimento CPV – ARI.

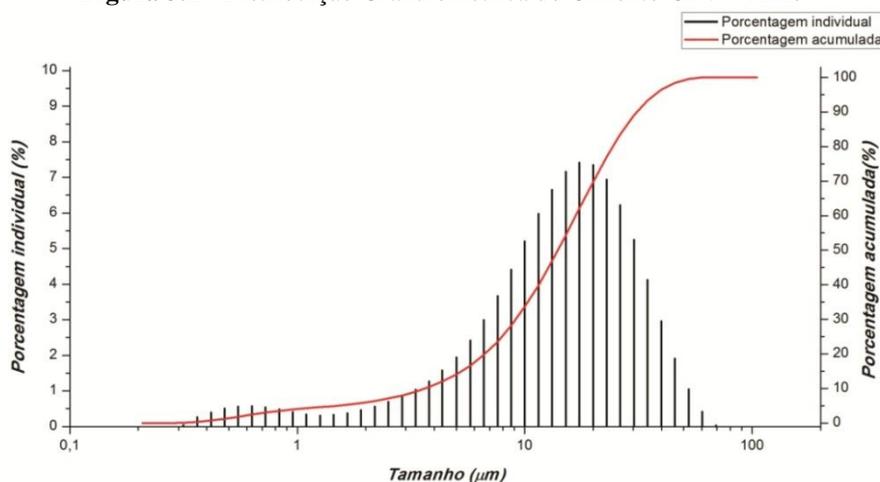


Tabela 3.4 - Característica do CPV – ARI.

Características analisadas		Cimento utilizado	Limite (NBR 5733/91)
Composição química (%)	Na ₂ O	-	-
	MgO	0,4	≤6,5
	Al ₂ O ₃	2,6	-
	SiO ₂	10,9	-
	SO ₃	4,1	≤3,5
	K ₂ O	0,6	-
	CaO	73,3	-
	Fe ₂ O ₃ T	5,0	-
	SrO	0,1	-
	TiO ₂	0,4	-
	V ₂ O ₅	0,1	-
	MnO	0,1	-
Perda ao fogo (%) - NBR 5743/77		2,4	≤4,5
Área específica – Blaine (cm ² /g) - NBR NM 76/98		3820	≥3000
Tempo de pega (min) – NBR NM 65/03	Início	139	≥60
	Fim	236	≤600
Massa específica (g/cm ³) – NBR NM 23/01		3,15	-

3.2.5 Resíduo cerâmico

O resíduo utilizado nesta pesquisa é de origem da indústria de cerâmica vermelha, obtida a partir do descarte de tijolos da empresa Cincera LTDA. Após a seleção do material, o

mesmo foi moído em moinho de bola, modelo Sonnex I-4205 da Contenco³, até atingir uma superfície específica com a atividade pozolânica mínima exigida pela norma NBR 5752 (ABNT, 2012). A Figura 3.3 e a Tabela 3.5 mostram os resultados de granulometria a *laser* e as caracterizações química e física realizadas com o material.

Figura 3.3 - Distribuição Granulométrica do RTM.

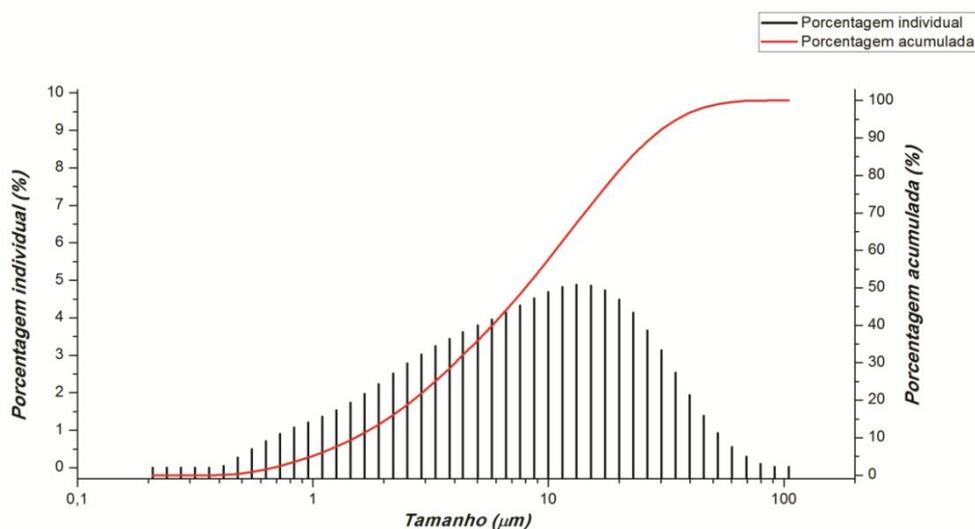


Tabela 3.5 - Característica do RTM.

Características analisadas	RTM utilizado	Limite (NBR 12653/12)	
Composição química (%)	Na ₂ O	0,4	≤1,5
	MgO	1,1	-
	Al ₂ O ₃	16,2	-
	SiO ₂	51,9	-
	P ₂ O ₅	0,2	-
	SO ₃	1,2	-
	K ₂ O	4,8	-
	CaO	3,5	-
	Fe ₂ O ₃ T	16,4	-
	SrO	0,1	-
	ZrO ₂	0,1	-
	TiO ₂	2,0	-
	V ₂ O ₅	0,2	-
	BaO	0,3	-
MnO	0,1	-	
Perda ao fogo (%) - NBR 5743/77	1,5	-	
Área específica – Blaine (cm ² /g) - NBR NM 76/98	5080	-	
Massa específica (g/cm ³) – NBR NM 23/01	2,62	-	

³ Os parâmetros da moagem do RTM: capacidade do moinho de 47 litros, rotação em torno de 5000 rpm, tempo de moagem de 1,5 horas, usou-se 18 bolas de aço de 40 mm.

A granulometria a *laser*, ensaios de fluorescência de raios X, perda ao fogo, área específica (blaine) e massa específica seguiram os mesmos procedimentos adotados para a caracterização do cimento. A soma dos óxidos de ferro, alumínio e sílica é menor do que 70%, como determina a NBR 12653/92.

Seguindo as recomendações da NBR 5752 (ABNT, 2012), o índice de atividade pozolânica do RTM empregado é de 86%. Durante todo o andamento de caracterização dos materiais, confecção dos corpos de prova (CPs) e exposição ao ambiente agressivo, o resíduo empregado seria considerado pozolânico. Logo, o resíduo em questão poderia ser considerado como um aglomerante nas dosagens empregadas nesse estudo. Porém, a norma NBR 5752 foi atualizada em 2014, aumentando o limite mínimo de atividade pozolânica para 90%; sendo assim, o RTM empregado nesta pesquisa não pode ser considerado aglomerante.

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova (CPs) utilizados para os ensaios acelerados de indução da corrosão por cloretos tiveram dimensões fixas de 80x80x80 mm e um cobrimento único da armadura de 20 mm (Figura 3.4). Em cada CP, foram dispostas duas barras de aço CA-50 com bitola de 6.3mm e comprimento de 100 mm. As barras foram previamente limpas de dois modos: mecanicamente e quimicamente. Os procedimentos para cada tipo de limpeza estão descritos no item 3.3.1.2. De modo a propiciar uma área de exposição de aproximadamente 6 cm², as extremidades das barras foram envoltas por fita adesiva PVC. A Figura 3.5(a) mostra a preparação final das barras.

Figura 3.4 – Características geométricas dos corpos de prova (medidas em mm).

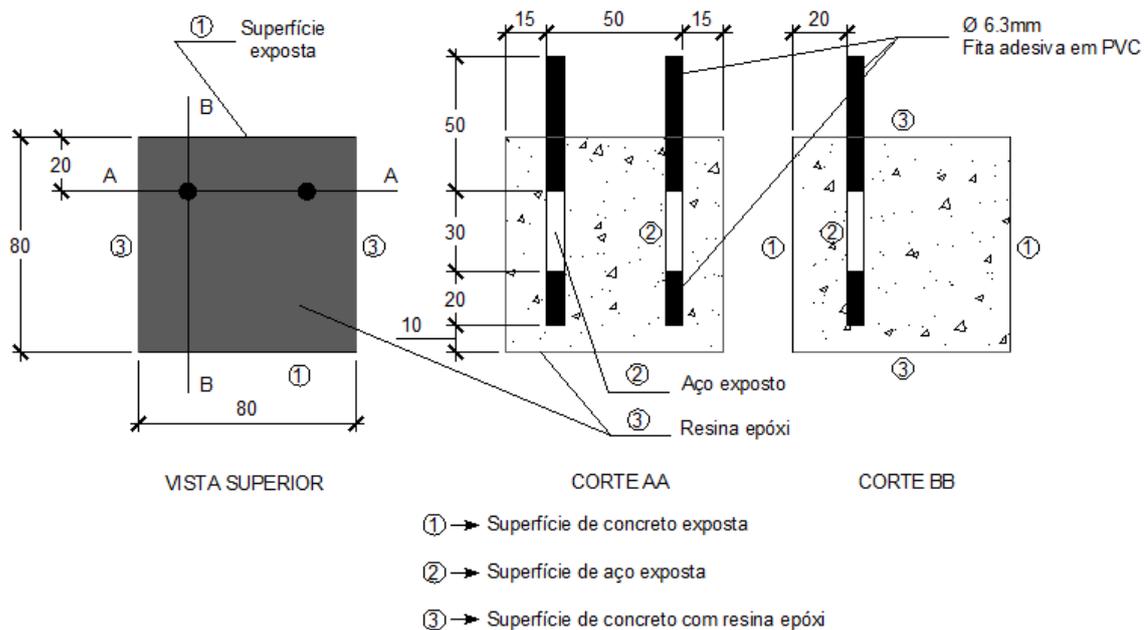
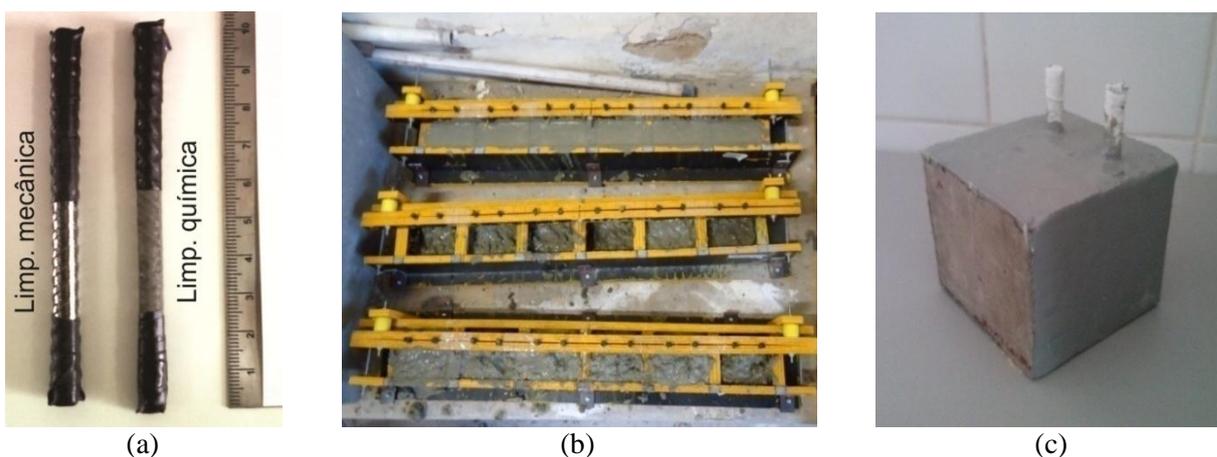


Figura 3.5 – Detalhes da confecções dos CPs – (a) barras preparadas para moldagem, (b) moldagem dos CPs, (c) CPs prontos pra ensaio.



Os corpos de prova foram moldados em formas de madeira plastificada (Figura 3.5(b)) com as dosagens descritas no item 3.3.1, adensados manualmente em duas camadas com 15 golpes e desmoldados com 24 horas. Antes dos espécimes serem dispostos em cura, eles tiveram a parte externa da armadura envolvida com fita veda-rosca.

A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida com teor de umidade e temperatura controladas (UR de $95\pm 2\%$ e T $25\pm 5^\circ\text{C}$). A fim de estudar a influência do tempo de cura na resposta à despassivação da armadura, adotou-se para o tempo de cura em câmara úmida os tempos adotados nos ensaios de resistência a compressão, sete e vinte e oito dias. Após a cura, os CPs úmidos foram secos em ambiente de laboratório por 24 horas e envoltos em filme plástico até atingirem a idade de 90 dias, objetivando uma microestrutura mais estável. Por fim, os CPs foram pintados com resina epóxi em quatro das seis faces (Figura 3.5(c)) e submetidos aos ensaios detalhados no item 3.4.

3.3.1 Tipos de dosagens empregadas

Para as dosagens dos concretos, fixaram-se:

- O *slump* em 20 ± 2 mm, cujo objetivo foi facilitar a aplicação, compactação e acabamento e, por conseguinte, reduzir a formação de falhas de moldagens. Não se empregaram aditivos modificadores de consistência;
- A relação aglomerante/materiais secos de 1:4 teve como objetivo a utilização de um traço intermediário no consumo de aglomerantes. A proporção de agregados miúdos e graúdos foi estabelecida a partir de um ensaio de empacotamento;

- A relação água/aglomerante (a/agl) foi fixada em 0,55 e teve como objetivo atingir o *slump* predeterminado e o espaço de tempo hábil para a realização do trabalho, sabendo que o fator a/agl influencia na porosidade do material.

Com a finalidade de estudar a influência da adição cerâmica, a mesma foi adicionada à mistura, por substituição em massa de cimento, nas proporções de 0, 10 e 30%. A Tabela 3.6 mostra os traços utilizados (cimento: resíduo cerâmico: areia: brita: a/agl), o consumo de cimento e alguns resultados pertinentes às dosagens empregadas. A análise dos resultados físicos e mecânicos estão contidos no item 4.1.2

Tabela 3.6 – Características físicas da dosagem.

Características Analisadas		Traços (C: RTM: AR: BR)			
Traços em massa		1:0:1,86:2,25	0,9:0,1:1,86:2,25	0,7:0,3:1,86:2,25	
<i>Slump Test</i> (mm) – NBR NM 67/98		220	210	190	
Consumo de cimento (kg/m ³)		414,3	372,9	290,0	
Absorção total* - NBR 9778/05	28 dias	M. esp. (g/cm ³)	2,58	2,58	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,10	15,35	15,39
		Absorção (%)	6,87	7,01	7,07
	90 dias	M. esp. (g/cm ³)	2,58	2,59	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,05	15,30	15,39
		Absorção (%)	6,87	6,98	7,07
Resistência Mecânica*# (MPa) – NBR 5738/03	14 dias	41,0	33,1	29,4	
	28 dias	47,1	35,9	32,9	
	90 dias	52,2	47,2	44,6	

* Para cada dosagem, foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, adensados manual em duas camadas com 15 golpes cada, desmoldados com 24 horas e curados por sete dias em imersão total de água saturada em cal. Após o tempo de cura, os mesmos foram dispostos em ambiente de laboratório até a realização do ensaio.

Os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica na UFPE com capeamento em enxofre. Resultados estão apresentados segundo as determinações da norma em questão.

3.3.2 Limpeza das barras

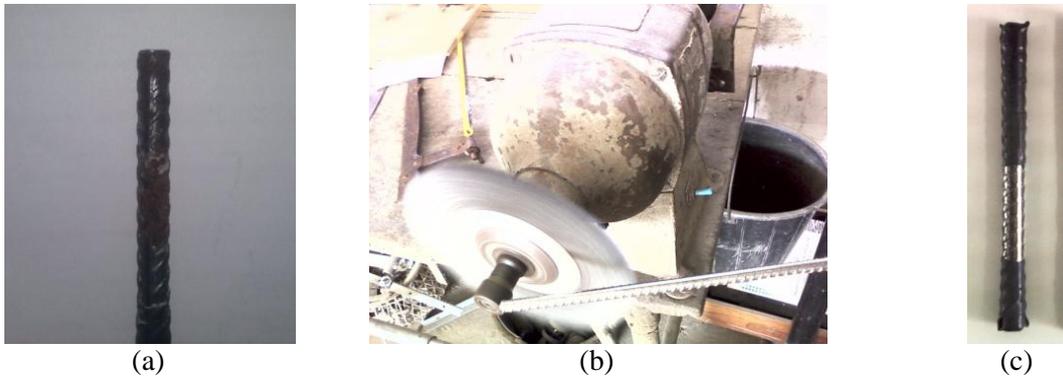
Essa etapa constitui a retirada da camada de óxido de ferro aderida à superfície da barra de aço, com o objetivo de padronizar as condições iniciais de trabalho. Para limpeza das barras, foram utilizados dois procedimentos distintos detalhados abaixo.

3.3.2.1 Limpeza mecânica

A limpeza mecânica seguiu as recomendações praticadas pela comunidade científica nacional (MEIRA *et al.*, 2007; VIERA, 2003). O preparo da barra teve a seguinte sequência: os vergalhões de 6.3 mm foram previamente cortados em intervalos de 100 mm, em seguida

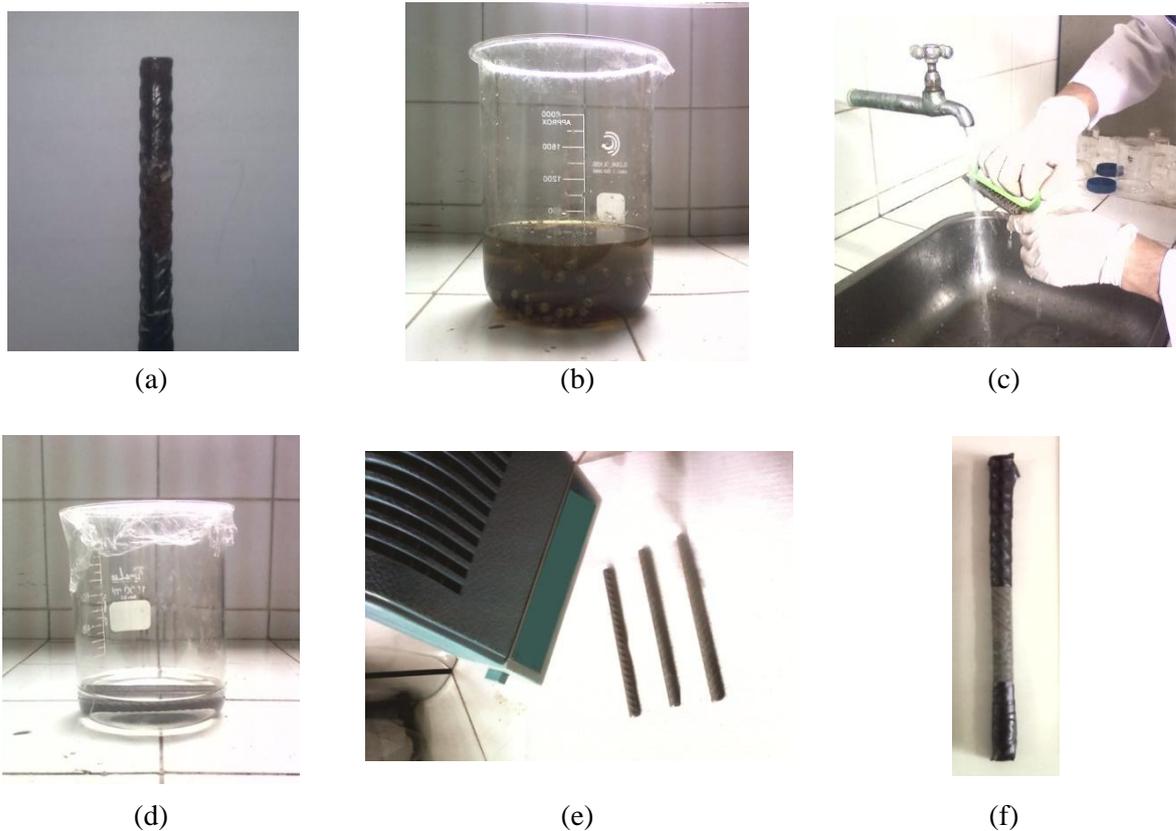
foram chanfrados nas pontas com esmeril (Figura 3.6 (a)), depois limpos com escovação mecânica de cerdas metálicas até a retirada total dos óxidos aderidos à superfície (Figura 3.6 (b)) e, por fim, envoltos em fita adesiva de PVC (Figura, 3.6 (c)).

Figura 3.6 - Sequência de limpeza mecânica das barras - (a) barras cortadas e chanfradas antes da limpeza, (b) limpeza por escovação mecânica com cerdas metálicas, (c) barras envoltas em fita adesiva de PVC.



3.3.2.2 Limpeza química

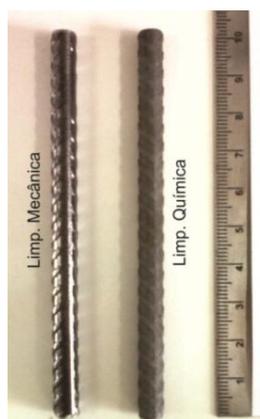
Figura 3.7 - Sequência de limpeza química das barras - (a) barras cortadas e chanfradas antes da limpeza, (b) barras em solução de ácido clorídrico e de hexametilenotetramina, (c) barras em escovação, (d) barras em acetona, (e) processo de secagem das barras, (f) barras envoltas em fita adesiva de PVC.



A limpeza química seguiu as recomendações da norma ASTM G1 (2011). O procedimento de limpeza das barras foi realizado de acordo com a seguinte sequência: corte da barra em intervalos de 100 mm, chanfro nas pontas com um esmeril (Figura 3.7 (a)),

disposição das barras em solução de ácido clorídrico na proporção de 1:1 e 3,5 g/l de hexametenotetramina por quinze minutos (Figura 3.7 (b)), lavagem e escovação imediata com escova de cerda plástica em água corrente para retirada final da camada de óxido (Figura 3.7 (c)), imersão total em acetona por dois minutos para desengordurar e facilitar a secagem (Figura 3.7 (d)), secagem com ar quente (Figura 3.7 (e)) e, por fim, envoltos em fita adesiva de PVC (Figura 3.7 (f)). A Figura 3.8 faz uma comparação visual entre as barras com limpezas químicas e com mecânicas, antes de serem envolvidas com fita adesiva em PVC.

Figura 3.8 - Barras após limpeza.



3.4 ENSAIOS RELACIONADOS À DURABILIDADE

3.4.1 Características dos métodos acelerados de indução da corrosão por cloretos

3.4.1.1 Ciclos de imersão e secagem

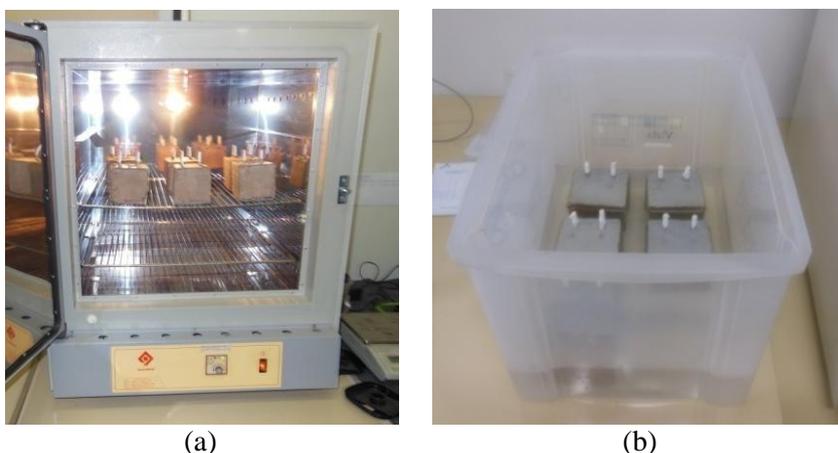
Baseado numa retrospectiva da literatura, os ensaios de imersão e secagem consistiram na submissão de três corpos de prova de cada série (conjunto de corpos de prova cúbicos com certa dosagem, tempo de cura e limpeza da barra), a imersão em uma solução de cloreto de sódio e secagem em estufa com temperatura controlada. Os critérios para a predeterminação das variáveis do ensaio (cátion associado ao cloreto, concentração da solução, tempo e tipo de secagem e imersão) foram a maior empregabilidade nos cenários nacional e internacional.

A escolha da solução empregada se deu pelo fato de a solução de cloreto de sódio a 1M ser a mais empregada na literatura (GLASS *et al.*, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006; entre muitos outros). Quanto aos ciclos, os períodos de imersão/secagem mais empregados são de 3 dias para imersão e 4 dias para secagem ou de 2 dias para imersão e 5 dias para secagem (GJØRV e VENESLAND, 1979; CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST *et al.*, 2011), optando-se pela primeira maneira. No que se refere à forma de

secagem, há, na literatura, um certo equilíbrio entre a secagem em ambiente de laboratório (WHEAT, 2002; TAVARES *et al.*, 2006; ANGST *et al.*, 2011) e a secagem em estufa com temperatura variando entre 40°C e 50°C (VIEIRA, 2003; TAVARES *et al.*, 2006; KISHIMOTO, 2010). No presente caso, optou-se pela secagem em estufa em função da redução do tempo de ensaio.

Portanto, após um período de estabilização da microestrutura do material, algo em torno de noventa dias, os espécimes foram dispostos na estufa com temperatura controlada de $45\pm 5^\circ\text{C}$ por quatro dias (Figura 3.9 (a)) e, logo em seguida, submetidos à imersão total por três dias em solução de um molar de NaCl (Figura 3.9 (b)). A solução era renovada totalmente a cada dois ciclos.

Figura 3.9 – Configuração de ensaio por imersão e secagem – (a) secagem em estufa e (b) imersão total em solução salina.



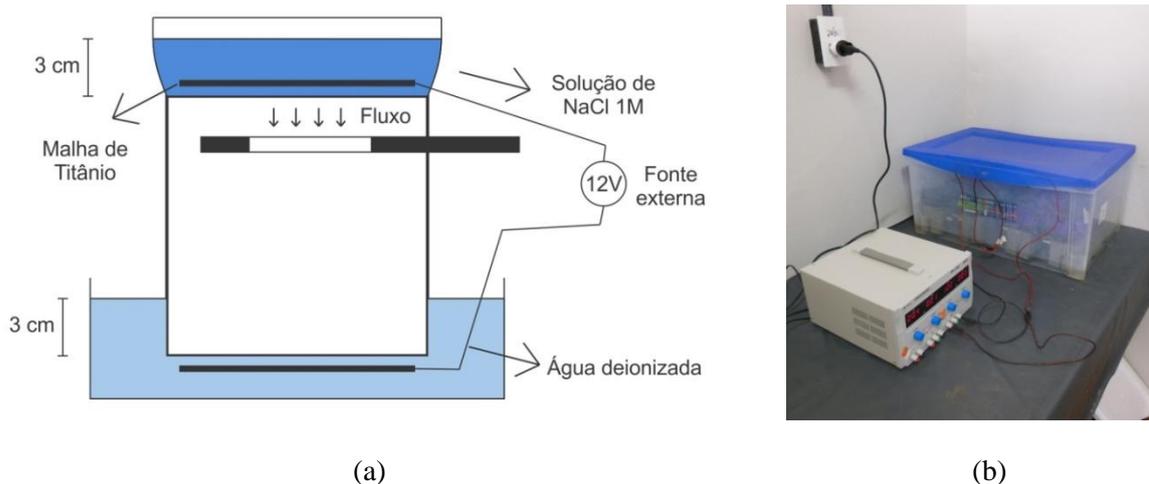
3.4.1.2 Eletromigração

Ensaio de indução por campo elétrico caracterizam-se por migração de íons através de uma membrana porosa com emprego de um campo elétrico (MIETZ, 1998). Estudos nesta área com íons cloretos mostram que o sal mais empregado é o cloreto de sódio (AUSTIN, 2009; PRABAKAR *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2009; SPAINHOUL *et al.*, 2008; AHMAD *et al.*, 2005; CABRERA, 1996; CASTELLOTE *et al.*, 2002; PAGE *et al.*, 2001; entre outros). As concentrações das soluções mais empregadas estão entre 3% e 1M (ASBORRA *et al.* 2011; TREJO, 2003; CASTELLOTE *et al.*, 2002; LEE *et al.*, 2002; ALONSO *et al.*, 1998; TORRES, 2006; entre outros).

A grande maioria dos ensaios dessa natureza utiliza a barra como um dos polos para a geração do campo elétrico (ASBORRA *et al.* 2011; AUSTIN, 2009; PRABAKAR *et al.*, 2009; SPAINHOUL *et al.*, 2008; TORRES, 2006; AHMAD *et al.*, 2005; CABRERA, 1996; LEE *et al.*, 2002; PAGE *et al.*, 2001; ALONSO *et al.*, 1998; entre outros). Tal metodologia é

de fácil montagem e de breve tempo de ensaio, mas gera uma enorme polarização na barra (TREJO, 2009). A diferença de potencial recomendada é de 10 Volts devido à pouca influência nos perfis de cloretos obtidos (TREJO & PILLAI, 2003), tendo em vista que o campo elétrico não só induz a migração de cloretos, mas também as hidroxilas (OH⁻) (ANGST, 2009; TREJO, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2000). Castellote *et al.* (2002) recomendam entre 10 e 13V.

Figura 3.10 – Configuração de ensaio por eletromigração - (a) desenho esquemático, (b) realização do ensaio.



O ensaio de eletromigração, aqui estudado, seguiram o esquema de montagem proposto por Castellote *et al.* (2002), que consiste no emprego de uma diferença de potencial pre-estabelecida entre duas malhas metálicas submersas em uma solução contendo cloretos e outra contendo apenas água deionizada; sendo o polo positivo, a malha metálica submersa em água deionizada, e o polo negativo, a malha submersa em solução contendo cloretos. Essa disposição induz a migração dos cloretos para o interior do concreto (Figura 3.10 (a)).

A escolha desse tipo de montagem se deu pela menor interferência nas leituras de monitoramento eletroquímico, devido à polarização da armadura com o emprego do campo elétrico, ver seção 4.2.2.1. Porém tal configuração de montagem repercute em um maior tempo de ensaio quando comparadas as configurações de montagem que empregam a própria armadura do CP como polo positivo, devido à maior resistividade do material provocada pela distância entre os polos. A polarização da armadura pode interferir nas leituras de potencial de corrosão e resistência de polarização, tendo como consequência uma decisão errônea sobre o período da iniciação da corrosão de cada material (ANGST *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002).

Logo após um período de 90 dias, com o intuito de estabilizar a microestrutura do concreto, os corpos de prova foram imersos totalmente em água destilada até a constância de massa. Tal procedimento teve o objetivo de minimizar o efeito de difusão por sucção do

agente agressivo nas primeiras horas de ensaio de eletromigração e termos apenas o mecanismo de transporte por migração iônica.

Partindo do mesmo pressuposto usado nos ensaios de imersão e secagem, a maior empregabilidade pela literatura, adotou-se a solução de um molar de cloreto de sódio (NaCl), renovado a cada 20 horas de ensaio e aplicação diária por cinco horas de um campo elétrico com diferença de potencial de 12V, através do emprego de uma fonte de bancada (Figura 3.10 (b)). Optou-se pelas malhas metálicas de titânio como polos do campo elétrico, devido à baixíssima oxidação (SPIESZ, 2012). Já as lâminas da solução com cloretos e da água deionizada foram de três centímetros, devido ao cobrimento adequado das malhas.

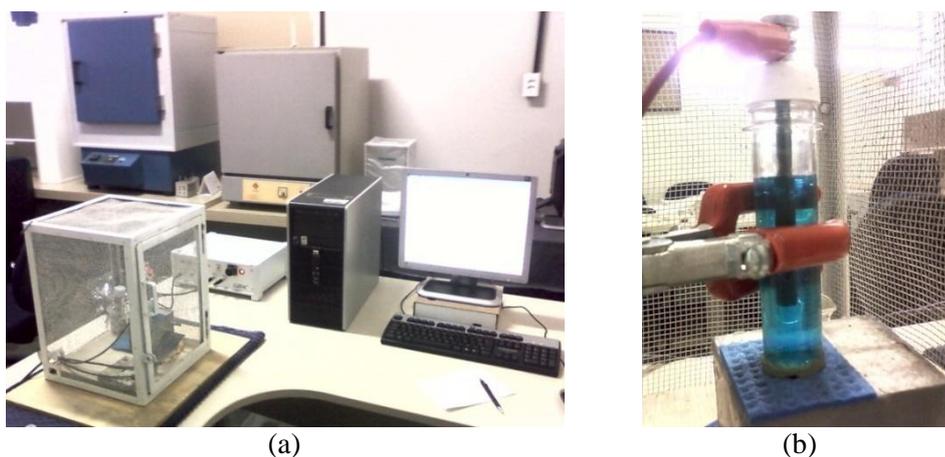
3.4.2 Monitoramento eletroquímico

A técnica de resistência de polarização (R_p) tem sido amplamente empregada com o objetivo de detecção da despassivação das armaduras e estudos sobre o teor crítico de cloretos (ANGST *et al.*, 2009; MEIRA *et al.*, 2014). Tal técnica alia uma resposta eficiente em relação à identificação do início do processo de corrosão com a rapidez das medidas. O monitoramento das barras foi realizado através de medidas de potencial de corrosão em circuito aberto e técnica eletroquímica de resistência à polarização com compensação da queda ôhmica para obtenção da densidade de corrente instantânea de corrosão.

O equipamento empregado nas leituras foi um ponteciostato de bancada, modelo GILL AC da ACM Instruments (Figura 3.11 (a)). Para a realização das medidas, empregou-se um eletrodo de referência de Cu|CuSO₄ (ESC) e um contra-eletrodo de aço inoxidável, mantendo-se todo o conjunto envolto em uma gaiola de Faraday para evitar interferências externas (Figura 3.11 (b)).

Através do monitoramento eletroquímico se obtém o comportamento das variáveis: potencial de corrosão – ESC (mV) e densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Juntas, elas podem trazer detalhes quantitativos e qualitativos sobre o estado da barra no interior do concreto sem causar deterioração à estrutura. Os critérios para detecção da despassivação da armadura eram leituras de potencial de corrosão inferiores a -350 mV (ESC) e densidade de corrente de corrosão superior a 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para o eletrodo empregado (ANGST *et al.*, 2009; CASCUDO, 1997). As leituras eram feitas sempre após as imersões na solução agressiva para os ensaios de ciclos de imersão e secagem e antes do acionamento do campo elétrico após um período de repouso de dezenove horas para os espécimes em ensaio de eletromigração, o que se processou até a detecção da despassivação das barras.

Figura 3.11 - Arranjo para as medidas de resistência à polarização – (a) visão geral, (a) detalhe do eletrodo de referência.



Para os espécimes submetidos a ciclos de imersão e secagem, após a detecção dos dois requisitos que caracterizam a despassivação, foram realizadas mais duas leituras em dias seguintes de modo a constatar, realmente, que a armadura entrou em processo de corrosão. Já os espécimes em ensaio de migração iônica, uma vez detectados os critérios de despassivação dos dois requisitos, os CPs foram dispostos em ambiente de laboratório afim de aguardar que o efeito reversível da polarização cessasse. Mais detalhes no item 4.2.2.1. Logo em seguida, eram realizadas mais duas leituras com o intuito de constatar o início do processo corrosivo.

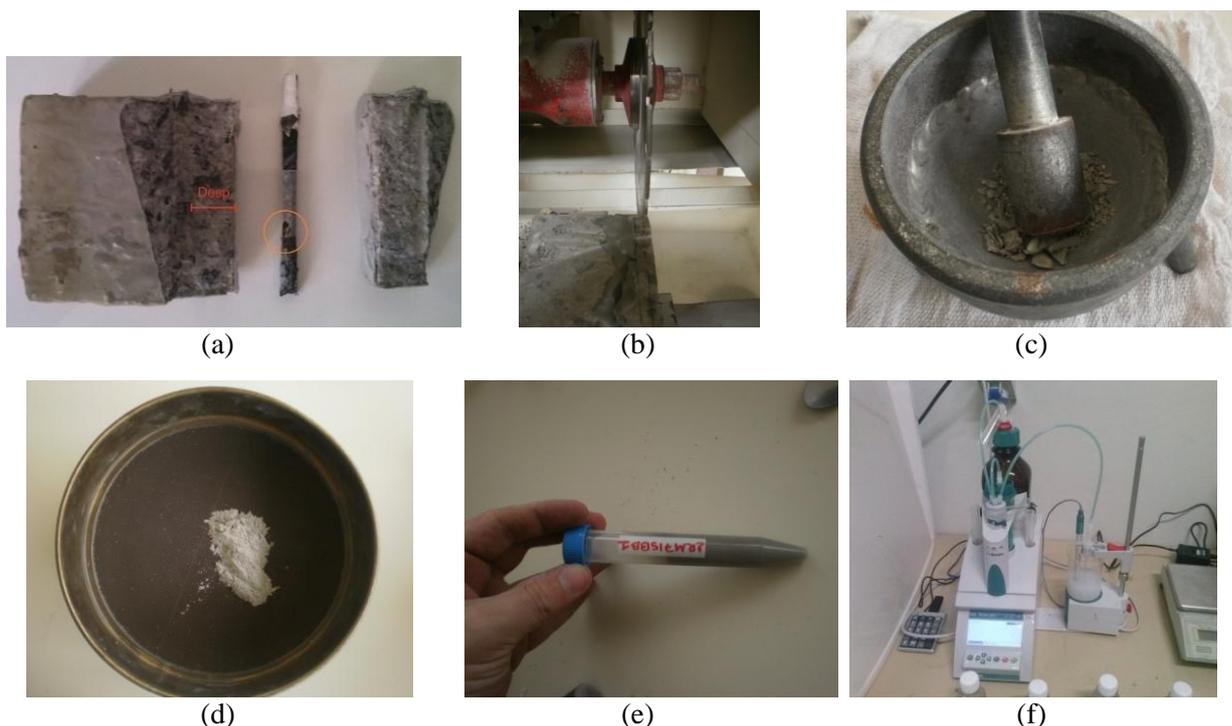
3.4.3 Teor crítico de cloretos

Uma vez detectado e constatado o início do processo corrosivo, os corpos de prova foram retirados dos ensaios acelerados de corrosão. Em seguida, a barra foi retirada com auxílio de uma talhadeira e martelo, detectado o pite de corrosão e obtida a distância desse pite à face do concreto (Figura 3.12 (a)).

De modo a determinar as concentrações de cloretos em camadas predefinidas, os espécimes foram cortados numa máquina de corte com disco diamantado em camadas de 1 mm para a superfície e em 5 mm para as demais quatro camadas posteriores (Figura 3.12 (b)). Em seguida, essas amostras foram pulverizadas manualmente (Figura 3.12 (c)), peneiradas em uma peneira de abertura de 0,149 mm (Figura 3.12 (d)) e, imediatamente, imersas em acetona a fim de se evitar a carbonatação do material (Figura 3.12 (e)).

Uma vez pulverizada a camada em questão, as amostras foram submetidas a titulações potenciométricas para determinação dos teores de cloretos livres e totais. Para tal, seguiram-se as recomendações do RILEM (2002a, 2002b) para extração das amostras e as recomendações da ASTM C-114 (1992) para a titulação potenciométrica, empregando-se um titulador automático para este fim, modelo Titrino da Metrohm (Figura 3.12 (f)).

Figura 3.12 – Detalhamento da pulverização e da titulação – (a) retirada da barra, (b) corte das camadas, (c) pulverização manual das amostra, (d) peneiramento das amostras, (e) identificação e imersão em acetona, (f) titulação potenciométrica.



3.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES

3.5.1 Polarização da armadura com a aplicação do campo elétrico

A aplicação de um campo elétrico através do concreto gera uma carga positiva ou negativa na armadura, dependendo do sentido que se aplique o campo elétrico (MIETZ, 1998). Esse fenômeno, chamado polarização, pode causar interpretações errôneas sobre o estado de passividade da barra (CASTELLOTE *et al.*, 2002; TREJO *et al.*, 2009).

Com a intenção de evitar que as leituras de potenciais de corrosão - ESC e densidades de corrente de corrosão interfiram na decisão do estado da barra, decidiu-se estudar a influência da polarização sobre os materiais estudados. Os procedimentos para ensaio tiveram a seguinte sequência: as barras foram previamente preparadas conforme o item 3.3.2; a confecção dos espécimes foram conforme o item 3.3; dosagem conforme 3.3.1; a cura em câmara úmida por sete dias, repouso em ambiente de laboratório até completarem a idade de 90 dias. Uma vez estabilizada a microestrutura (idade de 90 dias), foram feitas leituras de potencial de corrosão – ESC e densidade de corrente inicial sem aplicação de campo.

Por fim, os espécimes foram dispostos em ensaio de eletromigração conforme o item 3.4.1.2, sendo as diferenças de potenciais aplicadas entre as malhas de 3, 7, 12 e 24 Volts por cinco horas. Após a aplicação do campo elétrico, foram feitas leituras de potencial de

corrosão e densidade de corrente em tempos predeterminados (imediatamente após o desligamento da tensão externa aplicada, 3, 12 e 48 horas) para cada tensão aplicada.

3.5.2 pH da água de equilíbrio

A água de equilíbrio nada mais é que a água livre contida nos poros capilares das pastas de cimento apta a reagir com os produtos hidratados ou componentes externos que possam adentrar a rede porosa do material (OLVIVEIRA & AGOPYAN, 2000). Essa água livre se equilibra com as fases sólidas e líquidas da pasta hidratada. A água de equilíbrio nos traz informações sobre a alcalinidade dos poros da matriz cimentícia, expressa em pH; a estabilidade da película passivadora é, pois, função da mesma (HAUSMAN, 1967).

As metodologias de ensaios empregadas para a obtenção de água dos poros são pelo método da água de equilíbrio ou por extração da água do poro sobre pressão (OLVIVEIRA, 2000). Para a determinação da água de equilíbrio, consideraram-se as recomendações do boletim técnico PCC 259 (2000). Este método consiste na aplicação de uma diferença de concentração entre a água do poro e uma água deionizada envolta à pasta, de modo que o meio mais concentrado (água do poro) difunde as espécies dissolvidas no interior da pasta para o meio exterior onde se encontra a água deionizada, sendo assim equilibrado o sistema.

Para este trabalho, foram moldadas pastas de cimento (referência) e pastas com substituição de cimento por resíduos cerâmicos nas proporções de 10, 20 e 30%, desmoldadas com 24 horas e curadas por sete dias em câmara úmida (UR de $95\pm 2\%$ e T de $25\pm 5^\circ\text{C}$). Após a cura, tais pastas foram pesadas e imersas em água deionizada previamente fervida na proporção de um grama de pasta para cinco mililitros de água deionizada. O pH da água deionizada foi de 7,75. As leituras foram feitas em um pHmetro digital com erro de $\pm 0,05$ e as leituras de pH aconteceram 5 horas após a imersão, aos 7, 14, 28 e 90 dias (Figura 3.13).

Figura 3.13 – Leituras da água de equilíbrio com pHmetro digital.



3.5.3 Análise termogravimétrica

Tendo como objetivo analisar a atividade pozolânica do RTM, a partir do consumo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), foi realizado um ensaio de termogravimetria (TG), de modo a determinar a perda de massa de uma amostra em função da elevação da temperatura. Para isso, foram confeccionadas três pastas distintas, uma pasta de referência, contendo apenas cimento e duas outras pastas, contendo uma adição de 10% e 30% de RTM, sempre mantendo a mesma quantidade de cimento. Uma vez confeccionadas e desmoldadas com 24 horas, as pastas foram imediatamente imersas em água destilada, para evitar a carbonatação, até a extração da amostra.

Os ensaios de TG foram realizados aos 59 e aos 90 dias, em atmosfera de nitrogênio, numa faixa de temperatura de 0 a 800°C e taxa de aquecimento de 5°C/min. A partir de picos, tipicamente característicos nos gráficos de termogravimetria diferencial (DTG) em produtos hidratados do cimento, foram identificadas as faixas de temperaturas referentes à perda de água quimicamente combinada ao hidróxido de cálcio (425-455°C) e à perda de gás carbônico para o carbonato de cálcio (500-700°C). Em seguida, foi determinado as parcelas de perda de massa referente à desintegração do Ca(OH)_2 e do CaCO_3 .

Nas amostras estudadas, os teores de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio foram calculados pelas equações usadas por Pilar (2012). A Equação 3.1 mostra a relação entre a massa molecular do hidróxido de cálcio e a massa molecular da água. Do mesmo modo, a Equação 3.2 mostra a relação entre a massa molecular do carbonato de cálcio à massa molecular do CO_2 .

$$T[\text{Ca(OH)}_2] = \frac{M[\text{Ca(OH)}_2]}{M[\text{H}_2\text{O}]} \times P[\text{H}_2\text{O}] = \frac{74}{18} \times P[\text{H}_2\text{O}] \quad (3.1)$$

$$T[\text{Ca(CO)}_3] = \frac{M[\text{Ca(CO)}_3]}{M[\text{CO}_2]} \times P[\text{CO}_2] = \frac{100}{44} \times P[\text{CO}_2] \quad (3.2)$$

Onde:

T [Ca(OH)_2] é o teor de hidróxido de cálcio, em %;

M [Ca(OH)_2] é a massa molecular do hidróxido de cálcio, 74 u;

M [H_2O] é a massa molecular da água, 18 u;

P [H_2O] é a perda de massa de água referente a desintegração do hidróxido de cálcio, em %;

T [CaCO_3] é o teor de carbonato de cálcio, em %;

$M [CaCO_3]$ é a massa molecular do carbonato de cálcio, 100 u;

$M [CO_2]$ é a massa molecular do gás carbônico, 44 u;

$P [CO_2]$ é a perda de massa de gás carbônico referente a desintegração do carbonato de cálcio, em %.

Os resultados das curvas de termogravimetria (TG) e de termogravimetria diferencial (DTG) das amostras estudadas estão apresentados no Apêndice A deste trabalho, mais especificadamente nas Figuras A.1 a A.6. A partir dos resultados de TG e DTG e da metodologia de cálculo realizada por Pilar (2012), foram calculados os teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, ao longo do tempo e da adição de RTM. Os resultados desse cálculo estão na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio nas pastas estudadas.

Idade	Dosagem	Teor de $Ca(OH)_2$ (%)	Teor de $Ca(CO)_3$ (%)
59 dias	REF	14,6	12,8
	C10%	12,5	12,4
	C30%	7,9	15,7
90 dias	REF	11,8	25,5
	C10%	10,1	18,7
	C30%	6,8	17,4

Diante do exposto, percebemos que há uma redução nos teores de hidróxido de cálcio, à medida que se adiciona RTM a pasta, em cada idade. A medida que o tempo passa, observa-se uma redução ainda maior no consumo de hidróxido de cálcio. Comprovando, assim, a atividade pozolânica do resíduo.

Sabendo que o consumo de hidróxido de cálcio também pode ocorrer em função da carbonatação, foi observado o teor de carbonato de cálcio presente nas pastas com adição de RTM e comparadas com as pasta de referência. Sendo assim, ao longo do tempo, observa-se que a adição de RTM não contribuiu para que o hidróxido de cálcio seja consumido pelas reações de carbonatação, tendo em vista que os teores de $CaCO_3$ não são maiores que os teores de $CaCO_3$ nas pastas de referência.

3.6 FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Por fim, as Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 mostram, de forma resumida, as sequências de procedimentos utilizados nos ensaios de pH da água de equilíbrio, de polarização e dos ensaios acelerados de corrosão por cloretos, tendo em vista os objetivos propostos no item 1.2.2 deste trabalho.

Figura 3.14 – Fluxogramas das atividades desenvolvidas no ensaio de polarização.

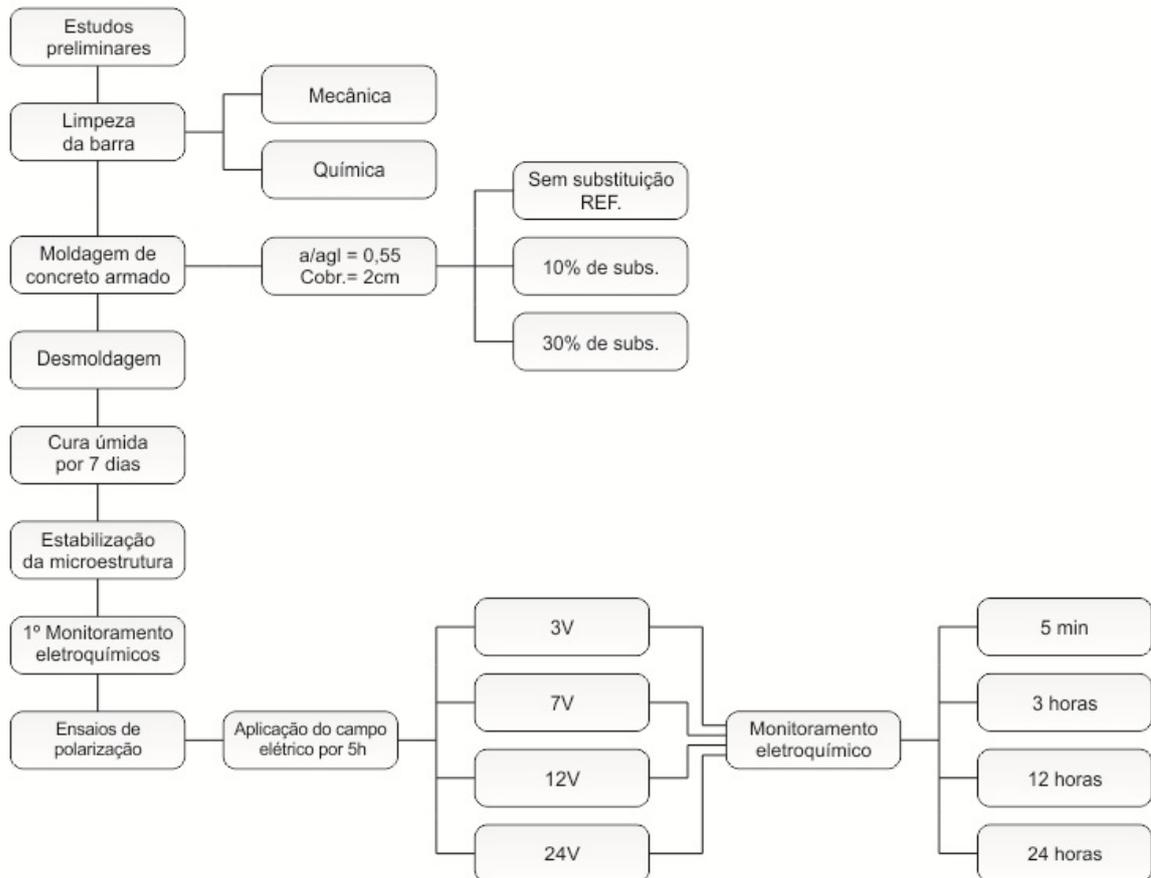


Figura 3.15 - Fluxogramas das atividades desenvolvidas no ensaio de pH da água de equilíbrio.

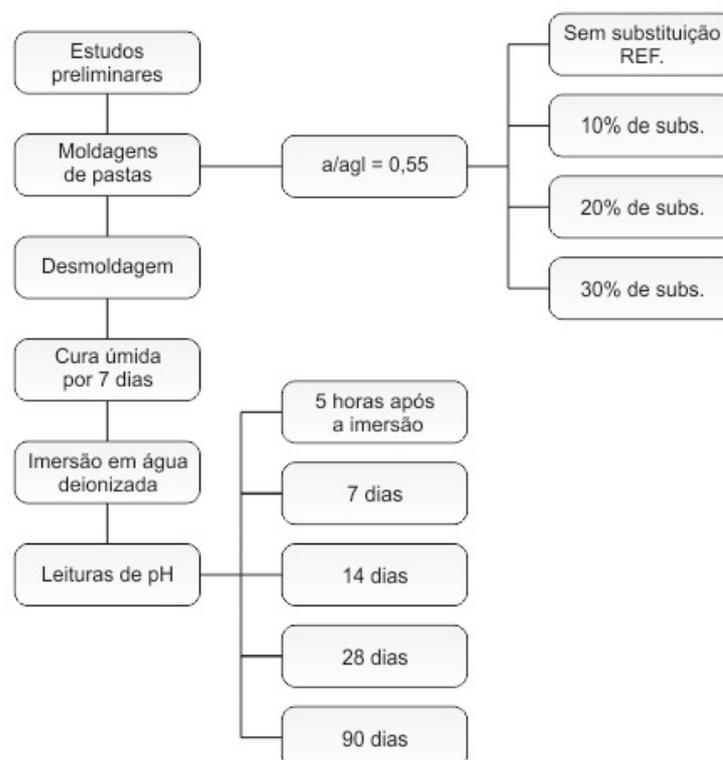
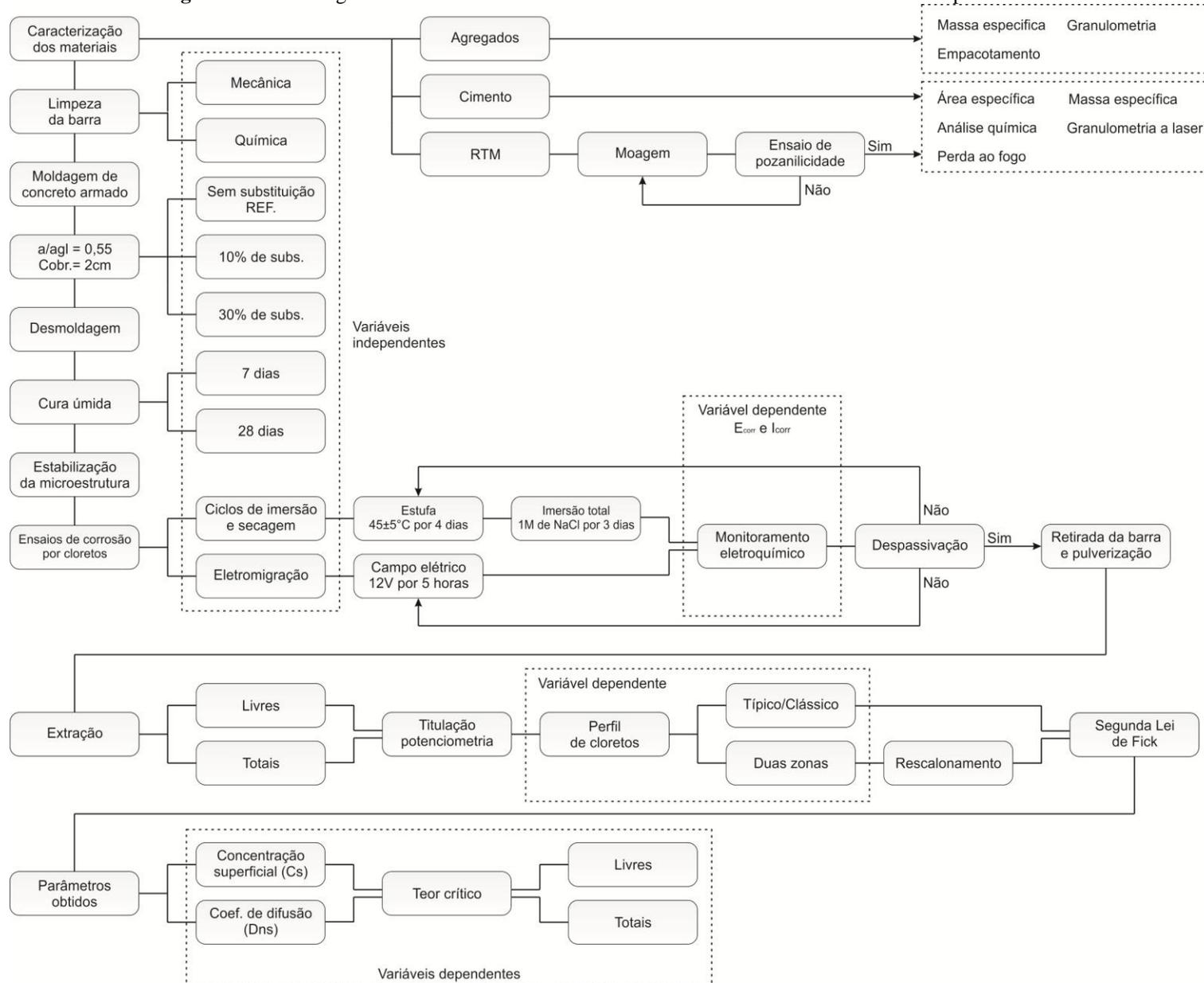


Figura 3.16 – Fluxogramas das atividades desenvolvidas nos ensaios acelerados de corrosão por cloretos.



