



**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA
CONCRETO: PENETRAÇÃO DE CLORETOS E CARBONATAÇÃO**

CURITIBA

2019



ANA FLÁVIA BAÚ CARNEIRO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA
CONCRETO: PENETRAÇÃO DE CLORETOS E CARBONATAÇÃO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras Civas, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Patologia nas Obras Civas.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca

CURITIBA

2019

AGRADECIMENTOS

A todos os professores e professoras do curso pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

À Universidade Federal do Paraná, em especial ao Prof. Dr. Marcelo Medeiros, por colocar à disposição os laboratórios e equipamentos necessários para realização dos ensaios.

Ao Prof. Msc. Luís César De Luca pela atenção e apoio durante o processo de orientação do trabalho.

Ao Engenheiro Civil Paulo Daschevi, pelo importante auxílio com a realização dos ensaios.

A todos que de certa forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A partir da década de 70 observa-se uma crescente preocupação com a durabilidade de estruturas de concreto. Diversos materiais vêm sendo estudados com o objetivo de desacelerar o processo de corrosão das armaduras, principalmente por meio da restrição da penetração de agentes agressivos, água e/ou oxigênio. Dentre os mais utilizados estão os hidrofugantes de superfície, pinturas poliuretânicas e cristalizantes minerais. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da aplicação de tratamentos de superfície para concreto contra a entrada de íons cloretos e ao dióxido de carbono. Três tratamentos diferentes foram selecionados: um hidrofugante, um cristalizante e uma tinta poliuretânica, aplicados sobre amostras de concreto de dois traços diferentes. As amostras foram submetidas aos ensaios de migração de cloretos, carbonatação acelerada e molhabilidade. De modo geral, os resultados obtidos confirmam a hipótese de que a aplicação dos produtos é eficiente contra a entrada de agentes agressivos. Dentre os produtos estudados, o poliuretano foi o que apresentou maior capacidade protetora, tanto para íons cloretos quanto para dióxido de carbono. O aumento no consumo de cimento também proporcionou reduções significativas na penetrabilidade dos agentes, confirmando a importância do estudo de traço para proteção e recuperação de estruturas de concreto.

Palavras-chave: concreto, durabilidade, proteção de superfície, cloretos, carbonatação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013)	16
Figura 2 - Modelo ajustado de Tuutti para a corrosão de armaduras (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).....	17
Figura 3 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armadura (TUUTTI, 1982 (1982) ampliado por HELENE, 1993).....	18
Figura 4 - Esquema do avanço do processo de carbonatação (FIGUEIREDO, 2015 apud GOMES, 2006).....	19
Figura 5 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação (TULA, 2000 apud BAZZAN, 2014).....	20
Figura 6 - Principais fatores que determinam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995 apud CAVALCANTI FILHO, 2010)	20
Figura 7 - Ponto de viragem da fenolftaleína (CASTRO, 2003 apud BAZZAN, 2014)	21
Figura 8 - Processo de corrosão pela ação de cloretos (ANDRADE, 2001)	22
Figura 9 - Célula de migração utilizada no ensaio proposto pela ASTM 1202 (MEDEIROS, 2008).....	23
Figura 10 - Curva de variação da corrente ao longo do tempo (MEDEIROS, 2008)	24
Figura 11 – Medida da profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico visual por aspersão de solução de AgNO_3 0,1 M (MEDEIROS, 2008)	24
Figura 12 – Relação entre concentração de CO_2 e coeficiente de carbonatação (UOMOTO; TAKADA, 1993 adaptado por POSSAN, 2004).....	25
Figura 13 - Relação entre a concentração de cloretos no ambiente e no interior do concreto ao longo do tempo (MEIRA et al., 2007)	26
Figura 14 - Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação (VÉNUAT, 1977 apud FIGUEIREDO et al., 1993)	26
Figura 15 - Relação entre o fator água/cimento e a penetração de cloretos no concreto (JARGERMAN, 1990).....	27
Figura 16 - Acréscimo de tempo para início da corrosão em função do teor de C_3A (RASHEEDUZZAFAR et al., 1990).....	27
Figura 17 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (VERBECK, 1950 apud FIGUEIREDO et al., 1993).....	28
Figura 18 - Relação entre zona de exposição e perfil de cloretos para concretos expostos por 5 anos (SANDBERG et al., 1998 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).....	29
Figura 19 - Grupos de tratamentos de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de capilaridade (c) hidrofugantes de superfície (adaptado de BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997 apud MEDEIROS, 2008)	30
Figura 20 - Cobrimento equivalente dos sistemas de proteção (MEDEIROS, 2008 adaptado por MEDEIROS; HELENE, 2009)	30
Figura 21 - Desenho esquemático da composição de tintas (GNECCO et al., 2003)	31

Figura 22 - Valores típicos de participação dos grupos de matérias-primas nos três tipos de tecnologias (para efeito de ilustração) (GNECCO et al., 2003)	33
Figura 23 - Tintas poliuretânicas (GNECCO et al., 2003)	33
Figura 24 - Ligação química do agente hidrofugante com a superfície de concreto (MEDEIROS et al., 2015).....	34
Figura 25 – Interação entre a água e superfície do concreto com e sem hidrofugante de superfície (HELENE, 2000).....	35
Figura 26 - Esquema gráfico dos procedimentos experimentais	36
Figura 27 - Células de migração prontas para o início do ensaio	39
Figura 28 - Corpos de prova posicionados para início do ensaio de carbonatação acelerada	40
Figura 29 - Goniômetro utilizado para o ensaio de molhabilidade	41
Figura 30 – Resultados de carga total passante após ensaio de migração de cloretos	43
Figura 31 - Resultados de profundidade de penetração após ensaio de migração de cloretos.....	44
Figura 32 - Correlação entre profundidade de penetração e carga passante	44
Figura 33 - Resultados de profundidade de carbonatação aos 77 dias	45
Figura 34 - Resultados de profundidade de carbonatação aos 120 dias	46
Figura 35 - Resultados de ângulo de contato da água.....	47
Figura 36 - Amostras de referência e com cristalizante de superfície durante o ensaio	47
Figura 37 - Corpo de prova tratado com silano/siloxano após o ensaio e foto da gotícula de água sobre a superfície registrada pelo equipamento	48
Figura 38 - Corpo de prova tratado com poliuretano após o ensaio e foto da gotícula de água sobre a superfície registrada pelo equipamento	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos traços utilizados	37
Tabela 2 - Propriedades químicas do cimento utilizado	37
Tabela 3 - Propriedades físicas do cimento utilizado	37
Tabela 4 - Quantidade de fatias de corpos de prova para cada ensaio	38
Tabela 5 - Resultados de carga total passante média e profundidade de penetração obtidos no ensaio de migração de cloretos.....	42
Tabela 6 - Penetrabilidade a íons cloretos baseada na carga passante (adaptado de ASTM 1202, 2005)	43
Tabela 7 - Resultados de profundidade de carbonatação medidos aos 77 e 120 dias.....	45
Tabela 8 - Resultados de ângulo de contato calculados a partir do ensaio de molhabilidade	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	10
1.2. OBJETIVOS.....	10
1.2.1. Objetivo Geral	10
1.2.2. Objetivos Específicos.....	11
1.3. HIPÓTESE.....	11
1.4. JUSTIFICATIVAS	11
1.4.1. Tecnológicas.....	11
1.4.2. Econômicas	12
1.4.3. Sociais	12
1.4.4. Ecológicas.....	12
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	12
1.6. LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO.....	14
2.1.1. Corrosão das Armaduras em Estruturas de Concreto.....	15
2.1.2. Carbonatação	18
2.1.2.1. Ensaio Acelerado de Carbonatação	20
2.1.3. Penetração de cloretos	21
2.1.3.1. Ensaio de Migração de Cloretos.....	23
2.1.4. Fatores que Influenciam a Iniciação da Corrosão	25
2.2. TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA CONCRETO	29
2.2.1. Revestimentos Formadores de Película	31
2.2.2. Bloqueadores de Capilaridade.....	33
2.2.3. Hidrofugantes de Superfície	34
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.1. MATERIAIS E PROPORÇÕES DE MISTURA.....	37
3.2. TRATAMENTOS UTILIZADOS.....	38
3.3. ENSAIOS REALIZADOS	39
3.3.1. Migração de Cloretos.....	39
3.3.2. Carbonatação Acelerada	40
3.3.3. Molhabilidade	40
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
4.1. MIGRAÇÃO DE CLORETOS.....	42
4.2. CARBONATAÇÃO.....	44
4.3. MOLHABILIDADE.....	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS	54
APÊNDICE B – TABELAS ANOVA	56

1. INTRODUÇÃO

O impacto econômico potencialmente grande dos serviços de manutenção e reparo de estruturas de concreto a nível mundial tem chamado a atenção para a degradação do concreto, bem como para os produtos e métodos utilizados para aumentar a proteção dos materiais de construção (MEDEIROS; HELENE, 2009; DE MUYNCK *et al.*, 2008). Pesquisas apontam que o número de manifestações patológicas observadas em edificações tem aumentado apesar do avanço tecnológico do setor, sendo a corrosão de armaduras uma das principais causas (MEDEIROS; HELENE, 2008; SILVA *et al.*, 2003; FERREIRA; HELENE, 2014).

No caso de zonas urbanas e não marítimas, a corrosão é desencadeada pela penetração de CO_2 no concreto, fenômeno chamado de carbonatação, que reduz o pH da matriz (CAVALCANTI FILHO, 2010; PAULETTI *et al.*, 2007). Já nas zonas marítimas, a armadura é afetada pela presença de Cl^- na matriz, que, quando em quantidade suficiente, pode gerar pontos de instabilidade na armadura e corrosão (MEDEIROS, 2008).

Além da proteção química ocasionada pela película de óxidos passivadores existe também a proteção física proporcionada pela camada de cobrimento de concreto, que, em condições normais, dificulta o ingresso de substâncias, retardando o processo de corrosão. Entretanto, as características superficiais do concreto, como a presença de poros e fissuras superficiais, fazem com que o cobrimento não seja uma barreira perfeita (MEDEIROS, 2008). Para garantir a proteção das armaduras, são utilizados revestimentos aplicados sobre as armaduras ou na superfície do concreto.

Atualmente, um grande número de produtos para proteção superficial do concreto está disponível no mercado, como formadores de película, hidrofugantes de superfície e bloqueadores de capilaridade. Esses materiais têm sido muito utilizados para proteção e acabamento final de estruturas de concreto, tanto em obras novas como em estruturas já deterioradas que necessitam de recuperação (ARAÚJO, 2014). Entretanto, é importante ressaltar que a eficiência da proteção superficial diminui ao longo do tempo, e, para garantir seu bom funcionamento, deve-se estabelecer um programa de manutenção considerando a vida útil de cada material. O profissional deve especificar o material baseado em dados técnicos e experiências anteriores além de ter consciência das vantagens e desvantagens do sistema (MEDEIROS; HELENE, 2009).

Apesar de já serem muito utilizados, os produtos nem sempre possuem um histórico adequado de aplicações que possibilitem estabelecer uma referência de sua eficiência como barreira protetora ou mesmo informações técnicas suficientes nos catálogos de fornecedores. Além disso, a pequena quantidade de pesquisas e normas

tanto para a seleção como para a avaliação de desempenho de revestimentos dificultam muito a correta especificação dos materiais (ARAÚJO, 2014).

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a eficiência da aplicação de diferentes tratamentos de superfície para concreto em condições de exposição aos íons cloretos e ao dióxido de carbono de modo a auxiliar os profissionais da área na seleção do tratamento ideal para cada ambiente de exposição.

O trabalho está dividido em 5 capítulos:

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, as principais justificativas para a realização do estudo e os procedimentos metodológicos adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre a durabilidade e processos de deterioração do concreto, corrosão de armaduras devido à carbonatação e penetração de cloretos, além de descrever os tratamentos de superfície mais utilizados para proteção das estruturas de concreto.