4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões acerca dos ensaios empregados neste trabalho. Para os dados obtidos nos ensaios, foram usadas ferramentas de análise estatística, tais como: ajuste de curvas por regressão linear e não linear múltipla, análise de dados espúrios, análise de variância (ANOVA), Teste de Tukey, inferência estatística (teste de hipótese e estimação com distribuição de probabilidade normal) e teste de ajustamentos para distribuição de probabilidade normal (teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W)). A todas as análises citadas acima, usou-se o OriginPro 8.0 (versão 8.0B724), com exceção da ANOVA e do Teste de Tukey, na qual se usou o SPSS Statistics (versão 20.0.0).

Na primeira parte, são apresentados os resultados referentes às características físicas e químicas dos concretos estudados. Por fim, temos considerações sobre a durabilidade dos concretos com armaduras submetidas a ambientes com presença de cloretos.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

4.1.1 Alcalinidade da matriz cimentícia

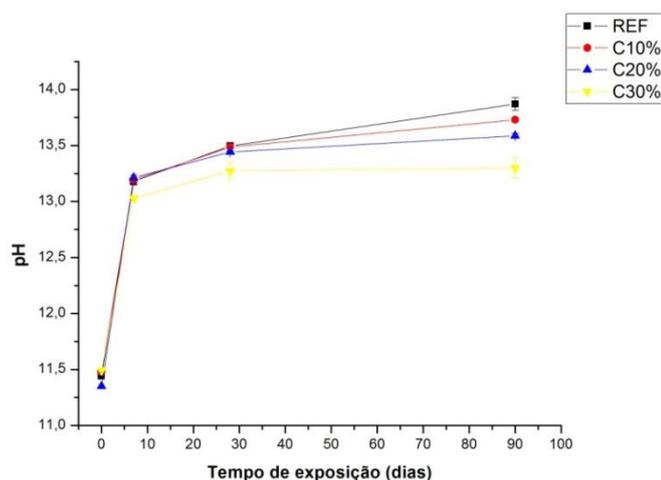
A alcalinidade da matriz cimentícia está diretamente ligada à formação e estabilidade da película passivadora da armadura no interior do concreto. Na fase líquida contida nos poros do concreto, tal alcalinidade, nas primeiras idades, é basicamente composta por uma solução saturada de portlandita (Ca(OH)_2 – hidróxido de cálcio), oriunda das reações de hidratação do cimento. Já em idades avançadas, cabem ao hidróxido de sódio (NaOH) e ao hidróxido de potássio (KOH) a manutenção de um meio alcalino. De modo geral, estes elementos estão contidos em solução nos poros do concreto, originários dos álcalis do cimento (CASCUDO, 1997).

Diante de tal importância, para o desempenho do material, foi confeccionada a Figura 4.1, a partir do ensaio descrito no item 3.5.2. A Figura 4.1 mostra a evolução do pH da água de equilíbrio com o tempo e o teor de substituição do cimento por RTM.

Aos 90 dias, idade na qual se iniciaram os ensaios acelerados de corrosão por cloretos, percebe-se que os valores de pH da água de equilíbrio ficaram acima de 12,9, para todas as pastas estudadas. Entretanto, observou-se uma redução máxima no pH da água de equilíbrio de 4,11% para pastas com 30% de substituição, em relação às pastas de referência. A princípio, esse valor isolado parece pequeno, porém tal diferença representa uma redução de

73,08% na concentração de íons hidroxila $[OH^-]$ contidos na água de equilíbrio da pasta. Para as pastas C10% e C20%, aos 90 dias, as reduções nas concentrações de íons hidroxila foram de 27,6% e 48,7%, respectivamente. Portanto, essa redução inicial nas concentrações de íons hidroxilas poderá trazer efeitos consideráveis sobre os valores de teores críticos de cloretos, apesar de o pH das matrizes com RTM serem relativamente bons.

Figura 4.1 – pH da água de equilíbrio versus idade.



Reportando-se à literatura, estudos sobre a alcalinidade de concretos com uso de resíduos de tijolo cerâmica mostram redução gradativa do pH à medida que se incorpora o resíduo. Vejmelková *et al.* (2012) observaram que os concretos de referência apresentam valores de pH da água de lixiviação da ordem de 12 após 60 dias de imersão em água destilada, enquanto que concretos com substituição de 60% do cimento por RTM apresentaram pH da água de lixiviação da ordem de 11. Tais resultados entram em consenso com os resultados aqui apresentados, no aspecto relacionado a redução no pH com a inserção de RTM.

4.1.2 Propriedades físicas e mecânicas

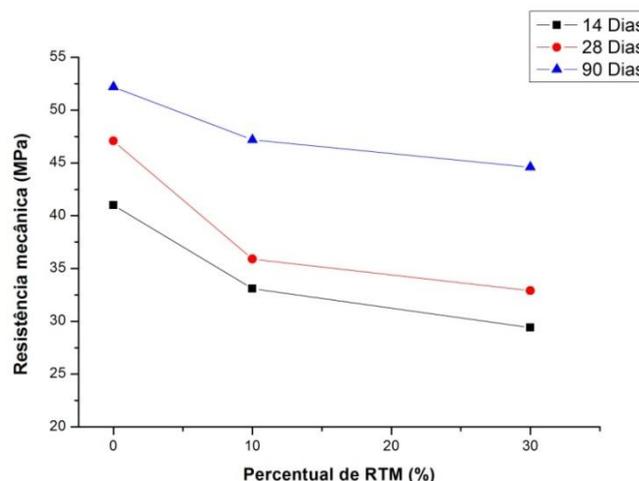
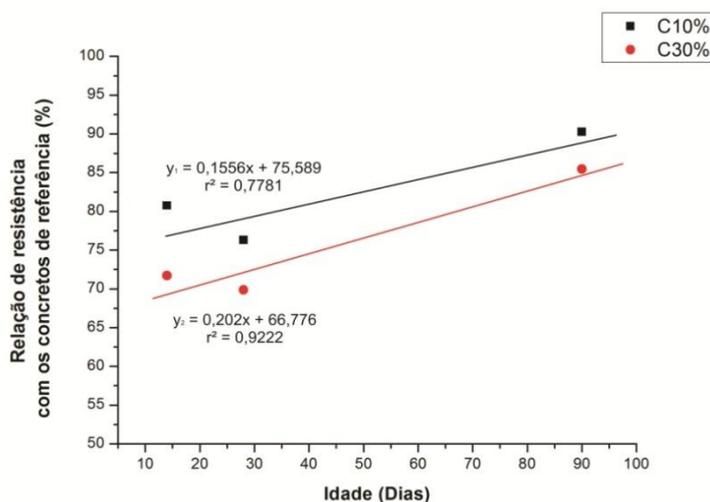
A Tabela 4.1 mostra os resultados médios obtidos para os ensaios de “Slump Test”, resistência a compressão e absorção total dos concretos empregados. Os resultados de abatimento mostram uma redução gradativa com a substituição de cimento por resíduo cerâmico devido à absorção de água pelo resíduo, fato esse constatado por outros pesquisadores (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2011; LEITE, 2011). Para os resultados de resistência mecânica, a Figura 4.2 mostra a influência das variáveis independentes (traço e idade) sobre esta propriedade. Os resultados de análise de variância estão presentes na Tabela 4.2. Já para o Teste de Tukey, os resultados estão na Tabela 4.3 e 4.4, para o efeito isolado do traço e da idade, respectivamente.

Tabela 4.1 - Características físicas e mecânicas dos concretos analisados.

Características Analisadas		Traços (C: RTM: AR: BR: AG)			
		REF	C10%	C30%	
		Referência	Substituição 10%	Substituição 30%	
Consumo de cimento (Kg/m ³)		414,3	372,9	290,0	
<i>Slump Test</i> (mm) – NBR NM 67/98		220	210	190	
Absorção total – NBR 9778/05	28 dias	M. esp. (g/cm ³)	2,58	2,58	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,10	15,35	15,39
		Absorção (%)	6,87	7,01	7,07
	90 dias	M. esp. (g/cm ³)	2,58	2,58	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,05	15,30	15,37
		Absorção (%)	6,87	6,98	7,05
Resistência Mecânica (MPa) – NBR 5738/03	14 dias	41,0	33,1	29,4	
	28 dias	47,1	35,9	32,9	
	90 dias	52,2	47,2	44,6	

A partir da Figura 4.2, analisando o efeito isolado das variáveis independentes, percebe-se que à medida que se substitui cimento por resíduo cerâmico há um decréscimo na resistência mecânica. Este efeito foi observado em todas as idades. Já para cada traço, há um aumento com a idade. Levando-se em consideração as resistências no início dos ensaios de durabilidade, 90 dias, as quedas são de 9,75% para C10% e 14,55% para C30% quando comparadas com concretos de referência. Para 28 dias, são 23,70% e 30,14% para C10% e C30%, respectivamente. Por fim, Para 14 dias são 19,26% e 28,29% para C10% e C30%, respectivamente.

A literatura mostra que a resistência mecânica de concretos com substituição de cimento por resíduos cerâmicos vermelhos tende a aumentar com 10% de substituição (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2014) e reduzir para substituições iguais e maiores que 20% (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2014; PARCHECO-TORGAL e JALALI, 2011). Para a idade, há um aumento na resistência; isso se comparado em uma mesma dosagem (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2014; PARCHECO-TORGAL e JALALI, 2011). Para esse trabalho não se percebeu tal aumento na resistência à compressão com a substituição de cimento por RTM, devido à idade de ensaio dos corpos de prova (CPs). A Figura 4.3 mostra a relação entre os concretos com substituições de cimento por RTM (C10% e C30%) e os concretos de referência *versus* a idade. Regressões lineares foram aplicadas às relações de resistência em questão, de modo a demonstrar a possibilidade de ganho da resistência com a idade, fato esse explicado acerca da atividade pozolânica lenta do resíduo empregado.

Figura 4.2 – Resistência mecânica *versus* adição de resíduo cerâmico.**Figura 4.3** – Relação de resistência mecânica *versus* idade.

A análise de variância dos dados de resistência mostra que a um nível de significância de 0,01, intervalo de confiança de 99%, visualiza-se estatisticamente que as variáveis independentes e a traço *versus* idade apresentam influência significativa sobre a resistência à compressão. Dessa forma, a idade é a que mais contribui para o resultado final da resistência com 57,20% de influência sobre o modelo, seguido pela substituição de cimento por RTM com 37,20% (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão.

Características analisadas	GDL	SQ	r^2	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	361,871	0,372	180,936	222,919	0,000
Idade	2	556,934	0,572	278,467	343,081	0,000
Traço x Idade	4	54,266	0,056	13,566	16,714	0,000
TOTAL CORRIGIDO	8	519,90	1,000	472,969	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.3 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre a resistência à compressão.

Traço	Subconjunto		
	1	2	3
REF	46,183	-	-
C10%	-	41,217	-
C30%	-	-	35,217

Tabela 4.4 – Teste de Tukey para o efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão.

Idade	Subconjunto		
	1	2	3
REF	33,833	-	-
C10%	-	41,350	-
C30%	-	-	47,433

A Tabela 4.3 mostra os resultados do Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre a resistência à compressão, a um nível de confiança de 99%. O Teste de Tukey é usado para comparar variáveis significativas com mais de dois subconjuntos. No caso deste trabalho, temos que a substituição de cimento por RTM apresenta três subconjuntos (REF, C10% e C30%). A partir da Tabela 4.3, percebe-se que todos os subconjuntos são estatisticamente significantes. Isso nos leva a interpretar que cada substituição aqui estudada influenciou diretamente sobre a resistência. Já a Tabela 4.4 mostra os resultados do Teste de Tukey para o efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão, sendo todos os subconjuntos da idade estatisticamente significantes.

Voltando aos resultados da análise de variância contidos na Tabela 4.2, percebe-se que há uma sobreposição de efeitos entre a substituição de cimento por RTM e a idade que provocou influência significativa no resultado, já que a um nível de confiança de 99%, temos "p" inferior a 0,01. Levando-se em consideração a Figura 4.3 e os resultados de ANOVA, o efeito conjunto das variáveis independentes (traço *versus* idade) mostra que o aumento da idade e a atividade pozolânica do resíduo minimizam a queda de resistência à compressão com o tempo. De fato, a literatura indica que as substituições estudadas têm efeito sobre a hidratação do cimento até o limite de substituição de 20% e o percentual excedente atua essencialmente na forma de *filler* (TYDLITÁT *et al.*, 2012), visto que a substituição de 10% é a que produz maior quantidade de hidratos formados, devido a uma redução na quantidade de água quimicamente combinada ao hidróxido de cálcio (GONSALVES *et al.*, 2006).

As Tabelas 4.5 e 4.7 mostram os resultados de análise variância para o índice de vazios e a absorção, respectivamente. Os resultados mostram que apenas o traço apresenta influência significativa sobre os resultados. À medida que se substitui cimento por RTM, há

um aumento gradativo no índice de vazios e na absorção (Figura 4.4); já a massa específica praticamente não sofre alteração. A um nível de confiança de 99%, o Teste de Tukey mostra que para o índice de vazios não há diferenças estatisticamente significativas entre as substituições de 10 e 30% de cimento por RTM, porém se comparados aos concretos de referência há diferenças (Tabelas 4.6). Para a absorção, o teste de Tukey mostra que todas as dosagens influenciaram significativamente sobre o modelo, a um nível de confiança de 99% (Tabela 4.8).

Tabela 4.5 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o índice de vazios.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,233	0,987	0,117	127,173	0,000
Idade	1	0,001	0,004	0,001	1,309	0,296
Traço x Idade	2	0,002	0,008	0,001	1,064	0,402
TOTAL CORRIGIDO	11	0,236	1,000	0,119	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.6 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o índice de vazios.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	15,055	-
C10%	-	15,323
C30%	-	15,373

Figura 4.4 – Índice de vazios e absorção *versus* percentual de resíduo.

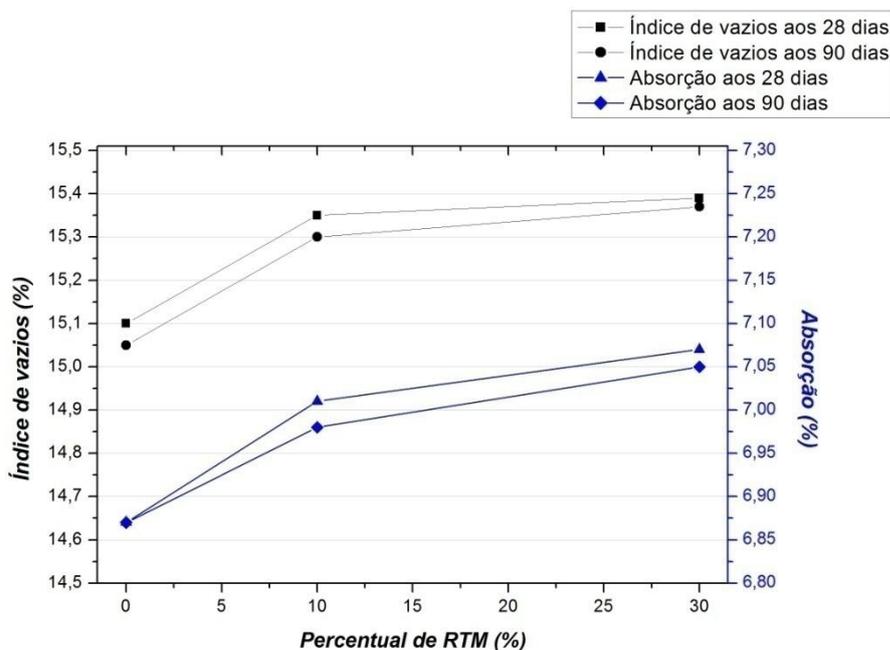


Tabela 4.7 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para a absorção.

Características analisadas	GDL	SQ	r²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,089	0,989	0,045	97,382	0,000
Idade	1	0,000	0,000	0,000	0,455	0,525
Traço x Idade	2	0,001	0,011	0,001	1,164	0,374
TOTAL CORRIGIDO	11	0,090	1,000	0,046	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.8 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre a absorção.

Traço	Subconjunto		
	1	2	3
REF	6,853	-	-
C10%	-	6,978	-
C30%	-	-	7,063

4.2 DURABILIDADE

4.2.1 Ensaio acelerado por imersão e secagem

4.2.1.1 Monitoramento eletroquímico

Nesta seção são apresentados os resultados de monitoramento eletroquímico dos espécimes submetidos a ensaio acelerado por imersão e secagem. As variáveis dependentes estudadas são o Potencial de corrosão – ESC (mV) e a densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Para os gráficos das variáveis analisadas, foram inseridas faixas indicadoras do risco de corrosão. As faixas de potencial empregaram as referências da norma ASTM C-876 (2009) e a densidade de corrente utilizou-se as referências propostas por Cigna *et al.* (1997).

- **Barras com limpeza mecânica**

Os resultados do monitoramento eletroquímico para as barras com limpeza mecânica e sete dias de cura estão apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. A partir dos resultados, observa-se uma variação no período da iniciação da corrosão de cada barra, porém há uma tendência de despassivação da armadura na seguinte sequência: C30%, C10% e REF, para concretos com limpeza mecânica das barras e cura de 7 dias. O tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de 35 ± 8 dias para C30%, 50 ± 26 dias para C10%, REF e 55 ± 12 dias para REF.

Figura 4.5 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 7 dias.

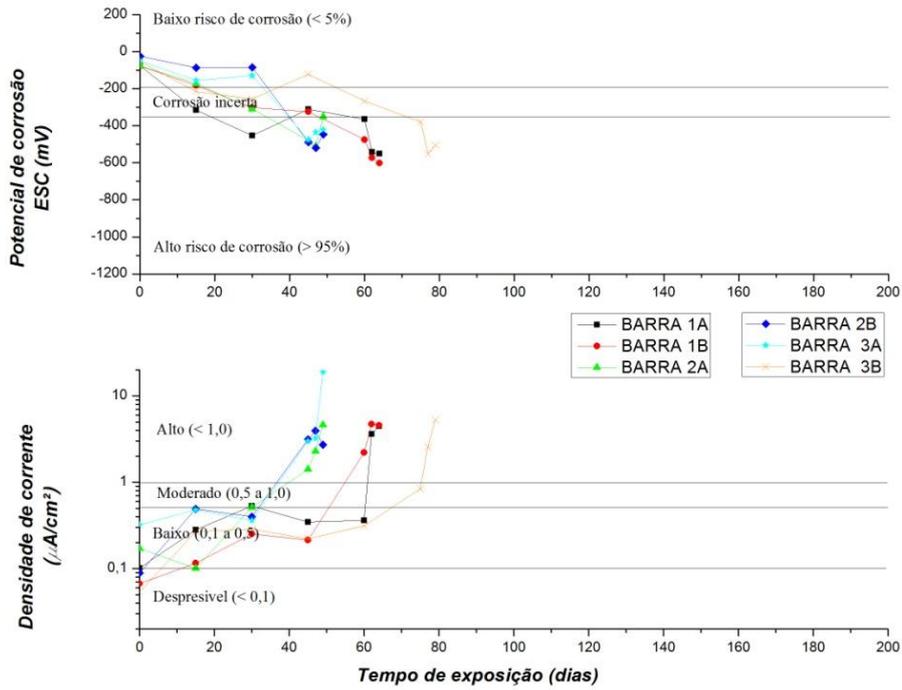


Figura 4.6 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 7 dias.

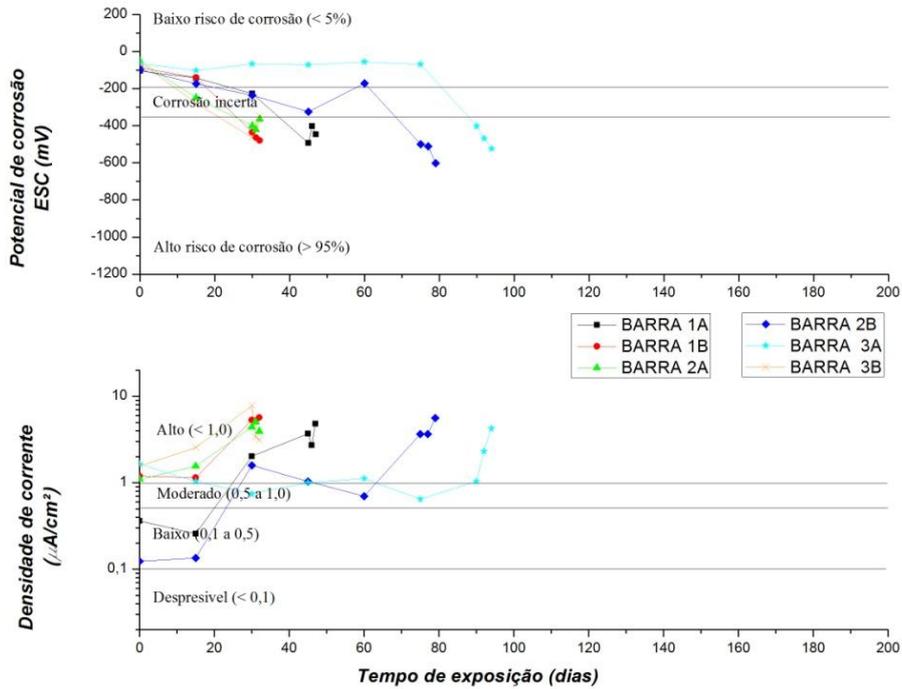
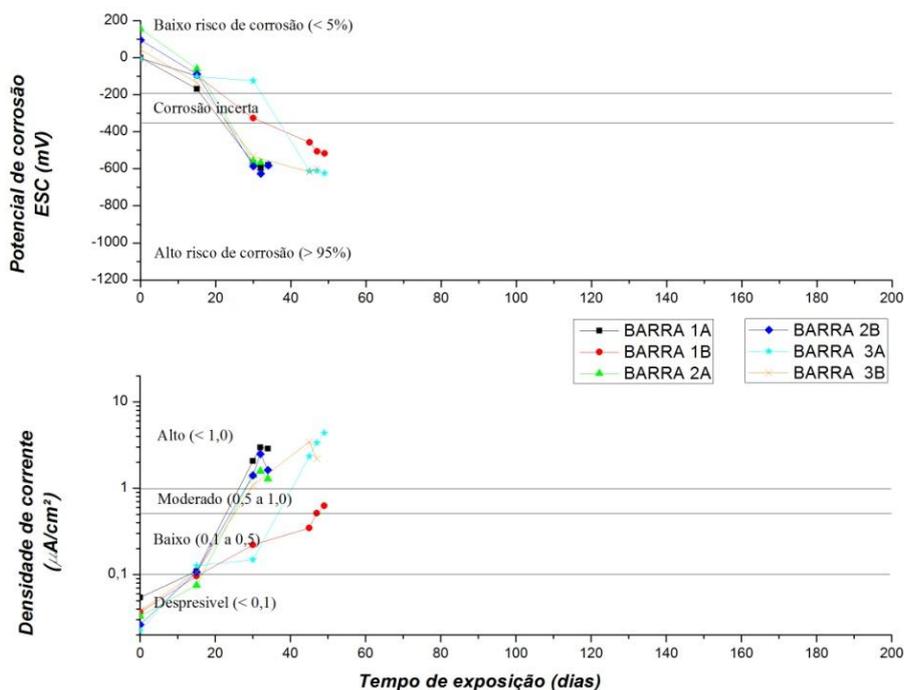


Figura 4.7 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 7 dias.



Os resultados do monitoramento eletroquímico para as barras com limpeza mecânica e cura de vinte e oito dias são apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

Figura 4.8 – Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 28 dias.

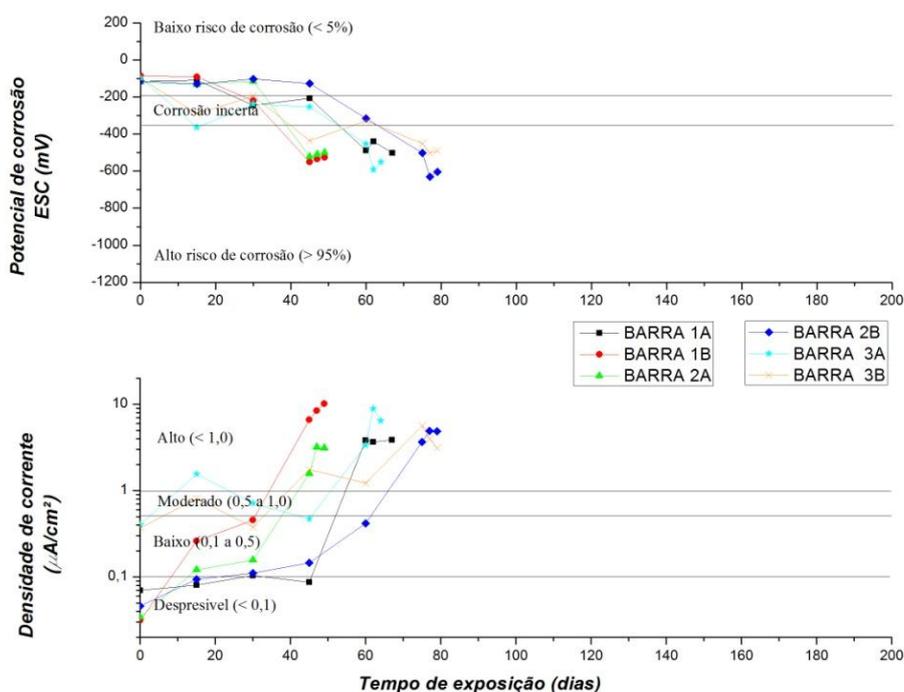


Figura 4.9 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 28 dias.

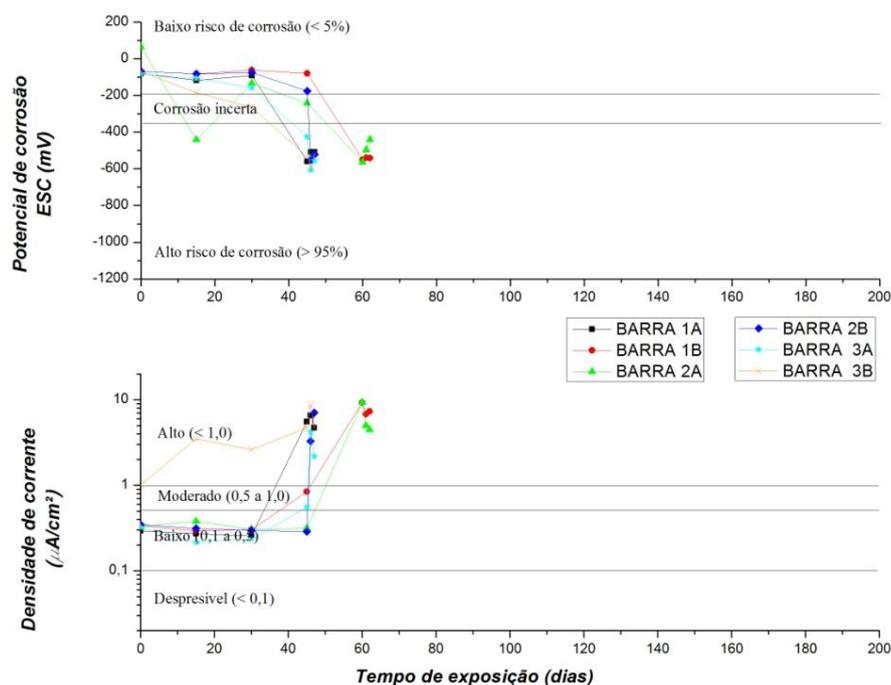
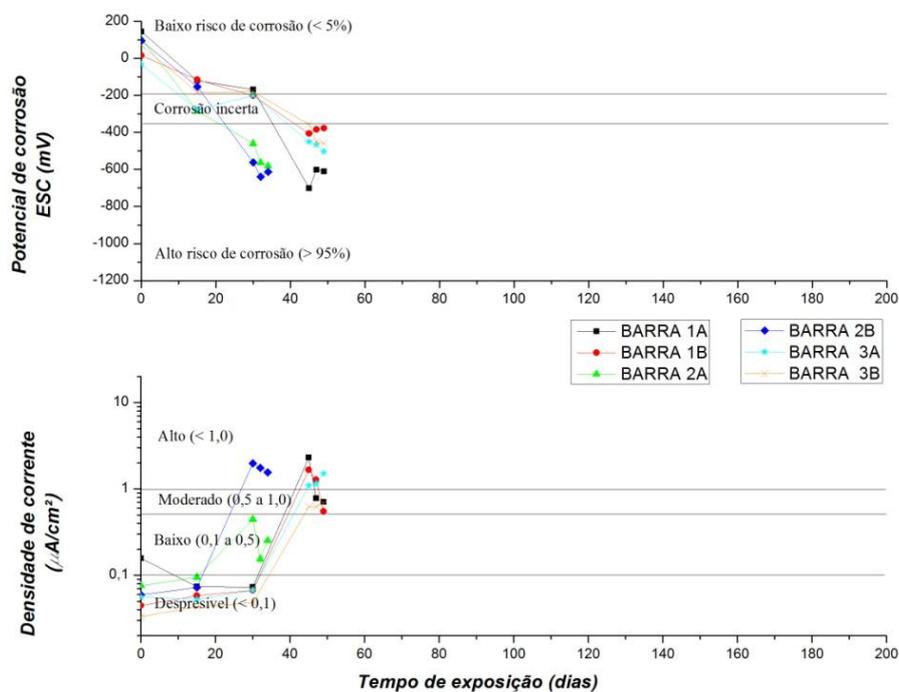


Figura 4.10 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 28 dias.



Para um mesmo tempo de cura e limpeza química das barras, percebe-se uma tendência de despassivação na seguinte sequência: C30%, C10% e REF. O tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de 40 ± 8 dias para C30%, 52 ± 9 dias para C10%, REF e 60 ± 14 dias para REF.

- Barras com limpeza química

Os resultados do monitoramento eletroquímico para a limpeza química e sete dias de cura estão apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Figura 4.11 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.

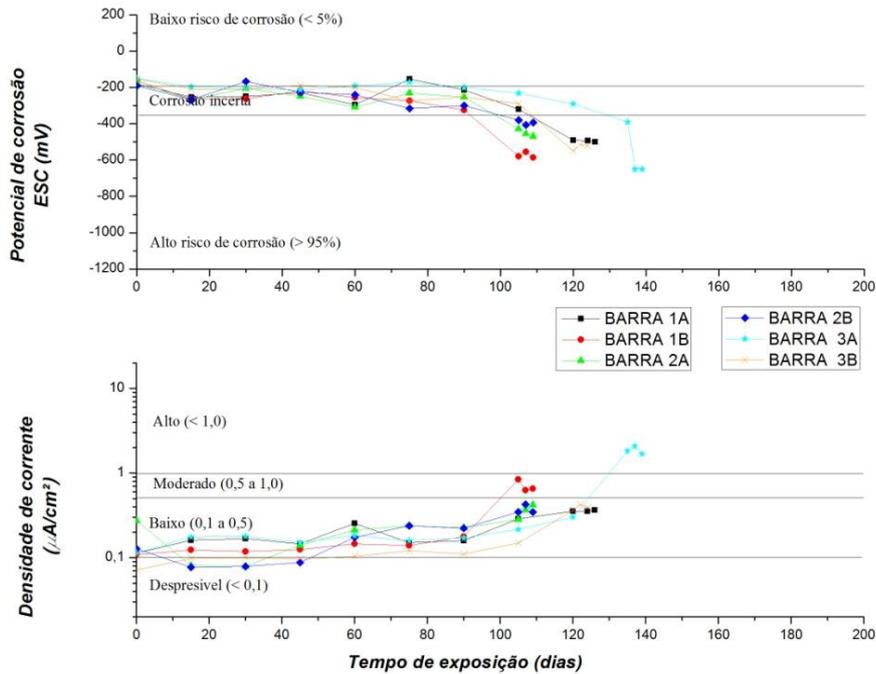


Figura 4.12 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 7 dias.

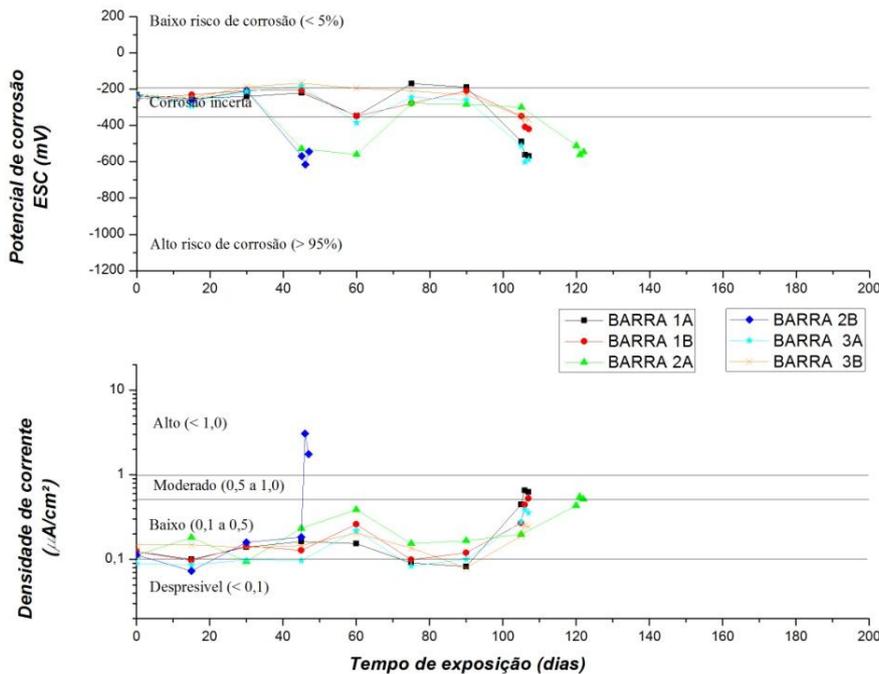
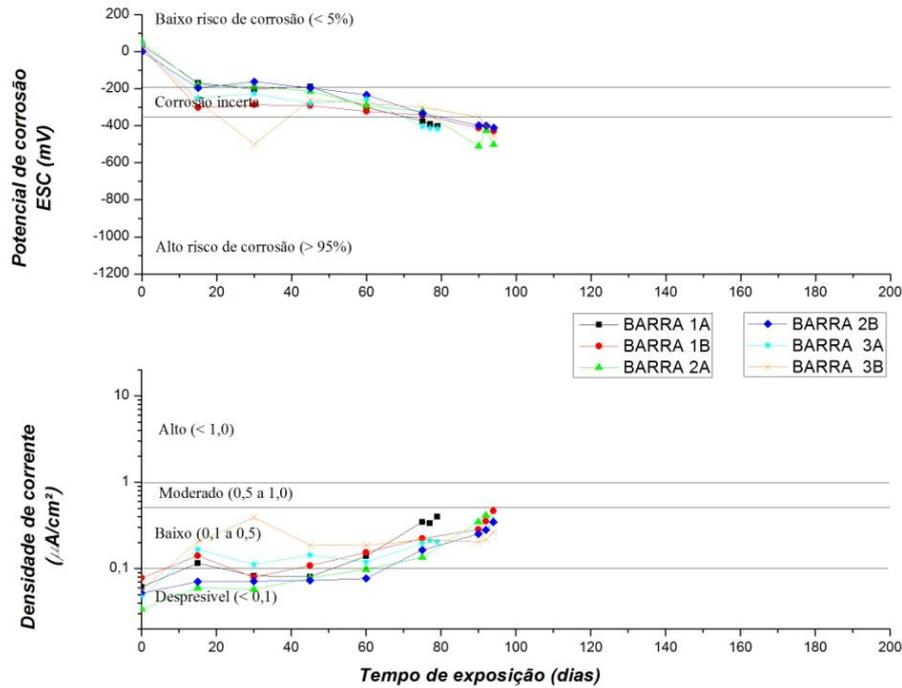


Figura 4.13 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 7 dias..



As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram os resultados do monitoramento eletroquímico para os espécimes com limpeza química e tempo de cura de 28 dias.

Figura 4.14 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 28 dias.

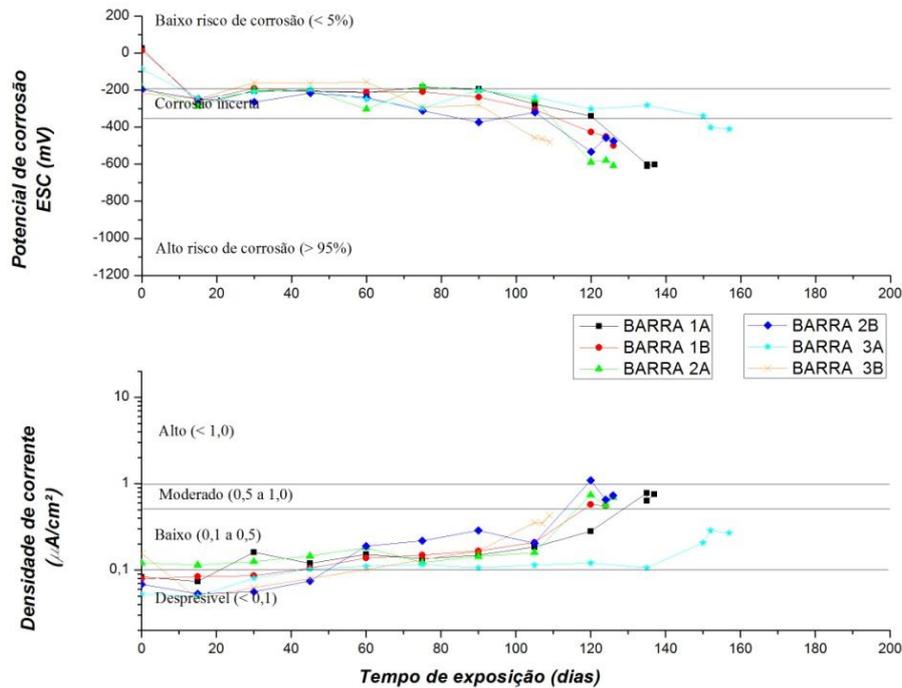


Figura 4.15 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 28 dias.

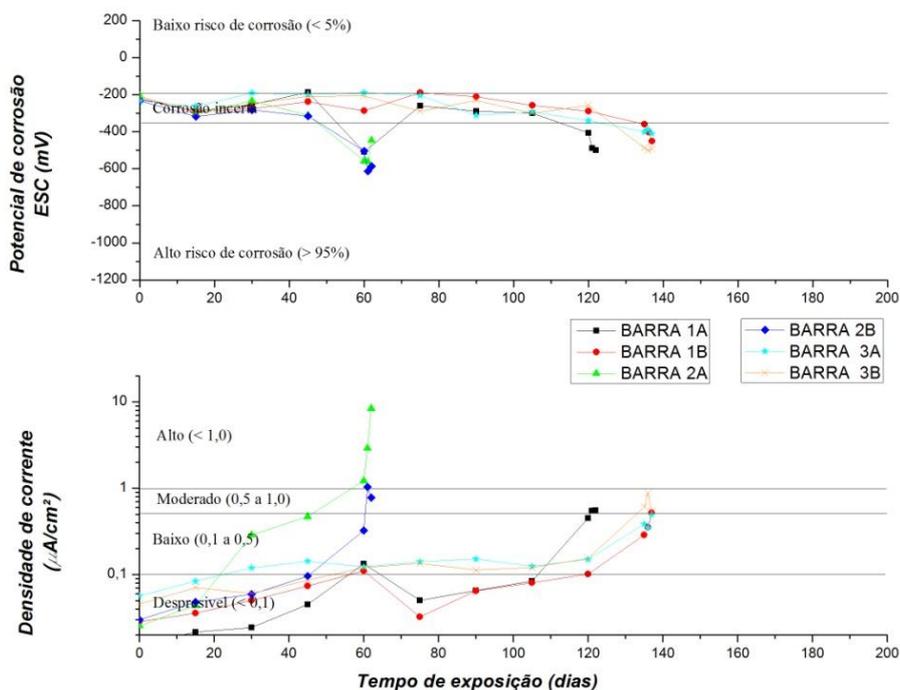
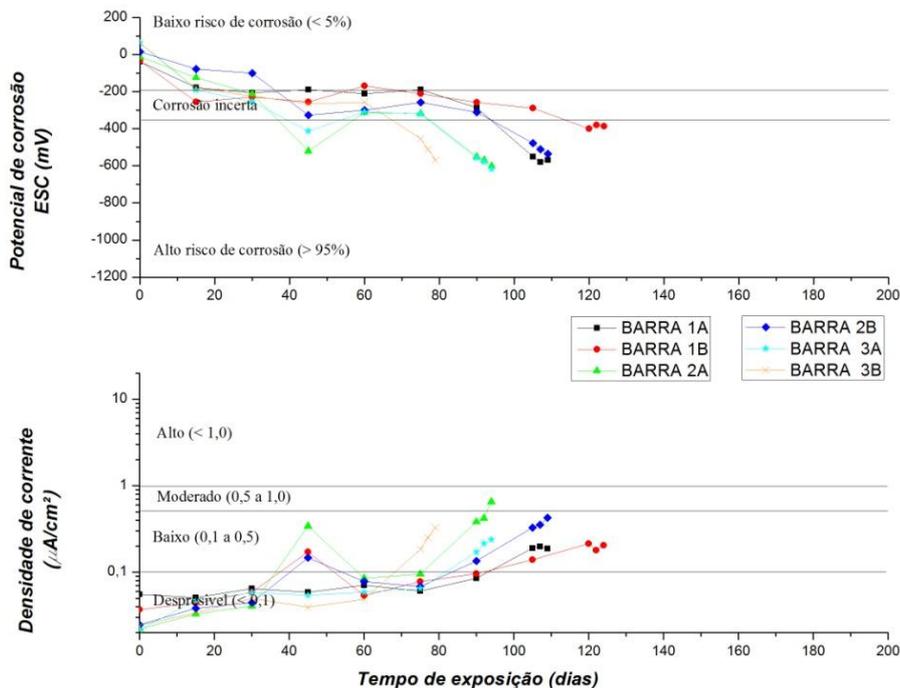


Figura 4.16 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 28 dias.



A partir das Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, fica claro que à medida que se substitui cimento por resíduo cerâmico, há uma redução no período de início da corrosão, seguindo a mesma linha de raciocínio dos demais. O tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de 85 ± 8 dias para C30%, 98 ± 27 dias para C10%, REF e 115 ± 13 dias para REF.

Já para as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, o tempo médio para início da corrosão e o seu desvio padrão para as barras com limpeza química e cura de 28 dias foram de 98 ± 16 dias para C30%, 108 ± 38 dias para C10% e 128 ± 16 dias para REF. Com a evolução do ensaio, as medidas eletroquímicas seguem a mesma linha de tendência das demais combinações de traço e tempo de cura analisadas, ou seja, reduções paulatinas nas medidas de potencial de corrosão e acréscimos moderados na densidade de corrente de corrosão à medida que se aumenta o tempo de exposição.

De modo geral, observa-se que concretos com maior consumo de cimento, maior tempo de cura e limpeza química das barras apresentam maior período de iniciação da corrosão. De modo a demonstrar tal efeito, foi realizada a análise de variância tendo como variável dependente o tempo necessário para o início da corrosão (Tabela 4.9). Os resultados do Teste de Tukey estão apresentados na Tabela 4.10 para um nível de confiança de 99%.

Tabela 4.9 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o tempo de início da corrosão.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	7500,000	0,113	3750,000	11,257	0,000
Limpeza da barra	1	56953,125	0,858	56953,125	170,966	0,000
Cura	1	1128,125	0,017	1128,125	3,386	0,041
Traço x Limpeza da barra	2	525,000	0,008	262,500	0,788	0,459
Traço x Cura	2	25,000	0,000	12,500	0,038	0,963
Cura x Limpeza da barra	1	253,125	0,004	253,125	0,760	0,387
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
TOTAL CORRIGIDO	71	66384,36	1,0000	1860,61	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.10 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o tempo de início da corrosão.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	89,380	-
C10%	76,880	76,880
C30%	-	64,380

Fica claro que a um nível de confiança de 99%, as variáveis de traço e limpeza da barra influenciam significativamente no período de iniciação da corrosão por cloretos. Com 85,80% de influência sobre o modelo, a limpeza da barra é a maior responsável pelo tempo necessário para iniciar a corrosão. Das variáveis dependentes analisadas a cura não

influenciou nos resultados significativamente a um nível de confiança de 99%, porém com um nível de confiança de 95% este item seria significativo. As demais combinações entre as variáveis não foram significantes.

Com relação ao traço, percebe-se que das características analisadas nos itens 4.1 (características dos concretos), as principais propriedades que influenciariam no período da iniciação da corrosão seriam a alcalinidade da solução dos poros e a porosidade do material. A alcalinidade estaria diretamente relacionada à formação e à estabilidade da película de passivação. Logo, quanto maior o pH da solução dos poros do concreto, melhor a formação do filme passivo e, conseqüentemente, maior a resistência ôhmica da película de passivação. A resistência ôhmica tem influência direta sobre a taxa de corrosão da barra (CASCUDO, 1997; ANGST *et al.*; 2011). Já a porosidade está relacionada ao transporte de massa no interior do concreto (GJØRV & VENNESLAND; 1979).

Os resultados do Teste de Tukey (Tabela 4.9) indicam que para um nível de confiança de 99%, concretos com substituição de 10% de cimento por resíduo não apresentam diferenças significativas entre os concreto de referência e com substituição de 30%. Tal fato é explicado pela grande dispersão entre os períodos de iniciação da corrosão, demonstrando assim que parte dos espécimes apresentou um período semelhante aos de referência e outra parte semelhante aos concretos com substituição de 30%. Comparando os espécimes de referência com os C30%, esses são estatisticamente diferentes.

Com o objetivo de analisar a relação entre o potencial de corrosão (E_{corr}) e a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), elaboraram-se as Figuras 4.17 e 4.18, que mostram o comportamento relativo desses dois parâmetros. Apesar de haver certa dispersão, principalmente nas leituras de barras com limpeza mecânica, dado o caráter estocástico do processo de corrosão, pode-se observar uma relação linear inversa entre o potencial e o logaritmo da densidade de corrente, conforme já observado por outros autores (ANDRADE, 1988; CABRAL, 2000; VIEIRA, 2003; ANGST *et al.*, 2011; dentre outros).

Vale salientar que, em inúmeros casos, observaram-se em um mesmo potencial de corrosão diferentes valores de densidade de corrosão, o que pode acarretar interpretações errôneas sobre as condições termodinâmicas favoráveis à instalação da corrosão (RILEM TC 154-EMC, 2003). Esta condição foi observada por diversos autores (CABRAL, 2000; VIEIRA, 2003; PORTELLA, 2006; TORRES, 2006; ANGST *et al.*, 2011; dentre outros). Portanto, o potencial de corrosão, isoladamente, não seria um parâmetro adequado para tal

decisão, sendo ele um dado meramente qualitativo na avaliação do fenômeno de corrosão (CASCUDO, 1997).

Figura 4.17 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza mecânica.

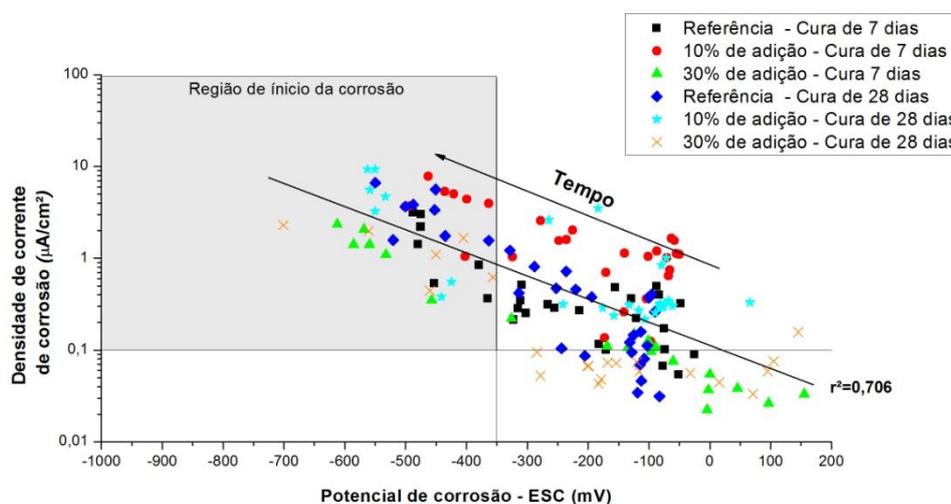
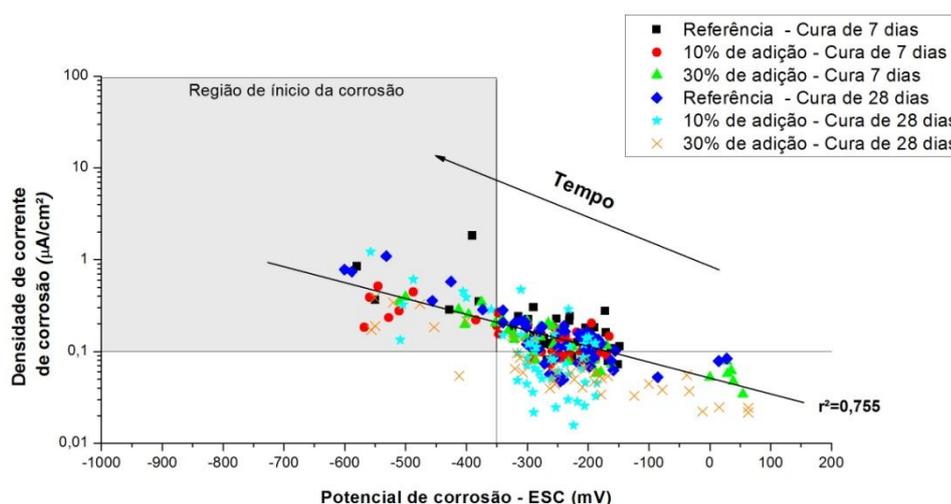


Figura 4.18 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza química.



Nas Figuras 4.17 e 4.18, observa-se que os pontos dos parâmetros eletroquímicos estão dispersos, sem apresentar qualquer tendência de comportamento em relação às dosagens. Porém, os resultados de análise de variância, na Tabela 4.6, mostram a influência significativa das diferentes dosagens sobre o tempo de despassivação. Em outras palavras, as condições do eletrólito e da formação e estabilidade da película passivadora têm forte influência sobre os parâmetros eletroquímicos no ato da leitura (PAGE, 1975; CASCUDO, 1997; ANGST *et al.*, 2009). Então era de se esperar que amostras com menos teores de cimento (C30%) apresentassem, inicialmente, potenciais de corrosão mais eletronegativos e densidades de correntes mais altas do que os concretos com maiores teores de cimento (referência); fato este que não foi observado neste trabalho, já que as leituras eletroquímicas encontram-se dispersos dentro das faixas observadas.

Levando-se em consideração o tipo de limpeza empregada, percebe-se que a limpeza química propicia uma melhor formação e estabilidade da película passivadora, tendo em vista que reduz a velocidade com que se desencadeia o processo corrosivo (inclinação da reta de regressão linear) (Figuras 4.17 e 4.18).

4.2.1.2 Perfis de cloretos

Uma vez extraídas e tituladas as amostras, foram obtidas as concentrações de cloretos (porcentagem em relação à massa de aglomerante) em função da profundidade média de cada camada. As variáveis dependentes analisadas nesta seção são as concentrações de cloretos totais e livres (%) em cada camada. Como esperado, percebe-se uma redução das concentrações de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade em todos os perfis analisados (Figuras 4.19 a 4.30). Além dos cloretos totais serem sempre maiores que os cloretos livres, motivado pelo poder de fixação da matriz cimentícia (Figuras 4.19 a 4.30).

Na grande maioria dos perfis de cloretos apresentados, há a formação de um pico de concentração interna nas primeiras camadas, caracterizando o que se chama de perfil em duas zonas (ANDRADE *et al.* 2000; CASTRO *et al.*, 2001; GUIMARÃES E HELENE; 2004). Esse tipo de perfil se caracteriza por apresentar uma concentração máxima de cloretos distante alguns milímetros da superfície do concreto, delimitando uma zona mais externa onde a absorção capilar é o principal mecanismo de transporte e uma zona mais interna, onde prevalece o mecanismo de transporte por difusão (CASTRO *et al.*, 2001).