O **Capítulo 3** trata sobre a metodologia empregada neste trabalho, apresentando os tratamentos de superfície utilizados e ensaios realizados.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos nos ensaios, juntamente com análise e comparação entre os produtos testados.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A aplicação de tratamentos de superfície no concreto é eficiente contra a entrada de agentes agressivos?

1.2. OBJETIVOS

Aqui serão mencionados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência da aplicação de diferentes tratamentos de superfície para concreto contra a entrada de íons cloretos e dióxido de carbono.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar se os resultados obtidos correspondem às descrições fornecidas pelos fabricantes;
- b) Analisar os diferentes tipos de proteção quanto à molhabilidade;
- c) Auxiliar os profissionais da área na seleção do tratamento ideal para cada ambiente de exposição.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que os tratamentos de superfície aplicados no concreto são eficientes contra a entrada de agentes agressivos no concreto.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste capítulo serão apresentadas as justificativas para a realização da pesquisa, expondo os principais fatores tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais intrínsecos ao trabalho.

1.4.1. Tecnológicas

A penetração de agentes agressivos, como o dióxido de carbono e os íons cloretos, é altamente prejudicial para a durabilidade e desempenho de estruturas de concreto armado. O processo de carbonatação, por exemplo, é um fenômeno natural que provoca a redução do pH do concreto e, com isso, a despassivação das armaduras (MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2015). Já a penetração de cloretos, quando em quantidade suficiente, pode gerar pontos de instabilidade na armadura e corrosão localizada com desenvolvimento rápido e ataque intenso. Com isso, a corrosão do aço é facilitada, o que pode gerar inúmeras manifestações patológicas e futuros reparos necessários para a manutenção da vida útil da estrutura (MEDEIROS; HELENE, 2009). Desse modo, é fundamental a realização de estudos sobre esses fenômenos para que, com maior conhecimento sobre seus funcionamentos, novas soluções e práticas possam ser adotadas.

1.4.2. Econômicas

Os gastos com recuperação de estruturas vêm sendo cada vez mais discutidos. Ueda e Takewaka (2004), conforme citado por Ferreira e Helene (2014), concluíram que, em alguns países, os gastos com manutenção representam praticamente os mesmos valores investidos em novas estruturas. Entre as principais causas está a corrosão de armaduras, sendo a carbonatação e a penetração de cloretos fatores desencadeantes deste processo. Por esse motivo, o melhor entendimento do processo de penetração de agentes agressivos e desempenho de sistemas que visam retardar esses fenômenos é fundamental para a redução de custos com reparos e principalmente para garantir a durabilidade e bom funcionamento das estruturas de concreto armado.

1.4.3. Sociais

Os tratamentos de superfície químicos vêm sendo cada vez mais utilizados para proteção e acabamento final de estruturas de concreto, entretanto, muitos produtos disponíveis no mercado não possuem histórico adequado de aplicações para comprovação de sua eficácia como barreira protetora (ARAÚJO, 2014). Desse modo, a realização de estudos sobre esse tipo de tratamento é fundamental para que cada vez mais os profissionais possam utilizar novas tecnologias com segurança, garantindo a vida útil das estruturas e a proteção dos usuários.

1.4.4. Ecológicas

Atualmente a preocupação com a qualidade e a durabilidade das edificações tem sido crescente na Engenharia Civil, principalmente pois, com o prolongamento do ciclo de vida das edificações, reduz-se o impacto ambiental ao economizar recursos naturais ao mesmo tempo que o desenvolvimento sustentável das cidades é favorecido (CAVALCANTI FILHO, 2010).

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho possui caráter experimental. Para concretização dos objetivos propostos foram realizados ensaios de carbonatação acelerada e migração de cloretos em amostras sem proteção e com proteção na superfície. Três produtos diferentes disponíveis no mercado foram selecionados para a realização dos ensaios e

comparação dos resultados: uma tinta, um bloqueador de capilaridade e um hidrofugante de superfície.

A tinta utilizada neste trabalho consiste em uma tinta poliuretânica bicomponente alifática à base de água, ou seja, seu componente A é poliéster e o B é o isocianato alifático. Sua formulação confere boa resistência química e grande resistência ao intemperismo (GNECCO *et al.*, 2003). Como bloqueador de capilaridade foi escolhido um cristalizante mineral resistente a substâncias químicas agressivas, não tóxico, utilizado para impermeabilização, proteção e recuperação de estruturas de concreto. O hidrofugante de superfície selecionado é disperso em água, à base de silano/siloxano, sem solventes e com propriedade de repelência à água.

Após a moldagem e cura úmida das amostras cilíndricas, corpos de prova menores foram obtidos a partir do corte dos cilindros. Em seguida, os produtos de proteção foram aplicados como pintura sobre as superfícies das amostras conforme as orientações do fabricante.

Foram realizados ensaios acelerados de carbonatação e migração de cloretos. As amostras também foram avaliadas quanto ao ângulo de contato da água com a superfície, por meio do ensaio de molhabilidade.

O ensaio de migração de cloretos foi realizado conforme ASTM C 1202/05, exceto pela voltagem aplicada (30V) e duração do ensaio (30h), modificadas de acordo com o proposto por Medeiros (2008). O ensaio de carbonatação foi realizado em câmara de carbonatação (CARON) durante 77 e 120 dias, com teor de CO₂ igual a 5% e precisão de $\pm 3\%$. Para o ensaio de molhabilidade foi utilizado um goniômetro da marca Krüss.

A análise da eficácia de cada proteção foi realizada por meio da comparação entre os resultados dos ensaios para os corpos de prova com e sem tratamento. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados foram posteriormente analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA) e as médias foram comparadas com o teste de Tuckey.

1.6. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente trabalho analisa a eficiência de três diferentes produtos de tratamento para concretos expostos aos íons cloretos e ao dióxido de carbono. Outros ambientes de exposição são igualmente importantes em situações específicas, como ataque por ácidos ou sulfatos, porém não serão abordados neste estudo. Além disso, foram analisados dois traços de concreto diferentes a partir dos mesmos materiais, sendo os resultados obtidos para situação com maior e menor consumo de cimento CPV-ARI. A influência de adições ou uso de outro tipo de cimento não foram estudadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas considerações a respeito da durabilidade de processos de deterioração do concreto, corrosão de armaduras, carbonatação e penetração de cloretos, além de descrever os tratamentos de superfície mais utilizados para proteção das estruturas de concreto.

2.1. DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Até a publicação da ABNT NBR 6118:2003, a durabilidade das estruturas não era abordada com frequência durante a concepção dos projetos, o que se deve principalmente à maneira como as normas determinavam os parâmetros de dimensionamento. Sem investigações sobre as diferentes ações e reações da estrutura quando exposta à condições ambientais não favoráveis, apenas a relação entre esforços solicitantes e resistência dos materiais eram considerados (GOMES, 2006).

Para Helene (1998) *apud* Cavalcanti Filho (2010), a durabilidade das estruturas de concreto armado não é uma propriedade intrínseca, e sim o resultado da sua interação com o ambiente e as condições de uso, operação e manutenção. Por esse motivo, uma mesma estrutura pode apresentar comportamentos diversos quanto à durabilidade. A velocidade de degradação das estruturas depende diretamente dos cuidados adotados em todas as etapas do ciclo de vida da edificação, desde o projeto até a manutenção frente às ações e agentes atuantes (CAVALCANTI FILHO, 2010).

Com o crescente número de casos de insucesso e, com isso, a necessidade de intervenções onerosas nas estruturas, contatou-se a real importância de se estudarem outros critérios que envolvessem a análise não apenas estrutural das edificações para, então, garantir sua durabilidade e bom desempenho (GOMES, 2006). A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 – Projetos de Estruturas de Concreto estabelece que sejam observadas as condições ambientais na época do projeto de modo que a estrutura, depois de construída, conserve sua segurança e estabilidade durante sua vida útil.

Em estruturas já deterioradas, a recuperação do concreto é essencial para o prolongamento da vida útil da estrutura. Entretanto, os impactos econômicos das manutenções corretivas se mostram muito maiores do que as manutenções preventivas e ações tomadas ainda na etapa de projeto (HELENE, 1993). Estudos apontam que em países industrialmente desenvolvidos, estima-se que mais de 40% dos investimentos da construção civil sejam aplicados em estruturas já existentes, devido a reparos e manutenções (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Pode-se dividir as causas de deterioração das estruturas de concreto em

intrínsecas (internas ou inerentes à própria estrutura) e extrínsecas (externas à estrutura), sendo que sobre elas podem incidir falhas humanas e/ou causas naturais. As falhas humanas estão geralmente associadas a defeitos construtivos durante a execução da estrutura originados pela mão de obra não qualificada. Já as causas naturais de deterioração estão relacionadas principalmente às características químicas e físicas da própria estrutura. Por exemplo: porosidade e permeabilidade do concreto, aderência entre a pasta de cimento e os agregados etc (GOMES, 2006).

Medeiros e Helene (2009) apontam a importância de enxergar a edificação como “algo que necessita de manutenções periódicas”, e que os sistemas de proteção superficiais são ferramentas que devem ser utilizadas nesses trabalhos. Os autores comparam as construções com carros, que necessitam de manutenção para ter sua durabilidade e vida útil prolongadas.

É importante ressaltar que muitas vezes o termo “manutenção” é utilizado para definir atividades que são efetivamente recuperação e/ou reforço, visto que têm como objetivo a correção de um desempenho insatisfatório, seja por falhas de projeto, execução ou até mesmo falta de manutenção. Gomes (2006, p. 7) define a manutenção de uma estrutura como o:

“Conjunto de atividades necessárias à garantia de seu desempenho satisfatório ao longo do tempo, ou o conjunto de rotinas que tenha por finalidade o prolongamento de sua vida útil, a um custo compensador. Intervenções preventivas e avaliações programadas de manutenção possibilitam que sejam minimizadas as necessidades de reparos e/ou reforços”.

Os reparos ou reforços têm por finalidade reestabelecer a estrutura de modo que seu desempenho volte a ser satisfatório. Para isso, devem ser estabelecidos a partir de um diagnóstico adequado e um projeto específico (HELENE, 1992). Gomes (2006) reforça que essas intervenções devem ser compatíveis com o meio em que se encontra a estrutura e que os usuários devem ser conscientizados sobre a importância da manutenção dos edifícios.

2.1.1. Corrosão das Armaduras em Estruturas de Concreto

Segundo Ferreira e Helene (2014), um dos problemas patológicos mais graves e frequentes é a corrosão das armaduras, que além dos fatores técnicos e econômicos, representa um problema de caráter mundial e de grande desperdício de recursos

naturais. A corrosão das armaduras do concreto provoca vários danos à estrutura, diminuindo sua vida útil e comprometendo sua estabilidade, funcionabilidade e estética. Manifestações como expansão, fissuração, deslocamento e redução na seção da armadura são comuns em situações de corrosão das armaduras (CAVALCANTI FILHO, 2010).

A proteção das armaduras se dá por duas maneiras: uma física e outra química. O concreto separa o aço do meio externo por meio de uma barreira física. Já a proteção química se dá pela alta alcalinidade do concreto fresco que, quando em contato com as armaduras, forma um filme de óxidos que mantém o aço protegido. Esse mecanismo é conhecido como passivação das armaduras. A formação desse filme também depende do pH do concreto em contato com o aço, que deve estar acima de 11,5 para que a película não seja afetada (BAZZAN, 2014; CAVALCANTI FILHO, 2010).