Esse comportamento é explicado pelas características do método de indução da corrosão adotado, que se baseia em ciclos de umectação e secagem, favorecendo uma troca de umidade mais intensa nas camadas mais superficiais (CASTRO *et al.*, 2001; MEIRA *et al.*, 2007). A formação de perfis de cloretos em duas zonas é relativamente comum e foi observada por diversos autores (CASTRO *et al.*, 2001; LEVY, 2001; MEIRA *et al.*, 2007; COSTA e APPLETON, 2007; ANGST *et al.*, 2011), sempre com a formação de picos nas camadas mais superficiais.

- **Barras com limpeza mecânica**

As Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 mostram os resultados dos perfis de cloretos livres e totais para a limpeza mecânica com sete e vinte e oito dias de cura.

Figura 4.19 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 7 dias.

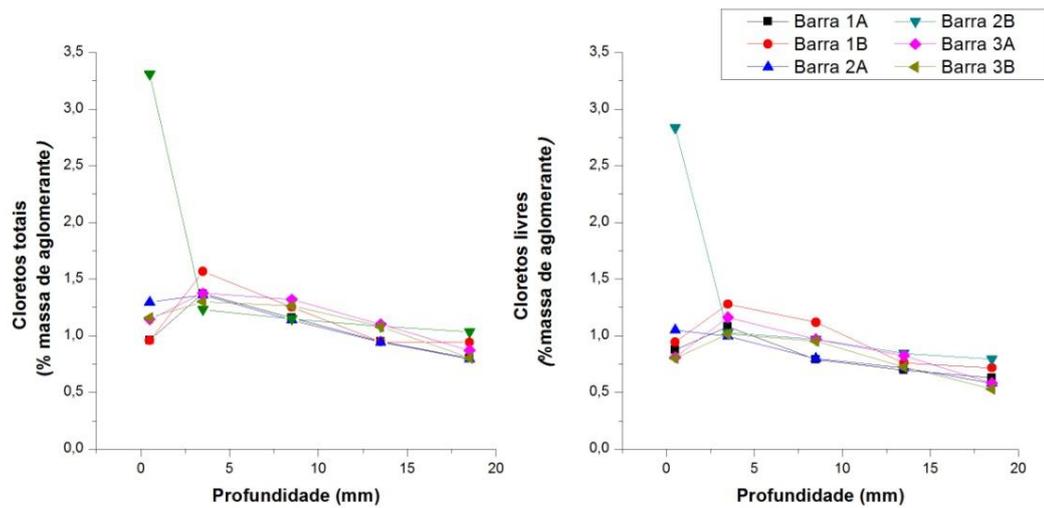


Figura 4.20 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 7 dias.

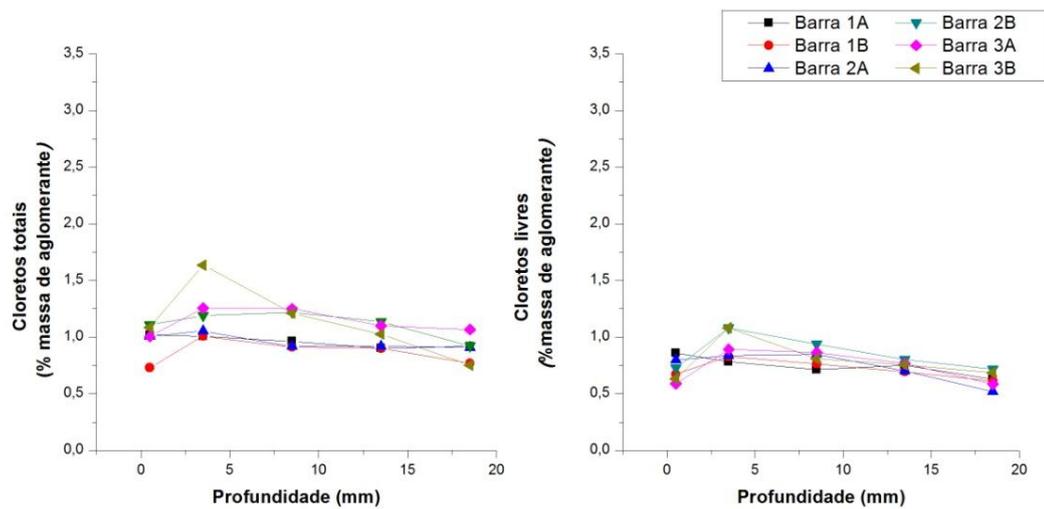


Figura 4.21 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 7 dias.

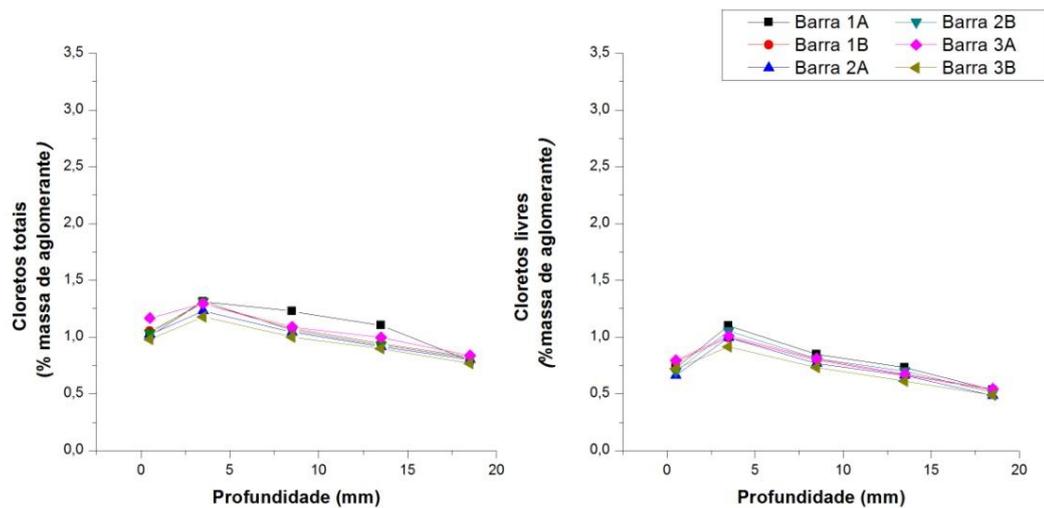


Figura 4.22- Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 28 dias.

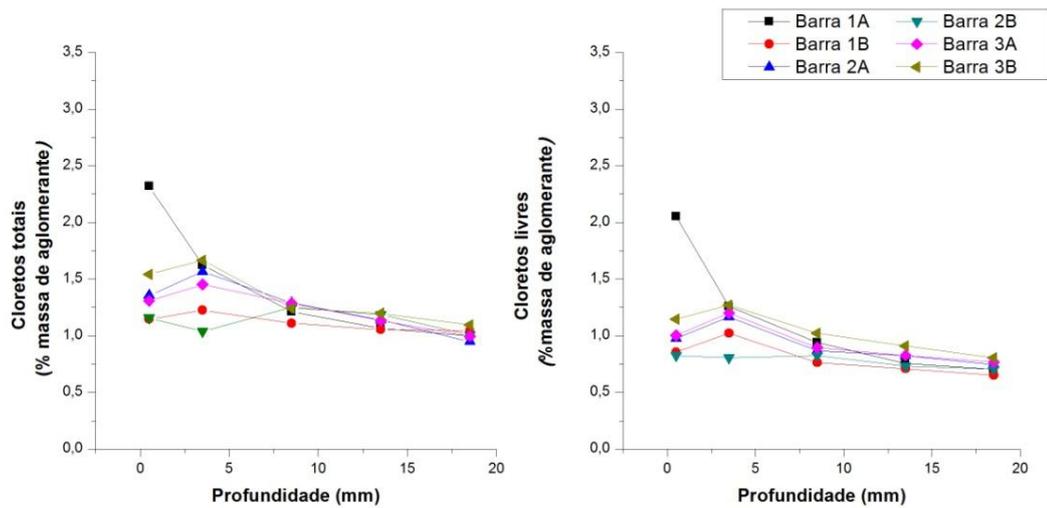


Figura 4.23 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 28 dias.

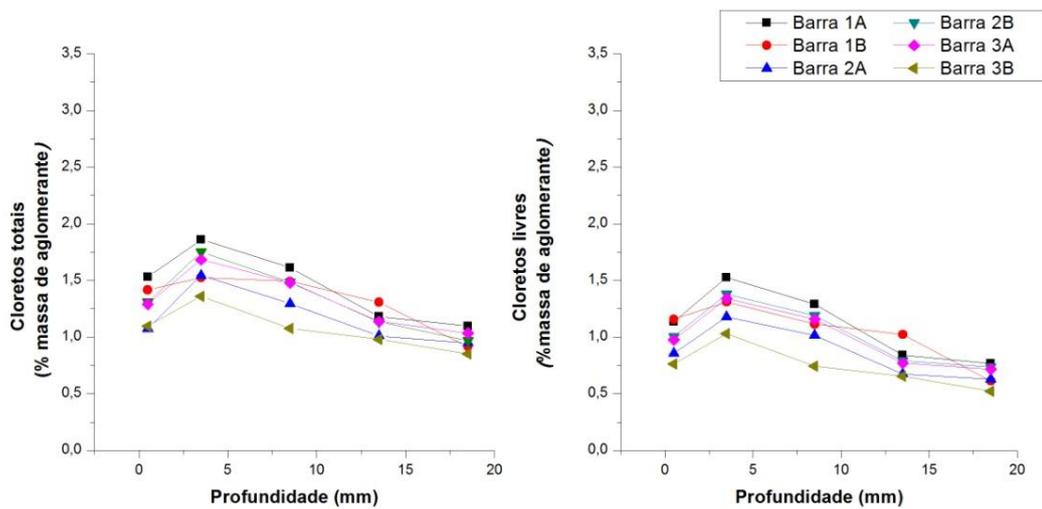
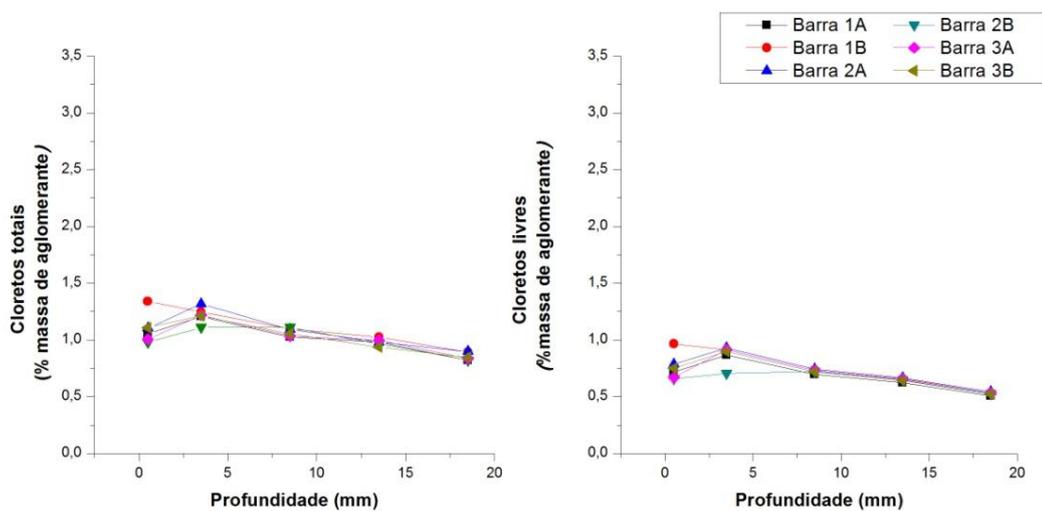


Figura 4.24 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 28 dias.



Os resultados mostram uma redução nas concentrações de cloretos livre e totais com a substituição de cimento por RTM, em ambos os tempos de cura. Com relação às concentrações de cloretos livres e totais em função da profundidade, há uma redução progressiva com o aumento da profundidade.

- **Barras com limpeza química**

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 mostram os resultados dos perfis de cloretos livres e totais para a limpeza química com sete e vinte e oito dias de cura.

Figura 4.25 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.

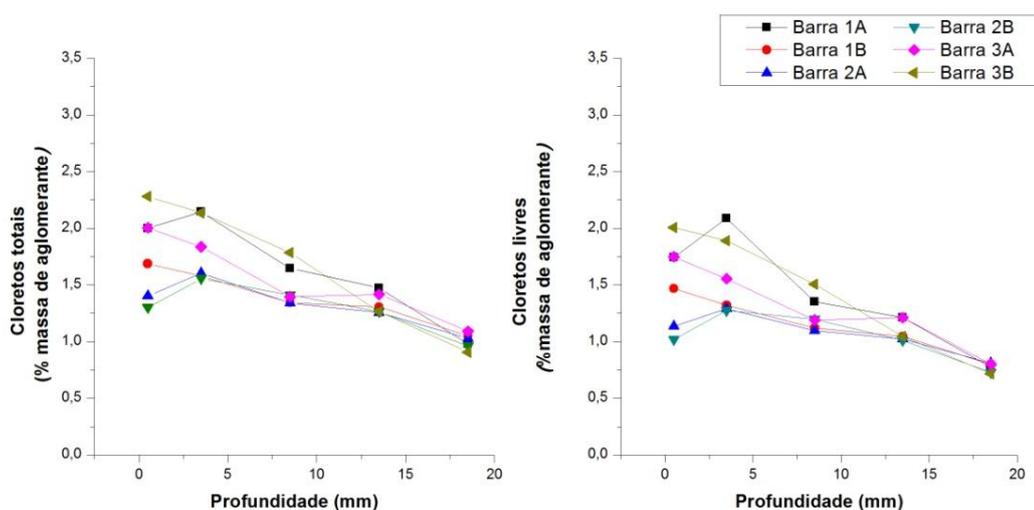


Figura 4.26 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 7 dias.

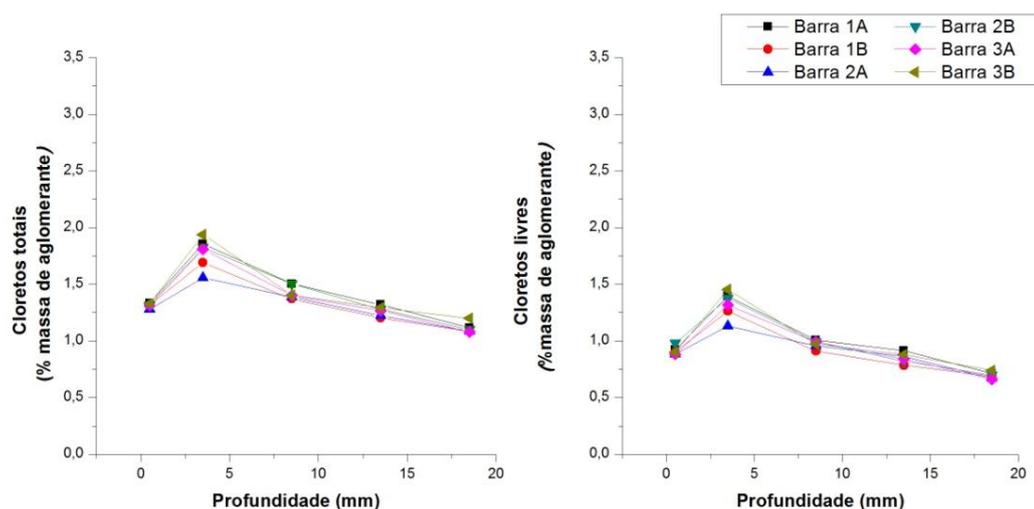


Figura 4.27 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 7 dias.

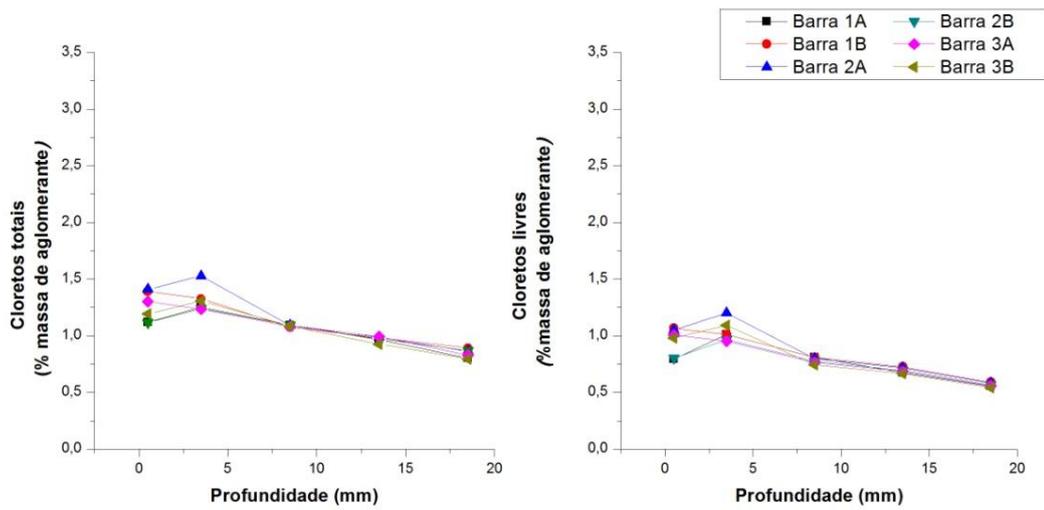


Figura 4.28 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 28 dias.

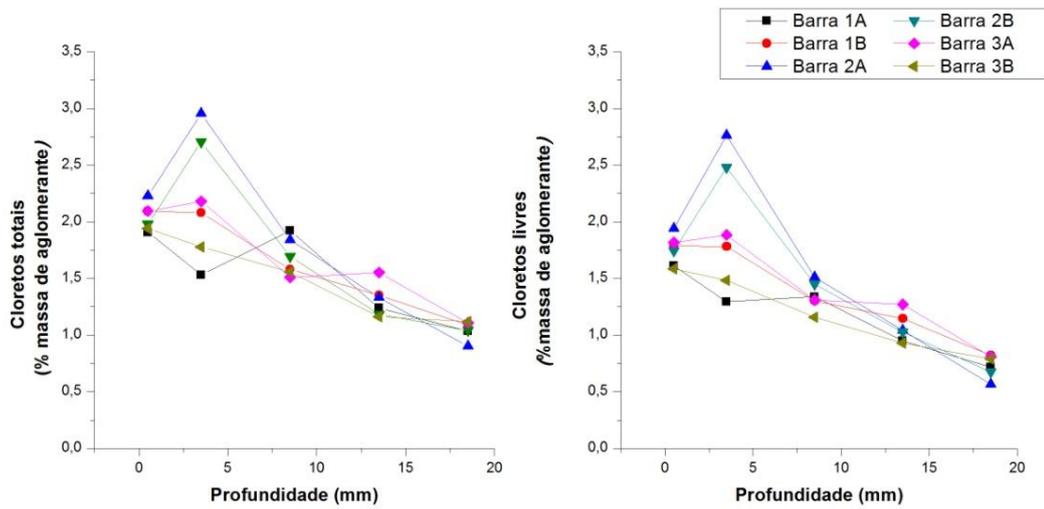


Figura 4.29 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 28 dias.

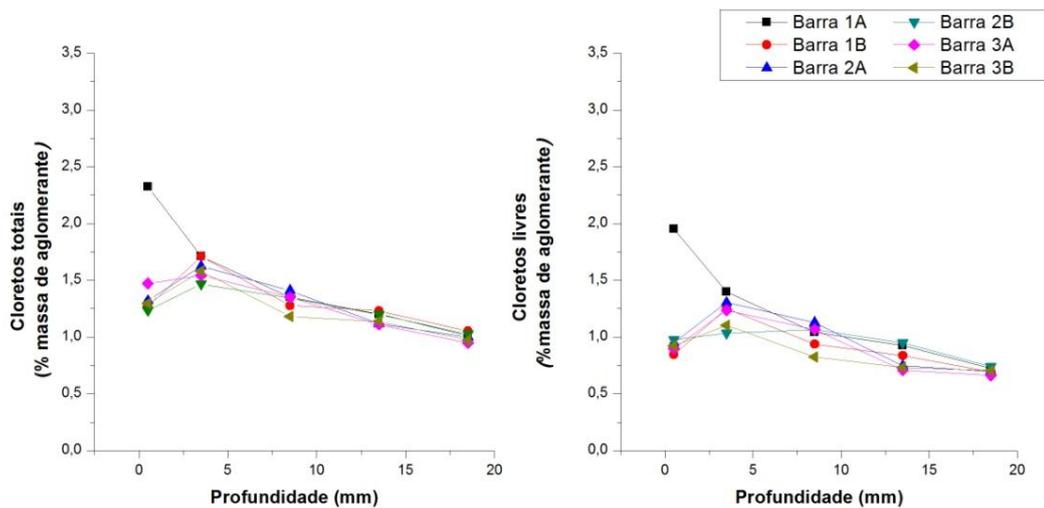
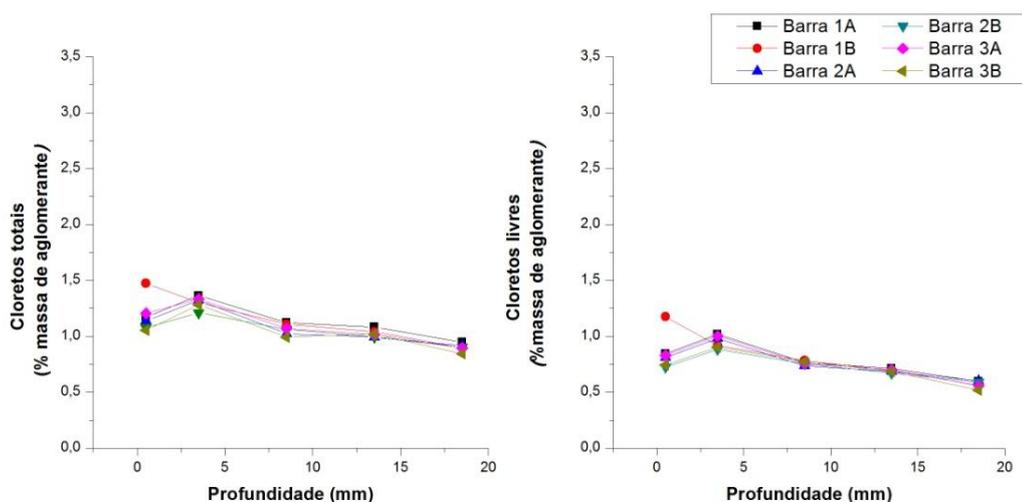


Figura 4.30 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 28 dias.



Assim como nas barras com limpeza mecânica, as barras com limpeza química também apresentam uma redução nos valores de cloretos livre e totais com a substituição de cimento por RTM, para ambos os tempos de cura deste estudo. Já em relação à profundidade, há uma redução progressiva com o aumento da profundidade. Por fim, levando-se em consideração os tipos de limpezas das barras é notória a influência das limpezas nos teores de cloretos livres e totais; assim, os concretos cuja armadura passou por limpeza química apresentam maiores concentrações de cloretos livres e totais no momento da despassivação.

Levando-se em consideração a influência do tempo de cura sobre os perfis de cloretos, em ambos os tipos de limpeza aplicadas às barras, percebe-se que quanto maior o tempo de cura, maior o tempo para o início da corrosão, conforme discutido no item 4.2.1.1, sendo assim maiores serão as concentrações de cloretos livres e totais nos perfis de cloretos, comparando-se traço a traço.

4.2.1.3 Fixação de cloretos à matriz cimentícia

Cada concreto tem características próprias com relação à sua capacidade de fixar cloretos à sua matriz cimentícia, porém essa fixação tende à saturação. Logo, à medida que se sobe a concentração de cloretos, a capacidade de fixação vai se reduzindo até estagnar (MEIRA, 2004). Alguns autores mostram relações lineares com o tempo, até certos teores, entre cloretos combinados e cloretos livres ou totais (BYFORS, 1990 *apud* MEIRA, 2004). Uma das formas usuais de representar essa relação é através da Isoterma de Langmuir (Equações 4.1 e 4.2).

$$Cl_{comb} = \frac{\alpha Cl_{liv}}{1 + \beta Cl_{liv}} \quad (4.1)$$

$$Cl_{comb} = Cl_{tot} - wCl_{liv} \quad (4.2)$$

Onde:

Cl_{comb} é o teor de cloretos combinados à matriz do concreto, em g_{cl}/g_{cim} ;

Cl_{liv} é o teor de cloretos livres na água dos poros do concreto, em g_{cl}/L ;

Cl_{tot} é o teor de cloretos totais, em g_{cl}/g_{cim} ;

α e β são constantes empregadas na isoterma, em L/g_{cim} e L/g_{cl} , respectivamente;

w é o teor de umidade média em relação à quantidade de cimento, em L/g_{cim} .

Partindo do conhecimento de que Cl_{LIV} representa wCl_{liv} , substituindo a Equação 4.2 na Equação 4.1 e adequando as unidades de concentrações deste trabalho, em porcentagem de massa de aglomerante, as unidades de concentrações impostas pela isoterma, em gramas por gramas, obtemos a Equação 4.3.

$$Cl_{tot} = Cl_{LIV} + \frac{\alpha Cl_{LIV}}{w \left[1 + \left(\frac{\beta Cl_{LIV}}{100w} \right) \right]} \quad (4.3)$$

Tendo em mãos os resultados das concentrações de cloretos livres e totais mostrados na seção 4.2.1.2, foram realizados ajustes à curva da Equação 4.3, de modo que os parâmetros α , β e w são constantes da regressão em questão obtidas pela interação. As Tabelas 4.11 e 4.12 mostram os resultados dos ajustes à curva da Equação 4.3. A partir do coeficiente de determinação (r^2), observamos pouca dispersão entre os ajustes e os pontos titulados, portanto os ajustes representam bem a relação entre cloretos livres e totais para as faixas aqui observadas. As Figuras 4.31 (a) e 4.32 (a) mostram as curvas obtidas pelos ajustes e os pontos titulados usados para o ajuste em cada tipo de limpeza de barra. As Figuras 4.31 (b) e 4.32 (b) são ampliações ajustadas em determinada faixa de dados na curva ajustadas de modo a facilitar a visualização de cada curva.

Analisando a Figura 4.31 (a), percebe-se que há certa proximidade entres as curvas. A partir das curvas ajustadas, pode-se concluir qual matriz tem maior ou menor capacidade de fixação. Traçando-se uma reta paralela ao eixo das concentrações de cloretos totais, em uma dada concentração de cloretos livres, percebe-se que quanto maior a concentração de cloretos totais para essa dada concentração de cloretos livres, maior a fixação de cloretos na matriz.

Por isso, as matrizes com maior tempo de cura e substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído apresentam maior capacidade de combinar cloretos à matriz (Figura 4.31(b)). A princípio, nos concretos de referência não foi observada diferenciação entre os tempos de cura na capacidade de combinar cloretos, ou seja, um maior tempo de cura não aumentou a capacidade de fixar cloretos. Nos demais tipos de concreto houve um aumento na fixação de cloretos com o aumento do tempo de cura.

Tabela 4.11 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.

Tipo de concreto	Parâmetros			
	α (L/g _{cim})	β (L/g _{cL})	w (L/g _{cim})	r ²
Referência com 7 dias de cura	1,37E-4	0,0541	1,70E-4	0,957
Referência com 28 dias de cura	4,51E-4	0,147	5,67E-4	0,932
C10% com 7 dias de cura	3,08E-4	0,092	5,51E-4	0,865
C10% com 28 dias de cura	4,61E-4	0,142	2,68E-5	0,971
C30% com 28 dias de cura	4,34E-4	0,166	1,12E-4	0,930
C30% com 28 dias de cura	5,21E-4	0,136	1,20 E-4	0,956

Figura 4.31 – Relação Cl_{tot} x Cl_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.

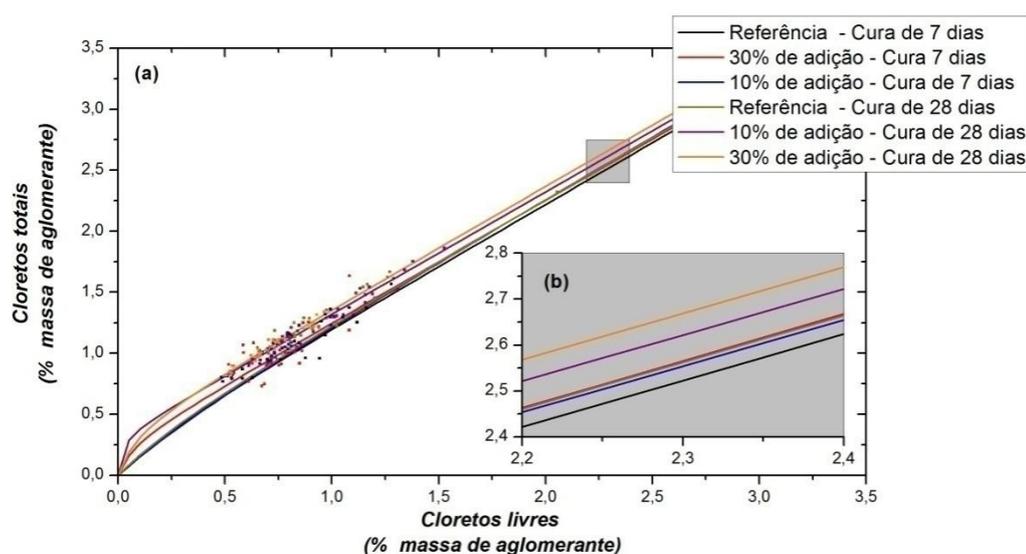
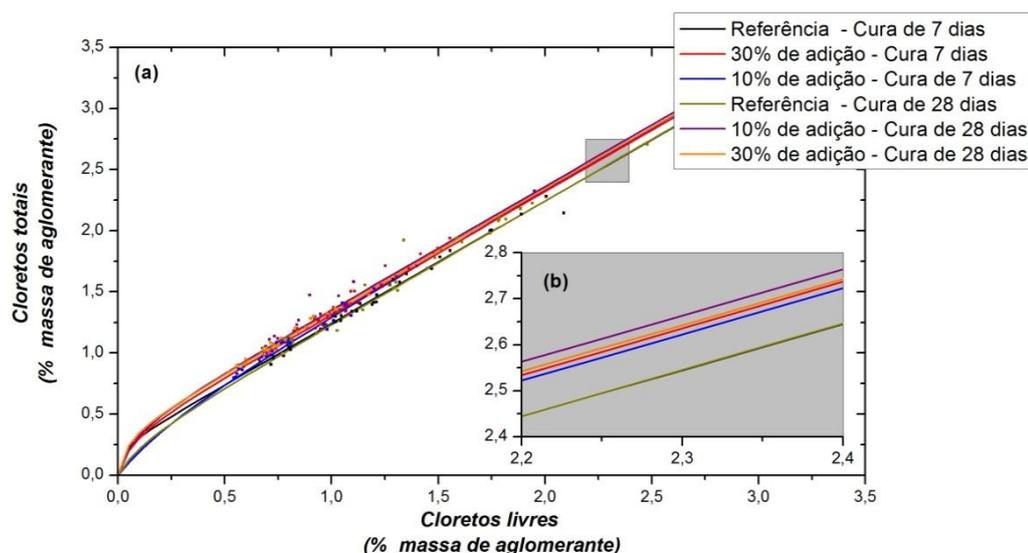


Tabela 4.12 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza química.

Tipo de concreto	Parâmetros			
	α (L/g _{cim})	β (L/g _{cL})	w (L/g _{cim})	r ²
Referência com 7 dias de cura	3,75E-4	0,152	2,77E -5	0,983
Referência com 28 dias de cura	3,91E-4	0,151	1,89E-4	0,976
C10% com 7 dias de cura	5,21E-4	0,137	4,21E-4	0,977
C10% com 28 dias de cura	4,94E-4	0,132	8,88E-5	0,926
C30% com 7 dias de cura	4,57E-4	0,138	8,51E-5	0,964
C30% com 28 dias de cura	4,78E-4	0,137	5,65E-5	0,957

Figura 4.32 - Relação CI_{tot} x CI_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza química.



Já em relação às dosagens cuja armadura passou por limpeza química (Figura 4.32 (a)), percebe-se a mesma linha de raciocínio para o caso de armaduras com limpeza mecânica. Porém, observou-se que a inclinação da reta dos ajustes para o traço com 10% de RTM e 28 dias de cura é maior que o traço com 30% de RTM e 28 dias de cura (Figura 4.32 (b)). Logo, esse ajuste induziria a conclusão de que o traço com 10% de RTM com 28 dias de cura fixa mais cloretos que o traço com 30% de RTM com 28 dias de cura. Por estarem tão próximos, os ajustes das curvas mostram que o traço com 30% de RTM com 28 dias de cura fixa mais cloretos que o traço com 10% de RTM com 28 dias de cura. Acredita-se que a proximidade dos resultados foi provocada por erros nas interações dos ajustes.

A Tabela 4.13 mostra os resultados de análise de variância para cloretos combinados em relação aos diferentes tipos de limpeza de barra, tempos de cura, profundidade e traço, analisando a influência de cada variável independente sobre a capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia. A Tabela 4.14 mostra os resultados do Teste de Tukey para a variável independente “traço”, devido a mesma ser aplicada a variáveis estatisticamente significativas com no mínimo três subconjuntos (REF, C10% e C30%).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.13, percebemos que a um nível de confiança de 99%, as variáveis independentes de traço e tempo de cura apresentaram diferenças estatisticamente significativas na fixação de cloretos à matriz, ou seja, o traço e a cura são as variáveis que influenciam diretamente na fixação de cloretos para o conjunto de dados em questão. O coeficiente de determinação (r^2) obtido de 0,176 e 0,346 indica que o modelo explica 17,6% e 34,6% da variabilidade dos valores observados sobre a fixação de cloretos à matriz, respectivamente. A interação traço *versus* cura também provocou influência

significativa sobre o modelo a um nível de confiança de 99%, sendo 14,7% responsável pela variabilidade dos valores observados.

Tabela 4.13 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para cloretos combinados.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,096	0,178	0,048	10,514	0,000
Limpeza	1	0,003	0,006	0,003	0,728	0,394
Cura	1	0,186	0,346	0,186	40,942	0,000
Profundidade	4	0,02	0,037	0,005	1,088	0,362
Traço x Cura	2	0,079	0,147	0,040	8,685	0,000
Traço x Limpeza	2	0,005	0,009	0,003	0,57	0,566
Traço x Profundidade	8	0,027	0,050	0,003	0,742	0,655
Limpeza x Cura	1	0,008	0,015	0,008	1,836	0,176
Limpeza x Profundidade	4	0,005	0,009	0,001	0,289	0,885
Cura x Profundidade	4	0,002	0,004	0,000	0,088	0,986
Traço x Limpeza x Cura	2	0,003	0,006	0,001	0,315	0,73
Traço x Limpeza x Profundidade	8	0,022	0,041	0,003	0,607	0,772
Traço x Cura x Profundidade	8	0,036	0,067	0,005	0,994	0,441
Limpeza x Cura x Profundidade	4	0,01	0,019	0,003	0,56	0,692
Traço x Limpeza x Cura x Profundidade	8	0,036	0,067	0,004	0,985	0,448
TOTAL CORRIGIDO	59	0,538	1,000	0,313	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

Tabela 4.14 – Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre cloretos combinados.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	0,2784	-
C10%	-	0,3150
C30%	-	0,3107

Ainda em relação à Tabela 4.13, percebe-se que a limpeza da barra e a profundidade da camada não influenciaram na fixação de cloretos, portanto essa variável dependente (combinação de cloretos à matriz) pode apresentar comportamento intrínseco apenas às características do concreto, independentemente da profundidade.

Já em relação ao traço, quanto maior a substituição de cimento por RTM, maior a fixação de cloretos à matriz cimentícia. Esse comportamento é explicado pela combinação de cloretos com outras fases hidratadas do concreto. Nesta dissertação não buscou detalhes sobre a fase hidratada em que aconteceu a fixação de cloretos. Porém, podemos concluir que a combinação não se dá apenas com os aluminatos, mas também com outras estruturas

hidratadas como, por exemplo, o gel de CSH (ENEVOLDSEN *et al.*, 1994). A atividade pozolânica do RTM, comprovadas por ensaio de termogravimetria (item 3.5.3), influência diretamente na formação de mais gel de CSH, e, conseqüentemente, numa maior fixação de cloretos a matriz cimentícia (ANGST *et al.*, 2009).

A cura úmida repercute diretamente no grau de hidratação. Sendo assim, quanto maior a cura maior a capacidade de fixação de cloretos. Vale salientar também que um maior tempo de cura propicia um maior tempo de exposição ao ambiente agressivo e, conseqüentemente, mais ingresso de cloretos para serem combinados, até um estado de saturação.

Levando em consideração os resultados do Teste de Tukey (Tabela 4.14), chegamos à conclusão que há diferenças significativas entre os concretos de referência e os concretos com resíduo. Logo, a substituição de cimento por RTM seria benéfica ao concreto, já que haveria uma otimização da característica abordada. Comparando os teores de substituição, não há diferenças significativas entre se substituir o cimento por RTM no teor de 10 ou 30%. Por fim, a análise aqui descrita não pondera as distintas idades com que as análises de cloretos foram realizadas, uma vez que quanto maior o tempo de exposição, maiores as concentrações de cloretos e maiores as concentrações de cloretos combinados.

4.2.1.4 Transporte de cloretos

Partindo dos conhecimentos sobre perfis de cloretos típicos e de duas zonas e dos resultados obtidos na seção 4.2.1.2, pode-se analisar os mecanismos de transporte que influenciaram nos ensaios acelerados por imersão e secagem. Nos perfis clássicos de cloretos e nas camadas mais internas do concreto em perfis de duas zonas, o mecanismo de transporte de cloretos que se prevalece é a difusão (MEIRA *et al.*; 2010; CASTRO, 2001; CASCUDO, 1997). A lei física que rege o mecanismo de difusão é a 2ª Lei de Fick, já discutida em sessões anteriores (Equação 4.4).

$$C(x, t) = C_s + (C_0 - C_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{nst}}} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

$C(x,t)$ é a concentração dos cloretos na profundidade x e no tempo t , em %;

x é a profundidade paralela ao fluxo de ingresso dos cloretos, em cm;

t é o período da iniciação da corrosão da armadura, em segundos;

C_0 é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto, em %;

C_s é a concentração de cloretos na superfície do concreto, em %;

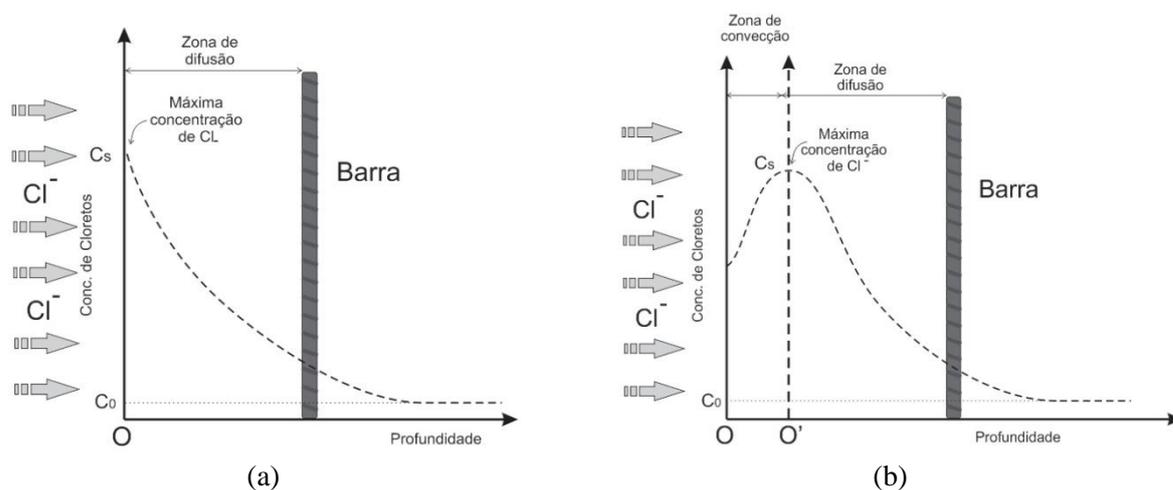
erf é a Função de Erro de Gauss;

D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário no tempo t , em cm^2/s .

A aplicação da 2ª Lei de Fick aos perfis de cloretos se deu primeiramente através da identificação do tipo de perfil de cloretos em questão. Aos perfis clássicos de cloretos, foi empregado diretamente o ajuste à 2ª Lei de Fick (GUIMARÃES *et al.*, 2007) (Figura 4.33 (a)). Aos perfis de duas zonas, foi empregada a técnica de reescalonamento de perfil, seguida da aplicação do ajuste à 2ª Lei de Fick (Figura 4.33 (b)), (ALONSO & ANDRADE, 1997; MEIRA *et al.*, 2010).

A técnica de reescalonamento consiste em detectar a concentração máxima mais próxima da superfície do concreto, dando-lhe a definição de “concentração superficial da Lei de Fick” (Figura 4.33 (b)). A partir da detecção, uma reta paralela ao eixo da concentração de cloretos é traçada (eixo O'). O perfil reescalonado é formado pelo novo eixo (O') e os demais pontos titulados posteriores (zona de difusão). Ao novo perfil, é aplicado o ajuste à segunda Lei de Fick. Esse foi o procedimento adotado nos perfis de duas zonas do presente estudo para avaliar o comportamento do coeficiente de difusão e demais parâmetros relacionados ao transporte de cloretos no interior do concreto.

Figura 4.33 – Representação esquemática do perfil clássico (a) e do perfil de duas zonas reescalonado (b).



A obtenção da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão (D) se deu através dos ajustes aos perfis experimentais de cloretos livres e totais com base na segunda Lei de Fick (Equação 4.4). Os resultados dos ajustes para cloretos livres nos espécimes com limpeza mecânica e química das barras estão mostrados no Apêndice B deste trabalho. Cabe ressaltar que tais ajustes são uma simplificação da realidade, partindo do pressuposto de que o coeficiente de difusão e a concentração superficial são considerados

constantes, embora se saiba que os mesmos variam com o tempo, a temperatura e a capacidade de fixar cloretos da matriz cimentícia.

Nas regressões em questão, foram considerados os perfis de cloretos no momento da despassivação. Dessa forma, os parâmetros aqui reproduzidos (C_s e D_{ns}) apresentam idades diferenciadas em função do tempo necessário para se dar início a corrosão. Porém, devido ao longo período de cura mais repouso (90 dias), o efeito dessa diferença é minimizado. De todo modo, esse aspecto deve ser ponderado nas considerações aqui realizadas. Tendo em vista que os cloretos livres são os principais agentes que deflagram a corrosão (ANGST *et al.*, 2009), os parâmetros de transporte (C_s e D_{ns}) abaixo discutidos são relativos aos ajustes aos perfis de cloretos livres. Também foram realizados ajustes para cloretos totais. Os resultados são mostrados no Apêndice B deste trabalho. Os parâmetros seguem a mesma linha de raciocínio que o mecanismo de transporte para cloretos livres.

Dos resultados obtidos nos ajustes mostrados no Apêndice B, levando em consideração o tipo de limpeza da barra, percebe-se um aumento na concentração superficial com a limpeza química em relação à limpeza mecânica, motivado principalmente pelo maior tempo de exposição ao ensaio. Já um maior tempo de cura não mostra uma tendência clara de aumento ou redução. Conforme observado por outros pesquisadores, a concentração superficial apresenta tendência de crescimento com o tempo de exposição ao ambiente deletério, com a porosidade do material e com a concentração do agente agressivo no meio (SILVA, 2010; ROMANO, 2009; COSTA & APPLETON, 2007; MEIRA, 2004).

Um dos modelos utilizados para relacionar essa variável dependente (C_s) com o tempo foi proposto por COSTA & APPLETON (1999) (Equação 4.5). Partindo disso, os resultados de concentração superficial foram ajustados à Equação 4.5. Os resultados das regressões estão apresentados na Tabela 4.15. De modo geral, os dados obtidos apresentaram dispersão significativa nos valores do parâmetro aqui analisado (coeficiente de variação entre 20% e 35%), o que repercutiu nos coeficientes de determinação dos ajustes realizados. Essa dispersão pode ser explicada pela heterogeneidade dos materiais, pelas limitações dos procedimentos de ensaio e pelos modelos empíricos dos ajustes adotados (ANGST *et al.*, 2011; COSTA & APPLETON, 1999).

$$C_s(t) = K_s \times t^n \quad (4.5)$$

Onde:

$C_s(t)$ é a concentração superficial em um determinado tempo t , em % em relação à massa de aglomerante;

K_s é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao material e à zona de exposição;

t é o tempo desejado, em dias;

n é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao tempo.

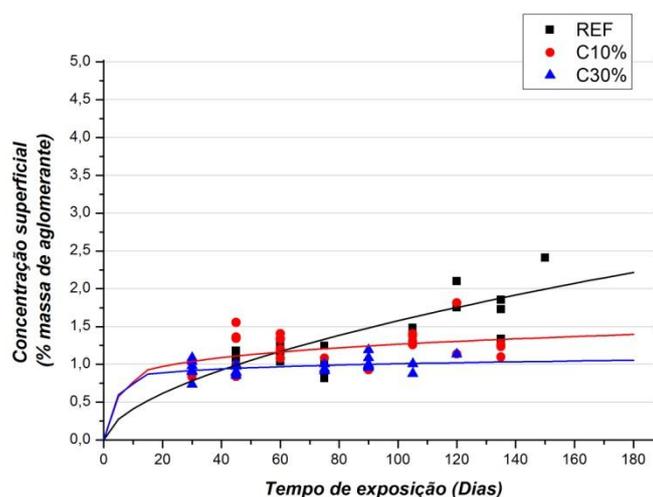
A Figura 4.34 mostra os resultados das concentrações superficiais e os ajustes em função do tempo para as concentrações superficiais de cloretos livres, após a retirada de dados espúrios. A Tabela 4.15 mostra os parâmetros de ajuste. Os parâmetros K_s e n foram obtidos pela interação com a Equação 4.5. Fica comprovado que, com o decorrer do tempo, maiores são os valores das concentrações superficiais em cada curva ajustada. Em relação aos traços, percebe-se uma redução gradativa na concentração superficial com o aumento da substituição de cimento por RTM. Este fato é explicado pela porosidade do material que repercute no tempo de exposição, correspondente ao período de iniciação da corrosão.

Ajustes à curva da Equação 4.5 realizados por Costa & Appleton (1999) mostram que concretos convencionais submetidos a diferentes ambientes de exposição natural apresentam o parâmetro “ n ” variando entre 0,37 e 0,54. Comparando os resultados da literatura com os apresentados neste trabalho, item 2.3.4.1 deste trabalho, percebe-se uma semelhança entre os parâmetros “ n ” da literatura e dos concretos de referência. Já para os concretos com uso de resíduos não se observou nenhum acerca da relação (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Resultados dos ajustes da Equação 4.5 aos dados de concentração superficial para os diferentes tipos de traço.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	K_s (%/dias ⁿ)	n	r^2
Referência	0,1675	0,4711	0,586
C10%	0,5954	0,1639	0,778
C30%	0,7068	0,0771	0,742

Figura 4.34 - Concentração superficial *versus* tempo de exposição.



Os coeficientes de difusão para os perfis de cloretos livres mostrados nas tabelas contidas nos Apêndice B deste trabalho apresentam resultados em diferentes idades, dependentes do período da iniciação da corrosão de cada armadura. De modo a ter uma base única de comparação, foi empregada a Equação 4.6, que representa o comportamento do coeficiente de difusão em relação ao tempo, expressa matematicamente através da Equação 4.6 (MANGAT & MOLLOY, 1994).

$$D(t) = D_0 \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-m} \quad (4.6)$$

Onde:

$D(t)$ é o coeficiente de difusão em um determinado tempo t , em cm^2/s ;

D_0 é o coeficiente de difusão em um determinado tempo t_0 , em cm^2/s ;

t é o tempo desejado, em segundos;

t_0 é o tempo de referência, em segundos;

m é o parâmetro que expressa a dependência em relação ao tempo.

Aos dados de coeficientes de difusão aqui relatados, foi ajustada a Equação 4.6, tendo como tempo de referência o período de 90 dias. Os parâmetros de regressão (D_0 e m) são apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17, para cada limpeza realizada nas armaduras. Ao fim do processo, foi confeccionada a Figura 4.35. Ela mostra os coeficientes de difusão, aos 90 dias, para os diferentes tipos de limpeza e cura em função do percentual de substituição de cimento por resíduo. Além disso, adicionou-se aos resultados, o índice de vazios aos 90 dias, de modo a facilitar a compreensão.

Estudos envolvendo ajustes a Equação 4.6 mostram os valores do parâmetro “ m ” variando entre 0,367 e 0,429, para concretos moldados com cimento Portland II-F e relação água/cimento de 0,57 submetidos a atmosfera marinha (MEIRA, 2004). Já Stanish & Thomas (2003), empregando em seus dados essa mesma relação, observaram valores de “ m ” iguais a 0,32, 0,66 e 0,79 para concretos sem adições e com adição de cinza volante de 25% e 56%. Comparando os dados obtidos neste trabalho com a literatura acerca do tema, percebemos uma conformidade entre os valores obtidos (Tabela 4.16 e 4.17). Dispersões consideráveis nos dados repercutiram em baixos coeficientes de determinação (r^2) para o ajuste à Equação 4.6, em ambos os tipos de limpeza realizados nas armaduras.

A Figura 4.35 mostra um aumento no coeficiente de difusão com a substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído, ou seja, um aumento na velocidade de

transporte de cloretos no interior do concreto. Este resultado entra em consenso com os resultados dos índices de vazios, logo a substituição de cimento por RTM influenciou diretamente no índice de vazios, que, conseqüentemente, influenciou no coeficiente de difusão. Se comparados aos concretos de referência, a substituição de 10% praticamente não influenciou nos resultados dos coeficientes de difusão.

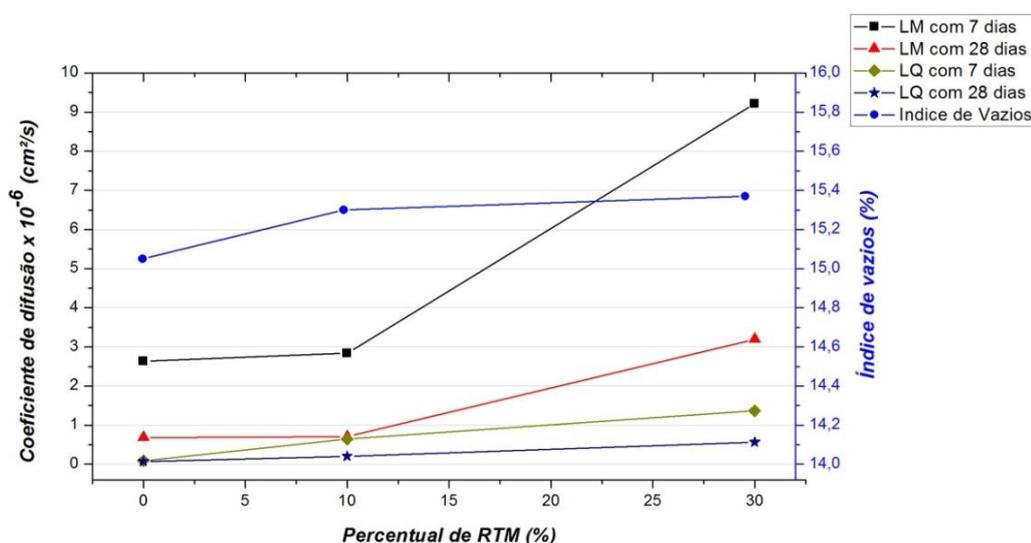
Tabela 4.16 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com barras limpas por ação mecânica.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	D_0 ($\times 10^{-6}$ cm ² /s)	m	r ²
Referência com 7 dias de cura	2,640	0,485	0,500
Referência com 28 dias de cura	0,686	0,257	0,475
C10% com 7 dias de cura	2,840	0,393	0,737
C10% com 28 dias de cura	0,702	0,286	0,823
C30% com 7 dias de cura	9,221	0,530	0,634
C30% com 28 dias de cura	3,195	0,454	0,941

Tabela 4.17 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com barras limpas por ação química.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	D_0 ($\times 10^{-6}$ cm ² /s)	m	r ²
Referência com 7 dias de cura	0,091	0,131	0,538
Referência com 28 dias de cura	0,072	0,191	0,437
C10% com 7 dias de cura	0,644	0,331	0,788
C10% com 28 dias de cura	0,206	0,161	0,727
C30% com 7 dias de cura	1,365	0,424	0,608
C30% com 28 dias de cura	0,564	0,311	0,663

Figura 4.35 – Coeficiente de difusão (90 dias) e o Índice de vazios (90 dias) em relação ao percentual de RTM, para ambas as limpezas da barra e tempos de cura.



Outras variáveis independentes também influenciaram diretamente no coeficiente de difusão no estado não estacionário, como, por exemplo, o tempo de cura e o tipo de limpeza realizados nas barras. Portanto, quanto maior o tempo de cura em câmara úmida nas primeiras idades, menor o coeficiente de difusão. Este comportamento é explicado pelo aumento no grau de hidratação do concreto com o aumento do tempo de cura que, por sua vez, reduz a porosidade do material.

Já para o tipo de limpeza aplicada nas barras, a limpeza química apresentou um menor coeficiente de difusão em relação às barras com limpeza mecânica. A princípio, o coeficiente de difusão não apresentaria relação com o tipo de limpeza da barra empregada, tendo em vista que tal propriedade apresenta comportamento apenas relacionado ao concreto (COSTA & APPLETON, 1999; MEHTA & MONTEIRO, 2008). Porém, as barras limpas quimicamente apresentaram um maior tempo necessário para iniciar o processo corrosivo. Tal período repercutiu diretamente nos resultados de coeficiente de difusão, minimizando-os consideravelmente.

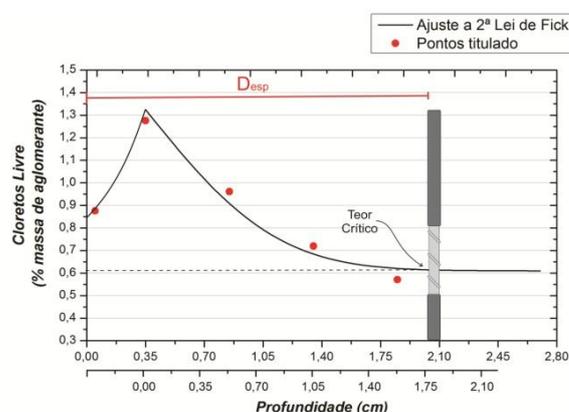
4.2.1.5 Teor crítico de cloretos

Os resultados de teores críticos de cloretos foram obtidos a partir dos ajustes à segunda Lei de Fick aplicados aos perfis de cloretos (clássicos ou reescalonados) no ato da detecção da despassivação, tanto para cloretos livres quanto para totais. Considerou-se o teor crítico como sendo o ponto em que a curva resultante do ajuste toca a barra no momento em que se configura o início da corrosão (Figura 4.36 (b)). Logo, a profundidade é a menor distância entre a superfície e o pite de corrosão [D_{esp}] (Figura 4.36 (a)) e o tempo como sendo o período de exposição ao ambiente deletério até a detecção da despassivação.

Figura 4.36 – Detecção do pite de corrosão e medida da profundidade do pite em relação à superfície [D_{esp}] (a); Cálculo do teor crítico a partir do perfil reescalonado típico dos dados apresentados neste trabalho (b).



(a)

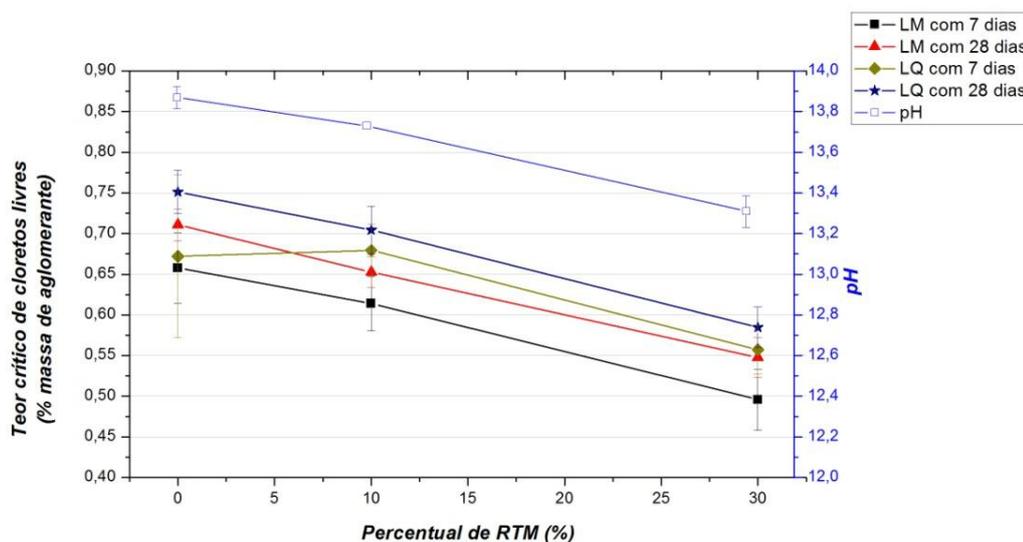


(b)

Após a obtenção dos valores de teores críticos, adicionalmente, foi empregada a técnica estatística de Chauvenet para análise dos dados espúrios, o que permitiu o emprego de dados mais consistentes e representativos da amostra.

A Figura 4.37 mostra os resultados médios e desvios padrões dos teores críticos para cloretos livres, após a utilização da referida técnica. Já as Tabelas 4.18 e 4.19 mostram, respectivamente, os resultados de análise de variância e do Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre os resultados de cloretos livres. Os resultados de ANOVA, apresentados na Tabela 4.18, mostram que o tempo de cura apresenta diferenças significativas nos resultados de teor crítico a um nível de confiança de 99%; logo, um maior tempo de cura interferiu nos resultados de teor crítico. A cura tem influência direta sobre o grau de hidratação e sobre a porosidade do material (MEHTA E MONTEIRO, 2008; NIVELLE, 1997), influenciando diretamente a quantidade dos produtos hidratados, o pH da matriz do concreto, a formação da película passivante e a velocidade de transporte dos agentes agressivos (ANGST *et al.*, 2009). Portanto, quanto maior a cura do concreto, maior o teor crítico de cloretos (Figura 4.37).

Figura 4.37 – Teor crítico de cloretos livres em função do percentual de RTM.



Percebe-se a influência da limpeza da barra nos resultados apresentados (Figura 4.37). A limpeza química das barras contribui para um aumento no teor crítico de cloretos livres se comparada às barras com limpeza mecânica. Essa influência é motivada principalmente pela melhor formação da película passivante na interface aço-concreto. Dessa forma, a limpeza química permite uma melhor retirada dos óxidos na superfície do aço antes da concretagem, quando comparados as barras com limpeza mecânica. Autores que estudaram a influência da limpeza das barras sobre o teor crítico relatam que uma oxidação previa contribui para a redução do teor crítico de cloretos (ANGST *et al.*, 2009; MOHAMMED & HAMADA,

2006), devido à má formação da película passivante no local (GONZALES *et al.*, 1996). Os resultados de ANOVA (Tabela 4.18) mostram que a um nível de confiança de 99%, o tipo de limpeza da barra provoca diferenças significativas nos resultados de cloretos livres, com um coeficiente de determinação (r^2) de 0,086, o que indica que o modelo explica 8,6% da variabilidade dos valores observados sobre o limite crítico de cloretos livres.

Por fim, temos a influência da substituição do cimento por RTM sobre os valores limites para início da corrosão. A Figura 4.37 mostra um decréscimo no teor crítico com a incorporação de RTM, para todas as combinações propostas. Este comportamento é explicado pela redução na alcalinidade do concreto com a substituição de cimento por RTM. Essa queda é motivada principalmente pela redução no consumo de cimento em cada traço (Figura 4.1) e pelas reações pozolânicas entre o cimento e o RTM. A alcalinidade da água dos poros do concreto é responsável pela formação e estabilidade da película passivadora, o que garante maior estabilidade eletroquímica da armadura (ANGST *et al.*, 2009; ANGST & VENNESLAND, 2009; SANDBERG, 1999; CASCUDO, 1997; TREADAWAY, 1988). Com uma confiança de 99%, os resultados de análise de variância (Tabela 4.18) mostram que os traços empregados apresentam diferenças significativas sobre as concentrações críticas de cloretos livres.

Tabela 4.18 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos livres.

Características analisadas	GDL	SQ	r^2	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,306	0,801	0,153	92,131	0,00001
Limpeza da barra	1	0,033	0,086	0,033	19,967	0,00023
Cura	1	0,034	0,089	0,034	20,747	0,00011
Traço x Limpeza da barra	2	0,002	0,0052	0,001	0,673	0,514
Traço x Cura	2	0,005	0,013	0,003	1,537	0,223
Cura x Limpeza da barra	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,999
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	0,002	0,005	0,001	0,585	0,560
TOTAL CORRIGIDO	10	0,382	1,0000	0,07	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.19 - Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o teor crítico de cloretos livres.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	0,6978	-
C10%	0,6657	-
C30%	-	0,5462

Da Tabela 4.19, pode-se concluir que a substituição de 10% de cimento por RTM não apresenta diferença significativa com os concretos de referência, ou seja, a substituição não

interferiu nos resultados obtidos neste estudo, a um nível de significância de 0,01. Já concretos com 30% de RTM apresentaram interferências significativas nos valores da variável dependente.

A Figura 4.38 mostra os resultados médios e desvios padrões dos teores críticos de cloretos totais em função do percentual de RTM para as diversas combinações de limpeza e tempo de cura, após a utilização da técnica estatística de Chauvenet. As Tabelas 4.20 e 4.21 mostram, respectivamente, os resultados de análise de variância e do Teste de Tukey para a variável dependente de teor crítico de cloretos totais. A partir dos valores obtidos e mostrados na Figura 4.38, percebemos que quanto maior o tempo de cura, a opção pela limpeza química e a redução na substituição de cimento por RTM, maior o teor crítico de cloretos totais. Este comportamento concorda com as conclusões sobre o teor de cloretos livres.

Figura 4.38 - Teor crítico de cloretos totais em função do percentual de RTM.

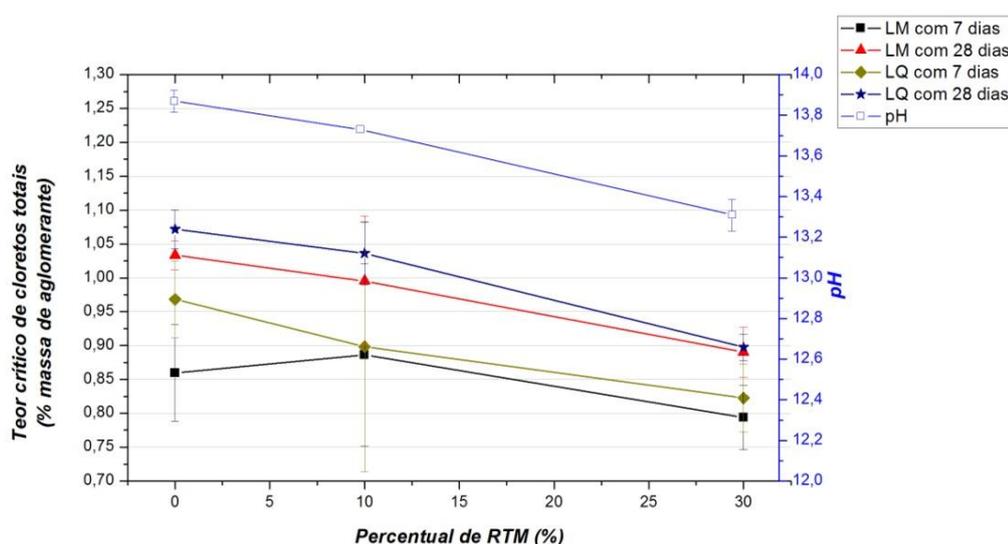


Tabela 4.20 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos totais.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,240	0,466	0,120	13,892	0,00068
Limpeza da barra	1	0,040	0,077	0,040	14,574	0,00062
Cura	1	0,178	0,345	0,178	20,571	0,00017
Traço x Limpeza da barra	2	0,022	0,042	0,011	1,273	0,287
Traço x Cura	2	0,005	0,009	0,003	0,302	0,741
Cura x Limpeza da barra	1	0,008	0,015	0,008	0,980	0,326
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	0,022	0,043	0,011	1,266	0,289
TOTAL CORRIGIDO	10	0,515	1,0000	0,07	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Os resultados de análise de variância, apresentados na Tabela 4.20, mostram que a um nível de confiança de 99%, as variáveis independentes de traço, tempo de cura e tipo de

limpeza apresentam diferenças significativas no modelo obtido. O Teste de Tukey para o efeito isolado do traço (Tabela 4.21) mostra que não há diferenças significativas entre os concretos de referência e com substituição de 10%, ou seja, os valores de teor crítico de cloretos totais são estatisticamente iguais; apenas concretos com substituição de 30% apresentariam valores de teor crítico totais diferentes estatisticamente dos concretos de referência.

Tabela 4.21 - Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre o teor crítico de cloretos totais.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	0,9866	-
C10%	0,9539	-
C30%	-	0,8511

4.2.1.6 Relação entre o potencial de corrosão e o teor crítico de cloretos

As variáveis que influenciam o teor crítico de cloretos são inúmeras, dentre elas podemos citar: a interface aço-concreto, o pH da solução dos poros, o tipo de cimento, as condições superficiais da armadura, o fator água/aglomerante, a disponibilidade de oxigênio, o grau de hidratação, a temperatura, a resistividade elétrica do concreto, a composição química do aço, o tipo de cátion associado aos íons cloretos e o potencial da barra (ANGST *et al.* 2009). A literatura remete a uma relação crescente entre os valores de teores críticos de cloretos (totais e livres) e o potencial de corrosão - SCE, dentro de uma determinada faixa de observação do potencial de corrosão, com exceção de uma faixa de incerteza localizada entre -200 ± 50 mV (SCE) (ALONSO *et al.*, 2002; IZQUIERDO *et al.* 2004).

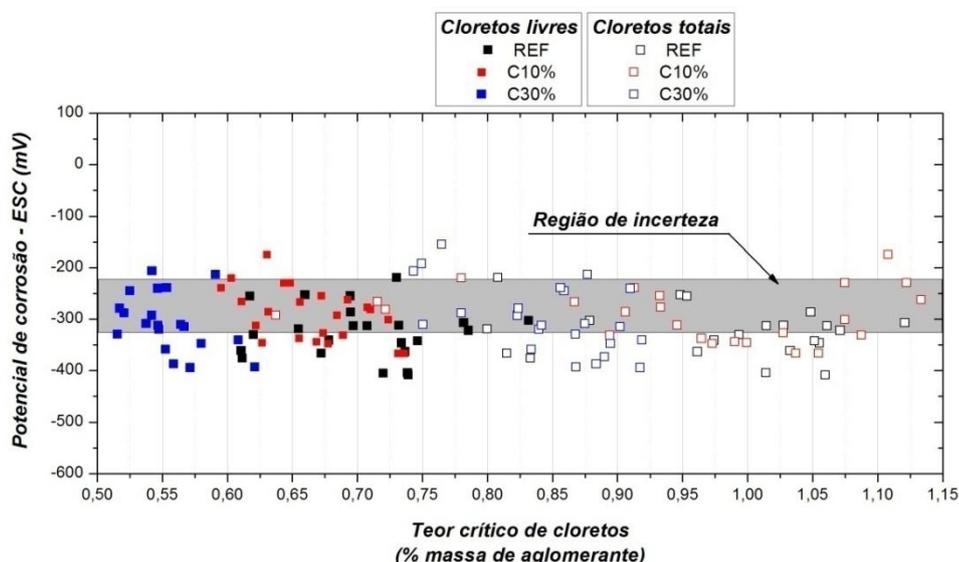
Levando-se em consideração a influência do potencial de corrosão sobre o teor crítico de cloretos livres e totais, foi confeccionada a Figura 4.39. Ela mostra o potencial de corrosão – ESC médio das últimas três leituras no momento da despassivação *versus* seus respectivos teores críticos de cloretos livres e totais. Aos dados de teores críticos de cloretos, foi empregada a técnica estatística de Chauvenet para dados espúrios, de modo a eliminar as coordenadas (potencial de corrosão, teor crítico) fora do padrão de comportamento dos dados. Ainda na Figura 4.39, foi inserida a faixa de incerteza proposta por Alonso *et al.* (2002), convertendo os limites do eletrodo de calomelano saturado (SCE) para o usado neste trabalho (Cobre|Sulfato de cobre - ESC), a partir do potencial de equilíbrio de ambos os eletrodos.

Os resultados mostram uma fraca influência do potencial de corrosão sobre o teor crítico de cloretos livres e totais, de modo que na região de incerteza (-274 ± 50 mV – ESC ou

-200 ± 50 mV – SCE) nada se pode concluir acerca da relação. Há um fraquíssimo aumento nos valores de teores críticos de cloretos livres e totais à medida que se reduz o potencial de corrosão, a partir de -324 mV (ESC) (-250 mV – SCE). Logo, os dados deste trabalho concordam com os descritos na literatura.

Dentro da faixa de potencial observada, observa-se uma grande dispersão entre os dados. Tal entrave poderia inviabilizar ou reduzir a possibilidade de relação entre as variáveis dependentes. Salienta-se ao leitor que as condições de ensaio são diferenciadas dos ensaios realizados pelos autores ALONSO *et al.*(2002) e IZQUIERDO *et al.* (2004) e não se pré-condicionou a armadura antes da concretagem, porém se monitorou a corrosão durante todo o processo agressivo.

Figura 4.39 –Potencial de corrosão (ESC) *versus* teor crítico de cloretos livres e totais.



4.2.2 Ensaio acelerado por eletromigração

4.2.2.1 Polarização da armadura com a aplicação do campo elétrico

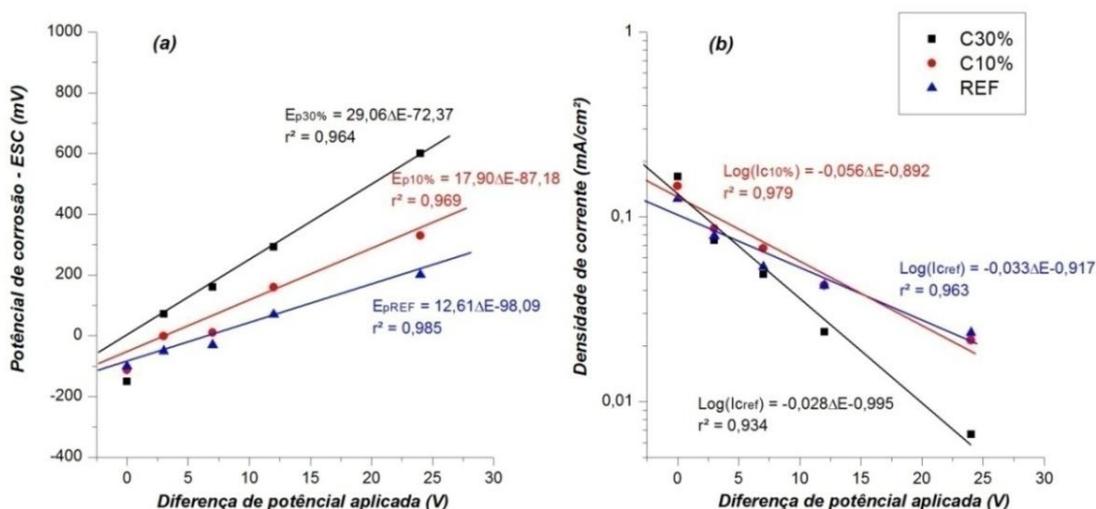
Por ser um material altamente condutivo, a armadura do concreto tende a apresentar um caminho preferencial para passagem de corrente, quando se aplica um campo elétrico através do concreto. Essa aplicação de modo a induzir a eletromigração de íons dissolvidos em um solvente causa um fenômeno na barra chamado de polarização potencioestática (MIETZ, 1998). Tal efeito caracteriza-se por carregar positivamente ou negativamente a barra, dependendo do sentido que se aplique o campo. O fenômeno de polarização pode causar interpretações errôneas sobre o estado de passividade da barra (ANGST, 2009; TREJO *et al.*, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002).

Como o propósito de evitar que tais leituras de potenciais de corrosão - ESC e densidades de corrente interferissem na decisão sobre o estado das barras, decidiu-se estudar a interferência da polarização sobre os materiais estudados. Logo, são variáveis independentes deste alvo de estudo: dosagem conforme item 3.3.1.1; limpeza da barra conforme item 3.3.1.2; método de ensaio conforme item 3.3.1.3-b; diferença de potencial aplicada entre as malhas metálicas foram de 3, 7, 12 e 24 volts; tempo de leitura dos parâmetros eletroquímicos de 3, 12, 48 horas e após o desligamento do campo elétrico aplicado.

- **Barras com limpeza mecânica**

A Figura 4.40 mostra os resultados dos potenciais de corrosão – ESC e densidade de corrente de corrosão em função da diferença de potencial aplicada no instante do desligamento do campo elétrico para as barras com limpeza mecânica. Apesar da armadura não atuar como polo negativo do campo elétrico, a mesma ainda sofre o efeito da polarização, demonstrada pelas leituras dos parâmetros eletroquímicos.

Figura 4.40 – Potencial de corrosão – ESC (a) e densidade de corrente de corrosão (b) versus diferença de potencial aplicada para leitura imediata e limpeza mecânica da barra



Para os potenciais de corrosão – ESC, os dados mostram que quanto maior a tensão externa aplicada, maiores as respostas desse parâmetro (Figura 4.40 (a)). Este comportamento também foi reportado por outros pesquisadores (AUSTIN, 2009; TREJO, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002). A interferência do campo elétrico é tão forte sobre a leitura de potencial que repercutiu em um comportamento linear com a tensão externa aplicada. Castellote *et al.* (2002) também mostra a mesma relação entre as variáveis relacionadas. A Tabela 4.22 apresenta os ajustes lineares entre o potencial de corrosão – ESC e a tensão externa aplicada para todos os tempos de leitura e traços utilizados. Os resultados da tabela em questão demonstram a mesma relação para os demais tempos de leitura e dosagens

empregadas. A partir dos coeficientes de determinação (r^2), pode-se concluir que os ajustes representam bem os dados para todos os tempos de leitura e dosagens utilizadas.

Tabela 4.22 - Ajustes lineares aos potenciais de corrosão – ESC para cada tipos de traço para a limpeza mecânica.

Tipo de concreto	Momento em que é realizada a leitura (Horas)	Parâmetros		
		a (mV/V)	b (mV)	r^2
Referência	0	12,61	-98,09	0,985
	3	8,99	-101,08	0,986
	12	4,32	-93,27	0,966
	48	0,212	-101,35	0,958
C10%	0	17,90	-87,18	0,969
	3	11,67	-86,95	0,933
	12	8,45	-102,71	0,973
	48	-0,456	-113,7	0,771
C30%	0	29,06	-72,37	0,964
	3	21,39	-65,93	0,926
	12	17,55	-165,25	0,951
	48	0,784	-154,28	0,648

Tabela 4.23 - Ajustes das densidade de corrente para cada tipo de traço para a limpeza mecânica.

Tipo de concreto	Momento em que é realizada a leitura (Horas)	Parâmetros		
		a (exp($\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{V}$))	b (exp($\mu\text{A}/\text{cm}^2$))	r^2
Referência	0	-0,033	-0,917	0,963
	3	-0,022	-0,963	0,878
	12	-0,017	-0,853	0,975
	48	-0,0022	-0,797	0,797
C10%	0	-0,056	-0,892	0,979
	3	-0,04	-0,854	0,983
	12	-0,016	-0,913	0,962
	48	0,0016	-0,907	0,772
C30%	0	-0,028	-0,995	0,934
	3	-0,028	-0,910	0,886
	12	-0,015	-0,773	0,997
	48	-0,001	-0,845	0,700

Com relação às densidades de corrente de corrosão, os resultados mostram uma relação linear decrescente entre a tensão externa aplicada e o logaritmo do parâmetro eletroquímico em questão (Figura 4.40 (b)). A Tabela 4.23 mostra os ajustes lineares entre a diferença de potencial aplicada através do concreto e o logaritmo da densidade de corrente. Assim como o potencial de corrosão, os ajustes lineares entre a densidade de corrente de corrosão e a tensão externa aplicada apresentaram coeficientes de determinação altos, ou seja, os ajustes demonstram realmente bem o comportamento. Tais valores mais eletropositivos

para potencial de corrosão e valores mais baixos para densidade de corrente de corrosão, devem-se à configuração do ensaio aplicada de modo a induzir a penetração de cloretos.

De modo a analisar o impacto sobre os parâmetros eletroquímicos, foram confeccionadas as Figuras 4.41 e 4.42. Elas mostram os percentuais relativos para os parâmetros eletroquímicos estudados em função do momento da leitura e da diferença de potencial aplicada ente as malhas. O percentual relativo nada mais é que o deslocamento em relação às condições sem aplicação do campo, ou seja, quantas vezes a leitura de cada percentual foi alterada com a aplicação do campo elétrico. As Equações 4.7 e 4.8 mostram, matematicamente, a relação envolvida.

$$PR_{corr}(t, \Delta E) = \left| \frac{P_{corr}(t, \Delta E) - P_{corr}(0,0V)}{P_{corr}(0,0V)} \right| \times 100\% \quad (4.7)$$

Onde:

$PR_{corr}(t, \Delta E)$ é o percentual relativo no tempo de leitura t e diferença de potencial externa aplicada de ΔE , em %;

$P_{corr}(t, \Delta E)$ é o potencial de corrosão - ESC no tempo de leitura t e diferença de potencial externa aplicada de ΔE , em mV, e

$P_{corr}(0,0V)$ é o potencial de corrosão - ESC antes da aplicação de campo elétrico, em mV.

$$IR_{corr}(t, \Delta E) = \frac{i_{corr}(t, \Delta E) - i_{corr}(0,0V)}{i_{corr}(0,0V)} \times 100\% \quad (4.8)$$

Onde:

$IR_{corr}(t, \Delta E)$ é a densidade de corrente relativa no tempo de leitura t e diferença de potencial externa aplicada de ΔE , em %;

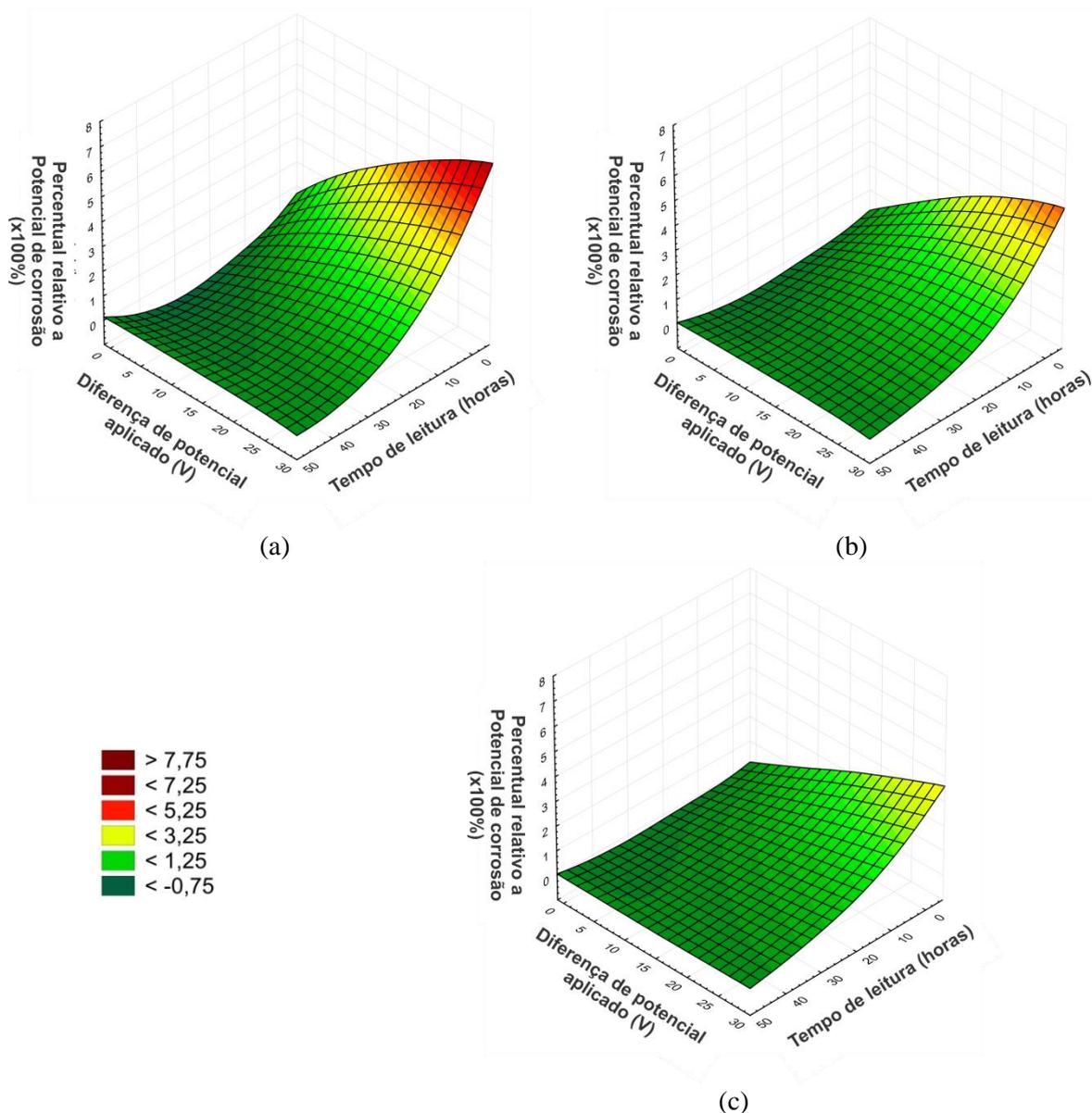
$i_{corr}(t, \Delta E)$ é a densidade de corrente no tempo de leitura t e diferença de potencial externa aplicada de ΔE , em mV, e

$i_{corr}(0,0V)$ é a densidade de corrente antes da aplicação de campo elétrico, em mV.

A partir da Figura 4.41 (a-b-c), observa-se que quanto maior a tensão externa aplicada entre os polos e menor o intervalo de tempo para leitura após a aplicação do campo, maior a interferência da polarização sobre o potencial de corrosão - ESC; isso ocorre para todos os traços em questão. Esse potencial também é influenciado pelas dosagens empregadas neste estudo. Portanto, concretos com maior substituição de cimento por RTM apresentam maior efeito de polarização. Esse fato é explicado pela rede porosa do material. Concretos com

maior substituição de cimento por RTM apresentam maior absorção e índice de vazios do que os concretos de referência, ver seção 4.1.2. Essas características físicas (absorção e índice de vazios) influenciam diretamente na resistividade do material à passagem de carga elétrica (MEHTA & MONTEIRO, 2008; CASCUDO, 1997).

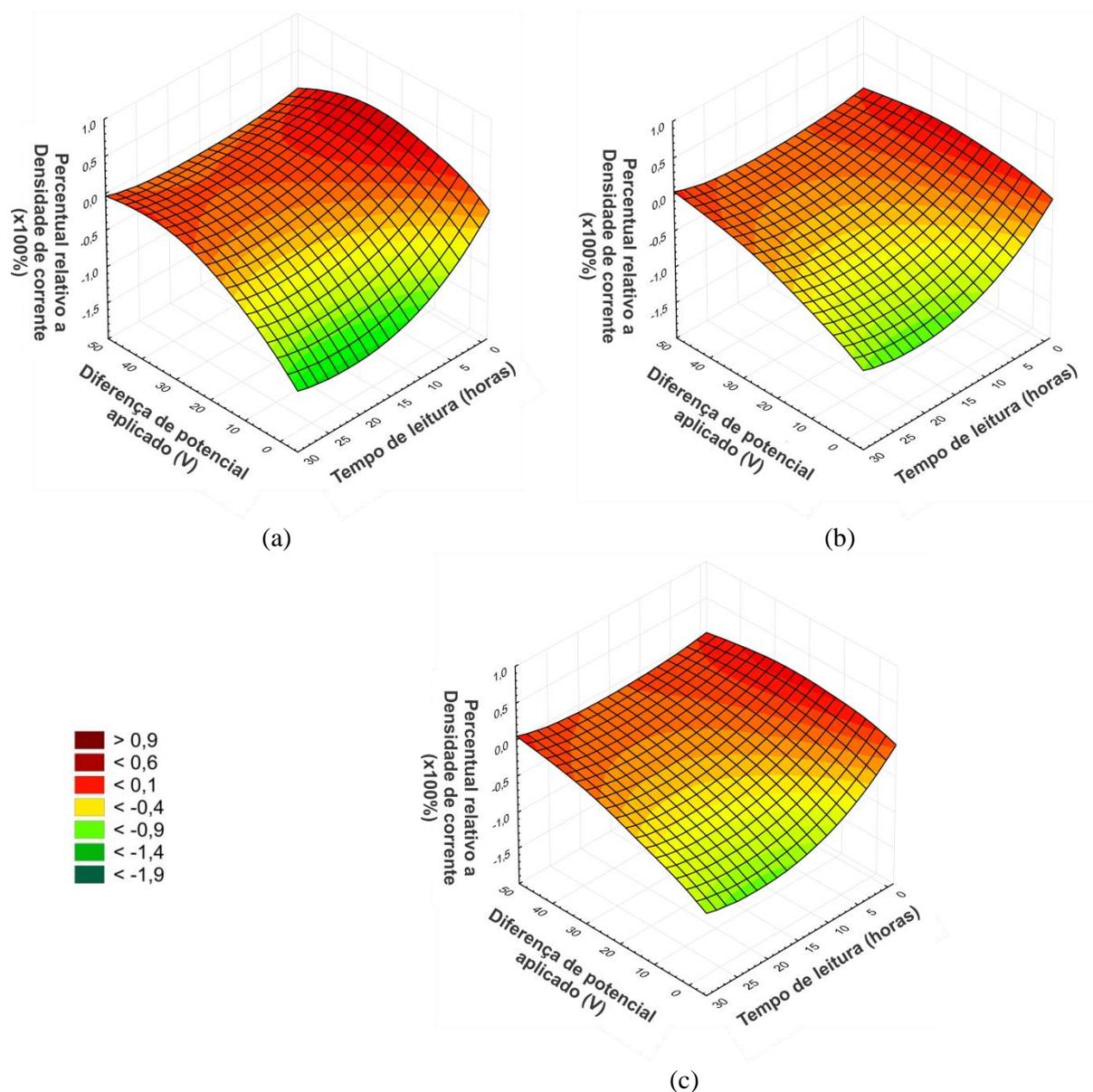
Figura 4.41 - Percentual relativo ao potencial de corrosão – ESC (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).



Austin (2009), aplicando uma densidade de corrente de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ durante 24 horas, observou um aumento de 33 vezes no potencial de corrosão – SCE em concretos moldados com cimento Portland tipo um, tendo a barra como um dos polos no esquema de montagem e leitura após desligamento do campo. Castellote *et al.* (2002), com o emprego de migração elétrica sem emprego da barra como polo, percebeu um crescimento de 197 vezes no potencial de corrosão – SCE em argamassas armadas, quando a tensão externa é aplicada com

12 volts. Trejo *et al.* (2009), com o emprego da metodologia “ACT setup test”⁴ em argamassas armadas, relatam que o efeito da polarização é pormenorizada em função da conexão entre a armadura e um “terra”. Neste trabalho, o maior aumento detectado no potencial de corrosão foi de 7,3 vezes no concreto com substituição de 30% de cimento por RTM. Apesar de condições diferenciadas em cada trabalho, os resultados mostram efeito da polarização com diversos tipos de montagem. No entanto, esse assunto ainda carece de maiores estudos por parte da comunidade científica.

Figura 4.42 - Percentual relativo densidade de corrente de corrosão (x 100%) *versus* momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).



4

O “ACT setup test” é uma metodologia de ensaio acelerado desenvolvida para a obtenção do teor crítico de cloretos em argamassa, aplicada em um curto espaço de tempo (TREJO & MILLER, 2003). Para maiores detalhes, reporta-se ao item 2.5.3 deste trabalho.

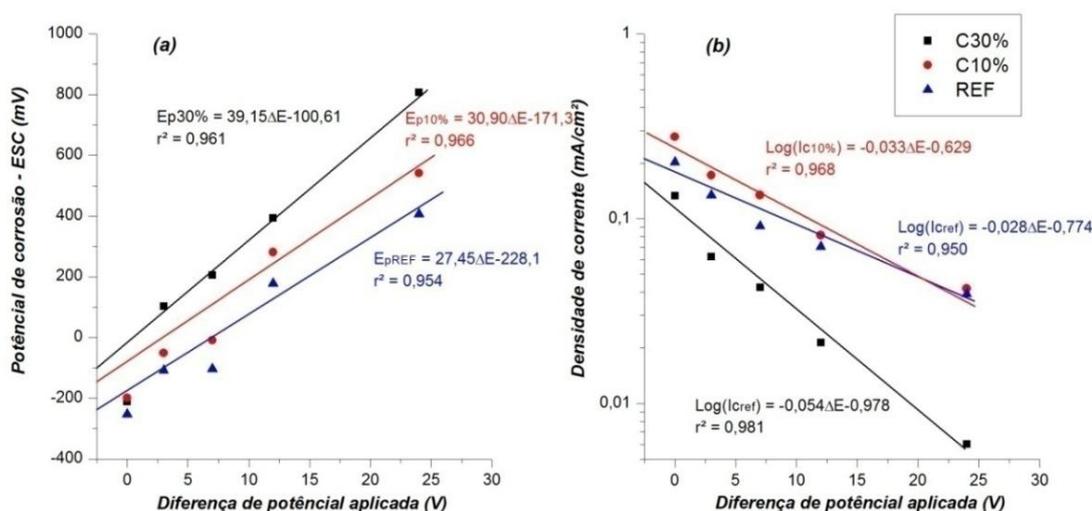
Em relação à densidade de corrente (Figura 4.42), percebe-se uma diminuição nos valores das densidades de corrente em menores proporções que o aumento no potencial de corrosão para todos os traços estudados. Dosagens com maiores teores de resíduo cerâmico apresentaram maiores reduções sobre os resultados de densidade de corrente de corrosão, motivados pela rede porosa que influencia diretamente na resistividade do material. Por fim, a polarização aplicada pelo esquema de montagem deste trabalho pode induzir a uma decisão errônea sobre o estado da barra, levando à conclusão de que o aço se encontra passivo.

Podemos observar em ambas as Figuras 4.41 e 4.42 que, com o passar do tempo, a polarização da armadura retoma as condições originais antes da aplicação da tensão externa. Este fato foi observado por outros autores que estudaram o fenômeno sobre o potencial de corrosão - SCE (AUSTIN, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002). O tempo para despolarização da armadura foi determinado por regressões polinomiais aos dados obtidos, tanto para o potencial de corrosão – ESC quanto para a densidade de corrente de corrosão. Para todos os traços, os maiores tempos de despolarização foram para a densidade de corrente, sendo eles de 47,98, 46,42 e 44,7 horas para os traços de referência, C10% e C30%, respectivamente, com tensão externa aplicada de 12 volts. Assim, recomenda-se para a tensão de 12 volts, uma espera de 48 horas para aferição da condição de atividade da barra.

- **Barras com limpeza química**

A Figura 4.43 mostra a relação entre a o potencial de corrosão e a diferença de potencial aplicada entre os polos, como também , a relação entre o logaritmo da densidade de corente de corrosão em função da diferença de potencial aplicada no ensaio.

Figura 4.43 - Potencial de corrosão – ESC (a) e densidade de corrente de corrosão (b) *versus* diferença de potencial aplicada para leitura imediata e limpeza química da barra.



Assim como nas barras com limpeza mecânica, nas barras com limpeza química também é observada uma relação linear entre o potencial de corrosão – ESC e a tensão externa aplicada (Figura 4.43 (a)). Para a densidade de corrente de corrosão, percebe-se uma relação linear com o logaritmo da propriedade eletroquímica em questão e a tensão externa aplicada (Figura 4.43 (b)). Esses resultados estão mostrados nas Tabelas 4.24 e 4.25 e indicam através do coeficiente de determinação (r^2), que os ajustes representam bem o comportamento linear.

Tabela 4.24 - Ajustes lineares dos potenciais de corrosão – ESC para cada tipo de traço para a limpeza química.

Tipo de concreto	Momento em que é realizada a leitura (Horas)	Parâmetros		
		a (mV/V)	b (mV)	r^2
Referência	0	39,15	-100,61	0,961
	3	21,48	-265,71	0,984
	12	20,47	-232,75	0,981
	48	-0,9635	-206,50	0,907
C10%	0	30,90	-171,30	0,966
	3	19,92	-166,20	0,970
	12	13,69	-186,68	0,971
	48	-1,33	-193,78	0,894
C30%	0	27,45	-228,10	0,954
	3	26,30	-99,59	0,917
	12	13,49	-246,80	0,975
	48	-1,15	-246,53	0,663

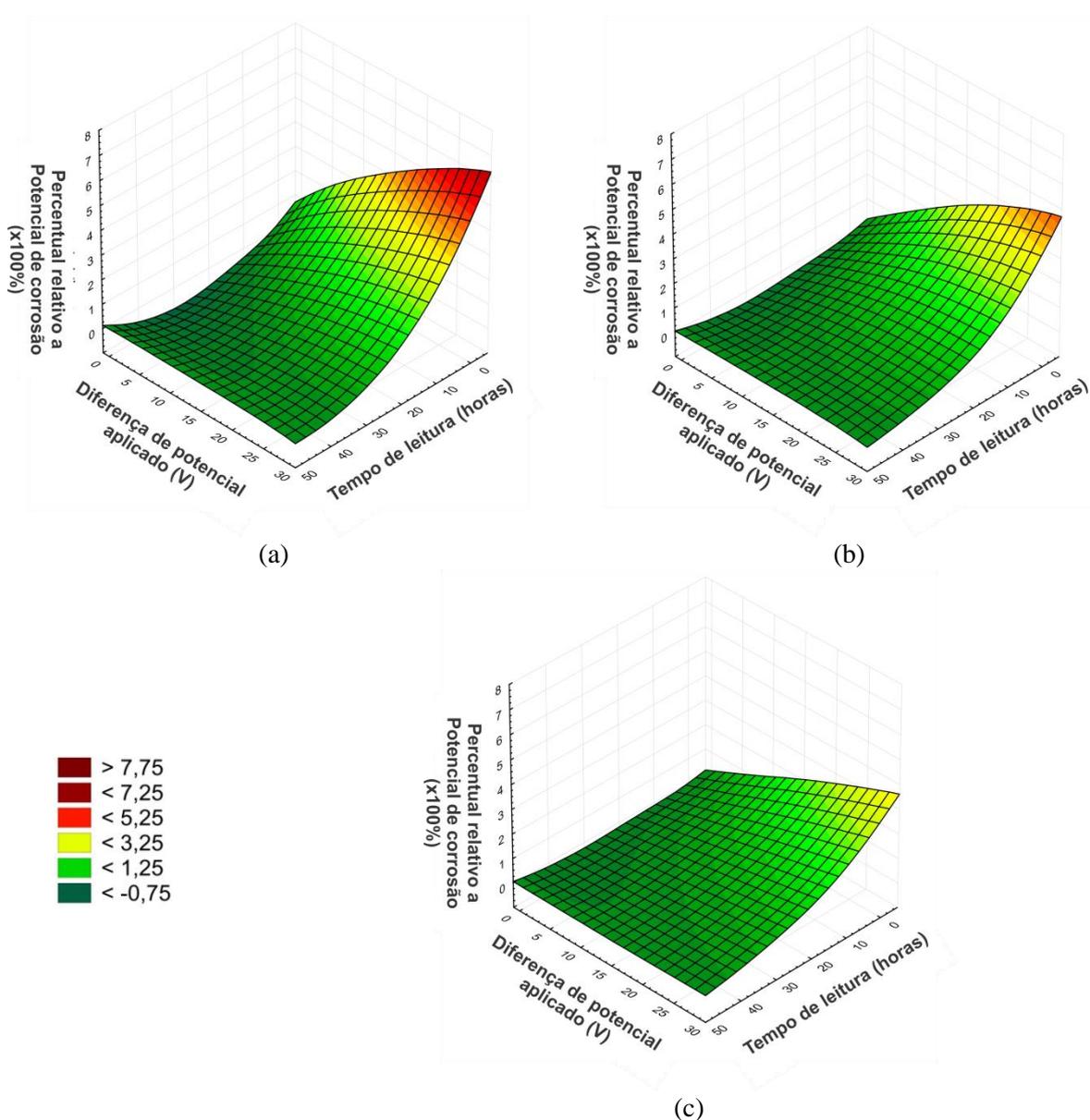
Tabela 4.25 - Ajustes das densidade de corrente para cada tipo de traço para a limpeza química.

Tipo de concreto	Momento em que é realizada a leitura (Horas)	Parâmetros		
		a (exp($\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{V}$))	b (exp($\mu\text{A}/\text{cm}^2$))	r^2
Referência	0	-0,0281	-0,7742	0,95
	3	-0,0220	-0,7450	0,893
	12	-0,0154	-0,7010	0,978
	48	-0,0024	-0,6900	0,961
C10%	0	-0,0535	-0,9775	0,981
	3	-0,0396	-0,9340	0,989
	12	-0,0164	-0,0565	0,981
	48	-0,0022	-0,5450	0,825
C30%	0	-0,0330	-0,6296	0,968
	3	-0,0274	-0,6244	0,898
	12	-0,0143	-0,8600	0,993
	48	-0,0036	-0,8811	0,682

Sobre os resultados de cada parâmetro eletroquímico, para a limpeza química, foram empregadas as Equações 4.7 e 4.8 para determinar o percentual relativo em relação às

condições originais dos CPs. Os dados obtidos pela Equação 4.7 foram cruzados com o momento da leitura e a diferença de potencial aplicado, para a confecção da Figura 4.44. Os resultados da Equação 4.8, por sua vez, foram cruzados com o momento da leitura e a diferença de potencial aplicado, para confecção da Figura 4.45. Os percentuais relativos mostram a proporção em que os parâmetros eletroquímicos foram alterados em relação às condições iniciais da barra sem aplicação do campo elétrico (condições originais).

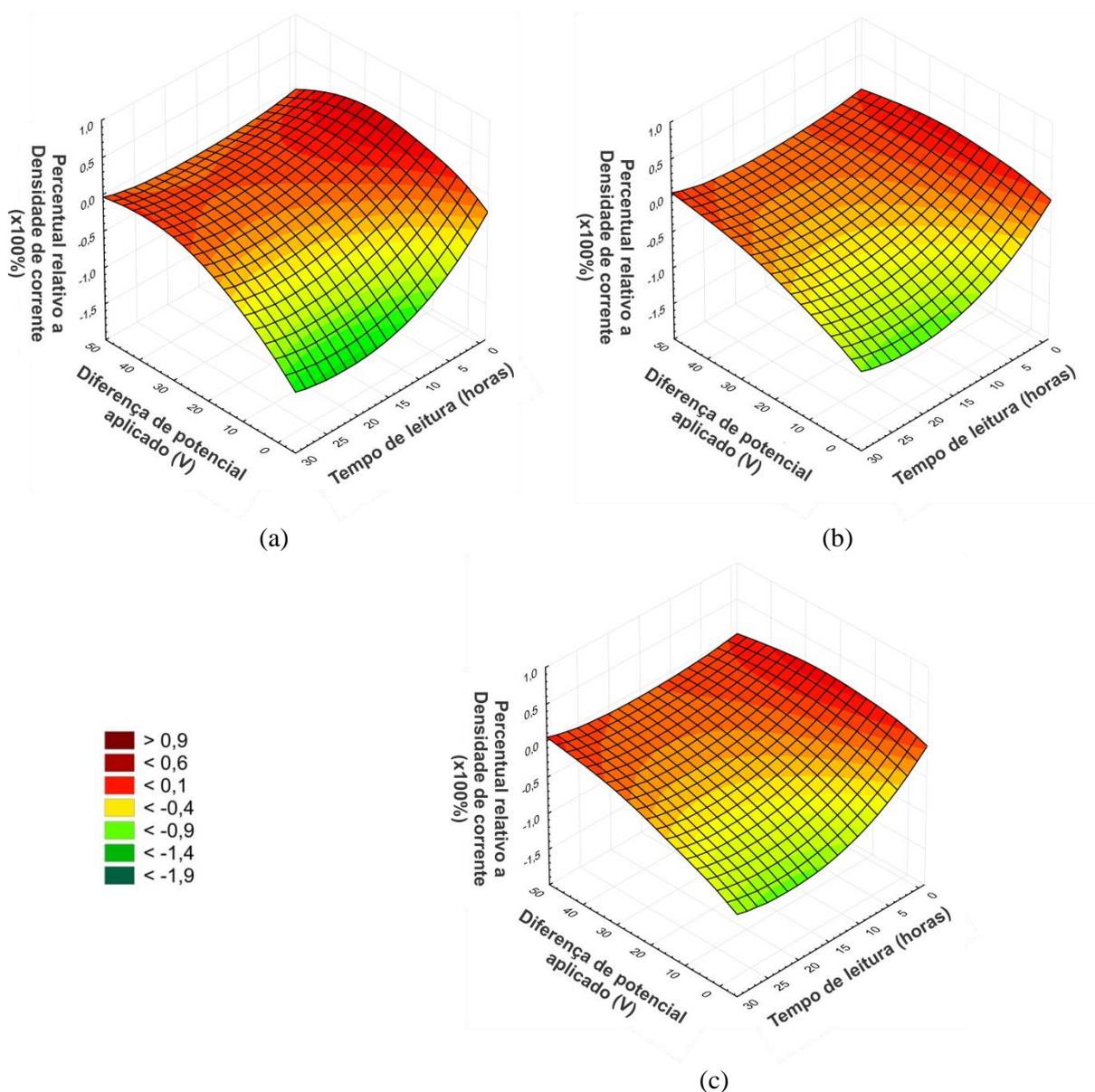
Figura 4.44 – Percentual relativo ao potencial de corrosão – ESC (x 100%) versus momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).



Assim como os percentuais relativos ao potencial de corrosão – ESC para as barras com limpeza mecânica, os percentuais relativos ao potencial de corrosão – ESC para as barras com limpeza química mostram um aumento gradativo com o aumento da tensão externa aplicada e a diminuição do intervalo de tempo para a realização das leituras após o

desligamento do campo para todas as dosagens analisadas. Comparando o efeito da polarização da barra com os traços, percebe-se uma redução na influência sobre o Potencial de corrosão - ESC com a redução da substituição de cimento por resíduo cerâmico, motivado pelo aumento da resistência do material à passagem de carga elétrica (Figura 4.44). Na Figura 4.45, percebe-se uma diminuição nos valores das densidades de corrente de corrosão para todos os traços estudados, além de uma redução gradativa com a incorporação desse resíduo.

Figura 4.45 - Percentual relativo da densidade de corrente de corrosão (x 100%) *versus* momento em que é realizada a leitura (horas) e diferença de potencial aplicado (V) para as barras com os traços C30% (a), C10% (b) e referência (c).



O efeito reversível da polarização também foi observado na limpeza química. O tempo para despolarização da barra foi determinado por regressões polinomiais aos dados obtidos, tanto para o potencial de corrosão – ESC quanto para a densidade de corrente. Para todos os traços, os maiores tempos de despolarização foram para a densidade de corrente, sendo eles

de 44,74, 44,00 e 43,96 horas para os traços de referência, C10% e C30%, respectivamente, com tensão externa aplicada de 12 volts. De forma semelhante, 48 horas de espera são necessárias para a aferição das condições de atividade das barras.

Comparando as Figuras 4.44 e 4.45, percebemos que a limpeza da barra também influencia na polarização da barra sobre o potencial de corrosão – ESC. Logo, concretos armados com barras limpas quimicamente apresentam menor polarização da barra com a passagem de corrente através do concreto. Essa propriedade também acontece com a densidade de corrente, de acordo com as Figuras 4.42 e 4.45. Esse resultado é explicado pela melhor formação e estabilidade da película passivante com a aplicação da limpeza química. Isso possivelmente interferiu diretamente na resistência ôhmica da barra e, conseqüentemente, na transferência de carga do concreto para a barra. Por fim, a partir dos resultados apresentados aqui e nos trabalhos de Trejo *et al.* (2009), Austin (2009) e Castellote *et al.* (2002), percebe-se que a polarização depende da configuração de ensaio utilizada, da diferença de potencial empregada, das condições de (preparação) limpeza da barra, das características do concreto e do tempo de espera para a realização das leituras após o desligamento do campo elétrico.

4.2.2.2 Monitoramento eletroquímico

As leituras das variáveis dependentes: potencial de corrosão – ESC (mV) e a densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) estão apresentadas nas Figuras 4.46 a 4.57, realizadas a cada dezenove horas após o emprego do campo elétrico. Para mais detalhes ver item 3.3.2.1. Uma vez detectado o início do processo corrosivo, os espécimes foram retirados de ensaio e, após o período de despolarização da barra (48 horas), foram realizadas duas novas leituras de modo a confirmar a despassivação. Assim como nos gráficos confeccionados na seção 4.2.1.1, aos gráficos dessa seção foram inseridas faixas indicadoras do risco de corrosão. Para as medidas de potencial, foram empregadas as faixas da norma C-876 (2009) e para a densidade de corrente, as faixas propostas por Cigna *et al.* (1997).

- **Barras com limpeza mecânica**

Os resultados do monitoramento eletroquímico para as barras com limpeza mecânica e sete dias de cura estão apresentados nas Figuras 4.46, 4.47 e 4.48. Observa-se uma tendência geral de despassivação na seguinte sequência: C30%, C10% e REF. O tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de $35,83 \pm 12,81$ horas para C30%, $36,66 \pm 12,90$ horas para C10%, REF e $53,33 \pm 17,51$ horas para REF.

Figura 4.46 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 7 dias.

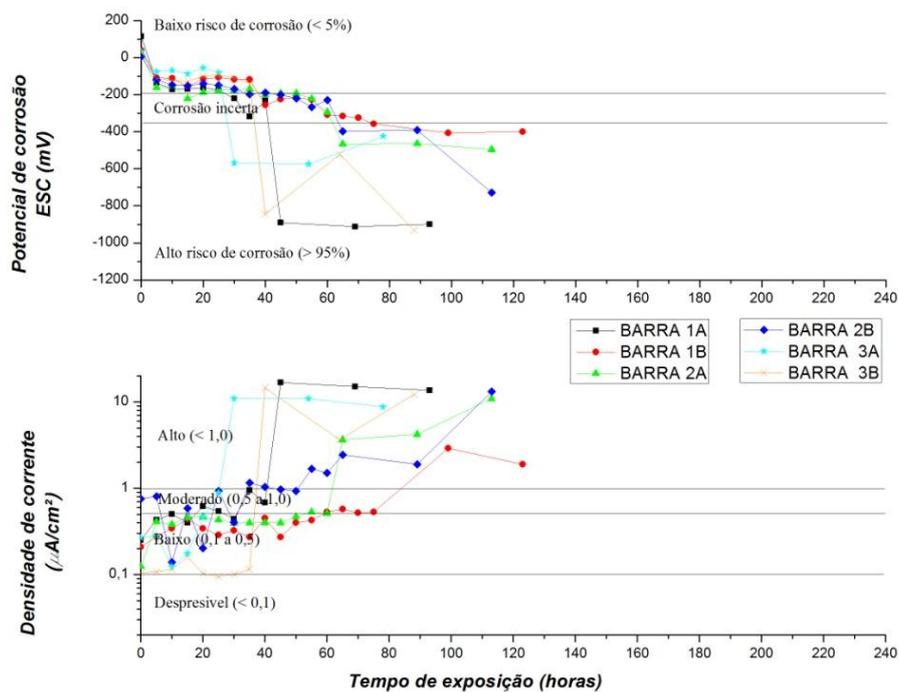


Figura 4.47 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 7 dias.