O processo corrosivo se dá a partir da perda de estabilidade da camada passivadora, ocasionada pela penetração de substâncias agressivas. Os principais agentes que promovem a despassivação das armaduras são a presença de cloretos e a carbonatação (BAZZAN, 2014). A carbonatação do concreto leva a uma redução do pH do meio e ocasiona a despassivação da armadura. Já a presença de íons cloreto, quando em quantidade suficiente, pode causar a corrosão das barras mesmo em condições de pH elevado. O processo corrosivo é fundamentado nos princípios da corrosão eletroquímica, onde a solução nos poros do concreto funciona como eletrólito e a armadura, um eletrodo misto (FIGUEIREDO *et al*, 1993). As reações que ocorrem nas regiões anódica e catódica da barra são representadas na Figura 1.

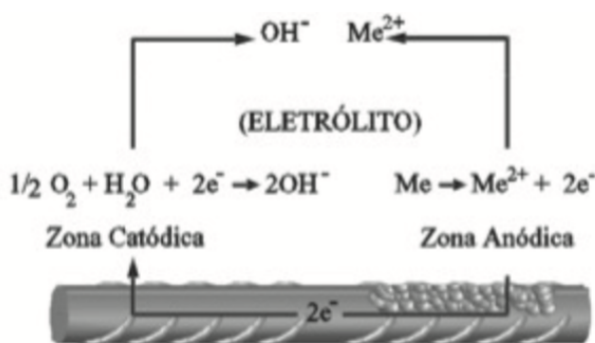


Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013)

A equação da esquerda representa as reações parciais catódicas, que consomem elétrons produzidos na zona anódica, na qual ocorrem as reações parciais de dissolução do metal (oxidação). O conjunto dessas reações representa a corrosão eletroquímica, que pode ser dividida em três fases (Figura 2): iniciação, despassivação e propagação (FIGUEIREDO; MEIRA, 1993).

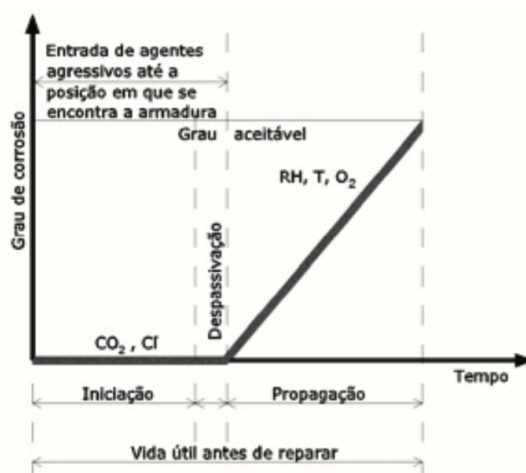


Figura 2 - Modelo ajustado de Tuutti para a corrosão de armaduras (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013)

Segundo Carmona (2005), para que o processo de corrosão eletroquímica ocorra são necessárias algumas condições, a partir do momento de despassivação das armaduras:

- a) Água suficiente no interior do concreto para possibilitar o transporte de íons;
- b) Diferença de potencial elétrico entre regiões da armadura;
- c) Presença de oxigênio.

Rodrigues (1996) *apud* Neves *et al.* (2010) aponta algumas propriedades relevantes para a proteção do concreto contra a penetração de agentes agressivos:

- a) Permeabilidade ao vapor de água e à água;
- b) Resistência à penetração de dióxido de carbono;
- c) Resistência à penetração de cloretos.

Segundo Bazzan (2014), o cobrimento das armaduras é fundamental para garantir a vida útil das estruturas, e garantir que ele tenha espessura e qualidade adequadas é a forma mais econômica de prevenir deteriorações por corrosão nas estruturas (NEVES *et al.*, 2010). A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 especifica cobrimentos mínimos em função da classe de agressividade ambiental para garantir a proteção das armaduras e retardar e até mesmo evitar o início da corrosão.

A vida útil pode ser definida como o período pelo qual as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas de modo a conservar suas características estruturais e estéticas sem necessidade de intervenção. Esse período deve ser estabelecido considerando as condições ambientais nas quais a estrutura estará exposta (BAZZAN, 2014). Helene (1993), tomando como referência a corrosão das armaduras, esquematizou a vida útil das estruturas conforme mostra a Figura 3.

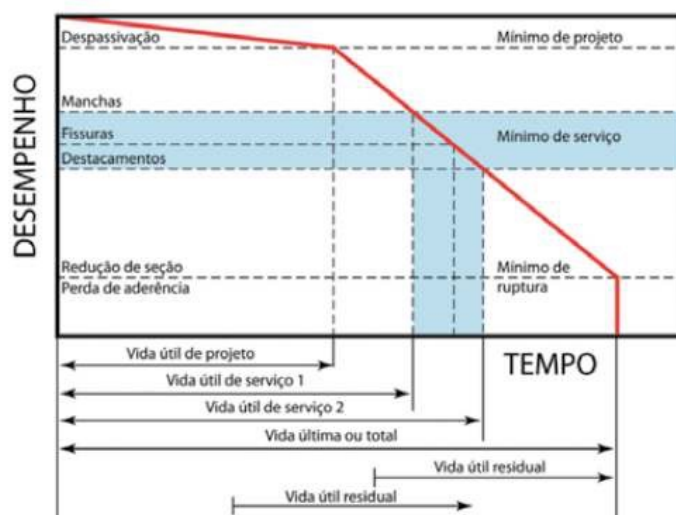


Figura 3 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armadura (TUUTTI, 1982 (1982) ampliado por HELENE, 1993)

A interação das armaduras com o meio ambiente depende das características físicas do concreto que o envolve: porosidade, permeabilidade, absorção e características químicas dos materiais que o compõe. Essas características determinam se a interação será maior ou menor (CAVALCANTI FILHO, 2010). A seguir são apresentados os dois principais processos responsáveis pela despassivação e posterior corrosão das armaduras no concreto: carbonatação e penetração de cloretos.

2.1.2. Carbonatação

A carbonatação consiste, basicamente, na redução do pH do concreto em função das reações químicas entre o dióxido de carbono (CO_2) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), liberado no processo de hidratação do cimento e principal responsável pela alta alcalinidade do concreto. O gás carbônico, em meio aquoso, forma o ácido carbônico (H_2CO_3), que penetra nos poros do concreto e reduz o pH do meio, além de reagir com os hidróxidos dissolvidos e provocar a precipitação dos carbonatos de cálcio (CaCO_3), de sódio (Na_2CO_3) e potássio (K_2CO_3) (MITRE *et al.*, 2002 *apud* BAZZAN, 2014). A principal reação que ocorre é a carbonatação do hidróxido de cálcio, representada na Equação 1.



Segundo Libório (1998) *apud* Gomes (2006), a carbonatação envolve um gás

dissolvido em uma película úmida reagindo com um álcali em solução, sendo necessária a existência de um líquido no qual o CO_2 possa ser dissolvido. Desse modo, a variação de pH se dá progressivamente a partir da superfície exposta do concreto. Quando a concentração de CO_2 no ambiente é constante, a profundidade de carbonatação varia com a raiz quadrada do tempo (GOMES, 2006).

Segundo Pauletti *et al.* (2007), a frente de carbonatação avança de modo diretamente proporcional à facilidade de difusão do CO_2 no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades do concreto. Na Figura 4 é apresentado um esquema básico da carbonatação.

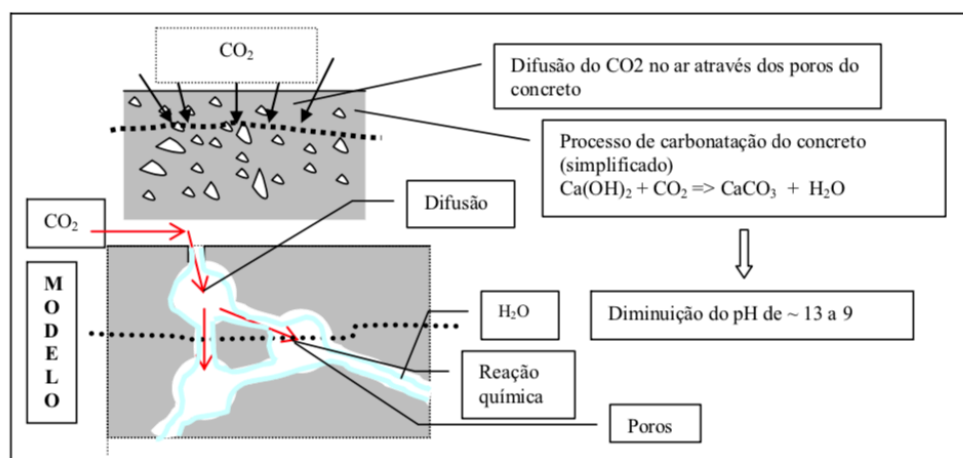


Figura 4 - Esquema do avanço do processo de carbonatação (FIGUEIREDO, 2015 *apud* GOMES, 2006)

É importante salientar que o fenômeno de carbonatação não é prejudicial ao concreto, mas sim às armaduras, que ficam mais suscetíveis ao ataque corrosivo (SALOMÃO; SILVA, 2008) e que, para que a carbonatação aconteça, primeiramente deve ocorrer a solubilização do CO_2 (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). A mudança no pH provoca a despassivação da armadura e diminui sua proteção contra o processo corrosivo, que depende de outros fatores como oxigênio, água e diferença de potencial elétrico na armadura (CAVALCANTI FILHO, 2010).

A camada carbonatada do concreto é denominada frente de carbonatação, e avança progressivamente a partir da superfície em direção ao interior do concreto. Ao atingir a armadura, gera sua despassivação (Figura 5).

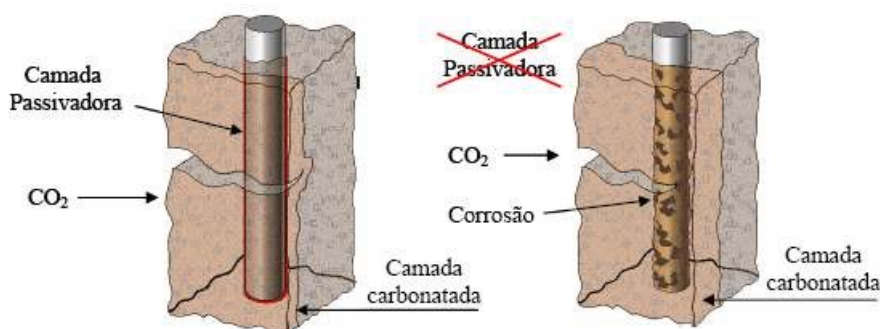


Figura 5 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação (TULA, 2000 *apud* BAZZAN, 2014)

A velocidade de avanço da frente de carbonatação, bem como sua profundidade, dependem de fatores relacionados com as características do concreto e meio em que ele está inserido, conforme mostra a Figura 6.

Fatores condicionantes		Características influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO_2	- Mecanismos físico-químicos - Velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ambiente	- Grau de saturação dos poros - Velocidade de carbonatação
	Temperatura	- Velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento: - Características do clínquer - Teor de adições	- Porosidade da pasta carbonatada - Reserva alcalina
	Traço	- Porosidade
	Qualidade de execução - Defeitos - Cuidados com a cura	- Porosidade - Grau de hidratação

Figura 6 - Principais fatores que determinam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995 *apud* CAVALCANTI FILHO, 2010)

2.1.2.1. Ensaio Acelerado de Carbonatação

Em condições naturais de exposição ao CO_2 (entre 0,03 e 1,2%), a carbonatação pode levar vários anos para apresentar profundidades mensuráveis. Para tentar reduzir esse tempo, muitas pesquisas são realizadas com teores elevados de CO_2 (que variam de 1 a 100%), o que acaba por acelerar o processo. Apesar de propiciar um maior controle sobre as condições do ambiente de exposição das amostras, o ensaio de carbonatação ainda não possui uma metodologia normatizada e universal, o que acaba por dificultar a comparação entre estudos (PAULETTI *et al.*, 2007).