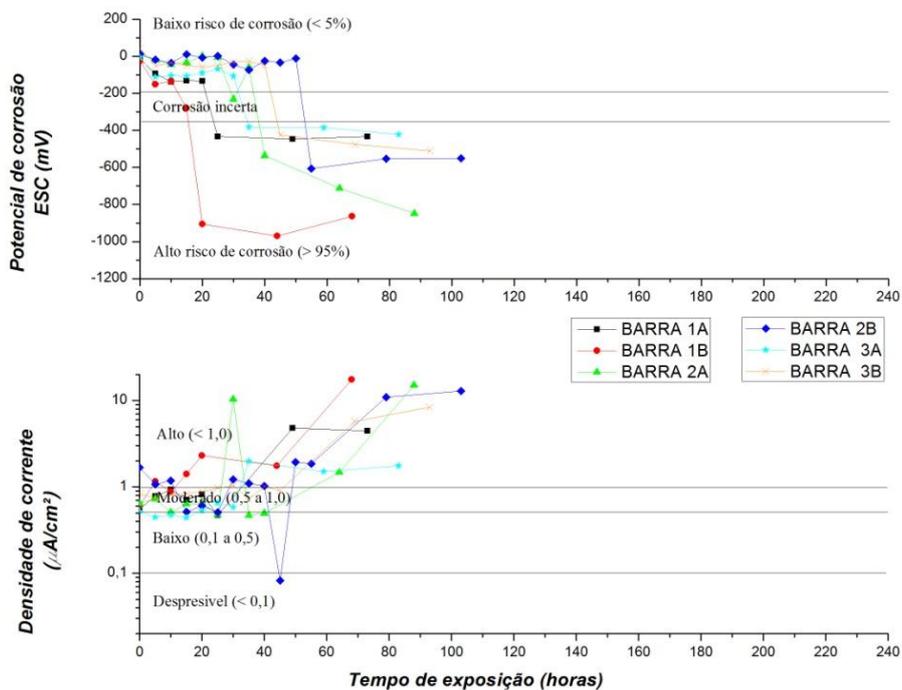
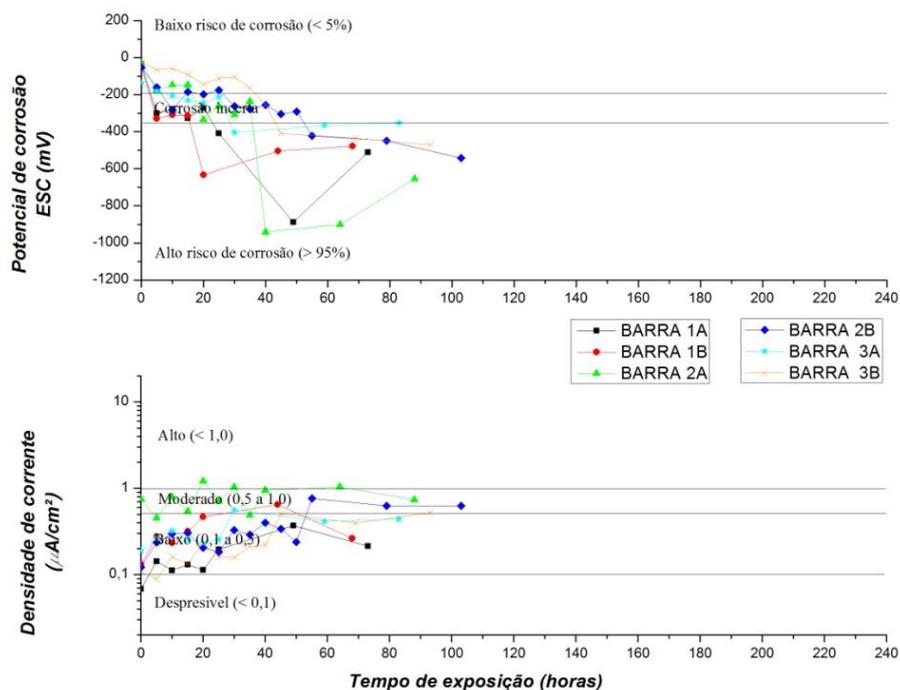


Figura 4.48 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 7 dias.



A seguir, são apresentados os resultados do monitoramento eletroquímico para as barras com limpeza mecânica e os CPs com vinte e oito dias de cura (Figuras 4.49, 4.50 e 4.51).

Figura 4.49 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço REF com cura de 28 dias.

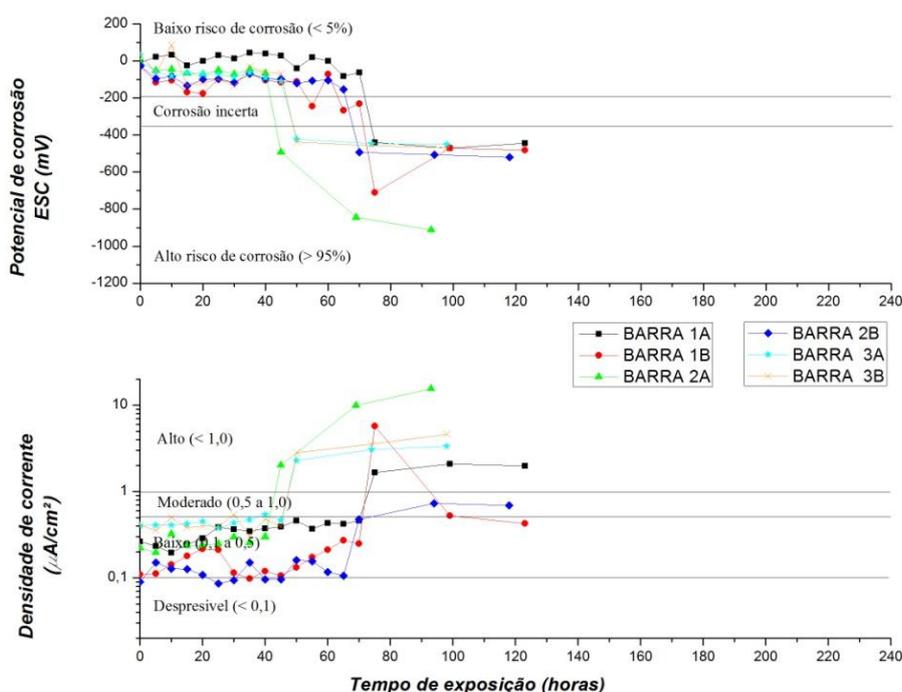


Figura 4.50 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C10% com cura de 28 dias.

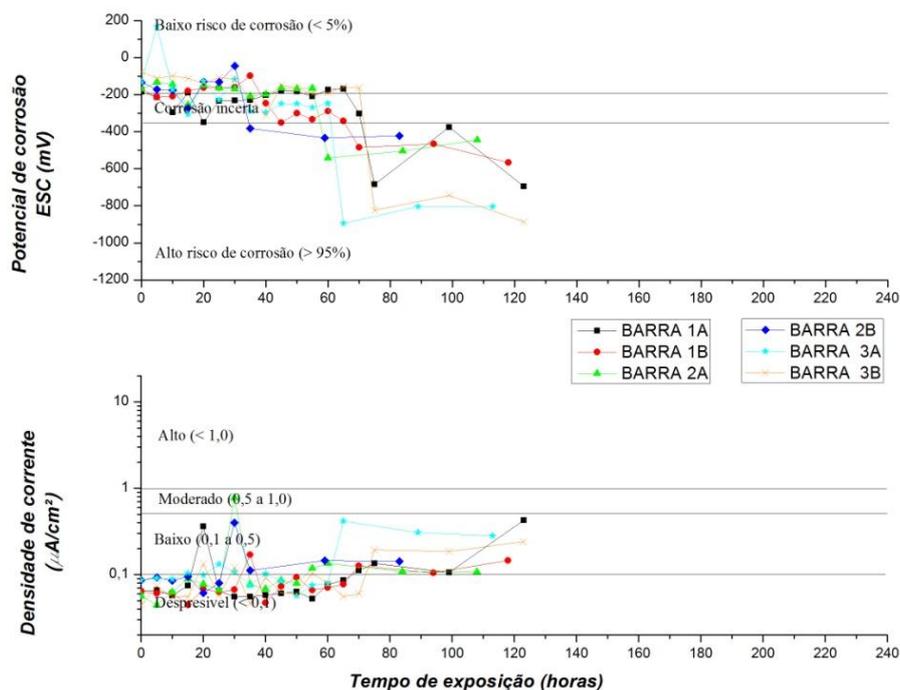
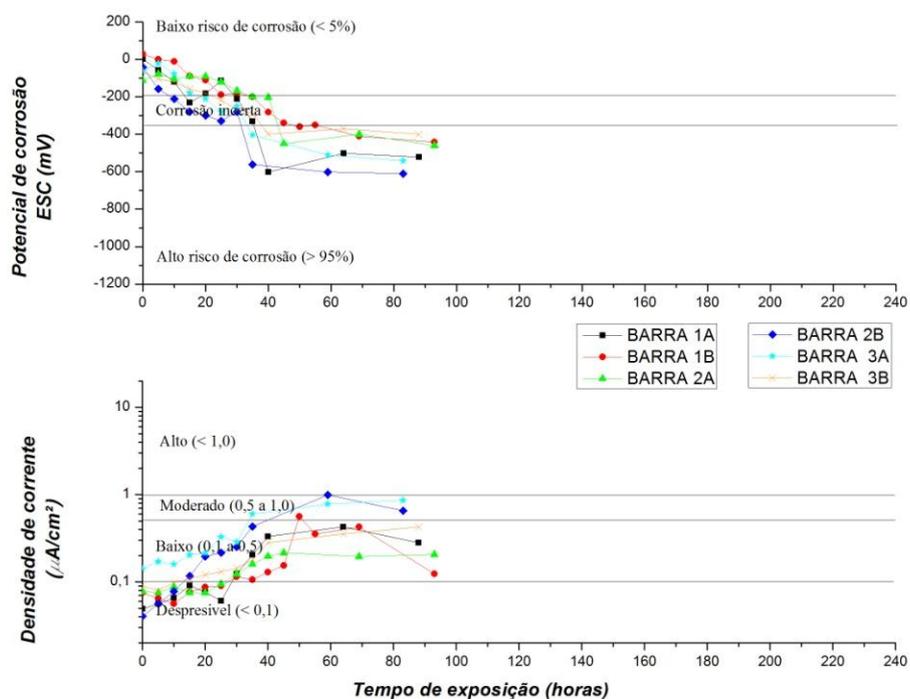


Figura 4.51 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza mecânica – Traço C30% com cura de 28 dias.



As Figuras em questão mostram uma tendência geral de despassivação na seguinte sequência: C30%, C10% e REF, para um mesmo tempo de cura. O tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de $40 \pm 4,47$ horas para C30%, $45 \pm 15,81$ horas para C10%, REF e $60,83 \pm 13,93$ horas para REF.

- **Barras com limpeza química**

Os resultados do monitoramento eletroquímico para a limpeza química com sete dias de cura estão apresentados nas Figuras 4.52, 4.53 e 4.54.

Figura 4.52 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 7 dias.

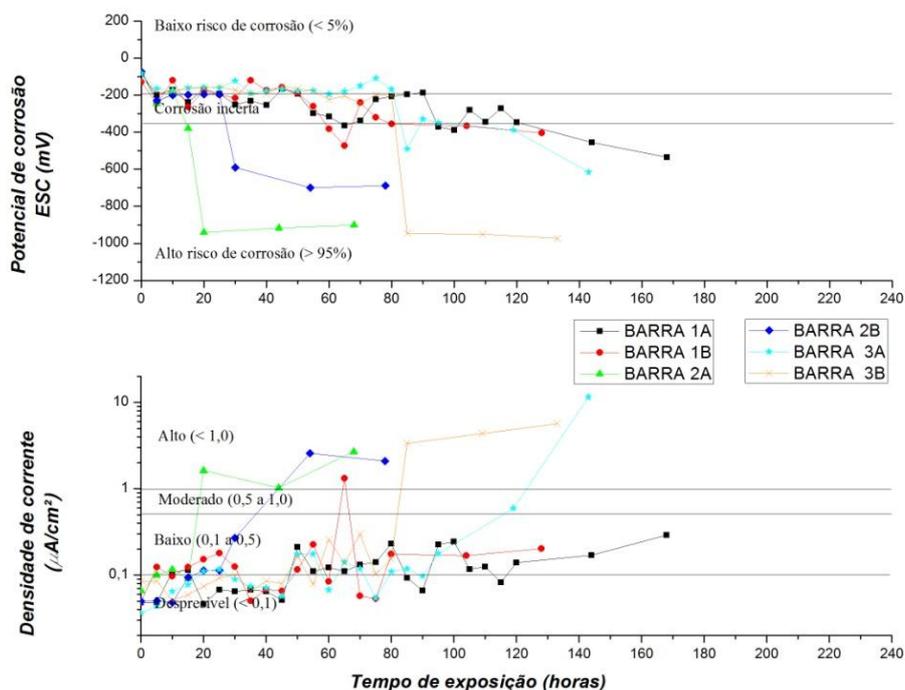


Figura 4.53 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 7 dias.

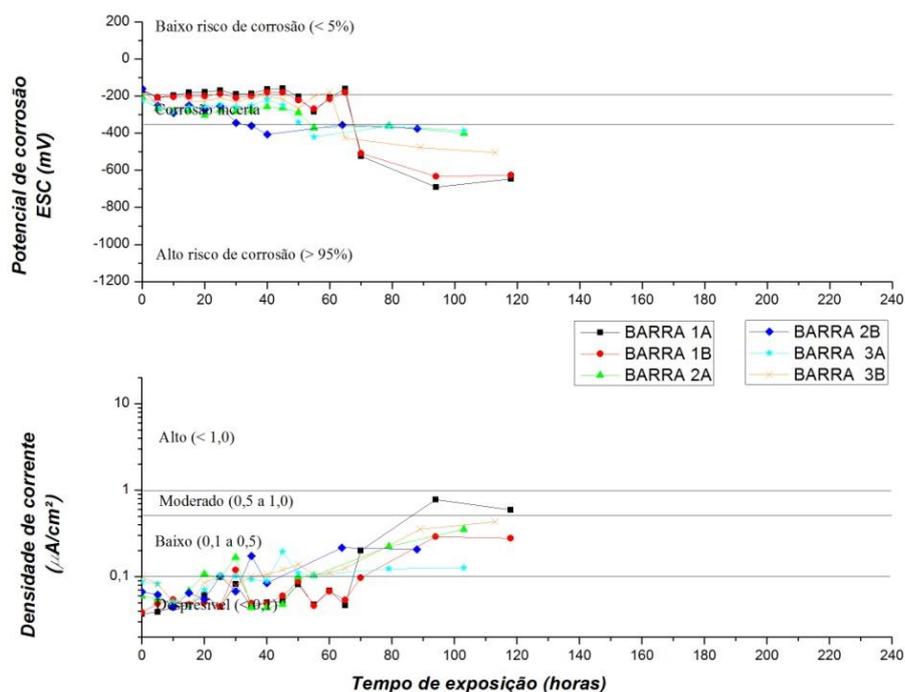
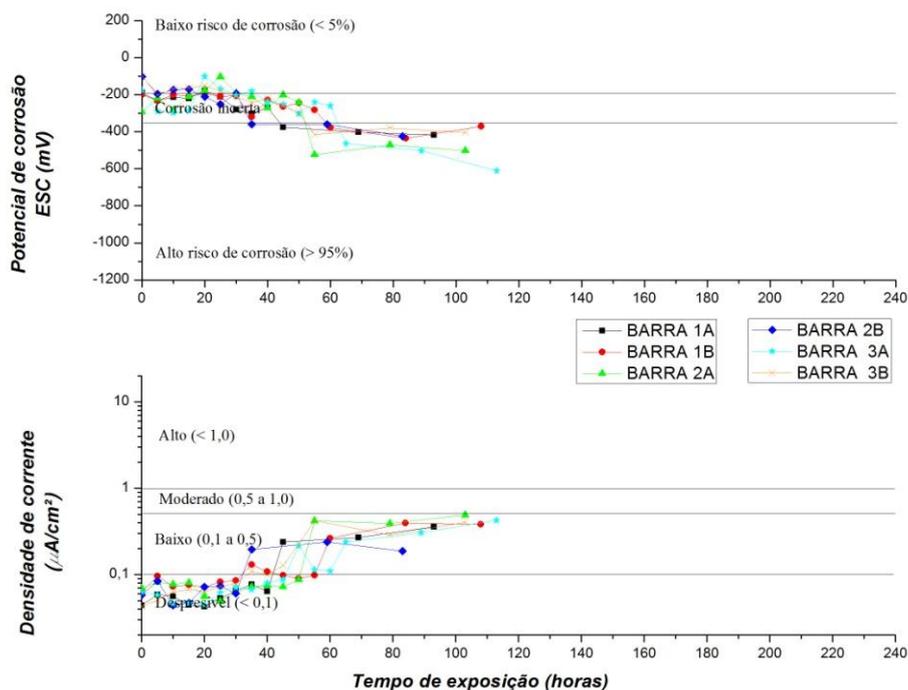


Figura 4.54 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 7 dias.



As Figuras 4.55, 4.56 e 4.57 mostram os resultados do monitoramento eletroquímico para os espécimes com limpeza química e tempo de cura de 28 dias.

Figura 4.55 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço REF com cura de 28 dias.

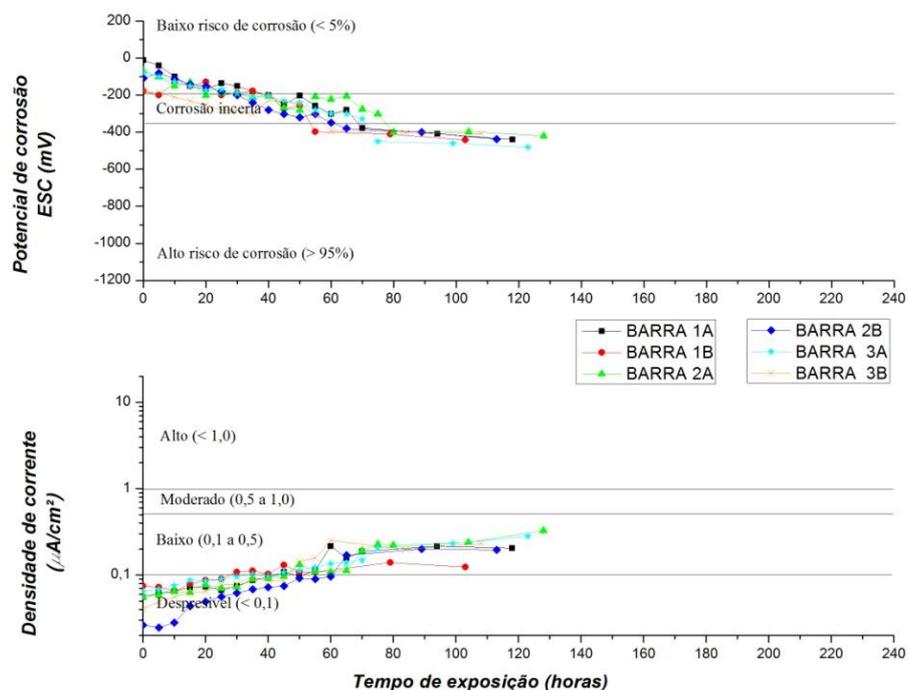


Figura 4.56 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C10% com cura de 28 dias.

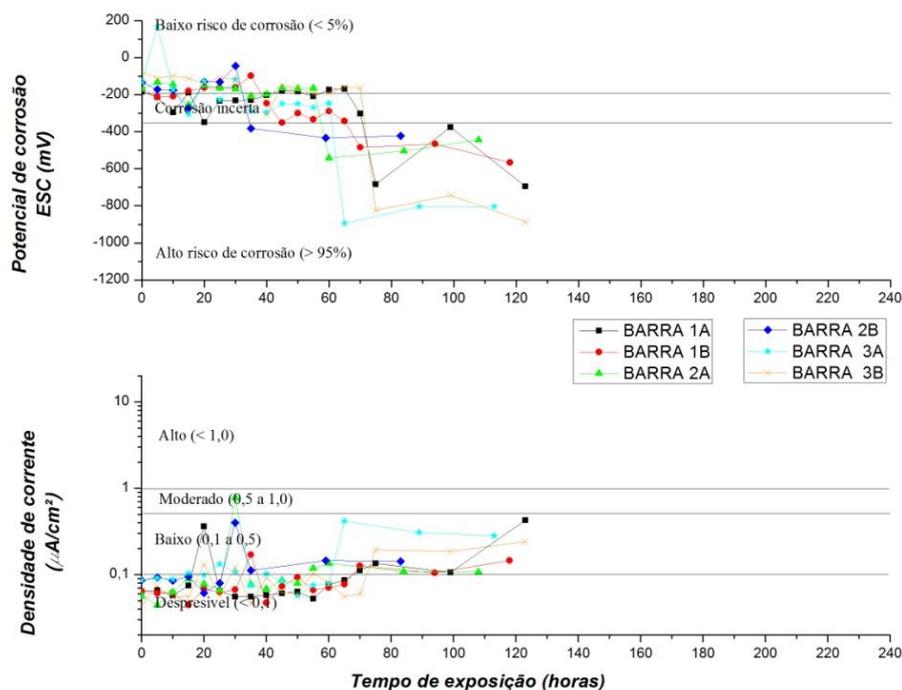
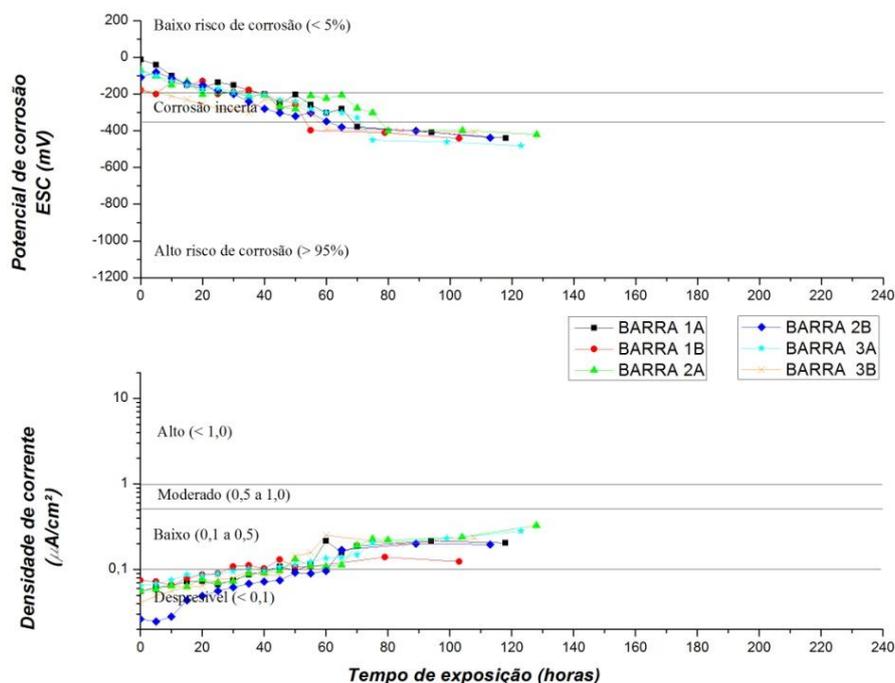


Figura 4.57 - Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão para as barras com limpeza química – Traço C30% com cura de 28 dias.



Partindo-se das Figuras 4.52, 4.53 e 4.54, obtemos que tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de $52,5 \pm 10,84$ horas para C30%, $59,17 \pm 11,58$ horas para C10%, REF e $71,67 \pm 38,8$ horas para REF.

Por fim, para as Figuras 4.55, 4.56 e 4.57 temos que o tempo médio para início da corrosão e o seu desvio padrão foram de $63,33 \pm 15,05$ horas para C10%, $67,5 \pm 9,35$ horas para C30% e $127,5 \pm 46,3$ horas para REF. De modo geral, percebe-se que a substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico reduz o tempo de exposição dos espécimes até a detecção do início do processo corrosivo. Esse comportamento é explicado pela mudança na alcalinidade do material com a substituição de cimento por RTM, conforme discutido no item 4.1.1. Tal redução na alcalinidade do material repercute diretamente na resistência ôhmica da película passivadora e, conseqüentemente, no monitoramento eletroquímico (CASCUDO, 1997).

Levando-se em consideração as variáveis independentes, observa-se que concretos com maior consumo de cimento, tempo de cura e limpeza das barras por ação química apresentam maior tempo de exposição ao ambiente deletério antes da despassivação das armaduras. As Tabelas 4.26 e 4.27 mostram os resultados de análise de variância e Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o tempo de despassivação.

Tabela 4.26 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o tempo de início da corrosão.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	12896,528	0,3251	6448,264	14,651	0,000
Limpeza da barra	1	14450,000	0,3643	14450,000	32,831	0,000
Cura	1	4512,500	0,1138	4512,500	10,252	0,002
Traço x Limpeza da barra	2	1814,583	0,0457	907,292	2,061	0,136
Traço x Cura	2	2289,583	0,0577	1144,792	2,601	0,083
Cura x Limpeza da barra	1	1512,500	0,0381	1512,500	3,436	0,069
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	2193,750	0,0553	1096,875	2,492	0,091
TOTAL CORRIGIDO	11	39292,68	1,0000	3295,48	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.27 – Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o tempo de início da corrosão.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	78,33	-
C10%	-	51,04
C30%	-	48,96

A partir da Tabela 4.26, percebe-se que, a um nível de confiança de 99%, as variáveis independentes: traço, tempo de cura e limpeza da barra apresentam diferenças estatisticamente significativas sobre o tempo de iniciação da corrosão, sendo, portanto, o traço e a limpeza da barra os maiores responsáveis por essa influência. Em relação ao Teste de

Tukey (Tabela 4.27) com um nível de confiança de 99%, os resultados mostram que há diferenças estatisticamente significativas entre concretos com e sem substituição de cimento por RTM.

Assim como nos ensaios de imersão e secagem, foram confeccionadas as Figuras 4.58 e 4.59, que mostram o comportamento relativo entre o potencial de corrosão - ESC (E_{corr}) e a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}). Apesar de haver uma dispersão considerável, principalmente nas leituras de barras com limpeza mecânica, dado o caráter estocástico do processo de corrosão e o efeito da polarização, ainda se observa uma relação linear entre o potencial de corrosão e o logaritmo da densidade de corrente. Os autores que aplicaram este tipo de método acelerado de corrosão por cloretos (eletromigração), não reportam tal relação linear; porém se percebe que à medida que os potenciais de corrosão decrescem, há um aumento na densidade de corrosão (CASTELLOTE *et al.*, 2002; TREJO *et al.*, 2009; ANGST *et al.*, 2011).

Figura 4.58 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza mecânica.

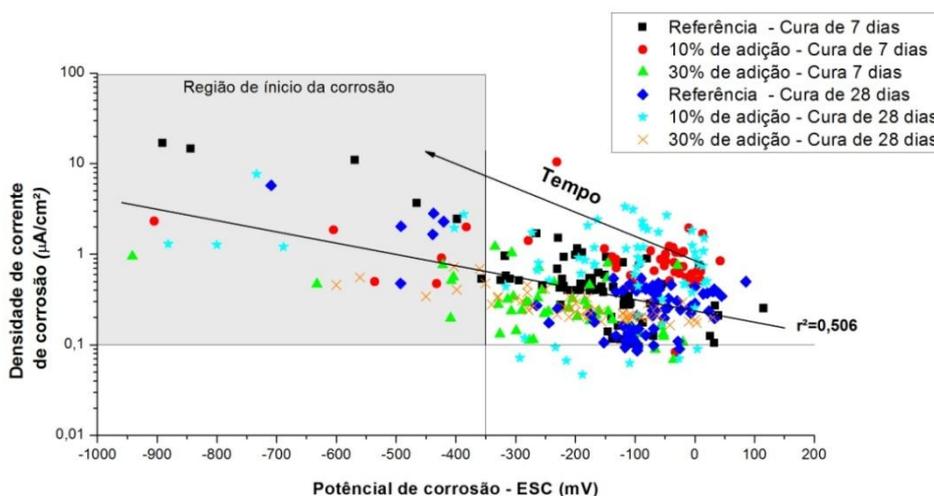
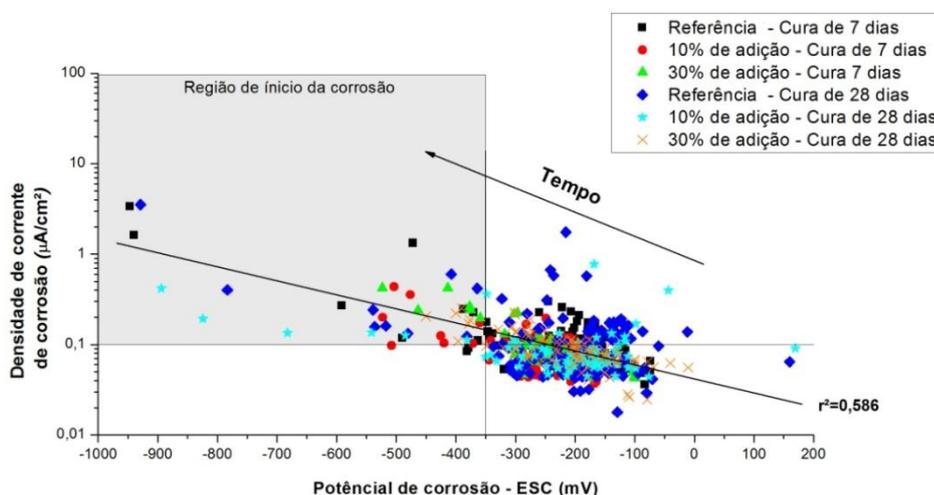


Figura 4.59 - Relação entre E_{corr} e i_{corr} para as barras com limpeza química.



A partir das Figuras 4.58 e 4.59, não foi possível observar para cada dosagem e tempo de cura, a influência das condições iniciais do eletrólito no ato da leitura dos parâmetros eletroquímica, ou seja, concretos com maiores consumos de cimento e/ou maiores graus de hidratação apresentariam leituras mais eletropositivas de potencial de corrosão – ESC e menores densidades de corrente de corrosão (PAGE, 1975; CASCUDO, 1997; ANGST *et al.*, 2009). Por conseguinte, os dados encontram-se dispersos dentro da faixa observada ($-1000 \leq E_{\text{corr}} \leq 200$), sem nenhuma tendência em relação às dosagens e aos tempos de cura.

Comparando-se os tipos de limpeza aplicados às barras no ato da confecção dos espécimes, observa-se pela inclinação da reta de regressão linear, uma melhor estabilidade e formação da película passivante nas barras com limpeza química. Neste caso, para uma determinada leitura de potencial de corrosão – ESC, observa-se uma menor resposta de densidade de corrente de corrosão se comparada às barras com limpeza mecânica.

4.2.2.3 Perfis de cloretos

Nesta seção são apresentados os perfis de cloretos livres e totais para os corpos de prova submetidos ao ensaio de eletromigração. Os perfis de cloretos, neste trabalho, nada mais são do que as concentrações de cloretos (porcentagem em relação à massa de aglomerante) em função das profundidades médias de cada amostra em relação à superfície. Em todos os perfis observados, percebe-se uma redução das concentrações de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade; fato esse observado por Castellote *et al.* (2002) que empregou o mesmo tipo de configuração desse ensaio.

Para os perfis obtidos, em sua grande maioria observa-se a formação de perfis clássicos de cloretos. Os perfis clássicos se caracterizam por apresentarem concentrações decrescentes de cloretos à medida que se penetra no concreto (CASCUDO, 1997). Em pouquíssimos casos, geralmente associados aos corpos de prova com maiores tempos de ensaios, os perfis de cloretos apresentaram o chamado perfil de duas zonas, conforme descrevem os segundo e terceiro parágrafos da seção 4.2.1.2.

- **Barras com limpeza mecânica**

As Figuras 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64 e 4.65 mostram os resultados dos perfis de cloretos livres e totais para as barras com limpeza mecânica e tempos de cura aplicados neste trabalho.

Figura 4.60 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 7 dias.

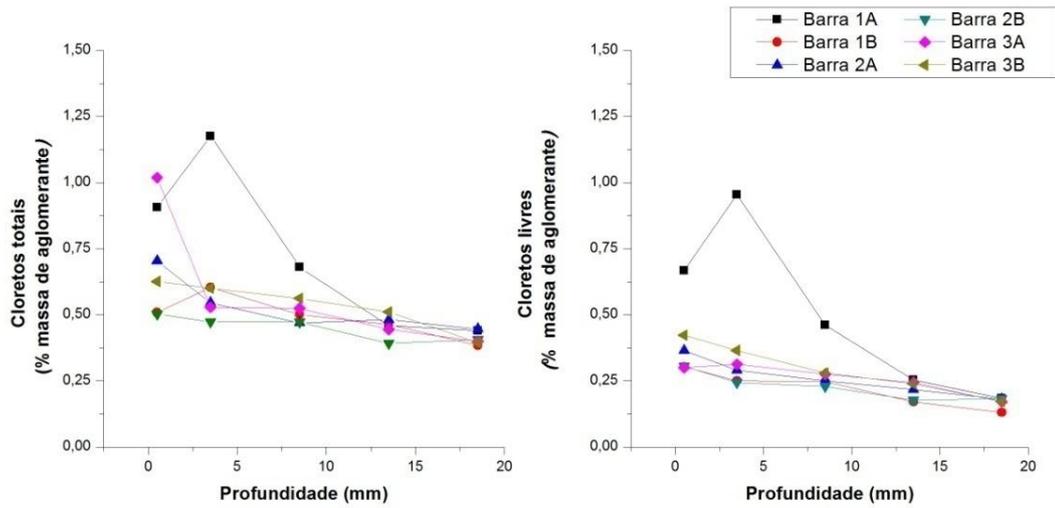


Figura 4.61 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 7 dias.

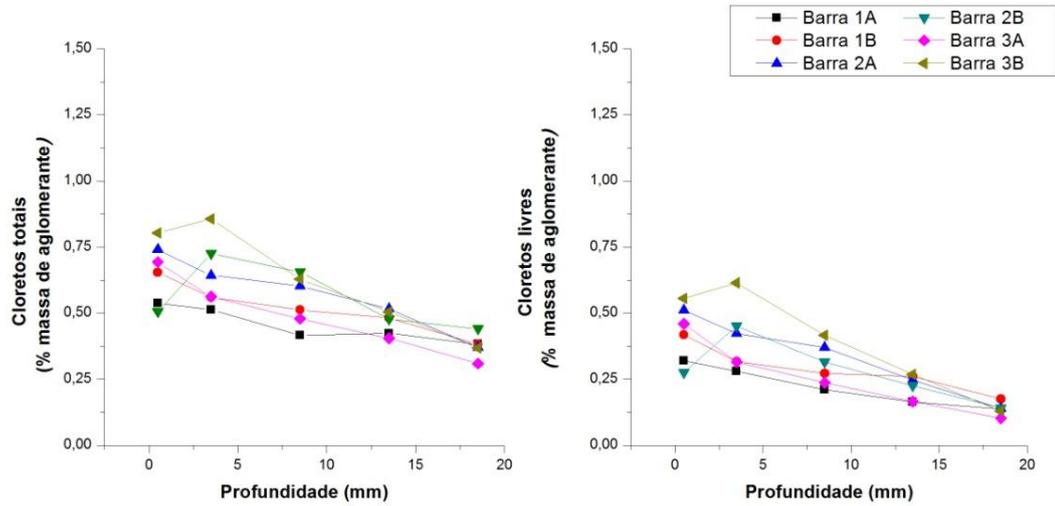


Figura 4.62 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 7 dias.

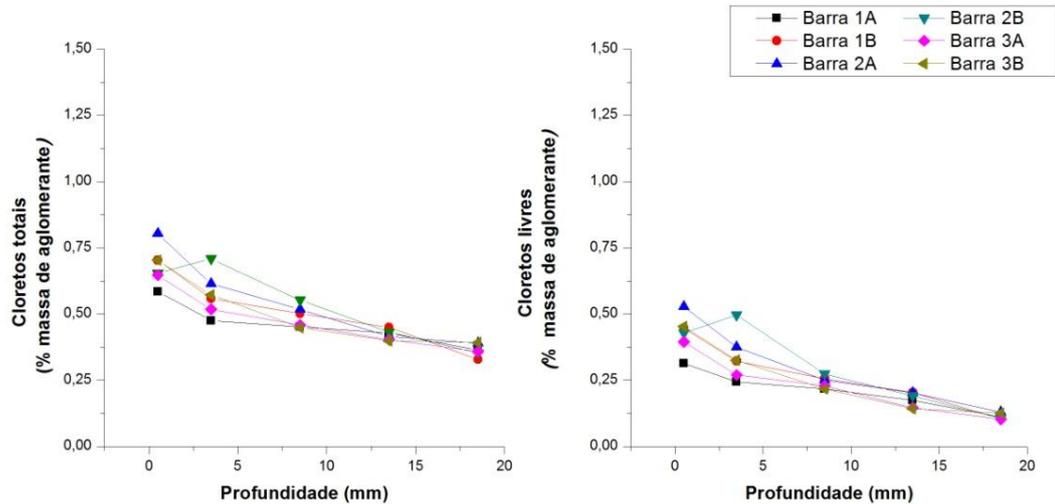


Figura 4.63 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço REF com cura de 28 dias.

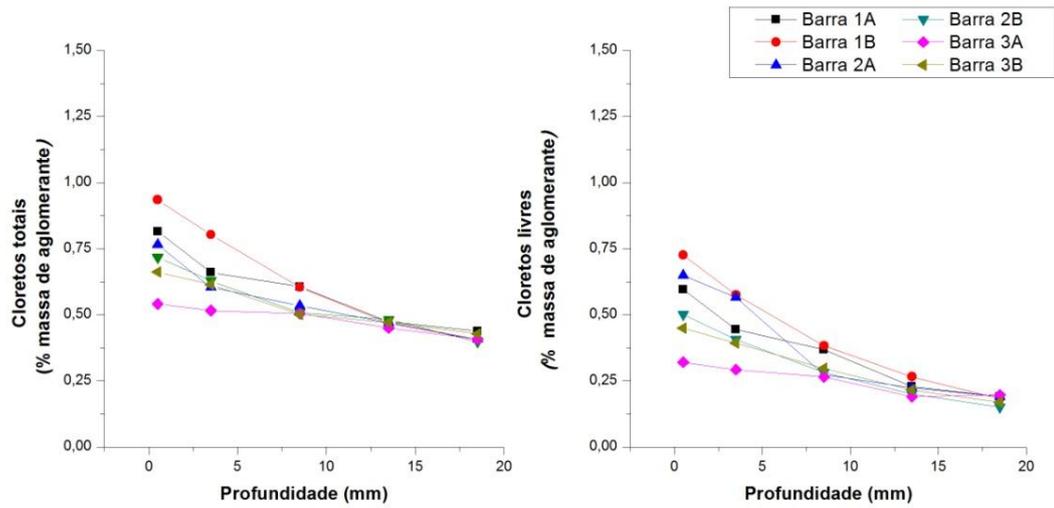


Figura 4.64 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C10% com cura de 28 dias.

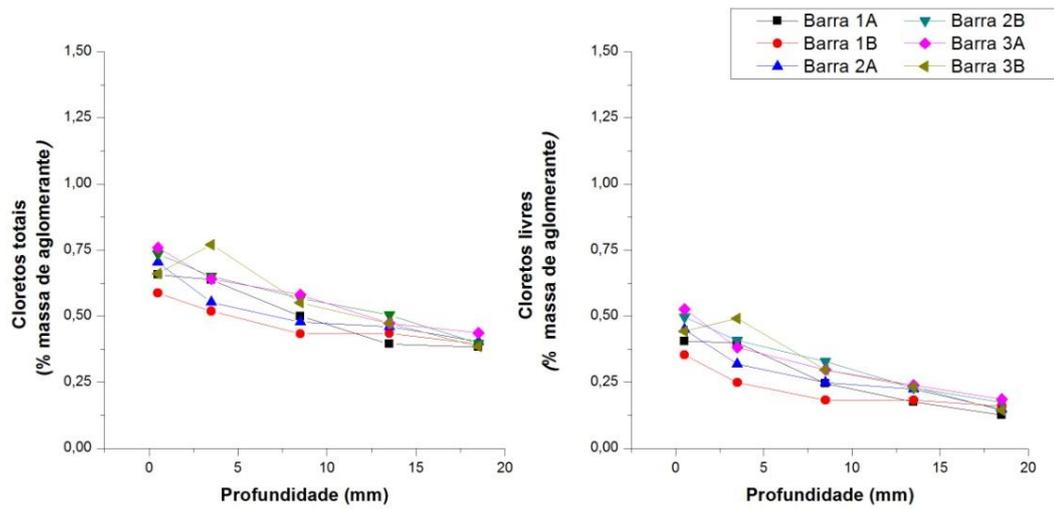
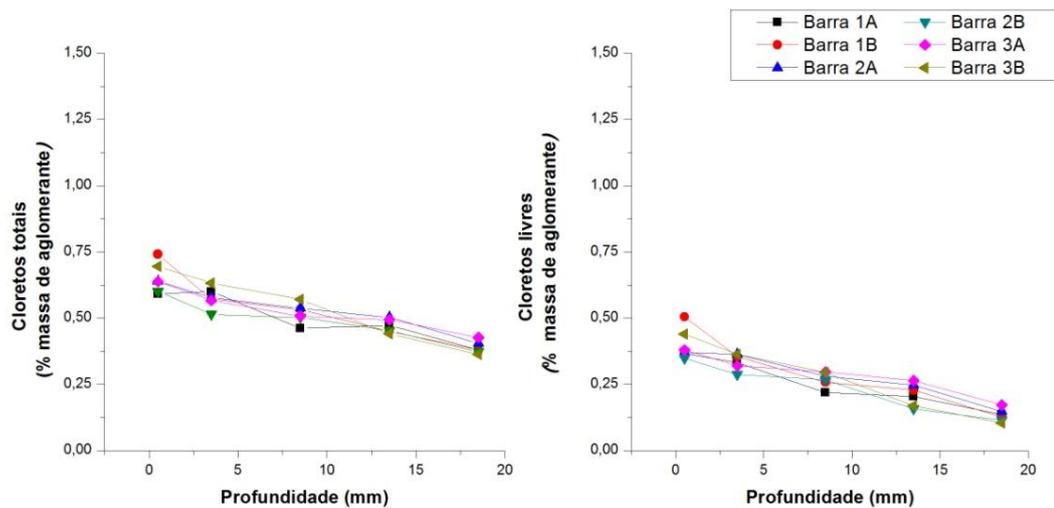


Figura 4.65 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza mecânica - Traço C30% com cura de 28 dias.



Comparadas as dosagens, os resultados mostram uma redução nas concentrações de cloretos livres e totais com a substituição de cimento por RTM, para todos os tempos de cura. Um aumento no tempo de cura propiciou um incremento sutil nas concentrações, camada a camada. Esse comportamento é explicado pelo tempo de ensaio.

- **Barras com limpeza química**

As Figuras 4.66, 4.67, 4.68, 4.69, 4.70 e 4.71 mostram os resultados dos perfis de cloretos livres e totais para as barras com limpeza química e tempos de cura aplicados neste trabalho.

Figura 4.66 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 7 dias.

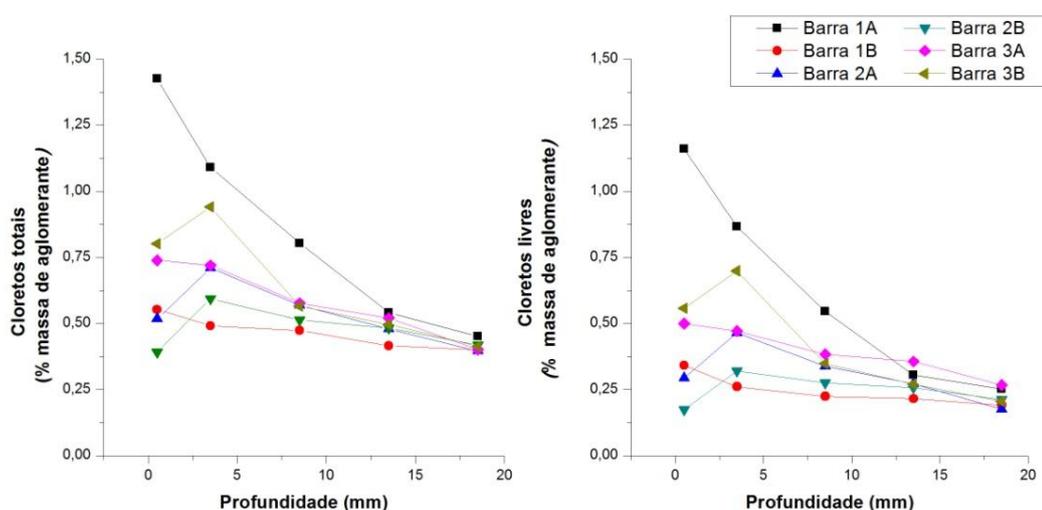


Figura 4.67 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 7 dias.

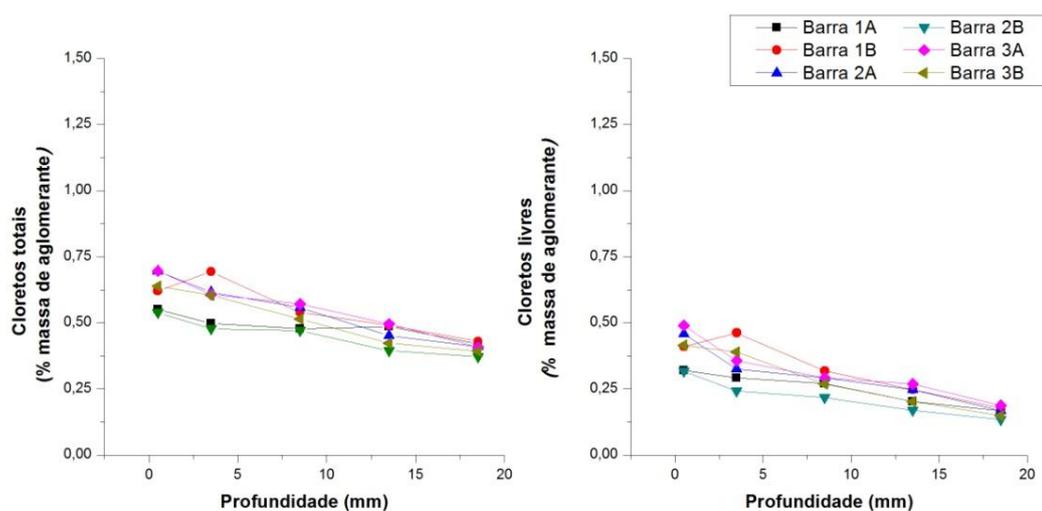


Figura 4.68 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 7 dias.

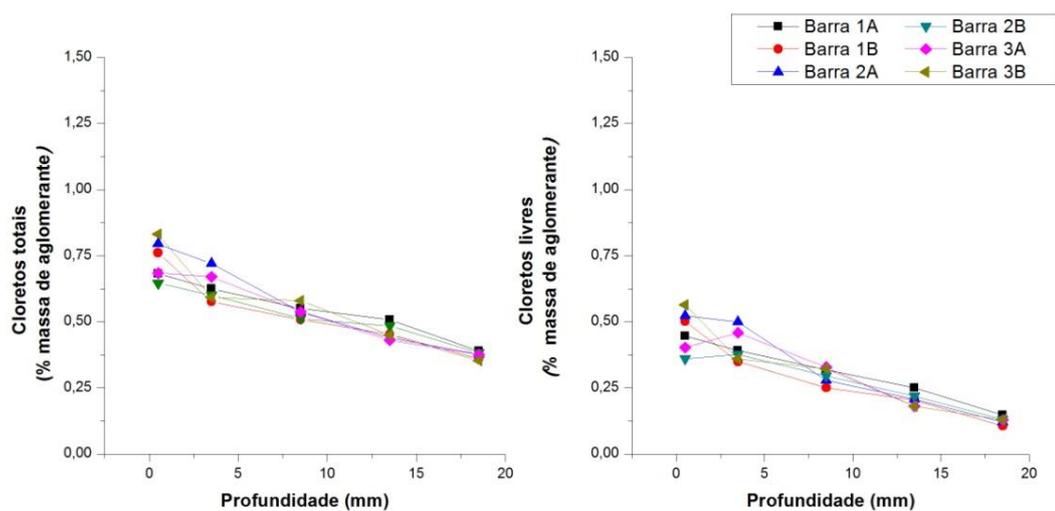


Figura 4.69 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço REF com cura de 28 dias.

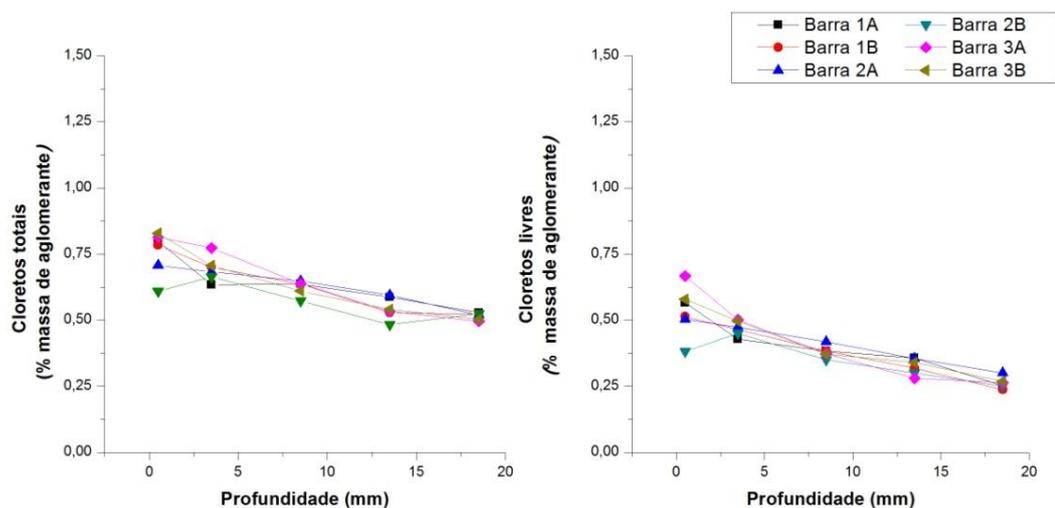


Figura 4.70 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C10% com cura de 28 dias.

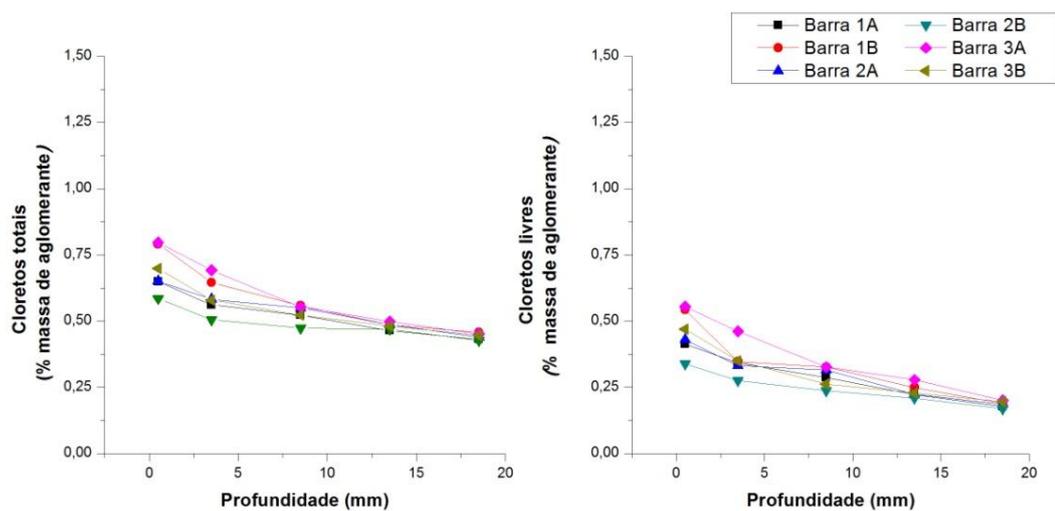
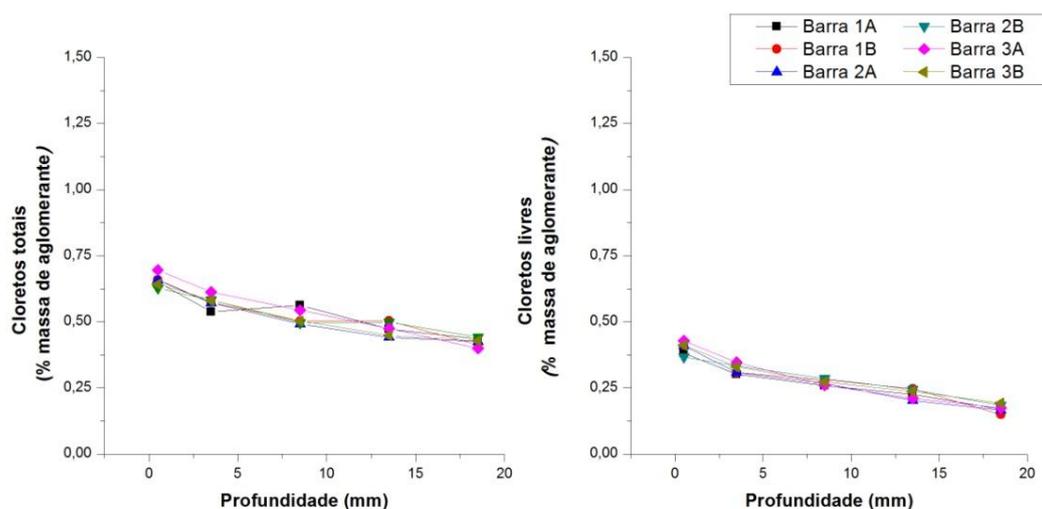


Figura 4.71 - Perfis de cloretos totais e livres para as barras com limpeza química - Traço C30% com cura de 28 dias.



Para as dosagens empregadas, percebe-se a influência da substituição de cimento por RTM, logo, quanto maior a substituição de cimento por RTM, menores as concentrações de cloretos livres e totais, camada a camada; fato esse observado em todos os perfis com armaduras limpas por ação química ou mecânica e em todos os tempos de cura. Um aumento do tempo de cura também garantiu um pequeno aumento nas concentrações de cloretos. Esse comportamento é, principalmente, explicado pelo tempo de ensaio.

Assim como nos perfis de cloretos em concretos submetidos a ensaio acelerado por imersão e secagem, observou-se um aumento nas concentrações de cloretos livres e totais, camada a camada, com o uso da limpeza das barras por ação química em comparação com as barras limpas por ação mecânica. A princípio, não há nenhuma relação entre os tipos de limpeza realizadas nas armaduras com os perfis de cloretos. Porém, os perfis de cloretos têm enorme dependência com o tempo de ensaio. Portanto, as barras limpas quimicamente, tiveram maiores períodos de ensaios do que as barras limpas por ação mecânica, o que, conseqüentemente, influenciaram nas concentrações de cloretos livres e totais.

4.2.2.4 Fixação de cloretos a matriz cimentícia

A partir dos resultados apresentados na seção anterior, foram empregados ajustes à Equação 4.3, apresentada na seção 4.2.1.3, cujo objetivo é entender a relação entre cloretos livres e totais e sua fixação à matriz cimentícia. Os resultados dos ajustes estão apresentados nas Tabelas 4.28 e 4.29. Os procedimentos para obtenção dos parâmetros se deram de forma análoga aos concretos submetidos a ensaio por imersão e secagem (ver seção 4.2.1.3). A partir do coeficiente de determinação (r^2), percebe-se pouca dispersão entre os ajustes e os pontos titulados, portanto os ajustes representam bem a relação entre cloretos livres e totais.

Com o objetivo de facilitar a visualização dos dados, foram confeccionadas as Figuras 4.72 (a) e 4.73 (a). Elas mostram as curvas obtidas pelos ajustes e os pares ordenados dos pontos titulados. Já nas mesmas figuras foram realizadas ampliações de modo a mostrar as diferentes curvas, Figuras 4.72 (b) e 4.73 (b). Delas, percebe-se uma proximidade considerável entre as curvas, principalmente nos corpos de prova com substituição de cimento por resíduo cerâmico. Via de regra, concretos com maiores substituição de cimento por RTM e maiores tempos de cura, apresentam uma maior capacidade de fixação de cloretos à matriz. As Figuras 4.72(b) e 4.73(b) facilitam a visualização.

Apesar de nas Figuras 4.72 (a) e 4.73 (a) se observar que os concretos de referência com 28 dias de cura apresentem menor capacidade de fixação do que os demais, esse fato não corresponde à realidade em virtude dos erros provocados pelos ajustes à Equação 4.3.

Tabela 4.28 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.

Tipo de concreto	Parâmetros			
	α (L/g _{cim})	β (L/g _{cL})	w (L/g _{cim})	r ²
Referência com 7 dias de cura	3,23E-04	0,142	1,08E-05	0,739
Referência com 28 dias de cura	3,50E-04	0,196	1,00E-04	0,916
C10% com 7 dias de cura	3,13E-04	0,128	3,68E-06	0,956
C10% com 28 dias de cura	3,15E-04	0,127	1,90E-06	0,979
C30% com 7 dias de cura	3,28E-04	0,134	2,11E-06	0,981
C30% com 28 dias de cura	3,21E-04	0,134	1,36E-05	0,956

Figura 4.72 – Relação $Cl_{tot} \times Cl_{liv}$ para concretos cuja armadura passou por limpeza mecânica.

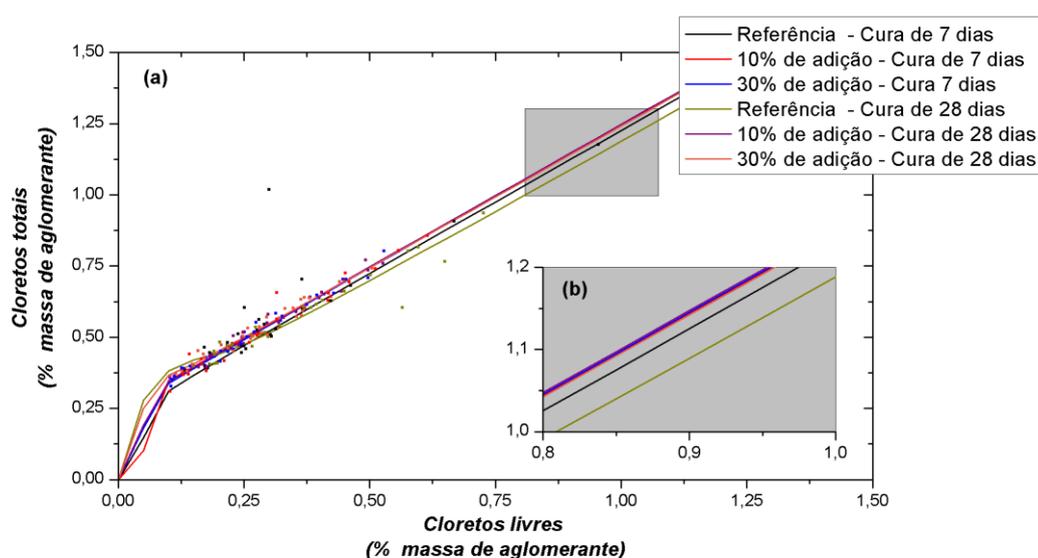
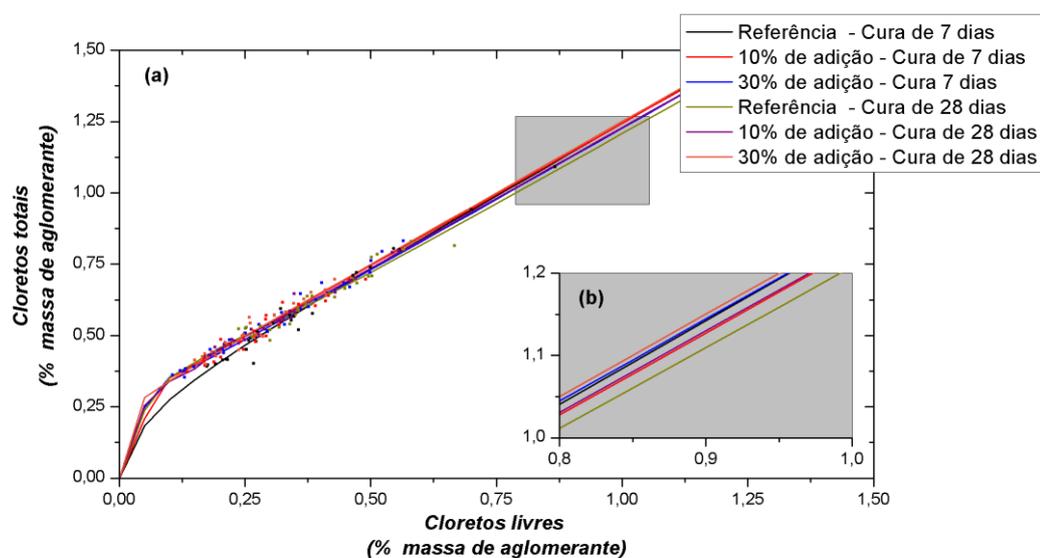


Tabela 4.29 – Resultados dos ajustes da Eq. 4.3 (Isotermas de Langmuir) aos dados referentes aos concretos cuja armadura passou por limpeza química.

Tipo de concreto	Parâmetros			
	α (L/g _{cim})	β (L/g _{cL})	w (L/g _{cim})	r ²
Referência com 7 dias de cura	3,08E-04	0,121	5,48E-05	0,986
Referência com 28 dias de cura	3,27E-04	0,166	9,1E-05	0,919
C10% com 7 dias de cura	4,19E-04	0,187	2,3E-05	0,939
C10% com 28 dias de cura	4,24E-04	0,189	4,2E-05	0,975
C30% com 7 dias de cura	3,12E-04	0,128	3,6E-06	0,976
C30% com 28 dias de cura	4,98E-04	0,198	8,01E-06	0,934

Figura 4.73 - Relação CI_{tot} x CI_{liv} para concretos cuja armadura passou por limpeza química.



Com o objetivo de analisar a interferência das variáveis independentes: tipo de limpeza, tempo de cura, profundidade e dosagem empregada, foi confeccionada a Tabela 4.30. Ela mostra os resultados de análise de variância para cloretos combinados à matriz cimentícia. Sabendo que a variável traço apresenta três subgrupos e é estatisticamente significativa, foi empregado o Teste de Tukey para avaliar a significância, caso a caso (Tabela 4.31).

Partindo-se dos resultados apresentados na Tabela 4.30, apenas a influência do traço sobre o teor crítico de cloretos combinados foi estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. Mais uma vez, os resultados de ANOVA mostram que a fixação de cloretos ao concreto é algo relacionado apenas às características da matriz cimentícia, tendo em vista que nem a limpeza da barra nem a profundidade de análise interferiam nos resultados.

Partindo-se do pressuposto que o resíduo cerâmico tem atividade pozolânica, mostrado nos ensaios de TG, deduzimos que a produção de gel de CSH e que o grau de hidratação amplia essa fixação de cloretos. Portanto, temos que não só os aluminatos colaboram para a

fixação de cloretos, mas também o gel de CSH (ENEVOLDSEN *et al.*, 1994). Do Teste de Tukey (Tabela 4.31), observa-se que há diferenças significativas entre os subconjuntos 1 (REF) e 2 (C10% e 30%).

Tabela 4.30 – Resultados da Análise de variância (ANOVA) para os cloretos combinados.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,013	0,1150	0,006	4,763	0,009
Limpeza	1	0,003	0,0265	0,003	1,933	0,165
Cura	1	0,000	0,0000	0,000	0,131	0,718
Profundidade	4	0,002	0,0177	0,000	0,377	0,825
Traço x Cura	2	0,002	0,0177	0,001	0,850	0,428
Traço x Limpeza	2	0,008	0,0708	0,004	2,893	0,057
Traço x Profundidade	8	0,009	0,0796	0,001	0,812	0,593
Limpeza x Cura	1	0,007	0,0619	0,007	5,021	0,026
Limpeza x Profundidade	4	0,002	0,0177	0,001	0,416	0,797
Cura x Profundidade	4	0,012	0,1062	0,003	2,219	0,067
Traço x Limpeza x Cura	2	0,011	0,0973	0,006	4,208	0,016
Traço x Limpeza x Profundidade	8	0,008	0,0708	0,001	,749	0,648
Traço x Cura x Profundidade	8	0,024	0,2124	0,003	2,220	0,026
Limpeza x Cura x Profundidade	4	0,004	0,0354	0,001	0,776	0,541
Traço x Limpeza x Cura x Profundidade	8	0,008	0,0708	0,001	0,765	0,634
TOTAL CORRIGIDO	59	0,113	1,0000	0,313	-	-

Tabela 4.31 – Teste de Tukey para o efeito isolado sobre os cloretos combinados.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	0,2338	-
C10%	-	0,2416
C30%	-	0,24834

4.2.2.5 Transporte de cloretos

A aplicação de um campo elétrico para indução de transporte de cloretos no interior do concreto modifica o tipo de mecanismo de transporte de íons, o que por consequência interfere na lei física que governa o fenômeno natural. Estudos na área de eletromigração tentam fazer uma analogia entre a migração iônica e a difusão. Um desses estudos foi proposto por Castellote *et al.* (2000), no qual segundo os autores do estudo, a partir da quantidade de carga passante através do concreto no estado não estacionário e da Lei de Faraday é possível calcular a quantidade de cloretos que penetrou na amostra e o coeficiente

de migração (D_{mig}). Além disso, de forma integrada ao passo anterior, é acrescentada a concentração superficial (C_s) e a segunda Lei de Fick, permitindo a obtenção do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Sendo assim, qualquer problema de migração é resolvido analogamente a partir de um conhecido problema de difusão (CASTELLOTE *et al.*, 2002).

O ponto de partida para a determinação dos parâmetros que governam o transporte deu-se através das equações de Nernst-Planck (Equação 4.9) e de Castellote *et al.* (2000) (Equação 4.10), obtendo a Equação 4.11.

$$D_{mig} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \frac{x_d - 1,601x_d^{0,589}}{t_e} \quad (4.9)$$

Onde:

D_{mig} é o coeficiente de migração, em cm^2/s ;

R é o coeficiente universal dos gases, 8.3144 J/mol.K ;

T é a temperatura do ambiente (25°C), em graus Kelvin;

z é a valência do íon, para cloretos é -1;

F é a constante de Faraday, $96485,33 \text{ J/V.mol}$;

E é o campo elétrico, em V/m ;

x_d é a profundidade de penetração, em metro;

t_e é o tempo de ensaio, em segundos.

$$D_{mig} = \frac{z \times F}{R \times T} \frac{\Delta V}{2Ln(100x_d)} D_{ns} \quad (4.10)$$

Onde:

D_{mig} é o coeficiente de migração, em cm^2/s ;

z é a valência do íon, para cloretos é -1;

F é a constante de Faraday, $96485,33 \text{ J/V.mol}$;

R é o coeficiente universal dos gases (8.3144 J/mol.K);

T é a temperatura do ambiente (25°C), em graus Kelvin;

ΔV é a diferença de potencial, em volts;

x_d é a profundidade de penetração, em metro.

$$D_{ns} = \frac{2Ln(100x_d)}{\Delta V} \frac{x_d - 1,601x_d^{0,589}}{t_e} \quad (4.11)$$

Associando a segunda Lei de Fick (Equação 4.4) com a Equação 4.11, obtemos a Equação 4.12. Sendo x_d a máxima penetração de cloretos livres, temos que a concentração na profundidade x_d é igual à concentração inicial (Equação 4.13). A obtenção da concentração superficial de cloretos (C_s) se deu através dos ajustes aos perfis experimentais de cloretos livres (seção 4.2.2.3) com base na Equação 4.12, com a condição de contorno proposta na Equação 4.13. Os ajustes se procederam conforme discutido no item 4.2.1.4. Após o ajuste em cada espécime, com o valor de x_d obtém-se os valores de coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}). Os ajustes aos perfis de cloretos totais partiram dos valores de x_d obtidos na interação dos perfis de cloretos livres em cada CP, os quais, em seguida, foram aplicados à equação 4.11.

$$C(x, t) = C_s + (C_0 - C_s)erf \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{2Ln(100x_d)}{\Delta V} \frac{x_d - 1,601x_d^{0,589}}{t_e} t}} \right) \quad (4.12)$$

$$C(x_d, t) = C_0 \quad (4.13)$$

Mais uma vez, ressaltamos que tais ajustes são uma simplificação da realidade, partindo do pressuposto de que o coeficiente de difusão e a concentração superficial são considerados constantes, embora se saiba que os mesmos variem com o tempo, a temperatura e a capacidade de fixar cloretos da matriz cimentícia. Nos ajustes em questão, foram considerados os perfis de cloretos no momento da despassivação da armadura. Dessa forma, os parâmetros C_s e D_{ns} apresentam idades diferenciadas em função do período de início da corrosão. Assim, esse aspecto deve ser ponderado nas considerações aqui realizadas, mesmo considerando o longo período de cura e repouso (90 dias), tal período minimiza essa diferença. Os resultados dos ajustes à Equação 4.12 estão apresentados no Apêndice C deste trabalho. As discussões, a seguir, tomaram como base os parâmetros de transportes (C_s e D_{ns}) obtidos nos ajustes aos perfis de cloretos livres, uma vez que os cloretos os livres são os principais agentes que deflagram a corrosão (ANGST *et al.*, 2009).

Analisando os resultados contidos no Apêndice C, percebe-se que os ajustes à Equação 4.12 apresentam altíssimos coeficientes de determinação (r^2), o que nos indica que os ajustes representam muito bem os valores obtidos na titulação. Para os parâmetros obtidos pelos ajustes, observamos que a penetração máxima de cloretos livres (x_d) varia com o tempo

de ensaio, com o tempo de cura e com as dosagens empregadas. Assim, quanto menores forem os tempos de ensaios, os tempos de cura e as substituições de cimento por resíduo cerâmico, menor será a penetração de cloretos através do concreto.

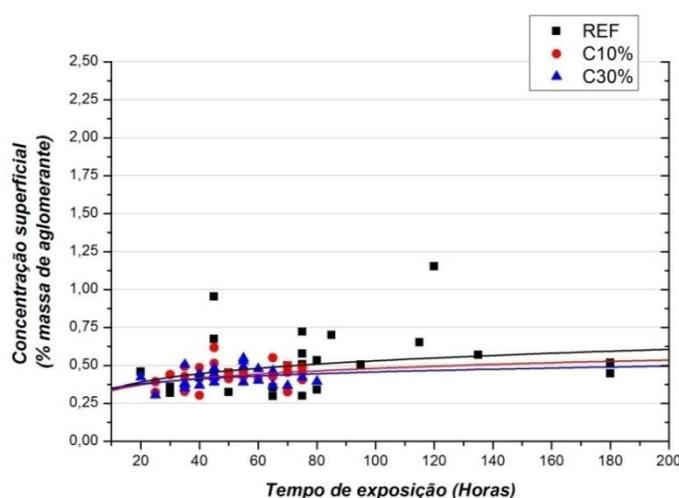
Já para as concentrações superficiais (C_s), foram empregados ajustes à Equação 4.5 discutida na seção 4.2.1.3. Os parâmetros (K_s e n) estão apresentados na Tabela 4.32. A Figura 4.74 mostra os resultados das concentrações superficiais e os ajustes à Equação 4.5, todos em função do tempo de exposição. Em uma mesma dosagem, percebe-se uma dispersão considerável entre os dados motivados pelos ajustes aos perfis de cloretos. À medida que se substitui cimento por resíduo, essa mesma dispersão é reduzida em virtude da maior fixação de cloretos à matriz de concreto.

A partir dos resultados, percebe-se a influência do tempo de exposição sobre C_s , logo, quanto maior o tempo de exposição, maior a concentração superficial (C_s). Outra variável independente que interferiu nos resultados foi a substituição de cimento por RTM, porém de forma menos intensa que o tempo de exposição. A dosagem influencia diretamente na porosidade do material que, por consequência, interfere no tempo de exposição ao ambiente contendo cloretos.

Tabela 4.32 – Ajustes na concentração superficial para os tipos de traço.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	K_s (%/hora ⁿ)	n	r^2
Referência	0,2200	0,1912	0,4856
C10%	0,2318	0,1583	0,6993
C30%	0,2668	0,1169	0,6775

Figura 4.74 - Concentração superficial *versus* tempo de exposição.



Por fim, temos as discussões acerca do coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}). Os valores apresentados no Apêndice C mostram os coeficientes de

difusão no ato da despassivação, ou seja, em idades diferenciadas. Com o objetivo de tornar esses dados comparáveis, foram aplicados aos dados ajustes à Equação 4.6. Os parâmetros de regressão (D_0 e m) estão nas Tabelas 4.33 e 4.34. Tomou-se como base para a idade de referência dos coeficientes de difusão (D_{ns}) a idade dos corpos de prova no início dos ensaios acelerados de corrosão (90 dias). A Figura 4.75 mostra os coeficientes de difusão, para os diferentes tipos de limpeza e cura em função do percentual de substituição de cimento por resíduo.

Figura 4.75 – Coeficiente de difusão (90 dias) e o Índice de vazios (90 dias) em relações ao percentual de RTM, para ambas as limpezas da barra e tempos de cura.

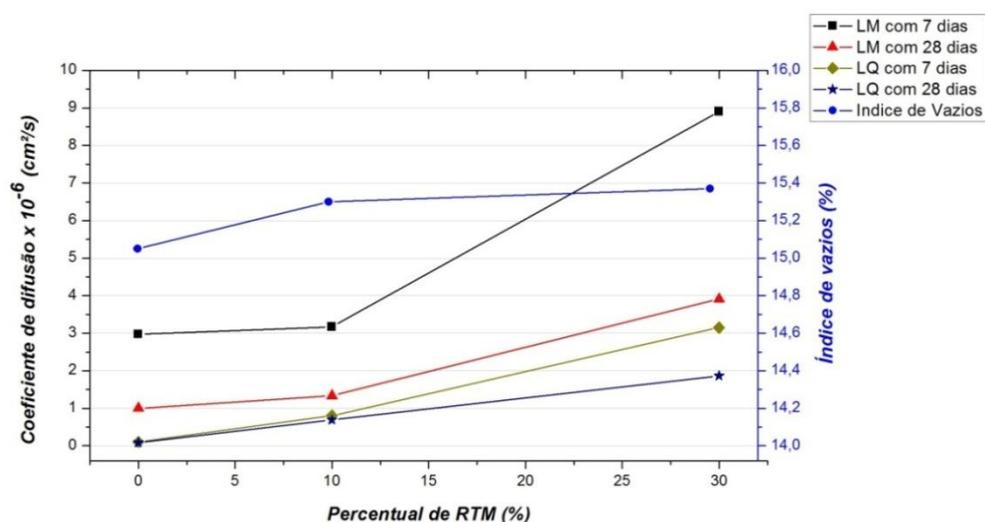


Tabela 4.33 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com limpeza mecânica das barras.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	D_0 ($\times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$)	m	r^2
Referência com 7 dias de cura	2,976	0,122	0,441
Referência com 28 dias de cura	0,997	0,209	0,631
C10% com 7 dias de cura	3,170	0,124	0,796
C10% com 28 dias de cura	1,330	0,781	0,965
C30% com 7 dias de cura	8,912	0,173	0,723
C30% com 28 dias de cura	3,911	0,486	0,814

Tabela 4.34 – Resultados dos ajustes da Equação 4.6 aos dados de coeficiente de difusão para os concretos com limpeza química das barras.

Tipo de concreto	Parâmetros		
	D_0 ($\times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$)	m	r^2
Referência com 7 dias de cura	0,102	0,192	0,612
Referência com 28 dias de cura	0,083	0,310	0,563
C10% com 7 dias de cura	0,806	0,682	0,973
C10% com 28 dias de cura	0,690	0,511	0,979
C30% com 7 dias de cura	3,150	0,483	0,781
C30% com 28 dias de cura	1,867	0,411	0,876

Partindo-se das dosagens empregadas, percebemos um aumento no coeficiente de difusão com a substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído. Fato observado também nos resultados dos índices de vazios. Dessa forma, a substituição de cimento por RTM influenciou diretamente no índice de vazios, que tiveram como consequência um aumento na velocidade de transporte dos agentes agressivos. A substituição de 10% de cimento por RTM influenciou levemente em um incremento nos resultados dos coeficientes de difusão se comparados aos concretos de referência (Figura 4.75).

As demais variáveis também influenciaram nos resultados de D_{ns} . Sendo assim, quanto maior o tempo de cura, menor o coeficiente de difusão. Este comportamento é explicado pelo aumento no grau de hidratação do concreto com o aumento do tempo de cura que, por sua vez, reduz a porosidade do material. Assim como nos ensaios de imersão e secagem, o tipo de limpeza aplicada nas barras apresentou influência no tempo de ensaio e, conseqüentemente, nos ajustes à Equação 4.12 que originaram o coeficiente de difusão. A princípio, o coeficiente de difusão não apresenta nenhuma relação com o tipo de limpeza empregada nas barras. Porém, as barras limpas quimicamente apresentaram um maior tempo necessário para iniciar a corrosão. Tal período influenciou diretamente nos ajustes.

4.2.2.6 Teor crítico de cloretos

Tendo em mãos os ajustes realizados no item 4.2.2.5, os valores de teores críticos de cloretos foram obtidos a partir do ponto em que a curva ajustada toca a armadura, conforme procedimento descrito na seção 4.2.1.5. Esse procedimento foi empregado tanto para os teores de cloretos livres como para totais. Com os valores de teores críticos, foi empregada a técnica de análise de dados espúrios (Teste de Chauvenet), obtendo-se um conjunto de dados mais consistentes e representativos da amostra. A Figura 4.76 mostra os resultados médios e desvios padrões dos teores críticos para cloretos livres, após a aplicação do Teste de Chauvenet, além de mostrar os resultados de alcalinidade dos poros do concreto com idade de 90 dias. Já as Tabelas 4.35 e 4.36 mostram, respectivamente, os resultados de análise de variância e do Teste de Tukey para o efeito isolado do traço sobre os resultados de teores críticos de cloretos livres.

A partir da Figura 4.76, observa-se que a substituição de cimento por RTM reduz progressivamente os teores críticos de cloretos livres, para todos os tempos de cura e tipos de limpeza da barra. A principal explicação para este comportamento é a redução na alcalinidade do concreto com a substituição de cimento por RTM (PAGE, 1975; ANGST *et al.*, 2009). A redução do pH dos poros se deve à redução no consumo de cimento em cada traço e às

possíveis reações pozolânicas entre o cimento e o RTM. As reações pozolânicas reduzem a quantidade de portlandita, principal produto da hidratação do cimento responsável pela alcalinidade do concreto (CASCUDO, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008). Os resultados de ANOVA mostram que os traços utilizados apresentaram diferenças significativas sobre o resultado, a um nível de confiança de 99% (Tabela 4.35). Por fim, na Tabela 4.36, o Teste de Tukey mostra que cada percentual de substituição de cimento por resíduo apresentou diferença significativa sobre o teor crítico de cloretos. Por conseguinte, cada dosagem apresenta valores de teores críticos de cloretos livres diferenciados.

Figura 4.76 – Teor crítico de cloretos livres em função do percentual de RTM.

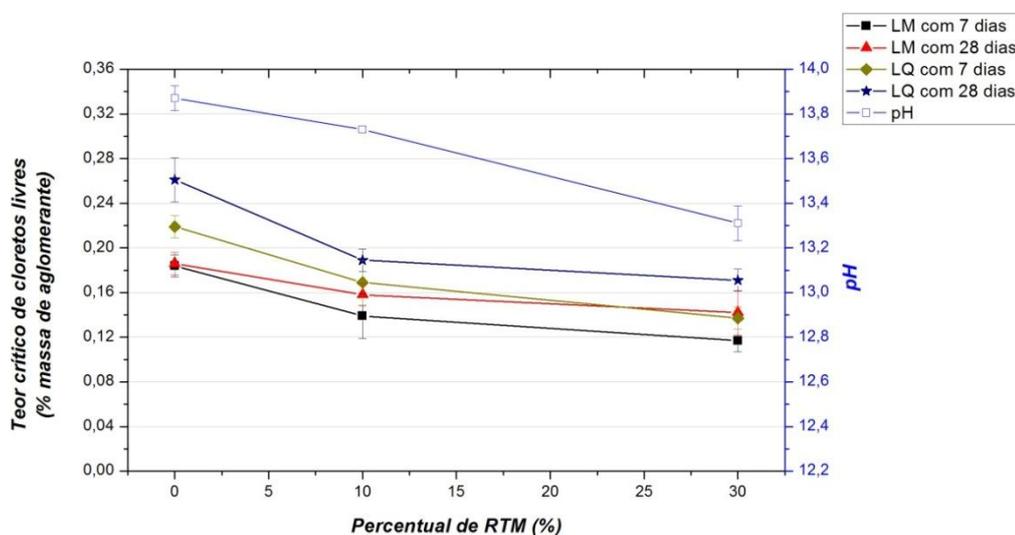


Tabela 4.35 - Resultados da Análise de variância (ANOVA) para o teor crítico de cloretos livres.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	11	0,062	0,564	0,031	105,920	0,000
Limpeza da barra	1	0,032	0,291	0,032	109,900	0,000
Cura	2	0,009	0,082	0,009	31,883	0,000
Traço x Limpeza da barra	1	0,005	0,045	0,002	8,068	0,001
Traço x Cura	1	0,001	0,009	0,000	1,576	0,215
Cura x Limpeza da barra	2	0,001	0,009	0,001	2,868	0,096
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	0,000	0,000	0,000	0,350	0,706
TOTAL CORRIGIDO	20	0,110	1,000	0,075	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

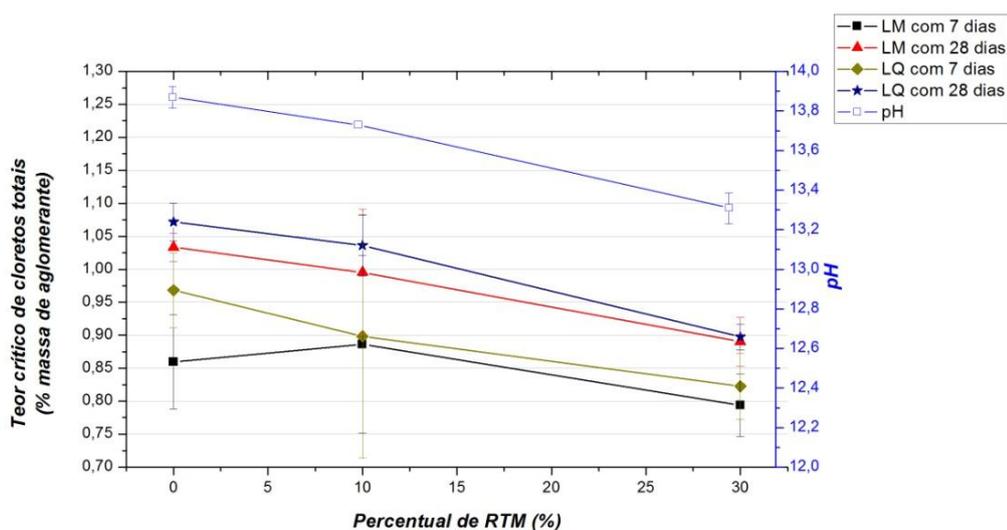
Tabela 4.36 - Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o teor crítico de cloretos livres.

Traço	Subconjunto		
	1	2	3
REF	0,2125	-	-
C10%	-	0,1631	-
C30%	-	-	0,1429

Em relação à limpeza aplicada sobre a barra, os dados mostram um aumento considerável sobre o teor crítico de cloretos livres, motivados por uma melhor limpeza dos óxidos aderidos à superfície do aço antes da concretagem. A limpeza da barra tem influência direta sobre a formação e estabilidade da película passivante (MOHAMMED & HAMADA, 2006; ANGST *et al.*, 2009). Os resultados de análise de variância, Tabela 4.35, mostram que a um nível de confiança de 99%, o tipo de limpeza da barra provoca diferenças significativas sobre os resultados de teores de cloretos livres, indicando que o modelo explica 29,1% da variabilidade dos valores observados sobre limite crítico de cloretos livres.

Para os tempos de cura usados neste trabalho, os resultados mostram um pequeno aumento do teor crítico com o tempo de cura, a análise de variância aplicada aos dados demonstra que a cura provocou diferenças estatísticas sobre o modelo a um nível de confiança de 99%. A cura tem influência direta sobre o grau de hidratação do cimento, a porosidade do material, o pH da matriz do concreto e a velocidade de transporte dos agentes agressivos (ANGST *et al.*, 2009).

Figura 4.77 - Teor crítico de cloretos totais em função do percentual de RTM.



Para os valores limites de cloretos totais que dão início à corrosão, a Figura 4.77 mostra os resultados médios e desvios padrões de tal variável dependente em função do percentual de RTM para as diversas combinações de limpeza das barras e tempo de cura, após a utilização da técnica de dados espúrios. Em relação à Figura 4.77, percebe-se um comportamento análogo com os teores críticos de cloretos livres, ou seja, uma redução dos valores com o incremento de resíduo, a redução no tempo de cura e a limpeza mecânica. Os resultados de análise de variância mostram que as variáveis independentes de tempo de cura, tipo de limpeza de barra e percentual de substituição de RTM apresentam diferenças estatisticamente significantes a um nível de significância de 99% (Tabela 4.37). Para a única

variável dependente significativa que apresenta três subconjuntos (traço), os resultados de Teste de Tukey mostram que não há diferenças significativas entre os concretos com substituição de 10 e 30% (Tabela 4.38).

Tabela 4.37 - ANOVA das variáveis independentes sobre o teor crítico de cloretos totais.

Características analisadas	GDL	SQ	r ²	MQ	Teste F	Significância - p
Traço	2	0,0350	0,3535	0,0170	22,3490	0,0000
Limpeza da barra	1	0,0200	0,2020	0,0200	26,0240	0,0000
Cura	1	0,0260	0,2626	0,0260	33,0440	0,0000
Traço x Limpeza da barra	2	0,0020	0,0202	0,0010	0,9730	0,3840
Traço x Cura	2	0,0030	0,0303	0,0020	1,9960	0,1450
Cura x Limpeza da barra	1	0,0080	0,0808	0,0080	10,1420	0,0020
Traço x Limpeza da barra x Cura	2	0,0050	0,0505	0,0020	2,9120	0,0620
TOTAL CORRIGIDO	10	0,0990	1,0000	0,0760	-	-

Onde: GDL = Grau de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Media quadrada.

Tabela 4.38 - Teste de Tukey para o efeito isolado sobre o teor crítico de cloretos totais.

Traço	Subconjunto	
	1	2
REF	0,4417	-
C10%	-	0,3972
C30%	-	0,3931

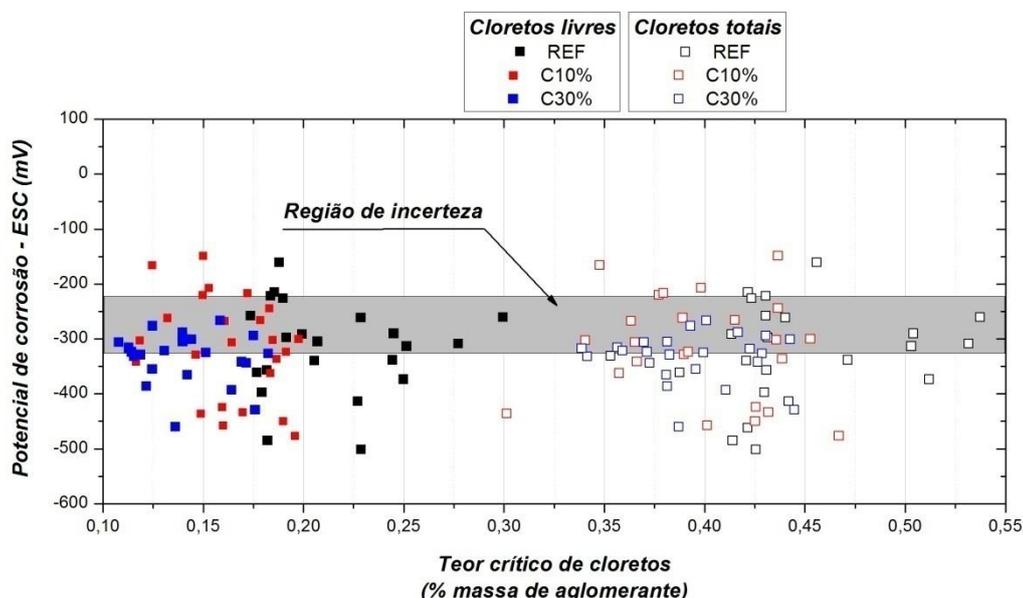
4.2.2.7 Relação entre o potencial de corrosão e o teor crítico de cloretos

O estudo da relação entre o potencial de corrosão e os teores críticos de cloretos livres e totais seguiu os mesmos procedimentos descritos no item 4.2.1.6. Sendo, o par ordenado, o teor crítico de cloretos (livres ou totais) e potencial de corrosão médio das últimas três leituras antes da detecção da corrosão. Aos dados de teores críticos, foi empregada a técnica de Chauvenet para eliminação para dados espúrios. Consequentemente, uma vez que os valores críticos de cloretos livres ou totais tivessem sido expurgados, o par ordenado também era expurgado.

Cruzando os valores de teores críticos de cloretos com o potencial de corrosão – ESC, observamos que há uma fraquíssima relação entre o potencial de corrosão e os valores de teores críticos de cloretos, tanto para livres quanto para totais, tendo em vista que se observa uma fraquíssima tendência de crescimento do teor crítico de cloretos com uma redução do potencial de corrosão – ESC para a faixa acima de 374 mV (ESC) (Figura 4.78). Em relação à região de incerteza (-274 ± 50 mV – ESC ou -200 ± 50 mV – SCE) não se percebe qualquer relação devido à dispersão dos dados.

Por fim, atenuam-se as discussões acima, partindo-se do pressuposto de que as metodologias de ensaio são diferentes das realizadas pelos autores ALONSO *et al.* (2002) e IZQUIERDO *et al.* (2004) que constataram tal relação, além de não haver um pré-condicionamento da armadura antes da concretagem, mesmo havendo monitoramento da corrosão durante todo o processo agressivo.

Figura 4.78 – Teor crítico de cloretos livres e totais *versus* potencia de corrosão (ESC).



4.2.3 Comparação entre os métodos acelerados de corrosão

4.2.3.1 Monitoramento eletroquímico

A aplicação do campo elétrico gera polarização na armadura. Esse fenômeno interfere nas leituras de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão, porém tal efeito é reversível conforme constatado, também, por outros autores (AUSTIN, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002) (Figuras 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44). O fenômeno de polarização não acontece em espécimes submetidos a ensaio de imersão e secagem, já que não há o emprego de campo elétrico. O efeito da polarização pode ser sentido nos dados obtidos quando confeccionada a relação entre o potencial de corrosão e o logaritmo da densidade de corrente, tendo em vista que tal relação é linear (ANDRADE, 1988; CABRAL, 2000; VIEIRA, 2003; ANGST *et al.*, 2011, dentre outros). A polarização da barra durante as leituras eletroquímicas manteve a relação linear entre o potencial de corrosão – ESC e o logaritmo da densidade de corrente de corrosão, porém com maior dispersão entre os dados se essa relação for comparada com os concretos submetidos a ensaio de imersão e secagem. Os coeficientes de determinação (r^2) provam isso: eles mostram uma dispersão maior entre os dados para as barras com limpeza

mecânica (Figuras 4.17 e 4.58) e, também, para as barras com limpeza química (Figuras 4.18 e 4.59).

4.2.3.2 Tempo de ensaio

Os tempos de ensaios foram os períodos necessários para o início da corrosão. Comparando as metodologias de ensaio, percebe-se que os tempos de ensaio foram bastante diferenciados. Concretos armados submetidos a ensaio de imersão e secagem demoraram no mínimo 720 horas (C30%, limpeza mecânica e cura de 7 dias) e no máximo 3600 horas (referência, limpeza química e cura de 28 dias); já concretos em ensaio de migração permaneceram em ensaio por no mínimo 20 horas (C30%, limpeza mecânica da barras e cura de 7 dias) e no máximo 180 horas (referência, limpeza química da barras e cura de 28 dias), representando, assim, uma diferença drástica. Segundo Angst *et al.* (2009), a maior vantagem do ensaio de migração elétrica é a rapidez de ensaio.

4.2.3.3 Perfis de cloretos

Para ambos os ensaios indutivos, percebe-se a presença de dois tipos de perfis de cloretos: o perfil típico ou clássico e o perfil de duas zonas. Os ensaios de imersão e secagem caracterizam-se por apresentar, em sua maioria, perfis de duas zonas em virtude dos procedimentos aplicados durante os ensaios e o tempo de exposição; fato esse que contribui para a formação da zona de convecção (ANDRADE *et al.* 2000; CASTRO *et al.*, 2001; GUIMARÃES E HELENE; 2004). Ensaios por eletromigração se caracterizam por apresentar, na sua enorme maioria, perfis típicos de difusão, devido aos CPs estarem sempre com os poros saturados de solução. Logo, o tipo de ensaio acelerado e o tempo de ensaio pode determinar o tipo de perfil de cloretos dos espécimes.

Comparando-se os valores das concentrações de cloretos livres e totais obtidos, camada a camada, percebe-se uma queda considerável nas concentrações de cloretos totais e livres em cada profundidade para os corpos de prova que sofreram a aplicação da migração iônica. Esta redução ocorre em virtude da aplicação do campo elétrico, que além de induzir a migração de cloretos, também induz a migração de outros íons, como as hidroxilas (OH^-) presentes nos poros do concreto (CASTELLOTE *et al.*, 2000; ANGST *et al.*, 2009). Essa migração das hidroxilas interfere no equilíbrio químico do concreto, baixando o pH dos poros e tendo como consequência uma fragilidade da película passivante (ANGST *et al.*, 2009). Por outro lado, como os poros estão sempre saturados com solução, há a dificuldade de difusão de

oxigênio através do concreto, comprometendo o início e a propagação da corrosão (ANGST *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2009).

4.2.3.4 Fixação de cloretos à matriz cimentícia

A Tabela 4.38 mostra as quantidades médias de cloretos combinados e os desvios padrões em relação à massa de aglomerante, após o uso da técnica de Chauvenet, além dos parâmetros α e β . O parâmetro α faz uma relação entre as médias de cloretos combinados aos concretos com adição de RTM e os concretos de referência, dentro de um mesmo ensaio e tempo de cura. Já o parâmetro β faz uma relação entre as médias de cloretos combinados de um mesmo concreto e tempo de cura em diferentes ensaios.

Tabela 4.39 – Imapcto dos métodos acelerados sobre a capacidade de fixação de cloretos à matriz cimentícia.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Parâmetros			
		Média	Desvio	α	β
Imersão e secagem	Referência com 7 dias de cura	0,255	0,056	-	-
	Referência com 28 dias de cura	0,301	0,066	-	-
	C10% com 7 dias de cura	0,287	0,100	12,55%	-
	C10% com 28 dias de cura	0,329	0,055	9,30%	-
	C30% com 7 dias de cura	0,289	0,039	13,33%	-
	C30% com 28 dias de cura	0,336	0,027	11,63%	-
Eletromigração	Referência com 7 dias de cura	0,233	0,035	-	-8,63%
	Referência com 28 dias de cura	0,232	0,026	-	-22,92%
	C10% com 7 dias de cura	0,237	0,022	1,72%	-17,42%
	C10% com 28 dias de cura	0,244	0,016	5,17%	-25,84%
	C30% com 7 dias de cura	0,247	0,019	6,01%	-14,53%
	C30% com 28 dias de cura	0,249	0,020	7,33%	-25,89%

A partir da tabela em questão, percebe-se um aumento na combinação de cloretos à matriz com a adição e o tempo de cura, independentemente do tipo de ensaio. Ver o parâmetro α da Tabela 4.39. Por ser algo intrínseco à matriz cimentícia, o tipo de limpeza empregadas nas barras não interferiu em nenhum dos dois tipos de ensaio, conforme mostram as Tabelas 4.13 e 4.30. Comparando os métodos de ensaio, fica claro que a capacidade de fixação de cloretos à matriz também foi alterada com a aplicação de um campo elétrico, de modo a reduzi-la se comparados aos ensaios de imersão e secagem. Ver o parâmetro β da Tabela 4.39.

Essa redução na fixação de cloretos se deve ao grau de hidratação, à resistividade do material e principalmente à aplicação do campo elétrico. A passagem de corrente através do concreto reduz a fixação devido a alterações no equilíbrio químico do concreto

(CASTELLOTE *et al.*, 2002; ANGST *et al.*, 2009), a formação de dupla camada nas paredes dos poros (CASTELLOTE *et al.*, 2002) e a alta velocidade de transporte dos cloretos que dificulta as reações entre as fases hidratadas do cimento e os cloretos (CASTELLOTE *et al.*, 1999). Para os dados deste trabalho, as reduções na fixação de cloretos junto aos concretos ficaram entre 8 e 26%, na comparação entre os métodos de ensaio.

4.2.3.5 Mecanismos de transporte de cloretos

Apesar de cada método de ensaio acelerado de corrosão por cloretos apresentarem fenômenos de transporte bastante diferenciados. De modo a torná-los comparáveis, Castellote *et al.* (2002) conseguiram desenvolver um método que transforma qualquer problema de migração em um clássico problema de difusão. Ver item 4.2.2.5. A transformação do método de migração para difusão se mostrou consistente, tendo em vista que os coeficientes de regressões dos ajustes foram altíssimos. Ver coeficientes de determinação (r^2) contidos no Apêndice C.

As concentrações superficiais (C_s) foram influenciadas pelo tempo de exposição ao ambiente agressivo e pela dosagem do concreto. Concretos submetidos a ensaio de imersão e secagem obtiveram maiores valores da referida variável dependente (Figuras 4.34 e 4.74). Já os coeficientes de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) foram bastante similares entre os métodos de ensaio (Figuras 4.35 e 4.75).

4.2.3.6 Teor crítico de cloretos

Uma vez que se pretende definir em qual "região" se encontram os valores limites de cloretos para os concretos estudados neste trabalho, aplicou-se a técnica de inferência estatística por estimação de parâmetros. Para isso, faz-se necessário conhecer qual a distribuição de probabilidade envolvida no parâmetro analisado.

Izqueirido *et al.* (2004) testaram diversas distribuições de probabilidade para teores críticos de cloretos, como a distribuição Normal, Log-normal, Gama, Frechet e Weibull. Os resultados mostraram que a distribuição de probabilidade a seguir deveria ser Log-normal ou Normal, em cada caso. Objetivando saber qual distribuição de probabilidade representa a amostra obtida, empregaram-se os teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W), comparando os dados de teores críticos à distribuição normal, a um nível de confiança de 95%. As Tabelas 4.40 e 4.41 mostram os resultados de significância estatística para distribuição normal dos teores críticos de cloretos livres e totais. A partir das Tabelas em

questão (Tabelas 4.40 e 4.41), observa-se que os teores críticos de cloretos deste trabalho podem seguir distribuição normal de probabilidade para todas as combinações de ensaio, tempo de cura, tipo de limpeza e traço (teor de RTM), motivado pela significância estatística em todos os testes K-S e na grande maioria para teste W, em vermelho.

Tabela 4.40 – Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W) para significância com distribuição normal de probabilidade, como 95% de confiança – barras com limpeza mecânica.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Cloretos livres		Cloretos totais	
		K-S	W	K-S	W
Imersão e secagem	Referência com 7 dias de cura	0,199	0,919	0,311	0,762
	Referência com 28 dias de cura	0,258	0,811	0,214	0,883
	C10% com 7 dias de cura	0,242	0,890	0,324	0,887
	C10% com 28 dias de cura	0,179	0,935	0,195	0,963
	C30% com 7 dias de cura	0,217	0,917	0,230	0,888
	C30% com 28 dias de cura	0,240	0,925	0,305	0,895
Eletromigração	Referência com 7 dias de cura	0,191	0,948	0,188	0,755
	Referência com 28 dias de cura	0,171	0,975	0,285	0,843
	C10% com 7 dias de cura	0,212	0,940	0,187	0,921
	C10% com 28 dias de cura	0,226	0,966	0,182	0,981
	C30% com 7 dias de cura	0,235	0,895	0,198	0,885
	C30% com 28 dias de cura	0,173	0,953	0,262	0,926

Tabela 4.41 – Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Shapiro-Wilk (W) para significância com distribuição normal de probabilidade, como 95% de confiança – barras com limpeza química.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Cloretos livres		Cloretos totais	
		K-S	W	K-S	W
Imersão e secagem	Referência com 7 dias de cura	0,197	0,958	0,253	0,940
	Referência com 28 dias de cura	0,237	0,889	0,308	0,771
	C10% com 7 dias de cura	0,227	0,898	0,242	0,938
	C10% com 28 dias de cura	0,244	0,873	0,175	0,925
	C30% com 7 dias de cura	0,312	0,904	0,255	0,937
	C30% com 28 dias de cura	0,238	0,895	0,178	0,942
Eletromigração	Referência com 7 dias de cura	0,337	0,7391	0,268	0,813
	Referência com 28 dias de cura	0,337	0,798	0,218	0,936
	C10% com 7 dias de cura	0,161	0,977	0,173	0,959
	C10% com 28 dias de cura	0,173	0,959	0,192	0,914
	C30% com 7 dias de cura	0,127	0,996	0,143	0,985
	C30% com 28 dias de cura	0,199	0,935	0,241	0,889

De posse desses resultados que demonstram que o teor crítico segue distribuição normal, podemos estimar a região onde os valores de teores críticos se situam. Portanto, se repetíssemos 100 vezes o ensaio de teor crítico, em 99 deles teríamos os valores dentro desta região. As Tabelas 4.42 e 4.43 mostram, a um nível de confiança de 99%, os valores mínimos e máximos de valores limites de cloretos livres e totais para iniciação da corrosão.

Tabela 4.42 – Limites mínimos e máximos para teores críticos de cloretos livres e totais, como nível de confiança de 99% - Limpeza mecânica.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Cloretos livres (% massa de aglomerante)		Cloretos totais (% massa de aglomerante)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Imersão e secagem	Referência com 7 dias de cura	0,6125	0,7029	0,7842	0,9351
	Referência com 28 dias de cura	0,6900	0,7315	1,0091	1,0575
	C10% com 7 dias de cura	0,5754	0,6526	0,7442	1,0281
	C10% com 28 dias de cura	0,6322	0,6730	0,8937	1,0965
	C30% com 7 dias de cura	0,4560	0,5352	0,7436	0,8442
	C30% com 28 dias de cura	0,5191	0,5763	0,8516	0,9292
Eletromigração	Referência com 7 dias de cura	0,1725	0,1955	0,3699	0,4541
	Referência com 28 dias de cura	0,1755	0,1965	0,4145	0,4355
	C10% com 7 dias de cura	0,1179	0,1601	0,3444	0,4076
	C10% com 28 dias de cura	0,1465	0,1695	0,3719	0,4141
	C30% com 7 dias de cura	0,1065	0,1275	0,3469	0,3891
	C30% com 28 dias de cura	0,1209	0,1631	0,3669	0,4091

Tabela 4.43 - Limites mínimos e máximos para teores críticos de cloretos livres e totais, como nível de confiança de 99% - Limpeza química.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Cloretos livres (% massa de aglomerante)		Cloretos totais (% massa de aglomerante)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Imersão e secagem	Referência com 7 dias de cura	0,5564	0,7875	0,9084	1,0281
	Referência com 28 dias de cura	0,7203	0,7819	1,0418	1,1018
	C10% com 7 dias de cura	0,6452	0,7138	0,7038	1,0928
	C10% com 28 dias de cura	0,6732	0,7354	0,9877	1,0848
	C30% com 7 dias de cura	0,5225	0,5919	0,7703	0,8749
	C30% com 28 dias de cura	0,5584	0,6106	0,8768	0,9182
Eletromigração	Referência com 7 dias de cura	0,2075	0,2305	0,3844	0,4536
	Referência com 28 dias de cura	0,2399	0,2821	0,4889	0,5311
	C10% com 7 dias de cura	0,1479	0,1901	0,3379	0,4221
	C10% com 28 dias de cura	0,1785	0,1995	0,4295	0,4505
	C30% com 7 dias de cura	0,1255	0,1485	0,3654	0,4286
	C30% com 28 dias de cura	0,1605	0,1815	0,3939	0,4361

Com os resultados, concluímos que os valores de teores críticos de cloretos livres e totais obtidos neste trabalho estão em acordo com os valores obtidos pela literatura, em cada tipo de ensaio empregado. Comparar os resultados da Tabela 4.42 e 4.43 com a Tabela 2.9 (tabela de valores limites de cloretos publicados na literatura). Comparando-se os resultados deste trabalho com os valores de espécimes submetidos à exposição natural contidos na literatura, percebe-se um aumento nos teores críticos de cloretos para corpos de prova

submetidos a ciclos de imersão e uma redução nos corpos de prova submetidos a ensaio de migração iônica.

Comparando-se o ensaio de imersão e secagem com o ensaio de exposição natural, percebe-se um aumento nos valores de teores críticos de cloretos livres e totais. Esse comportamento se deve principalmente: à influência de variáveis, como a temperatura e o vento, não abordadas neste trabalho (MEIRA, 2004); um considerável aumento no grau de hidratação e no refino da porosidade do concreto, devido a elevada idade do material em ensaios com exposição natural (MEIRA *et al.*, 2014); à ausência de oxigênio em quantidades suficientes próxima à armadura, em virtude dos espécimes estarem com os poros saturados de solução em boa parte do tempo (ANGST *et al.*, 2009) e, aos curtos ciclos de passivação e repassivação até a consolidação do início do processo corrosivo (MEIRA *et al.*, 2014).

Já comparando-se o ensaio de eletromigração com o ensaio de exposição natural, percebe-se uma redução nos valores de teores críticos de cloretos livres e totais. Esta redução se deve às passagem de corrente através do concreto modificado assim o equilíbrio químico do material, de modo que, não só os íons cloretos estão dispostos a migrarem, mas sim, qualquer íon eletronegativo, como as hidroxilas. Ao contrário dos cloretos, os íons hidroxilas ao chegarem às proximidades do ânodo tendem a oxidar, reduzindo sua disponibilidade, e conseqüentemente, reduzindo o pH (TREJO *et al.*, 2003). Portanto, os teores críticos de cloretos são reduzidos (CASTELLOTE *et al.*, 2002; ANGST *et al.*, 2009; TREJO *et al.*, 2003).

As Figuras 4.79 e 4.80 mostram as relações médias entre cloretos (livres e totais) para ensaio de imersão e secagem e cloretos (livres e totais) para ensaio de eletromigração, em cada tipo de limpeza empregada nas barras. Os resultados mostram uma relação linear entre as concentrações de cloretos, porém com dispersões consideráveis. Tais ajustes têm por objetivo correlacionar os ensaios de imersão e secagem com os de eletromigração. Conseqüentemente, a partir de dados de teores críticos (livres ou totais) de ensaio de imersão e secagem, pode-se obter teores críticos (livre ou totais) de eletromigração

Figura 4.79 – Comparação entre os teores críticos de cloretos para cada método acelerado de corrosão – barras com limpeza mecânica.