Fatores ambientais, como umidade, temperatura e concentração de CO_2 , além de procedimentos de ensaio, como cura, sazonalidade, tipo, tamanho e forma das amostras, são algumas das variáveis estudadas em laboratório (PAULETTI, 2004). Figueiredo (2005) aponta que a utilização de elevados teores de CO_2 pode resultar em alterações na microestrutura do concreto carbonatado e Isaia *et al.* (2005) concluíram que a relação entre os coeficientes de carbonatação calculados a partir do ensaio acelerado e natural têm uma boa correlação para concretos com relação água/cimento inferiores a 0,45 (*apud* CAVALCANTI FILHO, 2010).

Os resultados obtidos em laboratório dificilmente ocorrerão na prática, onde as variáveis são aleatórias e mudam constantemente, entretanto, ensaios acelerados são fundamentais para que as propriedades dos materiais, principalmente o cimento, sejam conhecidas e propiciem a constante evolução do setor. Além de serem muito viáveis economicamente, visto que reduzem o tempo para obtenção dos resultados (PAULETTI *et al.*, 2007).

Para determinação da profundidade de carbonatação é utilizada uma solução de fenolftaleína, substância que ao entrar em contato com a solução alcalina dos poros do concreto adquire coloração típica a partir de um determinado valor de pH (BAZZAN, 2014), conforme mostra a Figura 7.

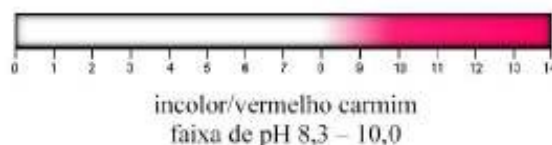


Figura 7 - Ponto de viragem da fenolftaleína (CASTRO, 2003 *apud* BAZZAN, 2014)

Após a aplicação, é possível visualizar a frente de carbonatação, indicada pela linha divisória entre a região incolor, carbonatada, e a colorida, não-carbonatada. Com o auxílio do paquímetro é realizada a medida da espessura de carbonatação em cada lateral do corte (BAZZAN, 2014).

2.1.3. Penetração de cloretos

A presença de íons cloretos (Cl^-), juntamente com a água e o oxigênio, quando em concentrações suficientes, causam desestabilização da película passivadora da armadura. Esse fenômeno ocorre de maneira localizada, o que faz com que a corrosão nesses casos seja tipicamente por pites, e não generalizada como na carbonatação (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

Após a ruptura pontual da película passivadora, os cloretos inicialmente se combinam com os íons Fe^{2+} , formando FeCl_2 (Figura 8). Os produtos da corrosão são hidrolisados, liberando os Cl^- para reagirem novamente. Durante a hidrólise também são liberados íons H^+ , o que gera uma diminuição do pH na região anódica, ao mesmo tempo que a formação de OH^- devido às reações catódicas eleva o pH na região catódica. Por esses motivos, a corrosão por pites é autossustentada (ANDRADE, 2001; FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

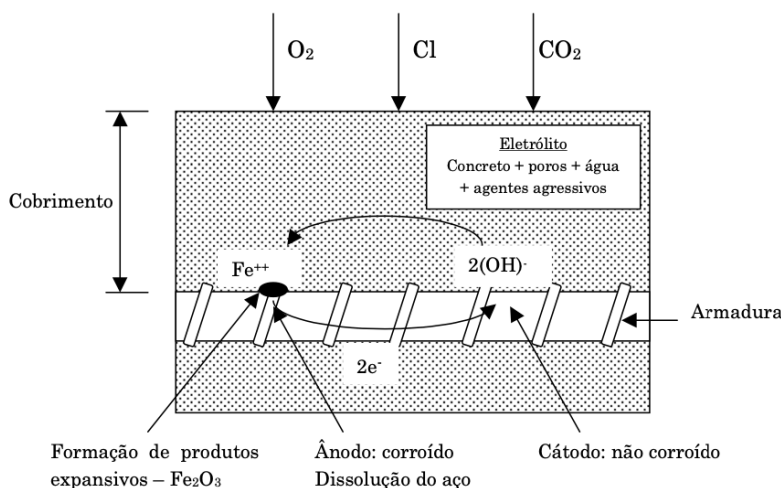


Figura 8 - Processo de corrosão pela ação de cloretos (ANDRADE, 2001)

Figueiredo e Meira (2013) apontam que a chegada de cloretos na região das armaduras, por si só, não representa o início da corrosão, sendo necessária uma quantidade mínima de cloretos para desencadear o processo, conhecida como limite crítico de cloretos.

Esse teor crítico depende de diversas variáveis, como aspectos ambientais, características dos materiais, interface aço-concreto, entre outros (ANDRADE, 2001). De maneira geral, as variáveis tratam do acúmulo pontual de cloretos em locais específicos, falhas na formação da película passivadora, potencial alcalino da matriz, capacidade de fixação de cloretos ao concreto, tipo de cloreto envolvido, forma de penetração no concreto, presença de oxigênio e condições de umidade (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

Além disso, há uma grande diversidade de processos para identificação da despassivação das armaduras e do teor crítico de cloretos. Variáveis como o potencial de corrosão e a densidade de corrente são utilizadas para identificar a despassivação do aço, sendo a última a mais utilizada (ALONSO *et al.*, 2000). Para o teor crítico de cloretos totais, são admitidos valores que vão de 0,1 a 3,1% em relação à massa de cimento, sendo usualmente adotados valores conservadores (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

2.1.3.1. Ensaio de Migração de Cloretos

Para análise do processo de migração de cloretos, o procedimento proposto pela ASTM C 1202/05 permite calcular a carga passante em Coulombs (C) ou Amperes por segundo (A/s). O ensaio consiste em submeter fatias de corpos de prova cilíndricos com 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro ao ensaio de migração com aplicação de uma voltagem de 60V ao longo de 6 horas com a medida da corrente passante a cada 30 minutos.

Após a preparação das fatias, elas devem ser secas até apresentarem constância de massa para selagem das laterais com uma camada de silicone. Em seguida, devem ser saturadas com o uso de vácuo e imersão, como descrito na ASTM C 1202/05, e, após a saturação, as células de migração são montadas conforme Figura 9.

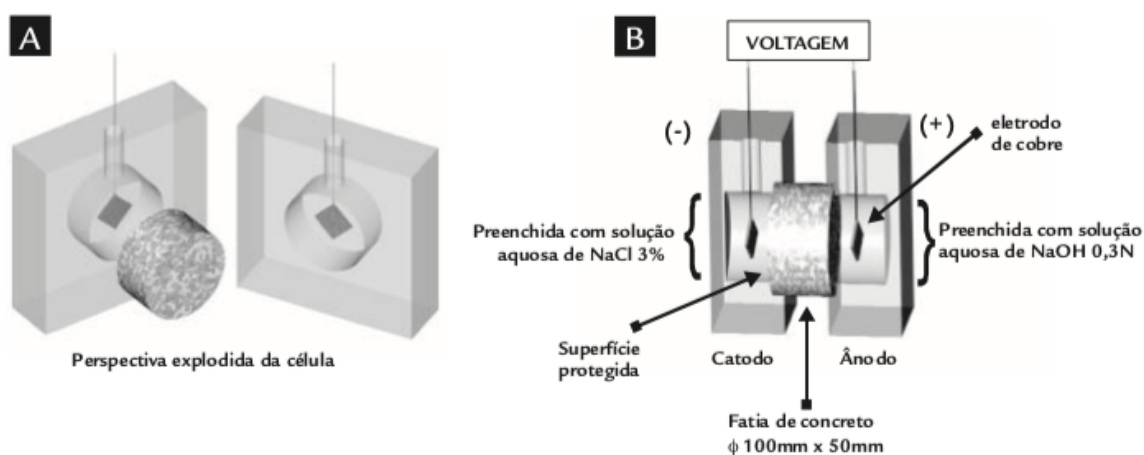


Figura 9 - Célula de migração utilizada no ensaio proposto pela ASTM 1202 (MEDEIROS, 2008)

A câmara catódica é preenchida com uma solução aquosa com 3% de NaCl, enquanto na câmara anódica é inserida uma solução de NaOH 0,3 N. Com as leituras de corrente passante ao longo do tempo obtém-se uma curva como a representada na Figura 10. O resultado do ensaio é a integral que representa a área entre a curva e o eixo x (hachurada na Figura 10), obtendo-se a carga passante em Amperes por segundo (A/s) ou Coulombs (C).

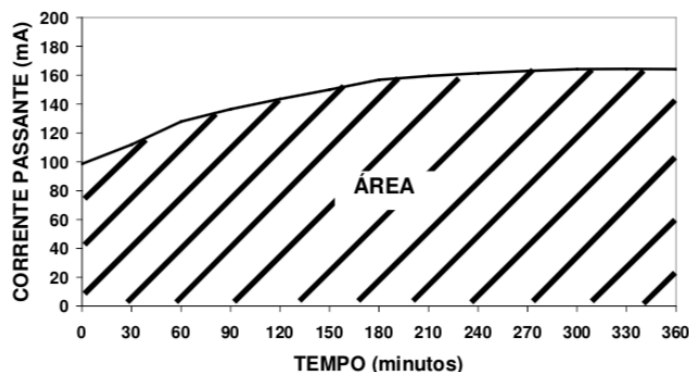


Figura 10 - Curva de variação da corrente ao longo do tempo (MEDEIROS, 2008)

Para verificação da profundidade de penetração de cloretos, após o término do ensaio, as fatias são fraturadas no sentido do fluxo de cloretos e uma solução aquosa de AgNO_3 0,1 M é aspergida na superfície recém fraturada. A região que apresenta presença de cloretos fica esbranquiçada devido à precipitação de AgCl , enquanto a região sem cloretos apresenta coloração marrom (Figura 11). Medeiros (2008) destaca que a região esbranquiçada indica a presença de cloretos livres, ou seja, solúveis em água, não considerando os cloretos fixos.



Figura 11 – Medida da profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico visual por aspersão de solução de AgNO_3 0,1 M (MEDEIROS, 2008)

Entretanto, a alta diferença de potencial aplicada (60 V) resulta no aquecimento das células devido ao efeito Joule, o que pode afetar a mobilidade dos íons e comprometer o resultado final obtido. Dessa forma, uma redução da voltagem para 30 V possibilita a redução do efeito Joule nos resultados finais, como demonstrado por Medeiros (2008). As células de migração utilizadas neste ensaio são configuradas da mesma forma do que as utilizadas no procedimento proposto pela ASTM C 1202/05 (Figura 9). As únicas diferenças entre os procedimentos estão na voltagem aplicada (30 V) e no tempo de ensaio (30 h).

2.1.4. Fatores que Influenciam a Iniciação da Corrosão

A iniciação da corrosão, segundo Figueiredo e Meira (2013), é caracterizada pelo transporte de agentes agressivos para o interior do concreto, especialmente o gás carbônico e os íons cloretos, responsáveis, respectivamente, pela carbonatação do concreto e ruptura localizada da película passivadora da armadura. Dessa forma, a presença desses agentes no ambiente, as características do concreto e a interação entre ambiente e estrutura são aspectos fundamentais para a iniciação da corrosão.

a) Concentração de agentes agressivos

Figueiredo e Meira (2013) afirmam que “a existência e a quantidade de agentes agressivos no ambiente é fator decisivo na iniciação da corrosão”.

Segundo o princípio da Lei de Fick, a difusão do CO_2 pelos poros do concreto é diretamente proporcional ao gradiente de concentração do CO_2 . Sendo assim, a velocidade de carbonatação aumenta com uma maior concentração de CO_2 , principalmente para concretos com grande relação água/cimento, como mostra a Figura 12 (CAVALCANTI FILHO, 2010; BAZZAN, 2014).