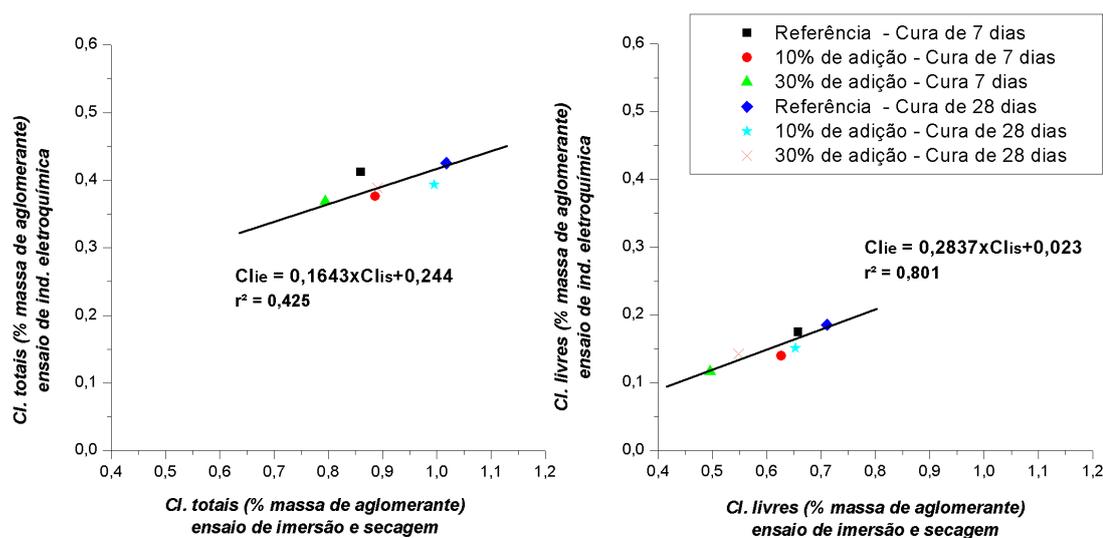
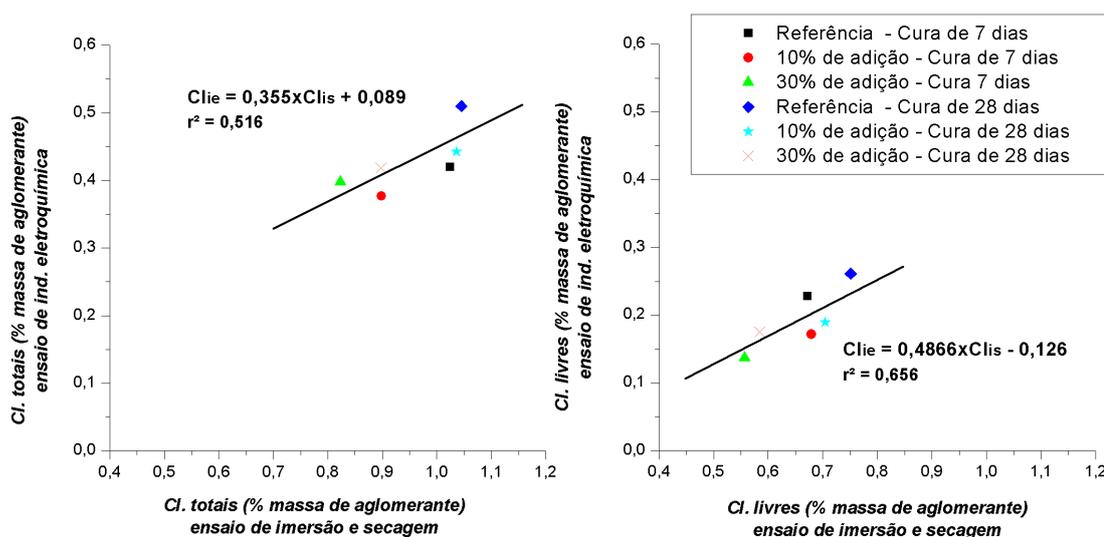


Figura 4.80 - Comparação entre os teores críticos de cloretos para cada método acelerado de corrosão – barras com limpeza química.



Para finalizar as discussões acerca deste trabalho, foi confeccionada a Tabela 4.44. Ela mostra resumidamente as tendências de crescimento, decréscimo ou constância das variáveis dependentes estudadas neste trabalho em função dos aspectos relacionados aos materiais ou ensaios.

Tabela 4.44 – Efeito da influência dos fatores determinantes sobre as variáveis dependentes.

Fatores determinantes	Variáveis dependentes										
	pH da solução do poro	Resistência mecânica	Absorção	Índice de vazios	Tempo de ensaio	Polarização na barra (ensaio de eletromigração)	Cs	Dns	Fixação de cloretos	Teor crítico de cloretos livres	Teor crítico de cloretos totais
Aumento na adição de RTM	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↓
Tipo de Limpeza	-	-	-	-	↑	↓	-	-	-	↑	↑
Aumento no tempo de cura	↑	↑	↑	↑	↑	N	≈	↓	↑	↑	↑
Idade	≈ ou ↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑
Tipo de ensaio: Imersão e secagem	≈	N	N	N	↑	-	↑	≈	↑	↑	↑
Tipo de ensaio: Eletromigração	↓	N	N	N	↓	↑	↓	≈	↓	↓	↓

Onde:

Simbologia **Significado**

↑ Indica tendência de crescimento;

↓ Indica tendência de decrescimento;

≈ Indica tendência de constância;

Simbologia **Significado**

0 Tem influência, mas não interferiu;

N Característica não analisada.

- Não tem influência;

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentados às conclusões finais a respeito do trabalho, sugestões para trabalhos futuros e a transferência de conhecimento técnico à comunidade científica, após o término das atividades planejadas nesta pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

Partindo dos resultados apresentados e das discussões realizadas, pode-se concluir que:

- O índice de atividade pozolânica do RTM foi de 86% para um Blaine de 5080 cm²/g. Análises de TG/DTG indicam que o RTM consumiu parte do hidróxido de cálcio da fase hidratada do cimento, confirmando a pozolanicidade do resíduo;
- A adição de resíduo de tijolo cerâmico moído em substituição ao cimento provoca redução na alcalinidade da água de equilíbrio, de modo que quanto maior a substituição, maior a redução no pH, se comparados aos concretos de referência. Esse comportamento se deve à redução no consumo de cimento e as reações pozolânicas entre o RTM e o cimento;
- A resistência mecânica do material tende a reduzir gradativamente com a substituição de cimento por RTM, em virtude da redução no consumo de cimento. Porém, o efeito pozolânico do resíduo tende a minimizar esse efeito com o tempo;
- O índice de vazios e a absorção do material aumentam com o aumento do percentual de resíduo incorporado a matriz do concreto, já a massa específica do concreto permanece quase inalterada;
- A aplicação de um campo elétrico através do concreto provoca um fenômeno reversível chamado de polarização da armadura. Esse efeito causa interpretações errôneas sobre o verdadeiro estado da armadura. A polarização é influenciada pelas dosagens empregadas, pela diferença de potencial aplicada entre os polos, o tempo de aplicação do campo e pelo tipo de limpeza aplicada sobre as barras. Para a configuração de ensaio de eletromigração utilizada, o tempo necessário para despolarizar a barra é de aproximadamente 48 horas. Logo, recomenda-se, no mínimo, uma espera de 48 horas para a realização de um monitoramento eletroquímico;
- Para os dados aqui apresentados, os perfis de cloretos tendem a ser de dois tipos: típicos ou de duas zonas. Dependendo do tipo de ensaio empregado e do tempo de exposição ao ambiente agressivo;

- As concentrações de cloretos livres e totais reduzem com a profundidade, a redução no tempo de cura, a substituição de cimento por RTM e a preferência pela limpeza mecânica das barras, todos motivados pelo tempo de ensaio e a fixação de cloretos na matriz cimentícia;
- As concentrações de cloretos livres e totais são sempre inferiores nos concretos submetidos ao ensaio de migração iônica, quando comparados aos concretos submetidos aos ensaios de imersão e secagem. Esse comportamento pode ser explicado pelas alterações químicas no concreto com a passagem de campo elétrico;
- A substituição de cimento por RTM contribui para uma maior fixação de cloretos à matriz do concreto. Esse comportamento é explicado pelas reações pozolânicas entre o cimento e o RTM que geram, assim, fases hidratadas que facilitam a fixação de cloretos;
- A concentração superficial (C_s) é uma variável dependente do tempo de exposição e da dosagem empregada. Já o coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) está relacionado ao tempo de cura, à dosagem empregada, ao tempo de ensaio e a idade do material. Logo, quanto maiores a idade, o tempo de cura, o consumo de cimento e o período necessário para início da corrosão, menor o coeficiente de difusão (D_{ns});
- Quanto maiores o tempo de ensaio e o índice de vazios do material, maior a penetração de cloretos (X_d) nos espécimes submetidos ao ensaio de eletromigração. Este parâmetro influencia diretamente o coeficiente de migração (D_{mig}), que representa a velocidade de transporte de cloretos nesse tipo de ensaio acelerado;
- O teor crítico de cloretos é função do tempo de cura, do tipo de limpeza da barra, da dosagem empregada e do tipo de ensaio acelerado de corrosão por cloretos. Essas variáveis independentes interferem no pH da matriz cimentícia, na porosidade do material, na resistividade e na formação/estabilidade da película passivante. Logo, tanto os teores críticos de cloretos livres ou totais diminuem tanto com a substituição de cimento por RTM, quanto com a redução do tempo de cura e com a limpeza mecânica;
- O teor crítico de cloretos reduz significativamente com o emprego do ensaio acelerado de corrosão por eletromigração, se comparado ao ensaio de imersão e secagem.

Por fim, cabe ressaltar que concretos submetidos ao ensaio por imersão e secagem com substituição de 10% de cimento por RTM apresentaram comportamento semelhante aos concretos de referência, conforme mostrados pelos resultados. Já para os espécimes em ensaios de eletromigração, a substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico apresentou uma diferença significativa entre as dosagens, o que interferirá no tempo de vida útil do material. A partir desses resultados, percebemos que possíveis alterações químicas provocadas pela passagem do campo elétrico podem ter sido decisivas para restringir a aplicação em alguns casos.

Partindo do pressuposto que os ensaios de imersão e secagem têm mais afinidade com a realidade, já que se tem um mecanismo de transporte natural e pode-se modelar o mecanismo de transporte envolvido, conforme Angst *et al.* (2009) já relataram, recomenda-se o uso do ensaio acelerado por imersão e secagem, caso o tempo de ensaio não seja determinante para a pesquisa. Para o uso de RTM, concluímos que a substituição de cimento por RTM é viável tecnicamente frente a corrosão por cloretos até a substituição de 10%, havendo uma forte tendência de melhorar seu desempenho com o tempo. Já a substituição de 30% só deve ser usada em ambientes com baixa agressividade e/ou com cobrimentos maiores.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração a originalidade do trabalho, a complexidade do fenômeno de corrosão por cloretos e as limitações de emprego de cada método acelerado de indução, alguns pontos não foram o alvo desta pesquisa pelos mais diversos motivos. Logo, abre-se espaço para maior estudo pela comunidade científica. Entre eles, podemos citar:

- Analisar o comportamento de concretos com RTM frente à corrosão por cloretos, em concretos com idades avançadas, de modo a avaliar a influência da atividade pozolânica sobre a porosidade do concreto e o pH da solução do poro;
- Ampliar o leque de variáveis estudadas neste trabalho, como: o cobrimento, a porcentagem de RTM e as relações a/agl e $agl/materiais\ secos$, de modo a definir tal comportamento;
- Aprofundar o conhecimento de métodos de indução da corrosão por cloretos através do emprego de variáveis como: o emprego de barras como recebido (padronizadas através da taxa de corrosão da armadura) e o emprego de outros tipos de ensaios acelerados;

- Estudar o efeito da substituição de cimento por RTM frente à corrosão por carbonatação;
- Concretos com fases hidratadas que contêm alumina apresentam suscetibilidade ao ataque por íons sulfatos. Levando em consideração a composição química do RTM que indica uma concentração de 16,2% de óxido de alumínio (Al_2O_3), é interessante que se avalie a vulnerabilidade desses concretos frente ao ataque por sulfatos.

5.3 TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO À COMUNIDADE ACADÊMICA

Os resultados desta pesquisa já foram objeto de publicações em periódico e anais no último ano. A primeira publicação foi apresentada no X Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estrutura (CINPAR 2014), realizado em Santiago, Chile, em junho de 2014, cujo título foi “Comportamento de concreto armado com a adição de resíduos de tijolos cerâmicos frente à corrosão por cloretos”. O trabalho enfocou o mecanismo de transporte de cloretos por difusão em concretos com substituição de cimento por RTM.

Em novembro de 2014, mais uma publicação em anais do IX Congresso Norte/Nordeste de Pesquisa e Inovação (IX CONNEPI), realizado em São Luís, Maranhão, cujo título foi “Comportamento de concretos com substituição de cimento por resíduo cerâmico vermelho”. O trabalho enfocou as propriedades químicas e mecânicas de concretos com uso de RTM.

A publicação de maior relevância deste trabalho até o momento foi o artigo aceito no periódico Ambiente construído (ISSN:1678-8621 e qualis-CAPES B1) com o título “Comportamentos de concretos armados com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos”, enfocando a influência do uso de RTM, da cura e do tipo de limpeza sobre os valores-limites de cloretos, além de análise sobre perfis de cloretos de duas zonas e transporte de massa no interior de concreto.

Por fim, espera-se que este trabalho gere uma publicação em um periódico internacional de grande relevância, como o *Corrosion Science* ou o *Construction and Building Materials*, além de congressos de grande relevância nacional e internacional como: 57º Congresso Brasileiro de Concreto e o 14º Congresso Internacional sobre Química do Cimento, respectivamente.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T-259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration**. Annual Book of AASHTO Standards, Washington, D.C., 1980.
2. ABRAMAT - Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção. **Perfil da Cadeia Produtiva da Construção e da Indústria de Materiais e Equipamentos**. São Paulo: ABRAMAT e FGV Projetos, 2014. Disponível em: <<http://www.abramat.org.br/site/datafiles/uploads/202014.pdf>>. Acessado 02 de novembro de 2014.
3. ABOSRRA, L.; ASHOUR, A. F.; YOUSEFFI, M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. **Construction and Building Materials**. V. 25, p. 3915–3925, 2011.
4. AHMAD, S. Techniques for inducing accelerated corrosion of steel in concrete. **The Arabian Journal for Science and Engineering**. V.34, N. 2C, p.95-104, 2009.
5. ALONSO, C.; ANDRADE, C.; RODRIGUEZ, J.; DIEZ, J. M. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. **Materials and Structures**, V. 31, p. 435-441, August-September, 1998.
6. ALONSO, C.; CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. **Electrochimica acta**. V. 47, p. 3469-3481, 2002.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-114: standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement**. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992.
8. _____. **ASTM B-117**. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 1995.
9. _____. **ASTM C-114**. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 1992.
10. _____. **ASTM C-876. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 1999.
11. _____. **ASTM C-1202**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 2012.
12. _____. **ASTM G-1. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 2011.

13. _____. **ASTM G-109**. Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia/ EUA, 2007.
14. ANFAC - Associação Nacional das Sociedades de Fomento Mercantil. Reciclagem: consciência ecológica e desenvolvimento econômico: Construção Civil. **Fomento Mercantil**. V. 69, p. 22-23, Janeiro - fevereiro, 2008. Disponível em: <<http://www.anfac.com.br/v3/uploads/revista/revista-anfac-fomento-mercantil69.pdf>> Acessado em: 01 de novembro de 2014.
15. ANDRADE, C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. **British Corrosion Journal**. V. 21, p. 49–53. 1986.
16. ANDRADE, C. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Madrid: CSIC/IETcc, 1988. 122 p.
17. ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**. V. 23, Nº 3, p. 724-742, 1993.
18. ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of skin effects on diffusion process in concrete. In: Nilsson, L. O.; Ollivier, J. P., editors. international RILEM workshop on chloride penetration into concrete, **Proceedings...**, Paris: RILEM; 1997. p.182–194.
19. ANDRADE, M. C.; SAGRERA, J. L.; SANJUAN, M. A.; Several Years Study On Chloride Ion Penetration Into Concrete Exposed To Atlantic Ocean Water. In: Second International Rilem Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress Into Concrete. **Proceedings...** Paris, RILEM, 2000.
20. ANDRADE, C. Procesos de corrosión en el hormigón y métodos modernos de cálculo de la carbonatación, penetración de cloruros y propagación de la corrosión. In: CURSO DE ESTUDIOS MAYORES DE LA CORROSIÓN (CEMCO), 15, 2001, Madrid. **Seminario sobre Durabilidad del hormigón e evaluación de estructuras corroídas**. Madrid: IETcc, abr. 2001.
21. ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**. V. 37, November, 2004, p. 623-643.
22. ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; d'ANDREA, R. Measurements of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. **Journal of Nuclear Materials**, V. 412, p. 209-216, 2011.
23. ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**. V. 53, p. 1451-1464, January, 2011.

24. ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: Rate limiting step of early pitting corrosion. **Electrochimica acta**. V. 56, p. 5877-5388, May, 2011.
25. ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**. V. 53, p. 1451-1464, 2011.
26. ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - State of the art. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**. Taylor & Francis Group, p. 311- 317, London, 2009.
27. ANN, K. Y.; JUNG, H. S.; KIM, H. S.; KIM, S. S.; MOON, H. Y. Effect of Calcium Nitrite-Based Corrosion Inhibitor in Preventing Corrosion of Embedded Steel in Concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 36, p. 530-535, March, 2006.
28. ANN, K. Y.; SONG, HA-W. Chloride threshold level for corrosion of steel. **Corrosion Science**. V. 49, p.4113-4133, June, 2007.
29. ANN, K. Y.; KIM, T. S.; KIM, J. H.; KIM, S.H. The resistance of high alumina cement against corrosion of steel in concrete. **Construction and building materials**. V. 24, p. 1502-1510, February, 2010.
30. ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and concrete research**. V. 25, n. 4, p. 893–902, november, 1994.
31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
32. _____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
33. _____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
34. _____. **NBR 5743: Cimento Portland - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, ABNT, 1977.
35. _____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
36. _____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
37. _____. **NBR 6467: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

38. _____. **NBR 7251: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, ABNT, 1982.
39. _____. **NBR 7480: Aço destinado a armadura para estruturas de concreto armado – especificações.** Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
40. _____. **NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à névoa salina - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, ABNT, 1993.
41. _____. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
42. _____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
43. _____. **NBR 11585: Pigmentos e cargas - Determinação da densidade - Método do picnômetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
44. _____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
45. _____. **NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
46. _____. **NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
47. _____. **NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, ABNT, 1996.
48. _____. **NM 76: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, ABNT, 1998.
49. _____. **NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
50. AUSTIN, S. A.; LYONS, R.; ING, M. Electrochemical behaviour of steel reinforced concrete during accelerated corrosion testing. **Corrosion**. V. 60 (2), pp 203 – 212, 2004.
51. BANFORTH, P. B., CHAPMAN-ANDREWS, J.F. Long term performance of R C elements under UK coastal exposure conditions. In: Swamy, R.N., editor. International conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, 1994, Sheffield. **Proceedings....**, Sheffield: Sheffield Academic Press; 1994. p. 139–156.

52. BANFORTH, P.B. The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials. **Magazine of Concrete Research**. V. 51, p. 87–96, 1999.
53. BEKTAS, F. Alkali reactivity of crushed clay brick aggregate. **Construction and Building Materials**. V. 52, p. 79–85, 2014.
54. BERTOLINI, L.; BOLZONI, F.; CIGADA, A. PASTORE, T.; PEDEFERRI, P. Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures. **Corrosion Science**. V.35, N. 5-8, p. 1633-1639, 1993.
55. BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; PEDEFERRI, P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. **Corrosion Science**. V.49, p. 1056-1068, August, 2007.
56. CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
57. CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 2007. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.
58. CABRERA, J. G. Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion. **Cement and concrete composites**. V. 18, p. 47-59, 1996.
59. CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto-Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. Co-edição, São Paulo; Ed. PINI, 1997. p. 25-252.
60. CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. ALONSO, C. Chloride binding isotherms in concrete submitted to nonsteady-state migration experiments. **Cement and concrete research**. V. 29, p. 1799–1806, january, 1999.
61. CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. ALONSO, C. Phenomenological mass-balance-based model of migration tests in stationary conditions application to non-steady-state tests. **Cement and concrete research**. V. 30, p. 1885-1893, August, 2000.
62. CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. **Corrosion Science**. V. 44, p. 2409–2424, February, 2002.
63. CASTRO, P.; De RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles from concret exposed to tropical marine environments. **Cement and concrete research**. V. 31, p. 529-537, January, 2001.

64. CASTRO, P.; VÉLEVA, L.; BALANCÁN, M. Corrosion of reinforced concrete in tropical Marie environment and accelerated test. **Construction and Building Materials**. V.11, n. 2 p. 75-81, March, 1997.
65. CHIANG, C. T.; YANG, C. C. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. **Materials Chemistry and Physics**. V. 106 p. 240–246, 2007.
66. CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NÜRNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. **Corrosion and protection of metals in contact with concrete**. COST Action 509 – Final Report. European Community: Luxembourg, 1997.
67. CORDEIRO, G. C.; DÉSIR, J. M.; VALLANT, J. M. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2002. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002.
68. COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, V.32, p. 354-359, 1999.
69. COSTA, A.; APPLETON, J. Análises da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas a ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. V. 46, p. 3-13, 2007.
70. DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; OLLIVIER, J.-P.; JULIEN, S.; HARZRATI, K. Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems. **Advanced Cement Basis Materials**. V. 6, p. 28-35, March, 1997.
71. DIAS, J. F. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
72. ELSENER, B. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**. V. 36, August-September, 2003, p. 461-471.
73. ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M.; HOPE, B. B. Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chlorides. **Cement and Concrete Research**. V. 24, p. 1525-1533, 1994.
74. ESPINELLI, U. A gestão do consumo de materiais como instrumento para a redução da geração de resíduos nos canteiros de obras. In: Seminário de gestão e reciclagem de resíduos da construção e demolição - avanços e desafios, **Anais...** São Paulo: PCC USP, 2005.

75. FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha. Minas Gerais: FIEMG**, 2013. Disponível em: <http://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/FIEMG/MeioAmbiente/2014/CartilhasPublica%C3%A7%C3%B5es/Cartilha-Cer-mica.pdf>. Acessado em 11 nov. 2014.
76. GARCÉS, P.; SANCHEZ De ROJAS, M. J.; CLIMENT, M. A. Effect of the reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to reinforced concrete structures. **Corrosion Science**. V.48, p. 531-545, January, 2006.
77. GARCIA-ALONSO, M. C.; SALTA, M. *et al.* Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and concrete research**. V. 37, p. 1463-1471, June, 2007.
78. GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
79. GJØRV, O. E.; VENNESLAND, O. Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. **Cement and concrete research**. V.9, p. 229-238, January, 1979.
80. GLASS, G. K.; HASSANEIN, A. M.; BUENFELD, N. R. Monitoring the passivation of steel in concrete induced by cathodic protection. **Corrosion Science**. V.39, n. 8, p. 1451-1458, 1997.
81. GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**. V. 39, n. 5, p. 1001-1013, 1997.
82. GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**. V. 6, n. 4, p. 83-94, out./dez. 2006.
83. GONZÁLEZ, J. A.; RAMÍREZ, E.; BAUTISTA, A.; FELIU, S. The behaviour of pre-rusted steel in concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 36, p. 501–511, 1996.
84. GUIMARÃES, A. T. C. (2000). **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 241p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
85. GUIMARÃES, A. T., HELENE, P. R. Modelo para previsão de vida útil residual utilizando perfil de cloreto com pico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil** . p. 11-21, Agosto, 2004.
86. GUIMARÃES, A.T.C., CASTRO, P. e NUNES, J. L.O. Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. 49o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** São Paulo : IBRACON, 2007.

87. GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, sw sweden. **Atmospheric Environment**. V. 30, N. 6, p. 977- 989, 1996.
88. HALL, C. Water sortivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**. V. 41, N. 147, p. 51-61, 1989.
89. HAUSMANN, D. A. **Steel corrosion in concrete: how does it occur?** Materials Protection, p. 19-23, 1967.
90. HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993. 231 p. (Tese de Livre Docência).
91. HUANG, R.; YANG, C. C. Condition Assessment of Reinforced Concrete Beams Relative to Reinforcement Corrosion. **Cement and Concrete Composites**. V. 19 p. 131-137, november, 1997.
92. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Estatística do Cadastro Central de Empresas 2008. **Fabricação de Produtos Cerâmicos Não-Refratários para Uso Estrutural na Construção**. Seção C, Divisão 23, Grupo 234, Classe 2342-7. 2008. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/cadastroempresa/2008/tabelas_pdf/tabela5.pdf>. Acessado em 07 de Nov. 2014.
93. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests**. Annual Book of International Standards, Switzerland, 2012.
94. JAEGERMANN, C. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**. V. 87, N. 4, p.333-339, 1990.
95. JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R. SALES, A.; DE PAULA, J. F. The influence of cement type and admixture on life span of reinforced concrete utility poles subjected to the high salinity environment of Northeastern Brazil, studied by corrosion potential testing. **Cerâmica**. V. 50 p. 12-20, 2004.
96. KISHIMOTO, I. Experimental Study on the Corrosion Condition of Steel Bars in Cracked Reinforced Concrete Specimen. In: International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants, 2010, Tokyo. **Proceedings...**, Tokyo, p. 166-172, 2010.
97. LEE, H.-S.; NOGUCHIB, T.; TOMOSAWAC, F. Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion. **Cement and Concrete Research**. V. 32, p. 1313-1318, 2002.

98. LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
99. LEVY, S. M.; **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC. USP.
100. IZQUIERDO, D.; ALONSO, C.; ANDRADE; C. CASTELLOTE. M. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation Experimental and statistical study. **Electrochimica acta.** V. 49, p. 2731-2739, May, 2004.
101. MALHEIRO, R. M. C.; MEIRA, G. R.; Lima, M. S. Influência da camada do revestimento de argamassa na penetração de cloretos em estruturas de concreto. **Ambiente Construído.** V. 14, n. 1, p. 47-63, Jan./Mar. 2014.
102. MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures.** V. 27, p. 338-346, 1994.
103. MEIRA, G. R (2004). **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese de Doutorado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 369p.
104. MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, C.; BORBA, J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites.** V.29, p.667-676, 2007.
105. MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., J. C. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites.** V. 27, p. 667 – 676, 2010.
106. MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; VILAR, E. O.; NERY, K. D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials.** V. 55, p. 289 -298, 2014.
107. MIETZ, J. **Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures: a state of the art report.** European Federation of Corrosion Publication. London: The Institute of Materials. V. 24, p. 10-21, 1998.
108. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** Tradutora Cristina Borba. São Paulo: Ibracon, 2008, 121– 123 p, 156 p, 161–170 p.

109. MOHAMMED, T. U. & HAMADA, H. Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions. **ACI Materials Journal**, p.233–242, 2006.
110. MONTEIRO, P. J. M.; GJØRV, O. E.; MEHTA, P. K. Microstructure of the steel-cement paste interface in the presence of chloride. **Cement and concrete research**. V. 15, p. 781-784, March, 1985.
111. 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. p. 229 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC. USP.
112. MORCILLO, M.; CHICO, B.; OTERO, E.; MARIACA, L. Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion. **Materials Performance**. V. 38, p. 72-77, 1999.
113. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª edição revisada e atualizada. Tradutor Salvador E. Gammusso. São Paulo: Pini, 1997.
114. NYGAARD, P. V. **Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion**. Tese de doutorado em engenharia civil, Technical University of Denmark - DTU, Kongens Lyngby, 2009.
115. OH, B. H.; JANG, S. Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. **Cement and Concrete Research**. V. 37, p. 47–53, september, 2006.
116. OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escoria**. 2000. 162p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.
117. OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. Estudo da água do poro de pasta de cimento de escoria pelo método de água de equilíbrio. **Boletim técnico da Escola politécnica da USP**. BT/PCC/259. São Paulo, 2000.
118. OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 87-95.
119. OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**. V. 32, p. 179-185, 2002.
120. OTIENO, M.B.; ALEXANDER, M.G.; BEUSHAUSEN, H. D. Corrosion propagation in cracked and uncracked concrete. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**. Taylor & Francis Group, p. 339- 344, London, 2009.
121. PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. **Materials and Structures**. V. 44, p.155–167, 2011.

122. PAGE, C. L. Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures. **Nature**. V. 258 p. 514–515, 1975.
123. PAGE, C. L.; HAVDAHL, J. Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica cement pastes. **Materials and Structures**, V. 18, p. 41-47, 1985.
124. PILAR, R. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento Portland**. 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2012.
125. PAGE, M.M.; PAGE, C. L.; NGALA, V. T.; ANSTICE, D. J. Ion chromatographic analysis of corrosion inhibitors in concrete. **Construction and Building Materials**. V.16, p. 73-81, January, 2002.
126. POLDER, R. B.; PEELLEN, W. H. A. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**. V. 24 p. 427–435, 2002.
127. PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R.; JOUKOSKI, A.; FREIRE, K. R. R. Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto de redes de distribuição de energia: estudo de caso na região de Manaus. **Química Nova**, V. 29, n. 4, p. 724-734, abril, 2006
128. POURBAIX, M. **Lecciones de corrosión electroquímica**. 3 ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987, 387 p.
129. PRABAKAR J.; MANOHARAN, P D.; NEELAMEGAM, M. Performance evaluation of concrete containing sodium nitrate inhibitor. In: International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, 11., 2009. Bath, UK. **Proceedings...** Bath: NOCMAT, 2009.
130. RAHARINAIVO, A.; GÉNIN, J. M. On the corrosion of reinforcing steels in concrete, in the presence of chlorides. **Materiales de construcción**. V. 36, N. 204, p. 5-16, 1986.
131. RAUPACH, M. Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete – theoretical background and practical consequences. **Construction and Building Materials**. V. 10, n. 5, p. 329-338, February, 1995.
132. RINCÓN, O. T. *et al.* Environment influence on point anodes performance in reinforced concrete. **Construction and Building Materials**. V.22, p. 494-503, January, 2007.
133. RIZZON, A. C.; ANDRADE, J. J. O. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de concretos de cimento branco. In: 48º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. 48º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** São Paulo : IBRACON, 2006.

134. ROMANO, F. S. (2009). **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 153p.
135. SAETTA, A. V.; SCOTTA, R. V.; VITALIANI, V. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. **ACI Materials Journal**. V. 90, N. 5, p. 441-451, 1993.
136. SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. **Cement and Concrete Research**. V. 28, p. 1489 – 1503, 1998.
137. SANDBERG, P. Factors affecting the chloride thresholds for uncracked reinforced concrete exposed in a marine environment. Part I: field exposure tests of reinforced concrete. **Concrete Science and Engineering**. V. 1, p. 92 - 98, 1999.
138. SAGOE-CRENTSIL, K. K.; GLASSER, F. P. Analysis of the steel-concrete interface. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, 3, 1990, UK. **Corrosion of reinforcement in concrete**. p. 74 – 86, 1990.
139. SANJUÁN, M.A. Electrochemical method to assess the absorption of NaCl solutions in OPC and SRPC mortars. **Building and Environment**. V. 35, p. 595 - 601, 2000.
140. SANTOS, L. (2006). **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 161p.
141. SCHIESSL, P.; LAY, S. Influence of concrete composition. **Corrosion in Reinforced Concrete Structures**. Woodhead Publishing Limited. p. 91–134, 2005.
142. SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2006.
143. SILVA, C. A. (2010). **Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da barra (Rio Grande – RS – Brasil)**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Oceânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, do Rio Grande, p. 287.
144. SPAINHOUR, L. K.; WOOTTON, I. A. Corrosion process and abatement in reinforced concrete wrapped by fiber reinforced polymer. **Cement & Concrete Composites**, V. 30 p. 535–543, March, 2008.

145. SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test. **Cement and Concrete Research**. V. 42, p. 1072-1082, 2012.
146. STANISH, K.; THOMAS, M.D.A. The use of bulk diffusion tests to establish time dependent concrete chloride diffusion coefficients. **Cement and Concrete Research**, V. 33 N. 1, p. 55-62, 2003.
147. TAVARES, L. M.; COSTA, E. M.; ANDRADE, J. J. O. Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando barras de aço comum e barras de aço galvanizado. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, Foz do Iguaçu, 2006. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMat, 2006. p. 5844-5855.
148. TANG, L.; NILSSON, L.-O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. **Cement and concrete research**. V. 23, p. 247-253, 1992.
149. THOMAS, M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 26, p. 513–519, 1996.
150. TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M .R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**. V. 39, p. 1357-1365, 2007.
151. TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P., Ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988. Cap. 4 p. 56-59.
152. TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: Part I - ASTM A615 and A706 Reinforcement. **ACI Materials Journal**. V 100, n 6, p. 519 – 527, 2003.
153. TREJO, D.; MONTEIRO, P.J. Corrosion performance of conventional (ASTM A615) and low-alloy (ASTM A706) reinforcing bars embedded in concrete and exposed to chloride environments. **Cement and Concrete Research**. V. 35, p. 562–571, 2004.
154. TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: Part I - ASTM A 615 and A 706 Reinforcement. **ACI Materials Journal**. V 100. n 1. p. 519 – 527, 2003.
155. TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: Part II - ASTM A 615 and A 706 Reinforcement. **ACI Materials Journal**. V 101. n 1. p. 57 – 64, 2004.
156. TREJO, D.; HALMEN, C.; REINSCHMIDT, K. **Corrosion performance tests for reinforcing steel in concrete: technical report**. SL 0-4825-1. Texas Transportation Institute, Inc. p. 7-33, 2009.
157. TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de**

- concreto armado.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
158. TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Sweden: CBI, p. 468, 1982.
159. TYDLITAT, V.; ZAKOUTSKY, J.; VOLFOVA, P.; CERNY, R. Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics. **Thermochimica Acta.** V. 543, p. 125-129, 2012.
160. VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** Tese de Doutorado Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, UFGRS, Porto Alegre- RS, 2005.
161. VÁZQUEZ, E; BARRA, M.; APONTE, D.; JIMÉNEZ, C.; VALLS, S. Improvement of durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. **Construction and Building Materials.** Available online November 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028>>.
162. VEJMEJKOVA, E.; KEPPERT, M.; ROVNANIKOVA, P.; ONDRACEK, M.; KERŠNER, Z.; CERNY, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and concrete composites.** V. 34, p. 55-61, 2012.
163. VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído.** V. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.
164. VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo de corrosão de armaduras em concretos armados com adição de sílica ativa.** Tese de doutorado em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre – RGS, 2003.
165. WHEAT, H. G. Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Composites.** V. 24, p. 119–126, 2002.
166. WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.** São Paulo: Edusp, 2003. p. 14-17, p.24, p.72-78, p.98-105.
167. YU, H.; SHI, X.; HARTT, W.; LU, B. Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research.** V. 40, p. 1507–1516, 2010.
168. ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANGA, S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. **Journal of Cleaner Production.** Available online February 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.040>>.

APÊNDICE A

RESULTADOS DE ENSAIO DE TERMOGRAVIMÉTRIA E TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL.

Figura A.1 – Ensaio de TG e DTG para pasta de referência aos 59 dias.

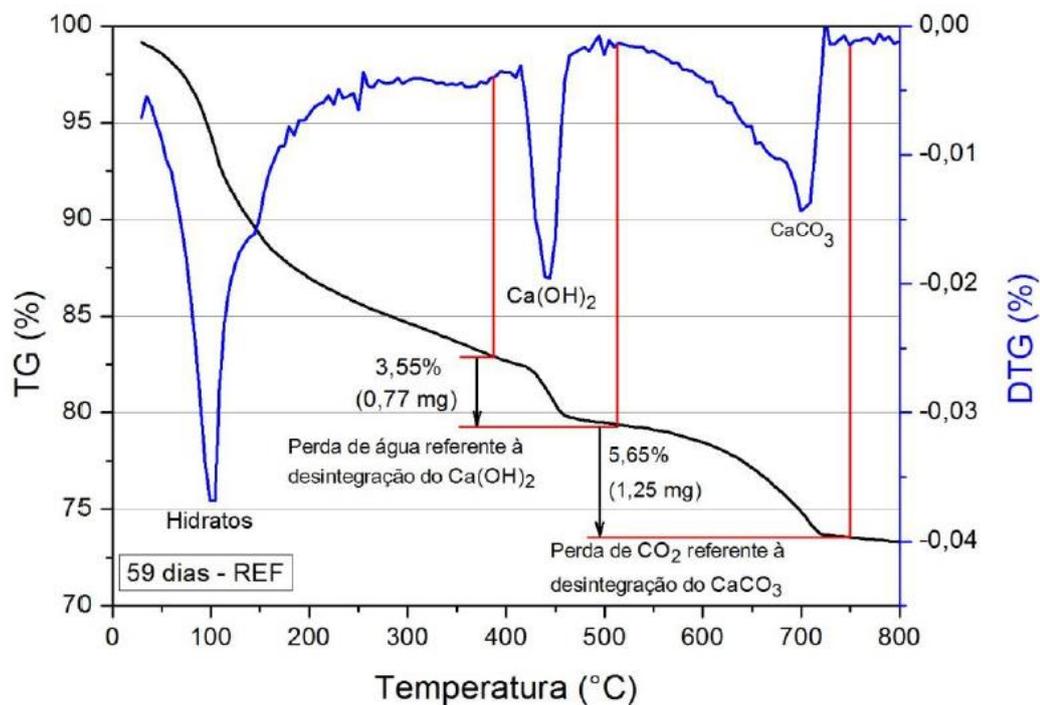


Figura A.2 – Ensaio de TG e DTG para pasta de referência aos 90 dias.

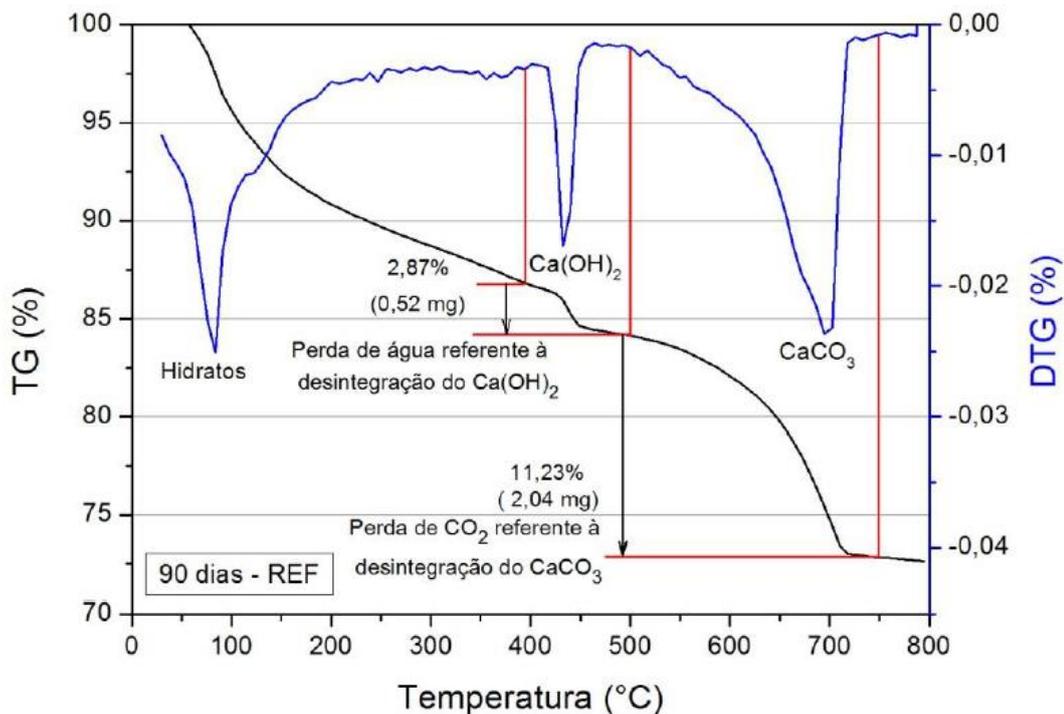


Figura A.3 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 10% de RTM aos 59 dias.

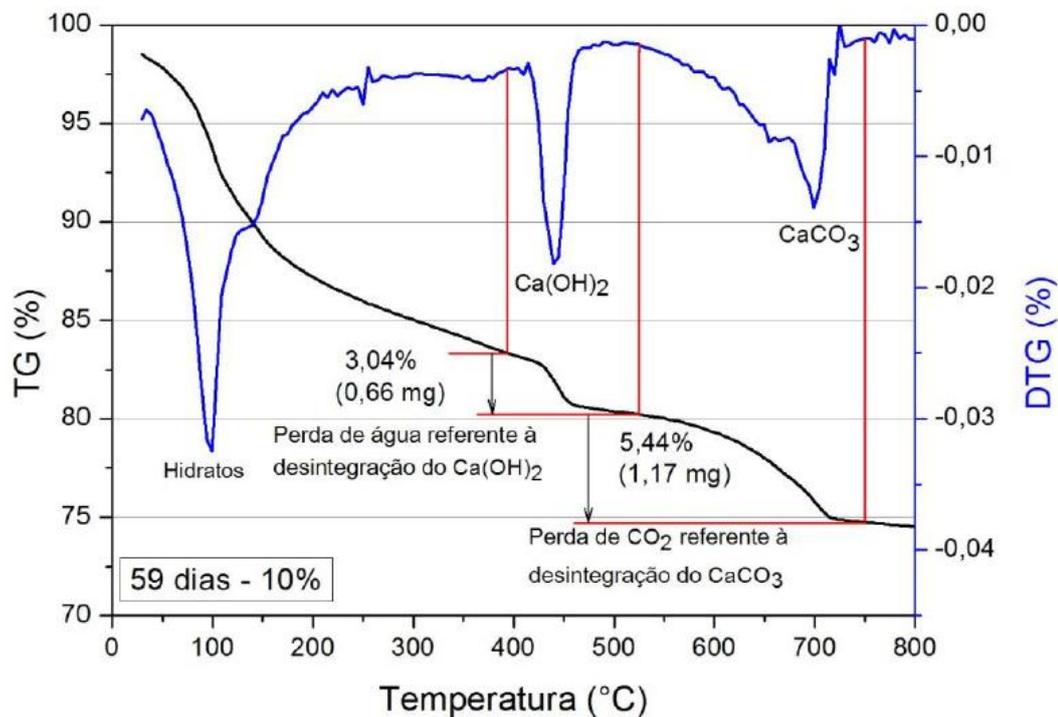


Figura A.4 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 10% de RTM aos 90 dias..

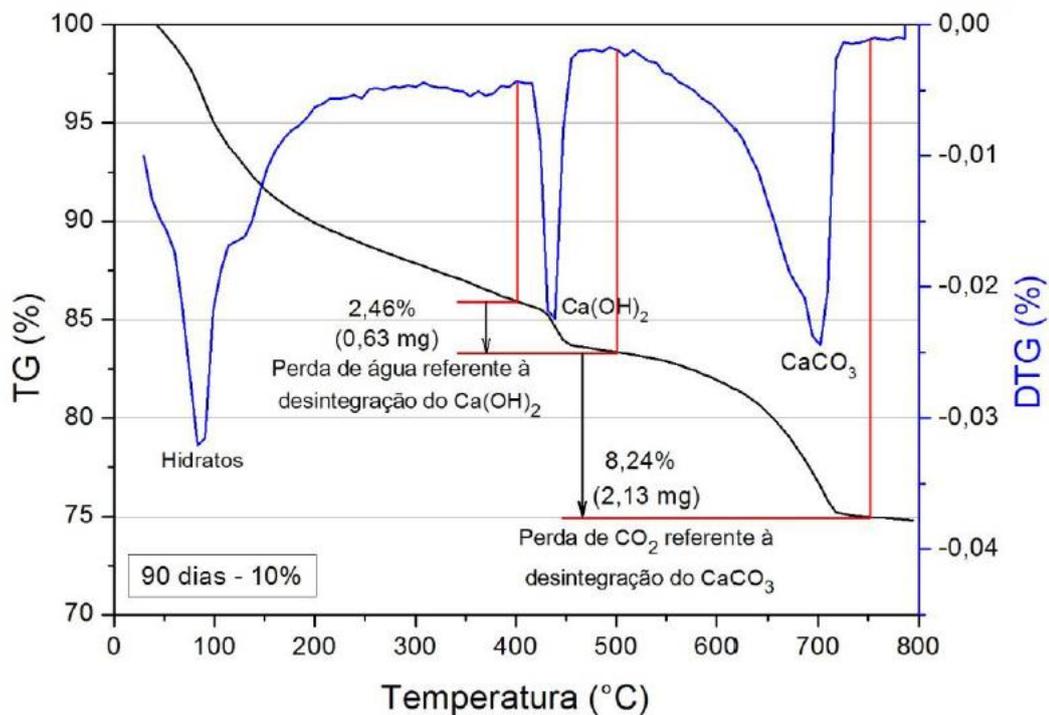


Figura A.5 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 30% de RTM aos 59 dias.

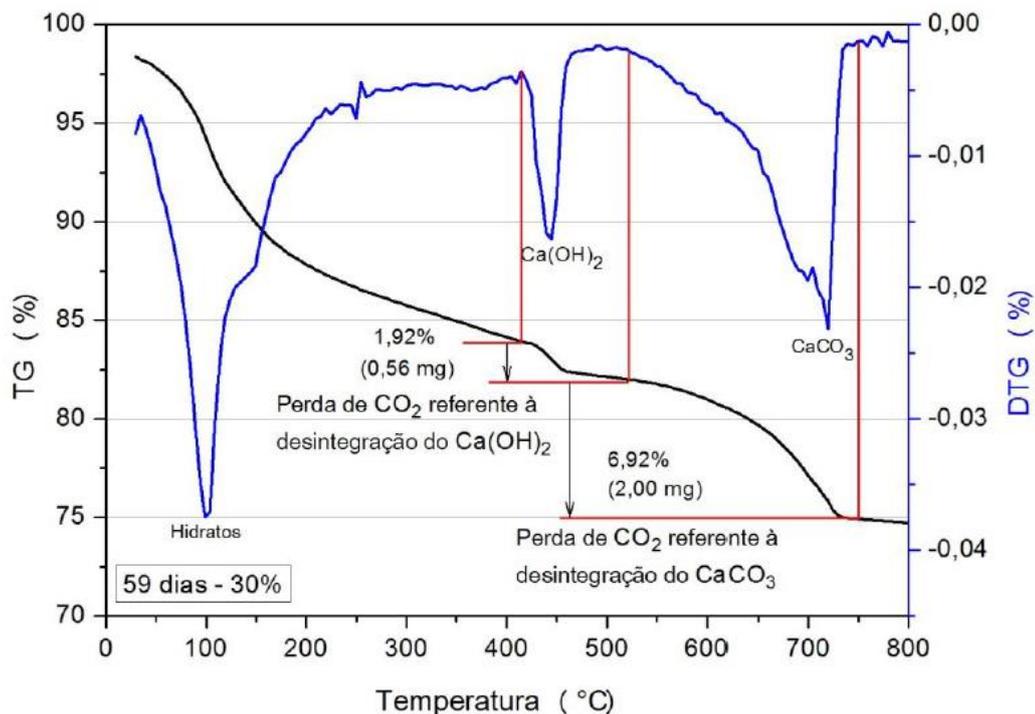
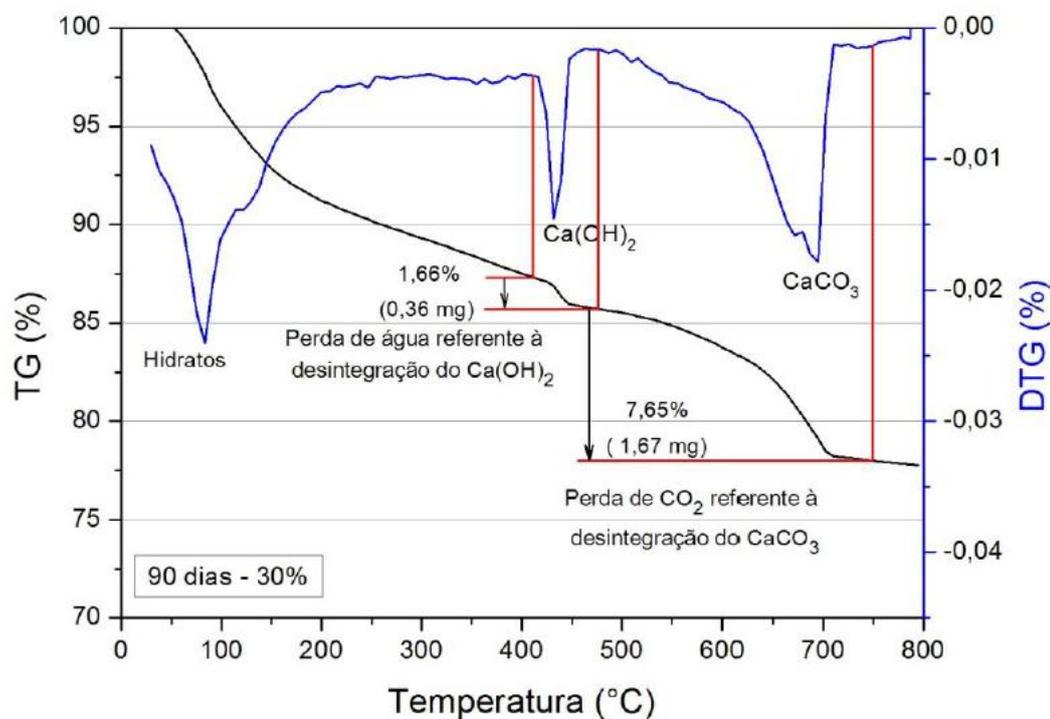


Figura A.6 – Ensaio de TG e DTG para pasta com adição de 30% de RTM aos 90 dias.



APÊNDICE B**RESULTADOS DO ENSAIOS DE TITULAÇÃO PARA OS CPS EM ENSAIO DE IMERSÃO E SECAGEM.****Tabela B.1** – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,877	0,943	1,051	2,834	0,811	0,802
Conc. na 2° camada	1,081	1,278	0,994	1,028	1,161	1,014
Conc. na 3° camada	0,791	1,118	0,798	0,969	0,970	0,951
Conc. na 4° camada	0,698	0,761	0,715	0,846	0,826	0,726
Conc. na 5° camada	0,629	0,717	0,582	0,796	0,582	0,531
Tempo de ensaio (Dias)	60	60	45	45	45	75
d desp (cm)	1,725	1,955	1,825	2,213	1,771	1,578
d esc. (cm)	1,375	1,605	1,475	2,013	1,421	1,228
R ²	0,877	0,841	0,976	0,9196	0,9411	0,8835
CS	1,036	1,304	1,061	1,0395	1,1771	1,0349
C0	0,351	0,568	0,327	0,592	0,5	0,41
Dns (cm ² /S)	2,37E-07	1,15E-07	4,83E-07	5,03E-07	1,85E-07	1,24E-07
Teor crítico	0,612	0,672	0,655	0,730	0,660	0,617
Dados espúrios	-1,072	0,341	-0,067	1,687	0,049	-0,938

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,962	0,958	1,295	3,307	1,145	1,158
Conc. na 2° camada	1,374	1,567	1,360	1,231	1,374	1,300
Conc. na 3° camada	1,158	1,253	1,138	1,149	1,320	1,263
Conc. na 4° camada	0,950	0,946	0,943	1,084	1,100	1,081
Conc. na 5° camada	0,800	0,941	0,794	1,035	0,872	0,803
Tempo de ensaio (Dias)	60	60	45	45	45	75
d desp (cm)	1,725	1,955	1,825	2,213	1,771	1,578
d esc. (cm)	1,375	1,605	1,475	2,013	1,421	1,228
R ²	0,999	0,893	0,999	0,915	0,883	0,831
CS	1,3755	1,533	1,361	3,31	1,427	1,361
C0	0,554	0,496	0,585	0,808	0,572	0,337
Dns (cm ² /S)	2,00E-07	2,39E-07	2,37E-07	6,15E-09	4,36E-07	4,28E-07
Teor crítico	0,833	0,815	0,800	0,808	0,948	0,954
Dados espúrios	-0,371	-0,624	-0,835	-0,722	1,240	1,311

Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,469	1,135	1,018	1,749	2,005	1,469
Conc. na 2° camada	1,319	1,288	1,274	1,556	1,890	1,319
Conc. na 3° camada	1,119	1,095	1,198	1,191	1,508	1,119

Conc. na 4° camada	1,046	1,022	1,010	1,211	1,044	1,046
Conc. na 5° camada	0,800	0,808	0,728	0,803	0,717	0,800
Tempo de ensaio (Dias)	105	105	105	135	120	105
d desp (cm)	2	2,35	2	1,25	2,284	2
d esc. (cm)	2	2	1,65	1,25	2,284	2
R ²	0,963	0,899	0,838	0,903	0,949	0,963
CS	1,454	1,291	1,325	1,727	2,099	1,454
C0	0,61	0,81	0,62	0,531	0,648	0,61
Dns (cm ² /S)	2,01E-08	5,51E-08	1,17E-08	1,22E-08	7,18E-08	2,01E-08
Teor crítico	0,611	0,832	0,620	0,554	0,737	0,611
Dados espúrios	-0,610	1,597	-0,516	-1,179	0,647	-0,610

Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,688	1,405	1,300	2,004	2,280	1,688
Conc. na 2° camada	1,580	1,603	1,556	1,837	2,135	1,580
Conc. na 3° camada	1,343	1,341	1,413	1,397	1,785	1,343
Conc. na 4° camada	1,306	1,255	1,265	1,417	1,265	1,306
Conc. na 5° camada	1,050	1,028	0,960	1,091	0,907	1,050
Tempo de ensaio (Dias)	105	105	105	135	120	105
d desp (cm)	2	2,35	2	1,25	2,284	2
d esc. (cm)	2	2	1,65	1,25	1,934	2
R ²	0,948	0,906	0,902	0,875	0,958	0,948
CS	1,684	1,581	1,59	1,999	2,369	1,684
C0	0,63	0,144	0,711	0,992	0,65	0,63
Dns (cm ² /S)	2,89E-07	5,11E-07	1,53E-07	6,55E-08	1,01E-07	2,89E-07
Teor crítico	1,033	0,879	0,994	1,306	0,961	1,033
Dados espúrios	0,057	-0,992	-0,210	1,915	-0,429	0,057

Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	2,054	0,855	0,975	0,823	1,003	1,147
Conc. na 2° camada	1,260	1,023	1,166	0,804	1,200	1,271
Conc. na 3° camada	0,940	0,763	0,870	0,823	0,895	1,023
Conc. na 4° camada	0,754	0,709	0,825	0,733	0,827	0,911
Conc. na 5° camada	0,704	0,653	0,744	0,705	0,765	0,805
Tempo de ensaio (Dias)	60	45	45	75	60	75
d desp (cm)	1,495	1,485	1,912	1,72	1,78	2,276
d esc. (cm)	1,145	1,135	1,562	0,87	1,43	1,926
R ²	0,946	0,834	0,823	0,872	0,847	0,961
CS	1,233	1,021	1,126	0,815	1,155	1,246
C0	0,52	0,471	0,512	0,57	0,584	0,583
Dns (cm ² /S)	1,16E-07	2,41E-07	2,89E-07	1,73E-07	1,19E-07	2,03E-07
Teor crítico	0,732	0,695	0,695	0,708	0,697	0,739
Dados espúrios	1,074	-0,808	-0,821	-0,163	-0,698	1,416

Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	2,319	1,146	1,355	1,158	1,309	1,543
Conc. na 2º camada	1,624	1,226	1,565	1,039	1,453	1,667
Conc. na 3º camada	1,211	1,110	1,291	1,251	1,285	1,243
Conc. na 4º camada	1,067	1,055	1,140	1,185	1,135	1,198
Conc. na 5º camada	0,999	1,046	0,947	1,009	0,997	1,095
Tempo de ensaio (Dias)	60	45	45	75	60	75
d desp (cm)	1,495	1,485	1,912	1,72	1,78	2,276
d esc. (cm)	1,145	1,135	1,562	0,87	1,43	1,926
R ²	0,9905	0,999	0,974	0,814	0,999	0,867
CS	1,621	1,225	1,554	1,268	1,452	1,629
C0	1,009	1,044	0,727	0,879	0,631	1,003
Dns (cm ² /S)	2,70E-08	3,34E-08	2,44E-07	1,11E-07	3,73E-07	5,11E-08
Teor crítico	1,028	1,049	0,939	1,061	1,015	1,014
Dados espúrios	0,237	0,728	-1,835	1,018	-0,071	-0,078

Tabela B.7 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,611	1,785	1,941	1,743	1,817	1,587
Conc. na 2º camada	1,292	1,783	2,761	2,479	1,885	1,485
Conc. na 3º camada	1,339	1,302	1,513	1,448	1,310	1,157
Conc. na 4º camada	0,949	1,147	1,044	1,027	1,271	0,931
Conc. na 5º camada	0,717	0,820	0,564	0,676	0,809	0,789
Tempo de ensaio (Dias)	135	120	120	150	135	105
d desp (cm)	1,693	2,026	1,585	1,51	2,132	1,84
d esc. (cm)	1,143	1,676	1,235	1,16	1,782	1,84
R ²	0,999	0,9124	0,962	0,932	0,858	0,99
CS	1,336	1,752	2,73	2,41	1,853	1,482
C0	0,626	0,581	0,538	0,536	0,711	0,712
Dns (cm ² /S)	2,47E-08	7,35E-08	2,55E-08	2,01E-08	3,91E-08	4,63E-08
Teor crítico	0,720	0,785	0,734	0,739	0,782	0,746
Dados espúrios	-1,173	1,287	-0,640	-0,450	1,152	-0,176

Tabela B.8 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,908	2,095	2,226	1,979	2,095	1,943
Conc. na 2º camada	1,532	2,080	2,954	2,706	2,180	1,778
Conc. na 3º camada	1,922	1,580	1,842	1,693	1,510	1,557
Conc. na 4º camada	1,240	1,352	1,331	1,183	1,552	1,161
Conc. na 5º camada	1,032	1,088	0,903	1,041	1,108	1,120
Tempo de ensaio (Dias)	135	120	150	120	135	105
d desp (cm)	1,793	2,126	1,685	1,71	2,132	2,06
d esc. (cm)	1,443	1,776	1,335	1,36	1,782	1,71

R ²	0,978	0,955	0,952	0,999	0,612	0,874
CS	1,913	2,181	2,921	2,705	2,119	1,802
C0	0,9	0,3	1,053	1,023	1,06	0,99
Dns (cm ² /S)	1,34E-08	2,24E-07	6,65E-09	1,70E-08	3,78E-08	5,11E-08
Teor crítico	0,910	1,071	1,055	1,060	1,121	1,052
Dados espúrios	-1,905	0,373	0,150	0,213	1,075	0,094

Tabela B.9 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,860	0,673	0,798	0,729	0,587	0,633
Conc. na 2º camada	0,782	0,827	0,835	1,082	0,892	1,082
Conc. na 3º camada	0,714	0,764	0,849	0,939	0,865	0,810
Conc. na 4º camada	0,752	0,694	0,700	0,802	0,766	0,757
Conc. na 5º camada	0,628	0,611	0,517	0,717	0,585	0,685
Tempo de ensaio (Dias)	45	30	30	75	90	30
d desp (cm)	2	1,995	1,756	2,055	2	2,021
d esc. (cm)	2	1,645	1,406	1,705	1,65	1,671
R ²	0,74	0,985	0,737	0,997	0,763	0,812
CS	0,837	0,8337	0,8885	1,0838	0,927	1,031
C0	0,45	0,412	0,31	0,609	0,534	0,312
Dns (cm ² /S)	9,80E-07	9,26E-07	8,11E-07	1,17E-07	1,30E-07	8,13E-07
Teor crítico	0,631	0,603	0,595	0,688	0,630	0,611
Dados espúrios	0,148	-0,704	-0,935	1,837	0,120	-0,466

Tabela B.10 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,019	0,731	1,005	1,108	1,005	1,085
Conc. na 2º camada	1,006	1,009	1,054	1,189	1,255	1,635
Conc. na 3º camada	0,963	0,912	0,917	1,219	1,249	1,211
Conc. na 4º camada	0,901	0,901	0,918	1,136	1,099	1,026
Conc. na 5º camada	0,918	0,769	0,908	0,920	1,067	0,750
Tempo de ensaio (Dias)	45	30	30	75	90	30
d desp (cm)	2	1,995	1,756	2,055	2	2,021
d esc. (cm)	1,65	1,645	1,406	1,205	1,15	1,671
R ²	0,854	0,845	0,991	0,853	0,81	0,952
CS	1,02	1,007	1,054	1,24	1,277	1,615
C0	0,8	0,66	0,913	0,552	0,882	0,545
Dns (cm ² /S)	7,11E-07	5,88E-07	1,00E-08	2,43E-07	2,67E-07	2,72E-07
Teor crítico	0,906	0,780	0,913	0,894	1,108	0,716
Dados espúrios	0,149	-0,787	0,199	0,058	1,647	-1,266

Tabela B.11 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,923	0,903	0,883	0,981	0,881	0,898

Conc. na 2° camada	1,397	1,263	1,133	1,377	1,317	1,455
Conc. na 3° camada	1,008	0,910	0,957	0,991	0,991	0,974
Conc. na 4° camada	0,914	0,785	0,863	0,820	0,839	0,880
Conc. na 5° camada	0,714	0,688	0,670	0,697	0,662	0,739
Tempo de ensaio (Dias)	105	105	120	45	105	105
d desp (cm)	2,215	1,815	2,01	1,96	1,964	1,825
d esc. (cm)	1,865	1,465	1,66	1,61	1,614	1,475
R ²	0,892	0,873	0,949	0,958	0,968	0,898
CS	1,3782	1,357	1,137	1,342	1,306	1,405
C0	0,694	0,697	0,582	0,489	0,584	0,579
Dns (cm ² /S)	3,73E-08	2,05E-08	7,55E-08	1,70E-07	5,27E-08	5,44E-08
Teor crítico	0,710	0,708	0,684	0,627	0,655	0,693
Dados espúrios	0,938	0,868	0,153	-1,621	-0,743	0,405

Tabela B.12 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,233	1,214	1,178	1,219	1,211	1,227
Conc. na 2° camada	1,756	1,592	1,458	1,724	1,710	1,839
Conc. na 3° camada	1,405	1,270	1,288	1,404	1,302	1,305
Conc. na 4° camada	1,221	1,102	1,122	1,179	1,167	1,194
Conc. na 5° camada	1,016	0,983	0,985	0,999	0,979	1,099
Tempo de ensaio (Dias)	105	105	120	45	135	105
d desp (cm)	2,215	1,915	2,01	1,86	1,764	1,725
d esc. (cm)	1,865	1,565	1,66	1,51	1,414	1,375
R ²	0,9923	0,971	0,999	0,997	0,9385	0,97
CS	1,762	1,564	1,458	1,719	1,695	1,836
C0	0,717	0,756	0,633	0,852	0,9059	1,132
Dns (cm ² /S)	2,38E-08	8,95E-08	1,70E-08	1,56E-07	2,69E-08	1,10E-08
Teor crítico	0,722	0,933	0,637	1,000	0,965	1,133
Dados espúrios	-0,956	0,189	-1,414	0,548	0,359	1,273

Tabela B.13 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,133	1,157	0,855	1,002	0,974	0,763
Conc. na 2° camada	1,526	1,310	1,176	1,379	1,340	1,029
Conc. na 3° camada	1,289	1,114	1,015	1,190	1,157	0,745
Conc. na 4° camada	0,840	1,023	0,675	0,792	0,769	0,655
Conc. na 5° camada	0,767	0,613	0,629	0,738	0,717	0,524
Tempo de ensaio (Dias)	45	60	60	60	45	45
d desp (cm)	2,15	2,0935	1,773	2,133	2,056	1,253
d esc. (cm)	1,8	1,7435	1,423	1,783	1,706	0,903
R ²	0,8816	0,835	0,855	0,856	0,855	0,932
CS	1,555	1,341	1,199	1,407	1,36	0,993
C0	0,583	0,364	0,488	0,573	0,55	0,212
Dns (cm ² /S)	1,47E-07	2,63E-07	1,13E-07	1,13E-07	1,51E-07	3,63E-07

Teor crítico	0,672	0,648	0,622	0,656	0,643	0,674
Dados espúrios	1,021	-0,214	-1,580	0,163	-0,470	1,081

Tabela B.14 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,531	1,417	1,074	1,309	1,290	1,097
Conc. na 2º camada	1,861	1,525	1,544	1,753	1,683	1,361
Conc. na 3º camada	1,614	1,492	1,295	1,485	1,480	1,077
Conc. na 4º camada	1,181	1,308	1,009	1,135	1,137	0,980
Conc. na 5º camada	1,096	0,915	0,950	0,967	1,034	0,851
Tempo de ensaio (Dias)	45	60	60	60	45	45
d desp (cm)	2,15	2,0935	1,773	2,133	1,656	1,153
d esc. (cm)	1,8	1,2435	1,423	1,783	1,306	0,803
R ²	0,943	0,726	0,961	0,976	0,93	0,947
CS	1,871	1,606	1,555	1,767	1,702	1,331
C0	0,612	0,712	0,877	0,66	0,818	0,635
Dns (cm ² /S)	3,21E-07	2,72E-07	7,29E-08	1,76E-07	1,97E-07	2,49E-07
Teor crítico	0,933	1,122	0,946	0,867	1,075	1,027
Dados espúrios	-0,650	1,322	-0,510	-1,329	0,830	0,337

Tabela B.15 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,951	0,846	0,948	0,975	0,899	0,923
Conc. na 2º camada	1,399	1,252	1,304	1,034	1,236	1,104
Conc. na 3º camada	1,041	0,937	1,125	1,067	1,067	0,823
Conc. na 4º camada	0,926	0,838	0,748	0,949	0,710	0,733
Conc. na 5º camada	0,723	0,692	0,698	0,741	0,661	0,705
Tempo de ensaio (Dias)	120	135	60	60	135	135
d desp (cm)	1,653	1,658	1,62	1,964	1,716	1,79
d esc. (cm)	1,653	1,308	1,27	1,114	1,366	1,44
R ²	0,904	0,955	0,855	0,916	0,855	0,973
CS	1,812	1,234	1,33	1,08	1,261	1,098
C0	0,451	0,574	0,542	0,541	0,514	0,6701
Dns (cm ² /S)	7,16E-08	5,02E-08	1,13E-07	1,44E-07	5,02E-08	1,56E-08
Teor crítico	0,689	0,724	0,731	0,736	0,668	0,677
Dados espúrios	-0,519	0,656	0,915	1,076	-1,214	-0,912

Tabela B.16 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	2,325	1,269	1,319	1,234	1,474	1,296
Conc. na 2º camada	1,711	1,713	1,624	1,467	1,544	1,583
Conc. na 3º camada	1,350	1,277	1,411	1,343	1,351	1,180
Conc. na 4º camada	1,201	1,230	1,117	1,198	1,109	1,137
Conc. na 5º camada	1,014	1,053	0,999	1,025	0,950	0,974

Tempo de ensaio (Dias)	120	135	60	60	135	135
d desp (cm)	1,653	1,658	1,62	1,964	1,716	1,79
d esc. (cm)	1,653	1,308	1,27	1,614	1,366	1,44
R ²	0,952	0,873	0,966	0,965	0,989	0,897
CS	2,273	1,663	1,637	1,485	1,551	1,552
C0	1,081	0,901	0,798	0,876	0,463	0,917
Dns (cm ² /S)	1,72E-08	5,05E-08	1,48E-07	2,02E-07	1,64E-07	3,06E-08
Teor crítico	1,088	1,075	1,055	1,037	0,990	0,973
Dados espúrios	1,116	0,839	0,400	0,020	-1,002	-1,373

Tabela B.17 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,730	0,782	0,661	0,699	0,794	0,719
Conc. na 2º camada	1,101	0,994	0,997	1,054	1,009	0,913
Conc. na 3º camada	0,847	0,798	0,767	0,811	0,810	0,733
Conc. na 4º camada	0,733	0,665	0,664	0,702	0,675	0,611
Conc. na 5º camada	0,533	0,534	0,483	0,510	0,542	0,490
Tempo de ensaio (Dias)	30	45	30	30	45	30
d desp (cm)	1,897	1,786	1,956	1,982	1,915	1,983
d esc. (cm)	1,547	1,436	1,606	1,632	1,565	1,633
R ²	0,974	0,991	0,974	0,974	0,992	0,991
CS	1,084	0,981	0,983	1,037	0,996	0,901
C0	0,074	0,074	0,054	0,09	0,119	0,049
Dns (cm ² /S)	7,97E-07	6,28E-07	8,24E-07	7,60E-07	5,62E-07	9,89E-07
Teor crítico	0,525	0,542	0,460	0,479	0,517	0,450
Dados espúrios	0,784	1,230	-0,944	-0,436	0,575	-1,209

Tabela B.18 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,007	1,051	1,021	1,036	1,167	0,979
Conc. na 2º camada	1,313	1,296	1,230	1,315	1,295	1,179
Conc. na 3º camada	1,228	1,073	1,043	1,058	1,089	1,000
Conc. na 4º camada	1,103	0,943	0,916	0,929	0,997	0,898
Conc. na 5º camada	0,790	0,825	0,801	0,813	0,837	0,768
Tempo de ensaio (Dias)	30	45	30	30	45	30
d desp (cm)	1,897	1,786	1,956	1,982	1,915	1,983
d esc. (cm)	1,547	1,436	1,606	1,632	1,565	1,633
R ²	0,831	0,975	0,988	0,954	0,973	0,986
CS	1,361	1,273	1,216	1,282	1,28	1,167
C0	0,43	0,358	0,397	0,277	0,418	0,402
Dns (cm ² /S)	8,49E-07	6,06E-07	8,69E-07	9,84E-07	6,06E-07	8,85E-07
Teor crítico	0,859	0,823	0,765	0,749	0,824	0,743
Dados espúrios	1,364	0,611	-0,606	-0,934	0,629	-1,064

Tabela B.19 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,794	1,067	1,051	0,802	1,007	0,979
Conc. na 2° camada	1,009	1,009	1,199	0,966	0,952	1,093
Conc. na 3° camada	0,810	0,810	0,798	0,775	0,764	0,744
Conc. na 4° camada	0,675	0,726	0,715	0,694	0,685	0,666
Conc. na 5° camada	0,552	0,590	0,582	0,565	0,557	0,542
Tempo de ensaio (Dias)	75	90	90	90	75	90
d desp (cm)	2,087	2,176	2,452	2,023	1,967	2,15
d esc. (cm)	1,737	1,826	2,102	1,673	1,617	1,8
R ²	0,994	0,948	0,919	0,948	0,948	0,918
CS	1,005	0,999	1,191	0,956	0,942	1,084
C0	0,437	0,474	0,611	0,454	0,447	0,563
Dns (cm ² /S)	1,11E-07	1,03E-07	2,05E-08	1,03E-07	1,24E-07	2,32E-08
Teor crítico	0,521	0,552	0,611	0,547	0,547	0,564
Dados espúrios	-1,214	-0,156	1,795	-0,323	-0,343	0,241

Tabela B.20 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,121	1,392	1,409	1,116	1,302	1,192
Conc. na 2° camada	1,250	1,326	1,528	1,238	1,236	1,305
Conc. na 3° camada	1,093	1,075	1,092	1,092	1,082	1,086
Conc. na 4° camada	0,966	0,982	0,987	0,973	0,992	0,926
Conc. na 5° camada	0,801	0,890	0,862	0,869	0,830	0,796
Tempo de ensaio (Dias)	105	120	90	105	90	75
d desp (cm)	2,087	2,176	2,452	2,023	1,967	2,15
d esc. (cm)	1,737	1,826	2,102	1,673	1,617	1,8
R ²	0,984	0,962	0,944	0,999	0,963	0,997
CS	1,256	1,41	1,521	1,23	1,239	1,3
C0	0,632	0,677	0,89	0,706	0,734	0,675
Dns (cm ² /S)	1,19E-07	1,04E-07	1,94E-08	1,19E-07	1,09E-07	1,04E-07
Teor crítico	0,780	0,834	0,890	0,840	0,842	0,751
Dados espúrios	-0,857	0,223	1,359	0,342	0,384	-1,450

Tabela B.21 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,7163	0,9659	0,7846	0,6581	0,6693	0,7508
Conc. na 2° camada	0,8665	0,9135	0,9298	0,7047	0,9153	0,8978
Conc. na 3° camada	0,6957	0,7334	0,7454	0,7253	0,7338	0,7198
Conc. na 4° camada	0,6231	0,6568	0,6666	0,6486	0,6562	0,6437
Conc. na 5° camada	0,5070	0,5344	0,5416	0,5270	0,5332	0,5230
Tempo de ensaio (Dias)	45	45	30	30	45	45
d desp (cm)	1,783	1,757	1,615	1,815	1,815	1,685
d esc. (cm)	1,433	1,757	1,265	0,965	1,465	1,335

R ²	0,969	0,976	0,969	0,958	0,97	0,969
CS	0,851	0,974	0,913	0,733	0,899	0,882
C0	0,21	0,301	0,22	0,172	0,228	0,22
Dns (cm ² /S)	5,22E-07	4,83E-07	8,03E-07	9,27E-07	5,09E-07	5,13E-07
Teor crítico	0,516	0,546	0,591	0,542	0,538	0,554
Dados espúrios	-1,296	-0,053	1,745	-0,225	-0,407	0,235

Tabela B.22 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,055	1,339	1,104	0,979	1,007	1,109
Conc. na 2º camada	1,207	1,246	1,316	1,110	1,219	1,212
Conc. na 3º camada	1,025	1,098	1,093	1,112	1,035	1,055
Conc. na 4º camada	0,982	1,026	0,982	0,966	0,995	0,938
Conc. na 5º camada	0,820	0,895	0,898	0,821	0,836	0,847
Tempo de ensaio (Dias)	45	45	30	30	45	45
d desp (cm)	1,683	1,757	1,815	1,815	1,715	1,785
d esc. (cm)	1,333	1,757	1,465	0,965	1,365	1,435
R ²	0,932	0,98	0,941	0,814	0,854	0,998
CS	1,192	1,331	1,285	1,153	1,201	1,21
C0	0,408	0,684	0,481	0,403	0,266	0,765
Dns (cm ² /S)	7,73E-07	4,53E-07	8,79E-07	1,60E-06	1,17E-06	1,65E-07
Teor crítico	0,868	0,910	0,877	0,956	0,875	0,856
Dados espúrios	-0,609	0,530	-0,363	1,785	-0,418	-0,924

Tabela B.23 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,843	1,175	0,811	0,725	0,830	0,742
Conc. na 2º camada	1,017	0,917	0,979	0,882	1,001	0,902
Conc. na 3º camada	0,766	0,784	0,737	0,754	0,754	0,772
Conc. na 4º camada	0,714	0,695	0,687	0,669	0,703	0,685
Conc. na 5º camada	0,597	0,561	0,602	0,591	0,557	0,520
Tempo de ensaio (Dias)	105	120	90	105	90	75
d desp (cm)	2,05	1,965	1,95	1,975	1,867	1,846
d esc. (cm)	1,7	1,965	1,6	1,625	1,517	1,496
R ²	0,882	0,928	0,911	0,993	0,861	0,943
CS	1,007	1,135	0,973	0,879	0,987	0,911
C0	0,601	0,55	0,619	0,519	0,522	0,45
Dns (cm ² /S)	2,88E-08	3,90E-08	2,19E-08	7,71E-08	5,68E-08	1,23E-07
Teor crítico	0,609	0,567	0,621	0,580	0,572	0,559
Dados espúrios	0,970	-0,712	1,477	-0,181	-0,523	-1,032

Tabela B.24 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de imersão e secagem.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	1,171	1,474	1,136	1,075	1,205	1,055

Conc. na 2° camada	1,365	1,301	1,324	1,209	1,333	1,281
Conc. na 3° camada	1,123	1,107	1,023	1,061	1,069	0,993
Conc. na 4° camada	1,083	1,040	0,991	0,993	1,015	1,020
Conc. na 5° camada	0,948	0,896	0,915	0,901	0,897	0,844
Tempo de ensaio (Dias)	105	120	90	105	90	75
d desp (cm)	2,05	1,965	1,95	1,975	1,867	1,846
d esc. (cm)	1,7	1,965	1,6	1,625	1,517	1,496
R ²	0,911	0,961	0,873	0,96	0,885	0,58
CS	1,341	1,455	1,296	1,203	1,322	1,262
C0	0,833	0,867	0,846	0,843	0,905	0,87
Dns (cm ² /S)	8,41E-08	5,26E-08	4,26E-08	6,80E-08	3,14E-08	3,88E-08
Teor crítico	0,919	0,902	0,868	0,895	0,917	0,884
Dados espúrios	0,769	0,321	-0,603	0,117	0,735	-0,182

APÊNDICE C**RESULTADOS DO ENSAIOS DE TITULAÇÃO PARA OS CPS EM ENSAIO DE ELETROMIGRAÇÃO.****Tabela C.1** – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,668	0,303	0,365	0,305	0,300	0,423
Conc. na 2º camada	0,954	0,251	0,290	0,244	0,313	0,366
Conc. na 3º camada	0,462	0,247	0,250	0,230	0,276	0,280
Conc. na 4º camada	0,253	0,172	0,217	0,178	0,245	0,239
Conc. na 5º camada	0,185	0,131	0,182	0,182	0,172	0,173
Tempo de ensaio (Horas)	45	75	65	65	30	40
Xd (cm)	2,66	2,362	2,13	2,41	2,247	2,31
d desp (cm)	1,924	1,87	2,267	2,098	1,805	1,78
d esc. (cm)	1,574	1,87	2,267	2,098	1,805	1,78
R ²	0,998	0,924	0,935	0,864	0,946	0,983
CS	0,953	0,299	0,354	0,297	0,357	0,419
C0	0,188	0,02	0,1799	0,176	0,12	0,115
Dmig (cm ² /S)	6,26E-05	3,55E-05	3,89E-05	4,13E-05	8,65E-05	6,58E-05
Dns (cm ² /S)	2,62E-06	1,30E-06	1,26E-06	1,56E-06	3,00E-06	2,36E-06
Teor crítico	0,191	0,133	0,182	0,177	0,188	0,179
Dados espúrios	0,766	-1,975	0,330	0,084	0,598	0,196

Tabela C.2 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,907	0,509	0,703	0,504	1,019	0,627
Conc. na 2º camada	1,176	0,604	0,545	0,473	0,529	0,601
Conc. na 3º camada	0,681	0,501	0,470	0,473	0,524	0,562
Conc. na 4º camada	0,459	0,464	0,481	0,392	0,445	0,511
Conc. na 5º camada	0,440	0,384	0,446	0,406	0,401	0,395
Tempo de ensaio (Horas)	45	75	65	65	30	40
Xd (cm)	2,66	2,362	2,13	2,41	2,247	2,31
d desp (cm)	1,924	1,87	2,267	2,098	1,805	1,78
d esc. (cm)	1,574	1,87	2,267	2,098	1,805	1,78
R ²	0,998	0,927	0,814	0,675	0,936	0,880
CS	1,17	0,596	0,63	0,503	1,01	0,641
C0	0,43	0,263	0,414	0,367	0,456	0,194
Dmig (cm ² /S)	6,26E-05	3,55E-05	3,89E-05	4,13E-05	8,65E-05	6,58E-05
Dns (cm ² /S)	2,62E-06	1,30E-06	1,26E-06	1,56E-06	3,00E-06	2,36E-06
Teor crítico	0,432	0,353	0,414	0,388	0,456	0,430
Dados espúrios	0,533	-1,609	0,055	-0,668	1,201	0,487

Tabela C.3 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,161	0,342	0,294	0,174	0,500	0,557
Conc. na 2° camada	0,866	0,262	0,465	0,321	0,471	0,700
Conc. na 3° camada	0,546	0,225	0,339	0,275	0,384	0,348
Conc. na 4° camada	0,306	0,216	0,272	0,258	0,356	0,271
Conc. na 5° camada	0,253	0,192	0,176	0,212	0,268	0,206
Tempo de ensaio (Horas)	120	80	20	30	95	85
Xd (cm)	1,815	2,165	3,867	2,71	2,15	2,14
d desp (cm)	2,147	2,099	1,667	1,646	1,89	2,109
d esc. (cm)	2,147	2,099	1,317	1,296	1,89	1,759
R ²	0,995	0,93	0,971	0,958	0,965	0,968
CS	1,152	0,339	0,459	0,318	0,505	0,6998
C0	0,221	0,207	0,026	0,07	0,126	0,227
Dmig (cm ² /S)	1,95E-05	3,19E-05	1,68E-04	9,47E-05	2,67E-05	2,98E-05
Dns (cm ² /S)	4,97E-07	1,05E-06	9,71E-06	4,04E-06	8,76E-07	9,71E-07
Teor crítico	0,229	0,207	0,206	0,229	0,272	0,227
Dados espúrios	0,024	-0,881	-0,940	0,019	1,827	-0,048

Tabela C.4 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	1,425	0,553	0,517	0,392	0,739	0,802
Conc. na 2° camada	1,092	0,492	0,710	0,594	0,720	0,941
Conc. na 3° camada	0,804	0,474	0,570	0,513	0,577	0,567
Conc. na 4° camada	0,542	0,416	0,480	0,482	0,521	0,497
Conc. na 5° camada	0,452	0,401	0,396	0,418	0,402	0,413
Tempo de ensaio (Horas)	120	80	20	30	95	85
Xd (cm)	1,815	1,565	3,867	2,71	2,15	2,14
d desp (cm)	2,147	2,099	1,667	1,646	1,89	2,109
d esc. (cm)	2,147	2,099	1,317	1,296	1,89	1,759
R ²	0,988	0,83	0,991	0,929	0,954	0,951
CS	1,402	0,496	0,707	0,588	0,761	0,939
C0	0,411	0,318	0,327	0,297	0,34	0,442
Dmig (cm ² /S)	1,95E-05	2,71E-05	1,68E-04	9,47E-05	2,67E-05	2,98E-05
Dns (cm ² /S)	4,97E-07	5,20E-07	9,71E-06	4,04E-06	8,76E-07	9,71E-07
Teor crítico	0,426	0,368	0,421	0,440	0,421	0,442
Dados espúrios	0,217	-1,917	0,043	0,763	0,065	0,830

Tabela C.5 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,597	0,726	0,650	0,502	0,321	0,450
Conc. na 2° camada	0,444	0,576	0,565	0,407	0,293	0,394
Conc. na 3° camada	0,368	0,383	0,274	0,283	0,266	0,298
Conc. na 4° camada	0,230	0,266	0,225	0,202	0,190	0,216

Conc. na 5° camada	0,191	0,183	0,191	0,150	0,197	0,170
Tempo de ensaio (Horas)	75	75	45	70	50	50
Xd (cm)	2,175	2,38	2,635	2,18	2,635	2,975
d desp (cm)	1,9067	1,684	1,865	1,512	1,757	1,625
d esc. (cm)	1,9067	1,684	1,865	1,512	1,757	1,625
R ²	0,95	0,997	0,946	0,998	0,869	0,998
CS	0,578	0,721	0,674	0,499	0,324	0,452
C0	0,155	0,151	0,181	0,126	0,165	0,109
Dmig (cm ² /S)	3,41E-05	3,56E-05	6,23E-05	3,65E-05	5,61E-05	5,94E-05
Dns (cm ² /S)	1,13E-06	1,32E-06	2,58E-06	1,22E-06	2,33E-06	2,77E-06
Teor crítico	0,182	0,199	0,186	0,174	0,190	0,184
Dados espúrios	-0,442	1,599	-0,010	-1,398	0,488	-0,238

Tabela C.6 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,816	0,936	0,765	0,718	0,541	0,662
Conc. na 2° camada	0,661	0,803	0,604	0,629	0,516	0,615
Conc. na 3° camada	0,607	0,604	0,534	0,508	0,505	0,501
Conc. na 4° camada	0,475	0,468	0,470	0,482	0,451	0,471
Conc. na 5° camada	0,438	0,405	0,408	0,398	0,409	0,428
Tempo de ensaio (Horas)	75	75	45	70	50	50
Xd (cm)	2,175	2,38	2,635	2,18	2,635	2,975
d desp (cm)	1,9067	1,684	1,865	1,512	1,757	1,625
d esc. (cm)	1,9067	1,684	1,865	1,512	1,757	1,625
R ²	0,924	0,999	0,914	0,951	0,923	0,968
CS	0,796	0,937	0,741	0,71	0,546	0,658
C0	0,406	0,363	0,415	0,388	0,36	0,358
Dmig (cm ² /S)	3,41E-05	3,56E-05	6,23E-05	3,65E-05	5,61E-05	5,94E-05
Dns (cm ² /S)	1,13E-06	1,32E-06	2,58E-06	1,22E-06	2,33E-06	2,77E-06
Teor crítico	0,431	0,413	0,422	0,431	0,424	0,431
Dados espúrios	0,825	-1,669	-0,496	0,788	-0,233	0,784

Tabela C.7 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,566	0,514	0,502	0,382	0,667	0,580
Conc. na 2° camada	0,429	0,465	0,473	0,449	0,502	0,496
Conc. na 3° camada	0,383	0,384	0,418	0,351	0,374	0,371
Conc. na 4° camada	0,357	0,318	0,356	0,300	0,281	0,340
Conc. na 5° camada	0,253	0,237	0,300	0,251	0,263	0,269
Tempo de ensaio (Horas)	80	180	75	180	115	135
Xd (cm)	2,287	1,975	2,14	2,165	2,243	2,15
d desp (cm)	1,729	1,845	1,889	2,05	2,012	2,075
d esc. (cm)	1,729	1,845	1,889	1,7	2,012	2,075
R ²	0,805	0,987	0,992	0,979	0,986	0,974
CS	0,533	0,518	0,508	0,446	0,652	0,57

C0	0,209	0,178	0,181	0,23	0,241	0,226
Dmig (cm ² /S)	3,27E-05	1,35E-05	3,38E-05	1,42E-05	2,26E-05	1,88E-05
Dns (cm ² /S)	1,16E-06	3,94E-07	1,10E-06	4,68E-07	7,80E-07	6,17E-07
Teor crítico	0,277	0,250	0,300	0,245	0,244	0,251
Dados espúrios	0,716	-0,506	1,714	-0,728	-0,753	-0,442

Tabela C.8 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos de referência, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,800	0,784	0,708	0,609	0,814	0,829
Conc. na 2º camada	0,635	0,701	0,683	0,664	0,773	0,707
Conc. na 3º camada	0,637	0,637	0,648	0,573	0,638	0,611
Conc. na 4º camada	0,587	0,528	0,595	0,483	0,533	0,540
Conc. na 5º camada	0,528	0,523	0,520	0,525	0,496	0,503
Tempo de ensaio (Horas)	80	180	75	180	115	135
Xd (cm)	2,287	1,975	2,14	2,165	2,243	2,15
d desp (cm)	1,729	1,845	1,889	2,05	2,012	2,075
d esc. (cm)	1,729	1,845	1,889	1,7	2,012	2,075
R ²	0,753	0,952	0,933	0,747	0,977	0,982
CS	0,751	0,779	0,717	0,667	0,828	0,818
C0	0,45	0,493	0,46	0,504	0,429	0,5
Dmig (cm ² /S)	3,27E-05	1,35E-05	3,38E-05	1,42E-05	2,26E-05	1,88E-05
Dns (cm ² /S)	1,16E-06	3,94E-07	1,10E-06	4,68E-07	7,80E-07	6,17E-07
Teor crítico	0,532	0,512	0,537	0,504	0,471	0,503
Dados espúrios	0,917	0,088	1,162	-0,245	-1,630	-0,292

Tabela C.9 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1º camada	0,321	0,418	0,511	0,276	0,459	0,557
Conc. na 2º camada	0,280	0,318	0,423	0,452	0,315	0,615
Conc. na 3º camada	0,211	0,273	0,371	0,316	0,237	0,417
Conc. na 4º camada	0,165	0,260	0,248	0,227	0,166	0,268
Conc. na 5º camada	0,138	0,175	0,140	0,141	0,103	0,130
Tempo de ensaio (Horas)	25	25	45	50	30	45
Xd (cm)	3,551	3,71	2,63	2,71	2,983	2,73
d desp (cm)	1,985	2,055	2,015	1,873	1,735	2,032
d esc. (cm)	1,985	2,055	2,015	1,523	1,735	1,682
R ²	0,999	0,809	0,945	0,991	0,9433	0,993
CS	0,322	0,393	0,514	0,449	0,438	0,618
C0	0,118	0,14	0,104	0,061	0,091	0,064
Dmig (cm ² /S)	1,29E-04	1,32E-04	6,22E-05	5,68E-05	9,91E-05	6,34E-05
Dns (cm ² /S)	7,00E-06	7,39E-06	2,58E-06	2,42E-06	4,64E-06	2,72E-06
Teor crítico	0,132	0,164	0,150	0,150	0,119	0,125
Dados espúrios	-0,438	1,390	0,560	0,573	-1,216	-0,869

Tabela C.10 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,538	0,655	0,741	0,506	0,694	0,804
Conc. na 2° camada	0,514	0,560	0,643	0,725	0,563	0,856
Conc. na 3° camada	0,417	0,513	0,603	0,657	0,479	0,629
Conc. na 4° camada	0,424	0,482	0,516	0,478	0,405	0,505
Conc. na 5° camada	0,383	0,382	0,370	0,441	0,309	0,368
Tempo de ensaio (Horas)	25	25	45	50	30	45
Xd (cm)	3,551	3,71	2,63	2,71	2,983	2,73
d desp (cm)	1,985	2,055	2,015	1,873	1,735	2,032
d esc. (cm)	1,985	2,055	2,015	1,523	1,735	1,682
R ²	0,87	0,917	0,907	0,845	0,953	0,978
CS	0,544	0,636	0,737	0,739	0,671	0,849
C0	0,387	0,314	0,324	0,31	0,24	0,272
Dmig (cm ² /S)	1,29E-04	1,32E-04	6,22E-05	5,68E-05	9,91E-05	6,34E-05
Dns (cm ² /S)	7,00E-06	7,39E-06	2,58E-06	2,42E-06	4,64E-06	2,72E-06
Teor crítico	0,389	0,365	0,377	0,437	0,341	0,348
Dados espúrios	0,376	-0,310	0,030	1,745	-1,024	-0,817

Tabela C.11 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,321	0,410	0,457	0,317	0,490	0,416
Conc. na 2° camada	0,293	0,462	0,325	0,242	0,357	0,390
Conc. na 3° camada	0,271	0,319	0,292	0,217	0,292	0,269
Conc. na 4° camada	0,202	0,247	0,247	0,170	0,269	0,202
Conc. na 5° camada	0,169	0,178	0,168	0,135	0,188	0,149
Tempo de ensaio (Horas)	70	70	55	40	55	65
Xd (cm)	2,27	2,41	2,57	3,01	2,473	2,31
d desp (cm)	1,804	1,896	1,825	1,475	1,897	1,785
d esc. (cm)	1,804	1,546	1,825	1,475	1,897	1,785
R ²	0,954	0,985	0,833	0,911	0,886	0,97
CS	0,326	0,454	0,427	0,303	0,454	0,427
C0	0,102	0,113	0,141	0,114	0,103	0,073
Dmig (cm ² /S)	3,73E-05	3,84E-05	5,04E-05	7,47E-05	4,94E-05	4,05E-05
Dns (cm ² /S)	1,31E-06	1,44E-06	2,03E-06	3,52E-06	1,92E-06	1,45E-06
Teor crítico	15,920	4,990	4,530	2,024	8,275	9,500
Dados espúrios	0,179	0,170	0,183	0,149	0,191	0,161

Tabela C.12 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,552	0,621	0,696	0,539	0,696	0,640
Conc. na 2° camada	0,498	0,694	0,616	0,478	0,608	0,604
Conc. na 3° camada	0,478	0,539	0,557	0,471	0,571	0,514
Conc. na 4° camada	0,486	0,491	0,452	0,395	0,496	0,424

Conc. na 5° camada	0,420	0,430	0,409	0,372	0,408	0,394
Tempo de ensaio (Horas)	70	70	55	40	55	65
Xd (cm)	2,27	2,41	2,57	3,01	2,473	2,31
d desp (cm)	2,27	2,41	2,57	3,01	2,473	2,31
d esc. (cm)	2,27	2,06	2,57	3,01	2,473	2,31
R ²	0,753	0,943	0,974	0,877	0,952	0,979
CS	0,537	0,689	0,689	0,529	0,686	0,648
C0	0,34	0,431	0,32	0,27	0,341	0,323
Dmig (cm ² /S)	3,73E-05	3,84E-05	5,04E-05	7,47E-05	4,94E-05	4,05E-05
Dns (cm ² /S)	1,31E-06	1,44E-06	2,03E-06	3,52E-06	1,92E-06	1,45E-06
Teor crítico	0,415	0,432	0,358	0,301	0,392	0,363
Dados espúrios	0,819	1,174	-0,413	-1,611	0,318	-0,288

Tabela C.13 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,404	0,353	0,449	0,496	0,526	0,443
Conc. na 2° camada	0,400	0,249	0,319	0,409	0,382	0,492
Conc. na 3° camada	0,246	0,182	0,249	0,329	0,298	0,296
Conc. na 4° camada	0,176	0,183	0,224	0,229	0,240	0,233
Conc. na 5° camada	0,127	0,160	0,147	0,175	0,186	0,144
Tempo de ensaio (Horas)	35	35	50	75	35	40
Xd (cm)	3,01	2,87	2,55	2,131	2,93	2,61
d desp (cm)	1,875	1,9045	1,88	2,05	1,935	1,773
d esc. (cm)	1,875	1,9045	1,88	2,05	1,935	1,423
R ²	0,931	0,977	0,912	0,989	0,94	0,933
CS	0,426	0,352	0,412	0,489	0,493	0,486
C0	0,054	0,172	0,122	0,102	0,114	0,135
Dmig (cm ² /S)	8,53E-05	8,34E-05	5,52E-05	3,37E-05	8,43E-05	6,98E-05
Dns (cm ² /S)	4,02E-06	3,76E-06	2,21E-06	1,09E-06	3,88E-06	2,86E-06
Teor crítico	0,117	0,172	0,146	0,153	0,159	0,160
Dados espúrios	-1,823	1,097	-0,258	0,091	0,435	0,458

Tabela C.14 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,657	0,588	0,704	0,736	0,759	0,662
Conc. na 2° camada	0,638	0,518	0,552	0,651	0,641	0,771
Conc. na 3° camada	0,500	0,433	0,478	0,568	0,581	0,551
Conc. na 4° camada	0,394	0,435	0,460	0,504	0,473	0,473
Conc. na 5° camada	0,383	0,395	0,404	0,397	0,437	0,386
Tempo de ensaio (Horas)	35	35	50	75	35	40
Xd (cm)	3,01	2,87	2,55	2,131	2,93	2,61
d desp (cm)	1,875	1,9045	1,88	2,05	1,935	1,773
d esc. (cm)	1,875	1,9045	1,88	2,05	1,935	1,423
R ²	0,933	0,905	0,885	0,974	0,954	0,955
CS	0,678	0,573	0,671	0,73	0,7446	0,765

C0	0,333	0,361	0,377	0,34	0,4	0,382
Dmig (cm ² /S)	8,53E-05	8,34E-05	5,52E-05	3,37E-05	8,43E-05	6,98E-05
Dns (cm ² /S)	4,02E-06	3,76E-06	2,21E-06	1,09E-06	3,88E-06	2,86E-06
Teor crítico	0,366	0,380	0,390	0,398	0,426	0,401
Dados espúrios	-1,338	-0,686	-0,186	0,241	1,580	0,388

Tabela C.15 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,413	0,543	0,430	0,339	0,555	0,470
Conc. na 2° camada	0,343	0,348	0,332	0,276	0,461	0,350
Conc. na 3° camada	0,288	0,327	0,316	0,238	0,327	0,263
Conc. na 4° camada	0,222	0,250	0,224	0,209	0,278	0,229
Conc. na 5° camada	0,178	0,190	0,187	0,170	0,202	0,196
Tempo de ensaio (Horas)	75	70	60	35	65	75
Xd (cm)	2,15	2,32	2,43	2,84	2,33	2,23
d desp (cm)	1,65	1,683	1,83	1,543	2,12	1,835
d esc. (cm)	1,65	1,683	1,83	1,543	2,12	1,835
R ²	0,982	0,845	0,9	0,941	0,979	0,964
CS	0,405	0,497	0,412	0,328	0,55	0,455
C0	0,129	0,16	0,117	0,158	0,185	0,181
Dmig (cm ² /S)	3,39E-05	3,77E-05	4,49E-05	8,30E-05	4,06E-05	3,45E-05
Dns (cm ² /S)	1,11E-06	1,36E-06	1,71E-06	3,71E-06	1,47E-06	1,18E-06
Teor crítico	0,190	0,196	0,183	0,185	0,198	0,187
Dados espúrios	0,059	1,041	-1,109	-0,818	1,328	-0,501

Tabela C.16 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 10%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,649	0,791	0,652	0,585	0,797	0,700
Conc. na 2° camada	0,562	0,646	0,583	0,505	0,693	0,580
Conc. na 3° camada	0,522	0,559	0,550	0,473	0,553	0,522
Conc. na 4° camada	0,464	0,485	0,486	0,470	0,498	0,481
Conc. na 5° camada	0,431	0,459	0,439	0,426	0,452	0,447
Tempo de ensaio (Horas)	75	70	60	35	65	75
Xd (cm)	2,15	2,32	2,43	2,84	2,33	2,23
d desp (cm)	1,65	1,683	1,83	1,543	2,12	1,835
d esc. (cm)	1,65	1,683	1,83	1,543	2,12	1,835
R ²	0,884	0,9665	0,9577	0,832	0,994	0,938
CS	0,636	0,777	0,64	0,564	0,795	0,678
C0	0,417	0,462	0,33	0,405	0,45	0,429
Dmig (cm ² /S)	3,39E-05	3,77E-05	4,49E-05	8,30E-05	4,06E-05	3,45E-05
Dns (cm ² /S)	1,11E-06	1,36E-06	1,71E-06	3,71E-06	1,47E-06	1,18E-06
Teor crítico	0,425	0,467	0,437	0,436	0,453	0,439
Dados espúrios	-1,180	1,641	-0,409	-0,464	0,679	-0,266

Tabela C.17 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,314	0,447	0,528	0,428	0,395	0,453
Conc. na 2° camada	0,244	0,323	0,374	0,497	0,270	0,326
Conc. na 3° camada	0,217	0,256	0,251	0,274	0,229	0,218
Conc. na 4° camada	0,174	0,204	0,203	0,191	0,147	0,143
Conc. na 5° camada	0,112	0,105	0,130	0,107	0,103	0,127
Tempo de ensaio (Horas)	25	20	35	55	35	45
Xd (cm)	3,27	3,36	2,74	2,65	3,15	2,94
d desp (cm)	2,025	1,805	1,995	1,985	1,783	2,132
d esc. (cm)	2,025	1,805	1,995	1,635	1,783	2,132
R ²	0,938	0,915	0,965	0,961	0,915	0,99
CS	0,303	0,422	0,505	0,491	0,375	0,446
C0	0,08	0,025	0,105	0,104	0,084	0,124
Dmig (cm ² /S)	1,24E-04	1,57E-04	8,16E-05	5,11E-05	8,72E-05	6,56E-05
Dns (cm ² /S)	6,30E-06	8,15E-06	3,52E-06	2,13E-06	4,28E-06	3,03E-06
Teor crítico	0,114	0,116	0,125	0,113	0,108	0,125
Dados espúrios	-0,337	-0,172	1,180	-0,579	-1,296	1,204

Tabela C.18 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,584	0,704	0,804	0,655	0,647	0,704
Conc. na 2° camada	0,476	0,558	0,614	0,709	0,518	0,573
Conc. na 3° camada	0,452	0,502	0,517	0,553	0,458	0,449
Conc. na 4° camada	0,428	0,450	0,416	0,432	0,403	0,399
Conc. na 5° camada	0,364	0,329	0,390	0,352	0,358	0,392
Tempo de ensaio (Horas)	25	20	35	55	35	45
Xd (cm)	3,27	3,36	2,74	2,65	3,15	2,94
d desp (cm)	2,025	1,805	1,995	1,985	1,783	2,132
d esc. (cm)	2,025	1,805	1,995	1,635	1,783	2,132
R ²	0,772	0,873	0,952	0,999	0,927	0,998
CS	0,559	0,668	0,784	0,708	0,629	0,701
C0	0,361	0,153	0,393	0,291	0,364	0,393
Dmig (cm ² /S)	1,24E-04	1,57E-04	8,16E-05	5,11E-05	8,72E-05	6,56E-05
Dns (cm ² /S)	6,30E-06	8,15E-06	3,52E-06	2,13E-06	4,28E-06	3,03E-06
Teor crítico	0,371	0,342	0,396	0,339	0,370	0,393
Dados espúrios	0,121	-1,102	1,123	-1,216	0,060	1,013

Tabela C.19 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,447	0,501	0,523	0,361	0,403	0,565
Conc. na 2° camada	0,392	0,350	0,499	0,376	0,459	0,360
Conc. na 3° camada	0,318	0,251	0,278	0,295	0,329	0,323
Conc. na 4° camada	0,250	0,205	0,208	0,219	0,180	0,180

Conc. na 5° camada	0,149	0,106	0,121	0,131	0,129	0,130
Tempo de ensaio (Horas)	45	60	55	35	65	55
Xd (cm)	3,05	2,47	2,73	3,26	2,3	2,85
d desp (cm)	2,02	1,875	1,685	2,025	1,673	1,855
d esc. (cm)	2,02	1,875	1,685	1,675	1,323	1,855
R ²		0,922	0,940	0,966	0,976	0,87
CS	0,421	0,477	0,547	0,383	0,463	0,529
C0	0,093	0,102	0,043	0,103	0,071	0,105
Dmig (cm ² /S)	6,68E-05	4,53E-05	5,18E-05	8,86E-05	4,04E-05	5,29E-05
Dns (cm ² /S)	3,19E-06	1,75E-06	2,23E-06	4,48E-06	1,44E-06	2,37E-06
Teor crítico	0,151	0,122	0,136	0,140	0,144	0,131
Dados espúrios	1,358	-1,502	-0,100	0,228	0,654	-0,639

Tabela C.20 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de sete dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,683	0,762	0,795	0,646	0,684	0,831
Conc. na 2° camada	0,626	0,576	0,720	0,601	0,671	0,593
Conc. na 3° camada	0,551	0,508	0,538	0,512	0,538	0,580
Conc. na 4° camada	0,509	0,453	0,439	0,485	0,431	0,450
Conc. na 5° camada	0,391	0,361	0,377	0,383	0,376	0,354
Tempo de ensaio (Horas)	45	60	55	35	65	55
Xd (cm)	3,05	2,47	2,73	3,26	2,3	2,85
d desp (cm)	2,02	1,875	1,685	2,025	1,673	1,855
d esc. (cm)	2,02	1,875	1,685	1,675	1,323	1,855
R ²	0,951	0,867	0,991	0,955	0,958	0,799
CS	0,684	0,729	0,805	0,648	0,705	0,777
C0	0,311	0,371	0,331	0,325	0,188	0,296
Dmig (cm ² /S)	6,68E-05	4,53E-05	5,18E-05	8,86E-05	4,04E-05	5,29E-05
Dns (cm ² /S)	3,19E-06	1,75E-06	2,23E-06	4,48E-06	1,44E-06	2,37E-06
Teor crítico	0,399	0,381	0,387	0,417	0,443	0,359
Dados espúrios	0,058	-0,558	-0,367	0,649	1,542	-1,324

Tabela C.21 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,367	0,504	0,370	0,348	0,379	0,440
Conc. na 2° camada	0,332	0,355	0,364	0,287	0,320	0,364
Conc. na 3° camada	0,219	0,258	0,281	0,268	0,297	0,295
Conc. na 4° camada	0,205	0,229	0,248	0,158	0,264	0,169
Conc. na 5° camada	0,136	0,127	0,147	0,115	0,172	0,104
Tempo de ensaio (Horas)	40	45	45	35	35	40
Xd (cm)	2,64	2,78	2,54	3,01	3,12	2,49
d desp (cm)	1,875	2,05	2,125	1,984	2,015	1,935
d esc. (cm)	1,875	2,05	2,125	1,984	2,015	1,935
R ²	0,93	0,897	0,908	0,924	0,895	0,972
CS	0,369	0,481	0,388	0,349	0,374	0,446

C0	0,106	0,134	0,112	0,081	0,103	0,07
Dmig (cm ² /S)	7,02E-05	6,39E-05	6,12E-05	8,53E-05	8,68E-05	6,82E-05
Dns (cm ² /S)	2,91E-06	2,80E-06	2,44E-06	4,02E-06	4,23E-06	2,66E-06
Teor crítico	0,140	0,142	0,159	0,119	0,183	0,113
Dados espúrios	-0,102	-0,017	0,627	-0,918	1,559	-1,150

Tabela C.22 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza mecânica das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,592	0,742	0,640	0,602	0,638	0,696
Conc. na 2° camada	0,600	0,572	0,578	0,514	0,567	0,633
Conc. na 3° camada	0,462	0,532	0,537	0,503	0,507	0,571
Conc. na 4° camada	0,473	0,451	0,503	0,453	0,494	0,441
Conc. na 5° camada	0,381	0,380	0,405	0,373	0,427	0,363
Tempo de ensaio (Horas)	40	45	45	35	35	40
Xd (cm)	2,64	2,78	2,54	3,01	3,12	2,49
d desp (cm)	1,875	2,05	2,125	1,984	2,015	1,935
d esc. (cm)	1,875	2,05	2,125	1,984	2,015	1,935
R ²	0,585	0,865	0,932	0,887	0,9	0,977
CS	0,587	0,708	0,634	0,586	0,625	0,703
C0	0,372	0,367	0,302	0,332	0,409	0,202
Dmig (cm ² /S)	7,02E-05	6,39E-05	6,12E-05	8,53E-05	8,68E-05	6,82E-05
Dns (cm ² /S)	2,91E-06	2,80E-06	2,44E-06	4,02E-06	4,23E-06	2,66E-06
Teor crítico	0,381	0,381	0,401	0,383	0,429	0,356
Dados espúrios	-0,294	-0,311	0,512	-0,242	1,657	-1,323

Tabela C.23 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos livres em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,381	0,410	0,410	0,367	0,429	0,412
Conc. na 2° camada	0,302	0,308	0,309	0,334	0,347	0,331
Conc. na 3° camada	0,258	0,281	0,268	0,286	0,261	0,272
Conc. na 4° camada	0,226	0,247	0,203	0,244	0,211	0,237
Conc. na 5° camada	0,170	0,150	0,166	0,184	0,174	0,193
Tempo de ensaio (Horas)	70	55	80	65	75	60
Xd (cm)	2,17	2,68	2,09	2,25	2,18	2,47
d desp (cm)	2,123	1,785	1,83	2,05	2,09	2,02
d esc. (cm)	2,123	1,785	1,83	2,05	2,09	2,02
R ²	0,921	0,878	0,93	0,987	0,991	0,956
CS	0,3665	0,389	0,394	0,369	0,423	0,401
C0	0,146	0,117	0,153	0,091	0,167	0,189
Dmig (cm ² /S)	3,65E-05	5,14E-05	3,13E-05	4,00E-05	3,41E-05	4,53E-05
Dns (cm ² /S)	1,21E-06	2,17E-06	9,88E-07	1,39E-06	1,14E-06	1,75E-06
Teor crítico	0,164	0,175	0,169	0,176	0,171	0,195
Dados espúrios	-1,027	0,002	-0,563	0,071	-0,353	1,871

Tabela C.24 – Resultados dos ensaios de titulação para cloretos totais em concretos com substituição de 30%, cura de vinte e oito dias, limpeza química das barras e ensaio de eletromigração.

Variáveis	Barra1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Conc. na 1° camada	0,651	0,660	0,658	0,628	0,697	0,643
Conc. na 2° camada	0,538	0,573	0,571	0,582	0,613	0,582
Conc. na 3° camada	0,563	0,503	0,492	0,497	0,544	0,503
Conc. na 4° camada	0,473	0,504	0,442	0,499	0,475	0,449
Conc. na 5° camada	0,436	0,414	0,426	0,442	0,399	0,428
Tempo de ensaio (Horas)	70	55	80	65	75	60
Xd (cm)	2,17	2,68	2,09	2,25	2,18	2,47
d desp (cm)	2,123	1,785	1,83	2,05	2,09	2,02
d esc. (cm)	2,123	1,785	1,83	2,05	2,09	2,02
R ²	0,689	0,833	0,993	0,9	0,979	0,999
CS	0,624	0,642	0,653	0,626	0,685	0,642
C0	0,308	0,396	0,424	0,44	0,269	0,417
Dmig (cm ² /S)	3,65E-05	5,14E-05	3,13E-05	4,00E-05	3,41E-05	4,53E-05
Dns (cm ² /S)	1,21E-06	2,17E-06	9,88E-07	1,39E-06	1,14E-06	1,75E-06
Teor crítico	0,411	0,431	0,427	0,445	0,373	0,423
Dados espúrios	-0,296	0,505	0,349	1,081	-1,826	0,187