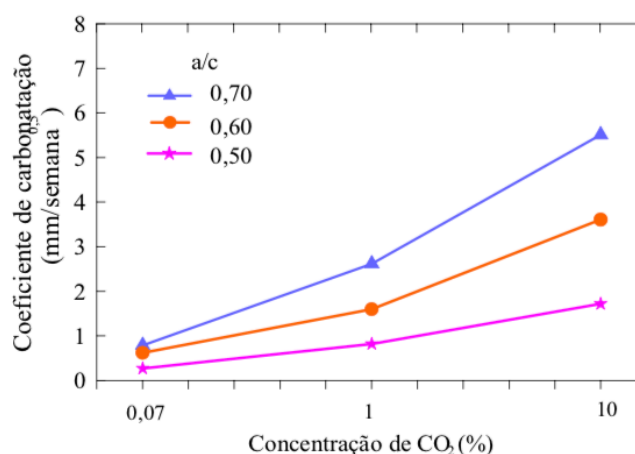


Figura 12 – Relação entre concentração de CO_2 e coeficiente de carbonatação (UOMOTO; TAKADA, 1993 adaptado por POSSAN, 2004)

A influência da concentração de cloretos no ambiente também pode ser exemplificada por meio da taxa média de deposição na vela úmida (Figura 13).

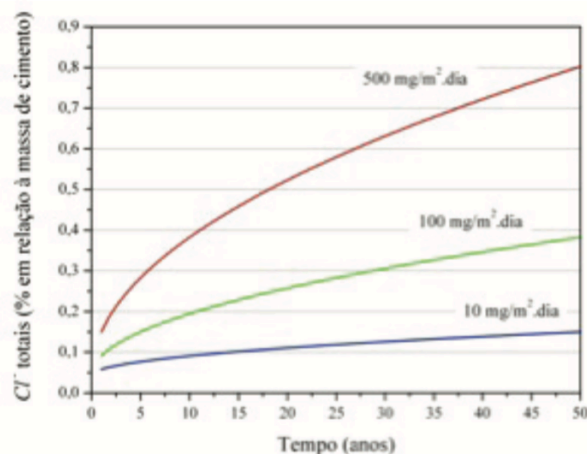


Figura 13 - Relação entre a concentração de cloretos no ambiente e no interior do concreto ao longo do tempo (MEIRA et al., 2007)

b) Características da matriz do concreto

Segundo Figueiredo e Meira (2013), aspectos relacionados à porosidade, potencial alcalino e capacidade de fixação de cloretos no concreto são alguns dos mais influentes na iniciação da corrosão.

A composição do concreto define propriedades muito relevantes para a penetração de agentes agressivos, como porosidade, absorção e permeabilidade da estrutura. A relação água/cimento também influencia diretamente na quantidade e tamanho dos poros e, conseqüentemente, na profundidade de carbonatação, conforme demonstra a Figura 14 (BAZZAN, 2014).

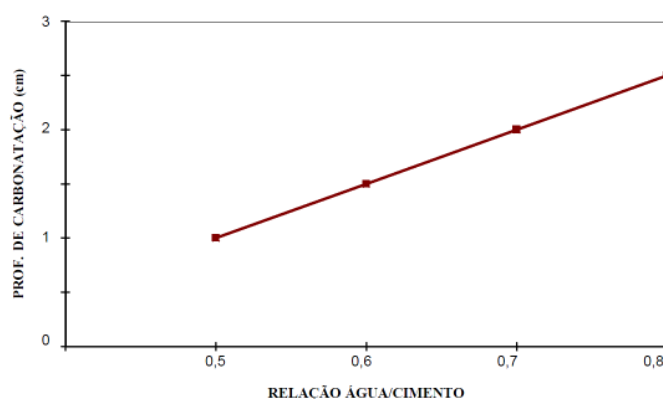


Figura 14 - Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação (VÉNUAT, 1977 apud FIGUEIREDO et al., 1993)

Como pode ser observado na Figura 15, a relação água/cimento também tem influência sobre a concentração de cloretos no concreto. Desse modo, Figueiredo e Meira (2013) apontam que a porosidade possui relação direta com a velocidade de transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto.

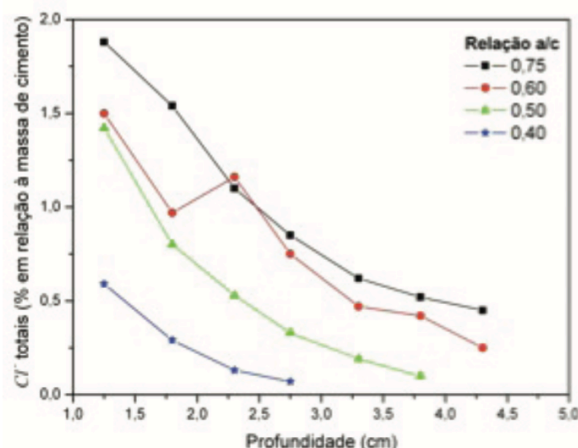


Figura 15 - Relação entre o fator água/cimento e a penetração de cloretos no concreto (JARGERMAN, 1990)

Quanto ao potencial alcalino do concreto, Figueiredo e Meira (2013) apontam que ele está diretamente relacionado com a profundidade de carbonatação e à quantidade de cloretos necessária para o início da corrosão. O teor de OH^- é maior quanto maior o potencial alcalino da matriz, sendo necessária uma maior quantidade de cloretos para atingir a mesma relação Cl^-/OH^- . Além disso, a fixação dos cloretos na matriz está fortemente relacionada com a quantidade de aluminatos na matriz, como mostra a Figura 16.

Teor de C_3A	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

Figura 16 - Acréscimo de tempo para início da corrosão em função do teor de C_3A (RASHEEDUZZAFAR *et al.*, 1990)

Em relação ao processo de carbonatação, matrizes com maiores quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ têm velocidade de penetração de CO_2 diminuída (CAVALCANTI FILHO, 2010). Helene (1993) explica que o uso de adições aumenta a profundidade de carbonatação devido à menor reserva alcalina, apesar de reduzirem a porosidade e permeabilidade do concreto.

Falhas nas etapas de lançamento, adensamento e principalmente cura do concreto podem causar alterações na sua estrutura, como o aparecimento de fissuras. Devido à heterogeneidade do concreto, a frente de carbonatação e os íons cloretos avançam mais rapidamente na estrutura (BAZZAN, 2014).

c) Interação entre ambiente e estrutura

A interação entre ambiente e estrutura está relacionada com a maneira como a estrutura reage ao ambiente e como o agente agressivo entra em contato com a estrutura. Um dos fatores de grande influência é a umidade relativa do ar, refletindo tanto na velocidade de carbonatação como no transporte de cloretos (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

Segundo Bakker (1988) *apud* Bazzan (2014), para que a carbonatação ocorra é necessária a presença de água nos poros do concreto, possibilitando a solubilização do CO_2 . Desse modo, a umidade relativa do ar influencia diretamente na velocidade de difusão do CO_2 visto que influencia na quantidade de água contida nos poros do concreto. Bazzan (2014) descreve três situações diferentes de acordo com a umidade presente nos poros:

- 1) Poros saturados: taxa de carbonatação muito lenta;
- 2) Poros secos: não ocorre dissociação do CO_2 nem reação do cimento hidratado;
- 3) Poros parcialmente preenchidos por água: a carbonatação avança até onde a rede de poros apresenta uma condição favorável.

A Figura 17 mostra a variação da carbonatação em relação à umidade relativa do ar. Observa-se que para o intervalo de umidade entre 50 e 75% são constatadas as maiores porcentagens de carbonatação, e que ela ocorre mais lentamente ou mesmo não ocorre para umidades inferiores a 20% ou superiores a 95% (BAZZAN, 2014; CAVALCANTI FILHO, 2010).

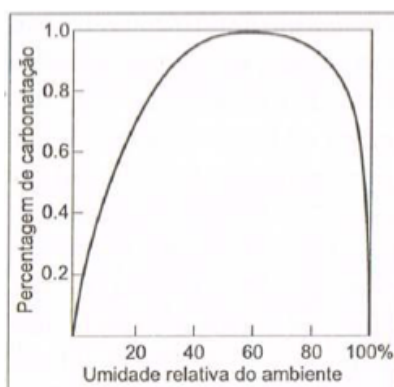


Figura 17 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (VERBECK, 1950 *apud* FIGUEIREDO *et al.*, 1993)

No que se refere ao transporte de cloretos, a absorção capilar é favorecida por menores teores de umidade, enquanto o transporte por difusão é mais favorecido com umidades próximas da saturação. Considerando o contato do agente com a estrutura,

no caso de cloretos varia de acordo com a localização da estrutura, se submersas, em zona de respingo ou atmosfera marinha, conforme mostra a Figura 18 (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

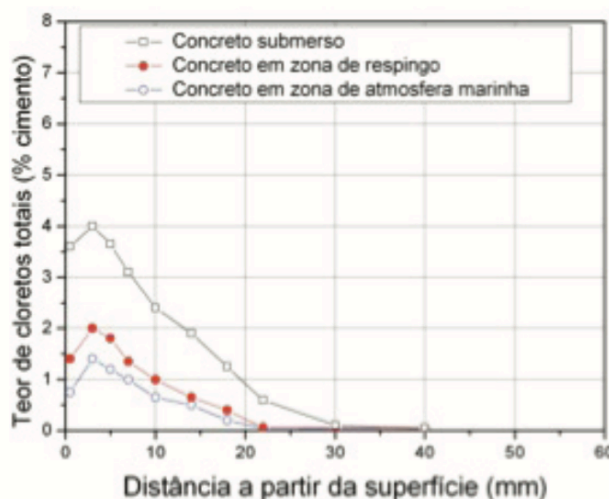


Figura 18 - Relação entre zona de exposição e perfil de cloretos para concretos expostos por 5 anos (SANDBERG *et al.*, 1998 *apud* FIGUEIREDO; MEIRA, 2013)

A Figura 18 mostra um aumento gradual das concentrações de cloreto conforme a estrutura fica mais próxima do mar, o que implica em diminuição do período de iniciação da corrosão.

2.2. TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA CONCRETO

A partir da década de 60 houve um grande desenvolvimento da indústria química para a construção civil, juntamente com diversas publicações estrangeiras sobre revestimentos (ARAÚJO, 2014). Segundo Guillot *et al.* (1990) *apud* Araújo (2010), a aplicação de pinturas como forma de proteger as estruturas de concreto contra a corrosão se iniciou a partir da década de 70. Mas somente por volta de 1999 se inicia a publicação de normas de avaliação dos sistemas de proteção e reparo de estruturas. No Brasil, a pintura como barreira física de proteção só começa a ser discutida no final da década de 80 (ARAÚJO, 2014).

Diversas linhas de pesquisa relacionadas à durabilidade do concreto armado estão sendo estudadas, mas sua maioria se aplica apenas a estruturas novas. Nesse contexto, a proteção superficial do concreto apresenta-se como uma opção viável para evitar a deterioração prematura de estruturas, tanto novas como antigas, sendo essa versatilidade uma das principais vantagens desse sistema. Entretanto, ainda são poucas as pesquisas voltadas para a eficiência dos muitos produtos disponíveis no mercado (MEDEIROS; HELENE, 2009).

Segundo Medeiros (2008), a eficiência da proteção superficial diminui ao longo do tempo, além de ter menor vida útil do que a estrutura de concreto, sendo essencial o estabelecimento de um programa de manutenção considerando cada material separadamente e as condições de exposição, evitando o desperdício de materiais e recursos financeiros. A manutenção pode ser preventiva, realizada antes de sinais aparentes de degradação, ou corretiva, realizada após manifestações patológicas, sendo este o caso mais frequente no Brasil.

Além disso, deve-se avaliar as condições de serviço a que os materiais de proteção superficial estarão submetidos, e não somente sua eficiência isoladamente, de modo a garantir sua durabilidade. Por exemplo: a especificação do verniz poliuretano deve ser bem avaliada, já que o tipo alifático é resistente aos raios solares e pode ser utilizado em superfícies externas enquanto o tipo aromático não apresenta boa resistência à radiação UV (MEDEIROS, 2008).

Os materiais de proteção superficial para concreto podem ser classificados em três tipos: formadores de película, bloqueadores de capilaridade e hidrofugantes de superfície (Figura 19).

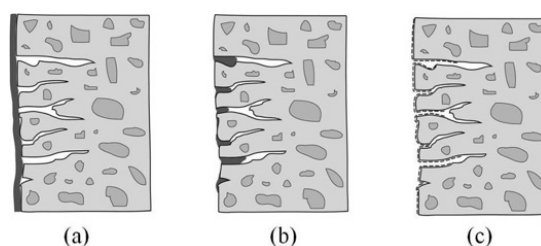


Figura 19 - Grupos de tratamentos de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de capilaridade (c) hidrofugantes de superfície (adaptado de BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997 *apud* MEDEIROS, 2008)

Medeiros (2008) converteu a proteção em termos de cobrimento equivalente, indicando quantos centímetros de cobrimento equivale uma demão do sistema de proteção (Figura 20).

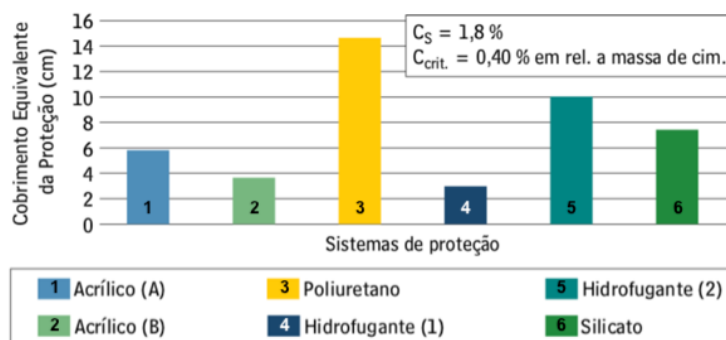


Figura 20 - Cobrimento equivalente dos sistemas de proteção (MEDEIROS, 2008 adaptado por MEDEIROS; HELENE, 2009)

Observa-se que os sistemas de proteção à base de poliuretano apresentam maior cobertura equivalente de proteção, chegando a mais de 14cm. Além disso, Medeiros e Helene (2009) apontam que a eficiência dos produtos não depende apenas do tipo de material, visto que produtos semelhantes apresentaram valores diferentes de cobertura equivalente.

2.2.1. Revestimentos Formadores de Película

Os revestimentos formadores de película podem ser divididos em tintas e vernizes. Segundo Medeiros e Helene (2009), tinta é uma “composição líquida pigmentada que se converte em uma película sólida após sua aplicação em uma camada delgada”. Sua formulação contém quatro componentes básicos: resinas, solventes, pigmentos e aditivos (Figura 21). Já os vernizes são constituídos apenas por resinas, solventes e aditivos, não possuem pigmentos e por isso não têm cor e geralmente têm durabilidade inferior à das tintas (MEDEIROS; HELENE 2009).

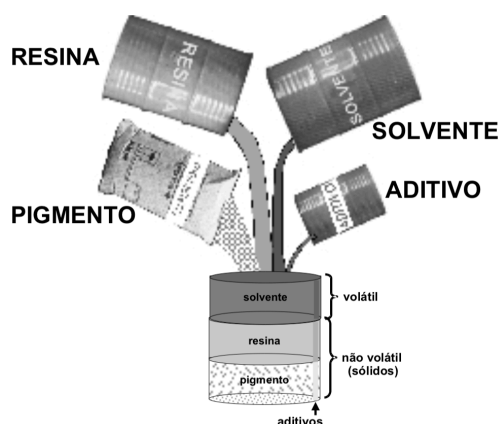


Figura 21 - Desenho esquemático da composição de tintas (GNECCO et al., 2003)

Segundo Medeiros (2008), produtos dispersos em água são menos duráveis e menos eficientes que os dispersos em solventes, assim como os bicomponentes são, de maneira geral, mais eficazes que os monocomponentes. Para o autor, os produtos que conferem maior aderência ao concreto e com maior resistência química e mecânica possuem base epóxi. Entretanto, não apresentam boa resistência aos raios UV e por isso não devem ser aplicados em ambientes externos (HELENE, 2000 *apud* MEDEIROS, 2008).

A qualidade da resina e da formulação das pinturas e vernizes influencia diretamente na proteção final da estrutura, o que justifica a diversidade de resultados em ensaios realizados com produtos aparentemente similares. Além disso, o controle de qualidade desde a fabricação até a aplicação, assim como a correta preparação da

superfície estão diretamente ligadas à durabilidade do sistema de proteção (HELENE, 2000 *apud* MEDEIROS, 2008).

A composição do veículo (resina + solvente) é um dos fatores que mais influenciam nas propriedades do filme. Os pigmentos controlam a cor, o brilho e o poder de cobertura, além de afetarem a permeabilidade e resistência (UEMOTO; AGOPYAN, 2000). A viscosidade da tinta é regulada pelos solventes, utilizados para dissolver a resina. Já os aditivos, são adicionados em pequenas proporções para dar características específicas às tintas (UEMOTO, 2002 *apud* MEDEIROS, 2008).

Segundo Helene (2000) *apud* Medeiros (2008), as principais características desse sistema de proteção são:

- a) Redução da carbonatação e lixiviação;
- b) Redução da permeabilidade e difusividade a sais solúveis;
- c) Inibição do crescimento de fungos e bactérias;
- d) Não permitem a secagem do concreto úmido;
- e) Alteração da estética original do concreto, conferindo brilho ou cor;
- f) Requerem superfície uniforme e homogênea para aplicação.

Segundo Neves *et al.* (2010), as tintas destinadas à proteção do concreto contra a carbonatação são geralmente caracterizadas pela resistência à difusão de dióxido de carbono e vapor de água, os dois principais responsáveis pela carbonatação. Medeiros (2008), concluiu que os formadores de película a base de poliuretano alifático apresentaram maior capacidade de impedir o ingresso de água, com eficiência equivalente à apresentada pelos sistemas duplos (hidrofugante base silano/siloxano + formador de película base acrílico), já muito utilizados na Europa e no Brasil.

Os poliuretanos foram criados na década de 30 a partir do trabalho sistemático de Otto Bayer e seus colaboradores. São polímeros muito versáteis utilizados em diversos segmentos e têm diversas aplicações, incluindo elastômeros, fibras, espumas, adesivos e também revestimentos de diversas superfícies, como aço, concreto, plásticos, madeira entre outros (COUTINHO; DELPECH, 1999).

Segundo Coutinho e Delpech (1999), a grande variedade de compostos disponíveis para a síntese de poliuretanos possibilita a obtenção de diversos produtos com as mais variadas propriedades. Além disso, o desenvolvimento de materiais à base de poliuretanos menos tóxicos é extremamente importante, visto que sua presença já é muito significativa em todos os setores

Nesse contexto de preservação ambiental, as indústrias químicas vêm desenvolvendo sistemas cada vez menos poluentes. Entre eles, estão as tintas com menor quantidade de solventes (*low VOC*) e tintas à base de água, que apresentam

desempenho equivalente ou até superior às tintas convencionais (Figura 22) (GNECCO *et al.*, 2003).

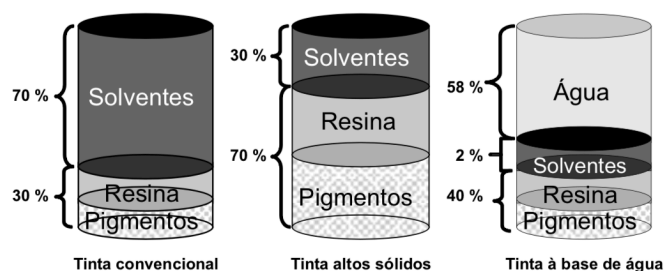


Figura 22 - Valores típicos de participação dos grupos de matérias-primas nos três tipos de tecnologias (para efeito de ilustração) (GNECCO *et al.*, 2003)

Gnecco *et al.* (2003) afirmam que, apesar de muito parecidas com as resinas à base de solventes, as resinas à base de água possuem matérias primas e tecnologias novas que possibilitam sua emulsão e dispersão das resinas com menos ou até nenhum solvente.

Um exemplo são as tintas poliuretânicas bicomponentes de secagem ao ar, fornecidas em duas embalagens com materiais diferentes que devem ser misturados antes do uso para que reajam entre si (Figura 23).

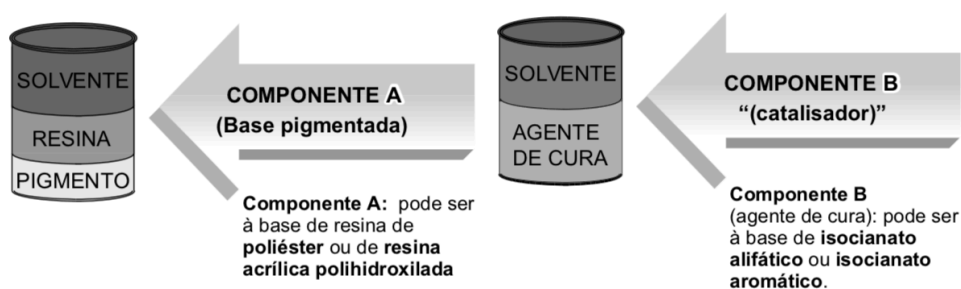
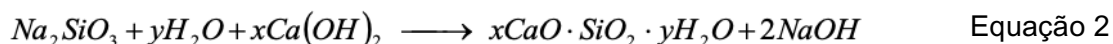


Figura 23 - Tintas poliuretânicas (GNECCO *et al.*, 2003)

2.2.2. Bloqueadores de Capilaridade

Os revestimentos bloqueadores de capilaridade têm em sua composição os silicatos de sódio, que penetram nos poros da superfície do concreto, reagem com um de seus componentes e formam um produto cristalino insolúvel semelhante ao silicato de cálcio hidratado, componente da matriz cimentícia (MEDEIROS; HELENE, 2009). Segundo Thompson *et al.* (1997), a Equação 2 representa a reação que permite a formação do silicato de cálcio hidratado a partir da reação do silicato de sódio com a portlandita da matriz.



Dessa forma, uma camada menos porosa é formada na superfície do concreto, reduzindo a penetração de água e agentes agressivos (MEDEIROS; HELENE, 2009).

Estudos apontam que o uso de silicato de sódio como tratamento de superfície pode ser uma boa opção para a proteção de concretos submetidos ao ataque por cloretos, apesar de não tornar o substrato impermeável (MEDEIROS *et al.*, 2012). Entretanto, são necessários estudos mais aprofundados sobre este tipo de tratamento.

2.2.3. Hidrofugantes de Superfície

Segundo Medeiros e Helene (2009) os revestimentos hidrofugantes de superfície têm como objetivo “impedir ou dificultar a absorção de água do concreto”. Atualmente são utilizados os silanos, siloxanos oligoméricos e misturas dos dois compostos, que reagem com os silicatos da matriz e promovem a aderência do produto no concreto (Figura 24) (MEDEIROS *et al.*, 2015).

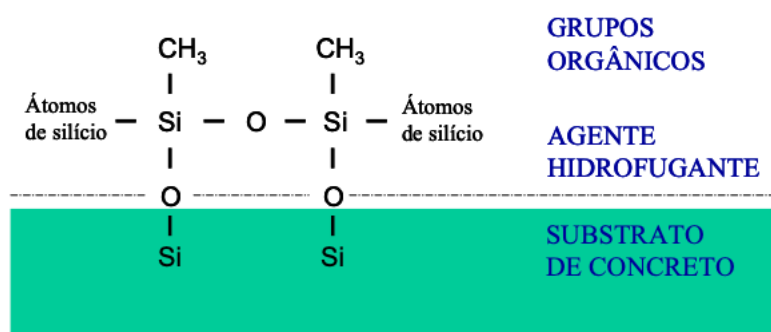


Figura 24 - Ligação química do agente hidrofugante com a superfície de concreto (MEDEIROS *et al.*, 2015)

Quando tratada com um produto hidrorrepelente, a superfície do concreto passa de hidrofílica para hidrofóbica, impedindo que as gotículas de água penetrem no material, fazendo com que o material seja apenas aberto à difusão de gases (NETO *et al.*, 2015). Segundo Grochoski e Helene (2008), o tratamento com hidrofugantes não se mostra tão efetivo contra a carbonatação como os formadores de película, visto que não colmatam/tamponam a superfície dos poros, permitindo a passagem de substâncias como o CO_2 .

A Figura 25 ilustra o mecanismo de ação do hidrofugante em superfícies, comumente chamado de Efeito Lótus. O ângulo de contato (θ) corresponde ao ângulo entre a gota de líquido e a superfície estudada e serve como medida quantitativa da molhabilidade de um sólido por um líquido (NETO *et al.*, 2015). Quanto menor o ângulo

de contato ($<90^\circ$), maior a atração molecular entre o líquido e o substrato, o que faz com que o líquido se espalhe e seja absorvido. Quando o ângulo é superior a 90° as gotas tendem a ficar esféricas, caracterizando um material hidrófugo (HELENE, 2000).

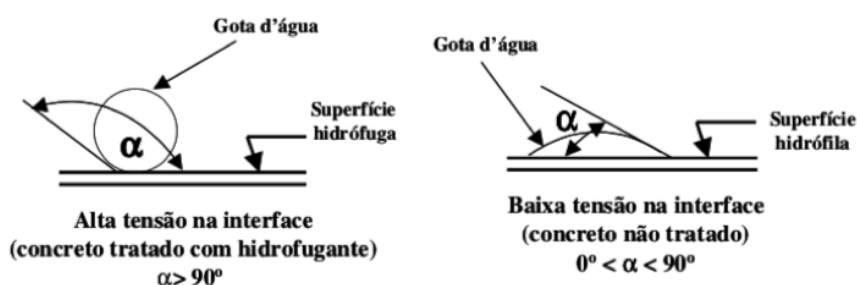


Figura 25 – Interação entre a água e superfície do concreto com e sem hidrofugante de superfície (HELENE, 2000)

Por se tratar de um material hidrofílico, o ângulo de contato do concreto é baixo, geralmente tido como igual a zero. Ao tratar a superfície com um produto que possui características hidrofóbicas, o ângulo de contato aumenta, modificando o comportamento do material quando submetido à molhagem.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para concretização do objetivo deste trabalho, foram comparadas as profundidades de carbonatação e penetração de cloretos em peças sem proteção e com sistemas de proteção superficial. Foram avaliados três sistemas diferentes: um hidrofugante à base de silano/siloxano, uma tinta poliuretânica e um cristalizante mineral. Os sistemas foram aplicados conforme instruções do fabricante, sendo submetidos aos ensaios de carbonatação e penetração de cloretos após a secagem total dos materiais.

Ressalta-se que o ensaio acelerado de carbonatação ainda não foi normatizado. Desse modo, a metodologia deste trabalho foi baseada no estudo de Kazmierczak e Helene (1995) que propõe uma metodologia para a avaliação de tintas e vernizes para proteção do concreto no estudo de Salomão (2008), que trata do ensaio acelerado de carbonatação do concreto.

Na Figura 26 são apresentadas as etapas do programa experimental, explicadas a seguir.

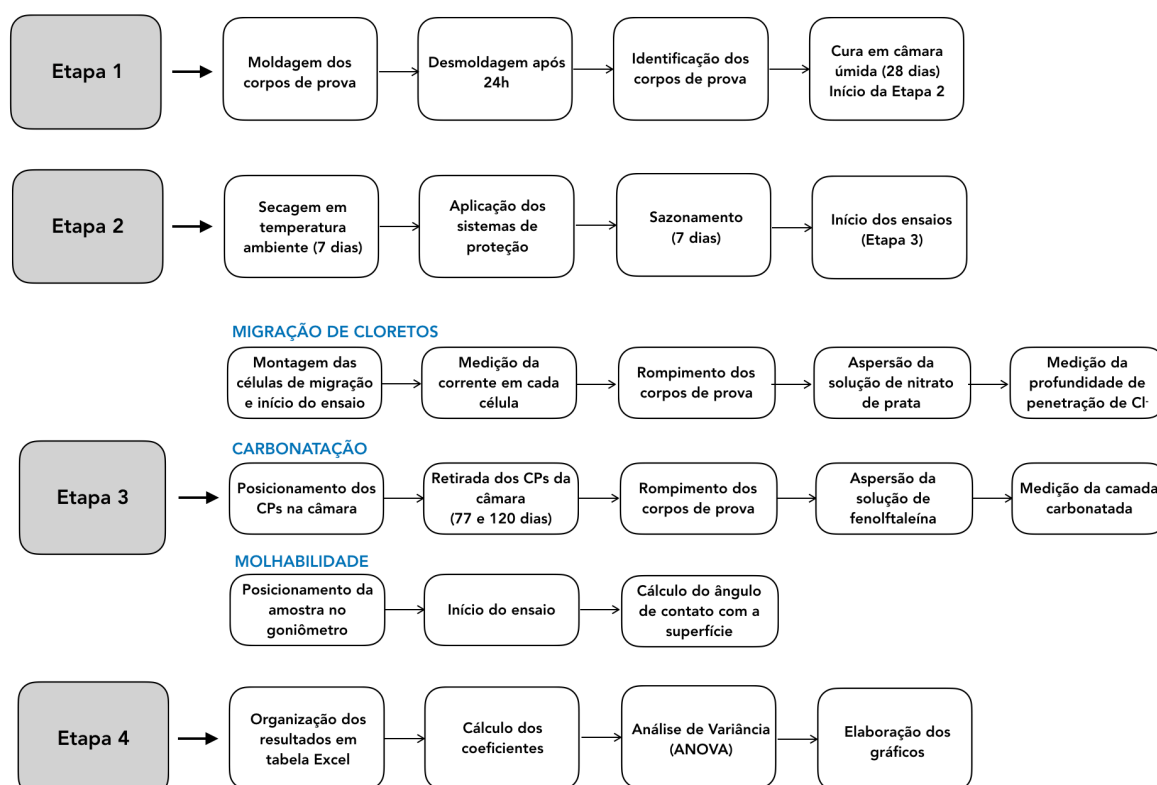


Figura 26 - Esquema gráfico dos procedimentos experimentais

3.1. MATERIAIS E PROPORÇÕES DE MISTURA

A mistura teve como aglomerante o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), com dois traços, um com maior consumo de cimento (denominado “rico”) e outro com menor consumo de cimento (denominado “pobre”). Os resultados de abatimento (*slump*), resistência à compressão aos 28 dias e massa específica são apresentados na Tabela 1, juntamente com o consumo de cimento e relação a/c para cada traço estudado.

Tabela 1 - Caracterização dos traços utilizados

	Traço	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Abatimento (mm)	Massa espec. (kg/dm³)
Pobre	1:1.04:1.96	0.68	309	90	2.37
Rico	1:2.57:3.43	0.39	540	95	2.37

O concreto foi produzido com cimento tipo CPV – ARI, brita calcária como agregado graúdo e areia natural como agregado miúdo. As propriedades químicas e físicas do cimento utilizado são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, conforme relatórios técnicos do fornecedor.

Tabela 2 - Propriedades químicas do cimento utilizado

Produto	(%)
CaO	61,35
SiO ₂	18,30
Al ₂ O ₃	4,28
Fe ₂ O ₃	2,94
MgO	2,49
SO ₃	2,59
CaO livre	0,85
Perda ao fogo	6,70
Resíduo insolúvel	1,38
Equivalente alcalino	0,66

Tabela 3 - Propriedades físicas do cimento utilizado

Propriedade	Valor
Expansão quente	0,26mm
Início de pega	3h58min
Fim de pega	4h47min
Consistência normal	27%
Blaine	3.378cm ² /g
#200	1,13%
#325	7,14%
Resistência à compressão aos 28 dias	42,3 MPa

Foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, 12 para cada traço, posteriormente fatiados em amostras de 5 cm de altura para a realização dos ensaios, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de fatias de corpos de prova para cada ensaio

Traço	Carbonatação	Migração de Cloretos	Molhabilidade	Total
Rico	24	12	4	40
Pobre	24	12	4	40

Os materiais foram misturados em uma betoneira nas proporções necessárias e então despejados nos moldes em 3 camadas, adensadas com 25 golpes cada, conforme NBR 5738:2015. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com uma lona plástica por 24 horas e, em seguida, armazenados em câmara úmida para cura por 28 dias. Antes da aplicação dos tratamentos superficiais, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente por 7 dias para secagem.

3.2. TRATAMENTOS UTILIZADOS

A tinta utilizada neste trabalho consiste em uma tinta poliuretânica bicomponente alifática à base de água, ou seja, seu componente A é poliéster e o B é o isocianato alifático, misturados na proporção de 10(A):3,5(B) até completa homogeneização. O produto possui densidade de 1,10 kg/L e teor de sólidos de 44,4% em volume. A aplicação foi realizada com o auxílio de um pincel em duas demãos uniformes com intervalo de 4h entre demãos, conforme orientações do fabricante.

O bloqueador de capilaridade selecionado foi um cristalizante mineral não tóxico, com massa específica aparente igual a 1,05 kg/L. O produto foi aplicado como pintura no substrato limpo, previamente saturado e respeitando o consumo recomendado pelo fabricante, de 1,0 kg/m², com proporção de mistura em volume de 3:1 (pó:água). O produto foi aplicado uniformemente sobre a amostra em demão única com o auxílio de um pincel.

O hidrofugante de superfície escolhido foi um hidrofugante disperso em água à base de silano/siloxano, sem solventes e com propriedade de repelência à água, com densidade de 1,00 g/cm³. Para a aplicação, a superfície estava seca e livre de partículas e imperfeições. O produto foi aplicado em duas demãos utilizando um pincel, com intervalo de 2 horas entre elas e respeitando o consumo recomendado pelo fabricante, de 400 ml/m².

Após a secagem dos tratamentos superficiais, os corpos de prova foram encaminhados para sazonalização por 7 dias antes da realização dos ensaios de carbonatação e penetração de cloretos.

Para os ensaios de migração de cloretos e molhabilidade os tratamentos foram aplicados apenas em uma das faces de corpos de prova, enquanto que para o ensaio de carbonatação realizou-se a aplicação nas duas faces e nas laterais das amostras. Foram usadas três fatias para cada sistema. Após a aplicação, os corpos de prova foram mantidos em ambiente controlado para sazonalização por 7 dias.

3.3. ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados ensaios acelerados de carbonatação e migração de cloretos. As amostras também foram avaliadas quanto ao ângulo de contato da água com a superfície, por meio do ensaio de molhabilidade. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados foram posteriormente analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA) e as médias foram comparadas com o teste de Tuckey. Os ensaios são descritos a seguir.

3.3.1. Migração de Cloretos

Após a aplicação dos sistemas de proteção e sazonalização, as laterais das 24 amostras selecionadas para o ensaio de migração de cloretos foram seladas com uma camada de silicone. Após 24 horas, as amostras foram saturadas com o uso de vácuo e imersão, conforme a ASTM C 1202/05. As fatias saturadas foram colocadas entre duas células acrílicas com 280 cm³ de capacidade volumétrica e vedadas com silicone. Após 24 horas, as soluções aquosas de 3% de NaCl e 0,3 N de NaOH foram colocadas nas câmaras catódica e anódica e os pólos das células foram conectados à fonte de tensão, conforme Figuras 9 e 27.



Figura 27 - Células de migração prontas para o início do ensaio

Após o término desse procedimento, as fatias de concreto foram seccionadas no sentido do fluxo de cloretos e aspergiu-se solução aquosa de AgNO_3 0,1 M na superfície recém fraturada. Essa operação leva a formação de duas regiões bem definidas: uma esbranquiçada, devido à precipitação de AgCl e outra marrom. A região esbranquiçada indica a presença de cloretos livres ou solúveis em água, o que representa a profundidade de penetração de cloretos no concreto (MEDEIROS; HELENE, 2009).

A partir das medições de corrente passante realizadas foram obtidas as curvas de corrente passante (A) vs tempo (minutos) para determinação da carga passante total em A/s ou Coulombs (C) por meio do cálculo da área entre a curva e o eixo x.

3.3.2. Carbonatação Acelerada

A carbonatação acelerada foi realizada em uma câmara de carbonatação com as seguintes condições: umidade relativa em 65%, temperatura de 23 °C e teor de CO_2 igual a 5% (Figura 28). A câmara de carbonatação empregada, da marca CARON, possui controle automático de temperatura (tolerância $\pm 1,1$ °C), umidade relativa (tolerância $\pm 2,5\%$) e teor de CO_2 (precisão de $\pm 3\%$).

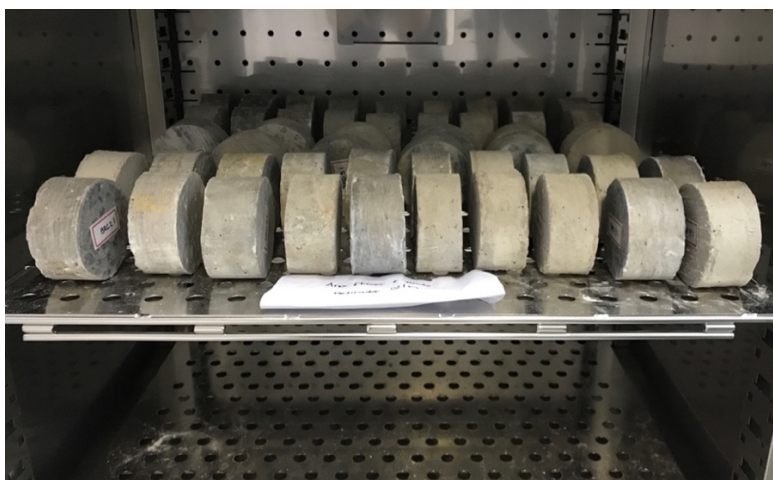


Figura 28 - Corpos de prova posicionados para início do ensaio de carbonatação acelerada

A medida do avanço da frente de carbonatação para as argamassas e concreto foi realizada com o uso de fenolftaleína aos 77 e 120 dias.

3.3.3. Molhabilidade

O ensaio de molhabilidade, também chamado de ensaio de ângulo de água, foi realizado em um goniômetro da marca Krüss, disponibilizado pelo Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR (Figura 29). O aparelho consiste em uma plataforma com movimentação horizontal e vertical para alocação da amostra, um

emissor de luz, um microscópio digital (câmera ligada ao *software*) e seringas dosadoras com diferentes diâmetros de agulha.

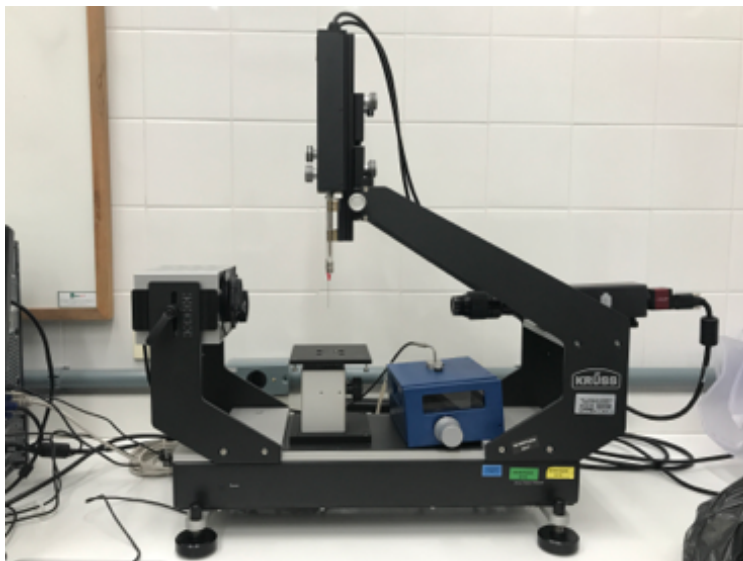


Figura 29 - Goniômetro utilizado para o ensaio de molhabilidade

Foram analisados 4 corpos de prova, sendo um de referência e os outros três com tratamento. Para maior confiabilidade dos resultados, foram realizadas 5 medições em cada amostra, com gotas de volume constante igual a 5 μml de água destilada. A superfície a ser analisada foi posicionada na base móvel e o foco da câmera ajustado para manter a nitidez à distância da agulha. Após o gotejamento, foram feitos registros da gota formada pelo *software* seguidos da análise e cálculo do ângulo formado entre a gota e a superfície. O cálculo do ângulo foi realizado a partir da inclinação da linha de contorno da gota, descrita matematicamente pela equação de Young-Laplace no ponto de intersecção com a tangente entre o líquido e a superfície.

A análise da eficácia de cada proteção foi realizada por meio da comparação entre os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada e penetração de cloretos para os corpos de prova com e sem tratamento. Para tanto, os resultados foram convertidos em cobrimento equivalente de concreto, possibilitando a análise de todos os sistemas de proteção em relação a uma estrutura sem tratamento. Além disso, os diferentes produtos foram avaliados quanto à afinidade com a água, por meio do ensaio de molhabilidade.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos do programa experimental. Para validação estatística foi utilizado o

4.1. MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Os resultados de carga passante média e profundidade de penetração para o ensaio de migração de cloretos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de carga total passante média e profundidade de penetração obtidos no ensaio de migração de cloretos.

	Carga total passante média (C)	Desv. padrão	Profundidade de penetração (mm)	Desv. padrão
Referência pobre	2628	109.12	44.20	2.64
Referência rico	2118	199.29	41.42	0.90
Hidrofugante pobre	2229	276.72	46.29	1.12
Hidrofugante rico	1806	190.78	39.90	2.81
Poliuretano pobre	1239	243.22	43.62	3.22
Poliuretano rico	348	312.07	17.08	4.15
Cristalizante pobre	2415	126.11	47.16	0.12
Cristalizante rico	2031	81.66	45.75	2.17

Na Figura 30 são apresentados os resultados de carga total passante para as amostras analisadas. De forma geral, observa-se uma tendência de redução da carga passante total com a aplicação dos tratamentos na superfície. As amostras tratadas com poliuretano apresentaram redução estatisticamente relevante na carga passante total, independente do consumo de cimento utilizado. Para o concreto de referência, houve diferença significativa entre as amostras analisadas, sendo o concreto com maior consumo de cimento o com menor carga passante total.

Pode-se inferir que, dentre os produtos analisados, o cristalizante de superfície e o silano/siloxano são os que apresentam menor capacidade de reduzir a carga passante, tendo valores estatisticamente iguais às amostras de referência.

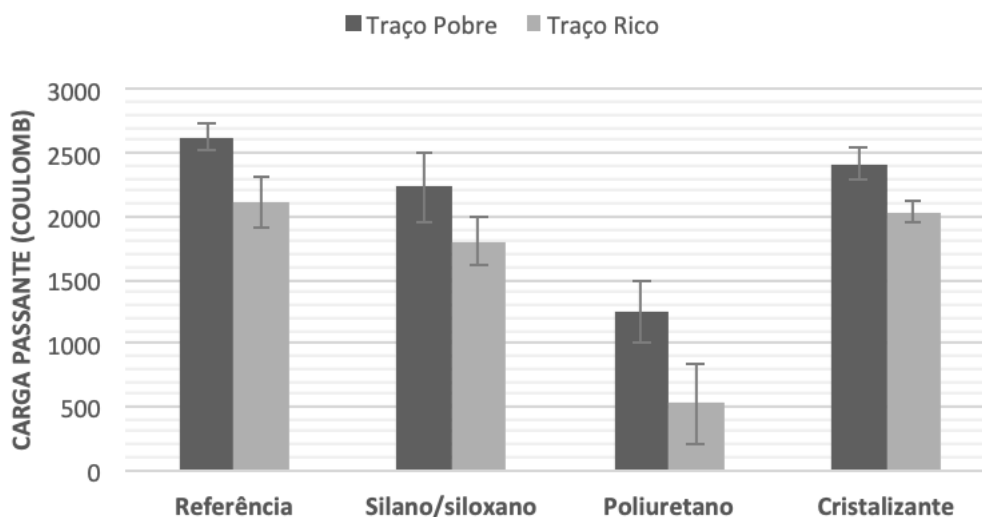


Figura 30 – Resultados de carga total passante após ensaio de migração de cloretos

Comparando os resultados obtidos com a Tabela 6, conclui-se que as amostras tratadas com poliuretano e as amostras de traço rico são as únicas com baixa penetrabilidade de íons cloretos (considerando a variabilidade dos resultados). Para as amostras de traço pobre, exceto a tratada com poliuretano, os valores de carga passante ultrapassaram os 2000 coulombs, ou seja, de penetrabilidade moderada aos íons cloretos.

Tabela 6 - Penetrabilidade a íons cloretos baseada na carga passante (adaptado de ASTM 1202, 2005)

Carga passante (coulombs)	Penetrabilidade a íons cloretos
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Negligenciável

A Figura 31 apresenta os valores de profundidade de penetração de cloretos após o ensaio de migração. Apenas as amostras do traço rico tratadas com poliuretano apresentaram redução estatisticamente significativa quando comparadas à referência, com aproximadamente 61% de redução. Observa-se também uma redução na profundidade com o aumento do consumo de cimento nas amostras tratadas com silano/siloxano e poliuretano.

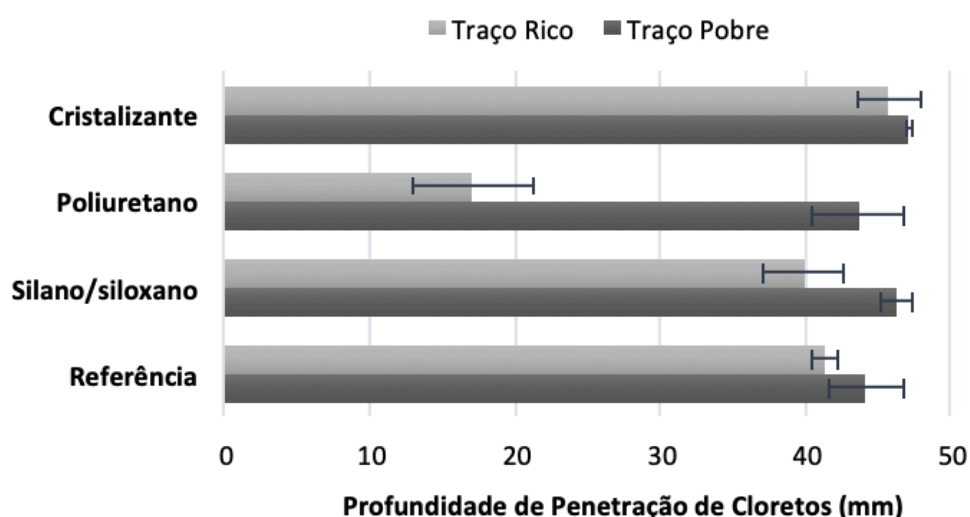


Figura 31 - Resultados de profundidade de penetração após ensaio de migração de cloretos

Na Figura 32 é possível observar que não houve boa correlação entre os dados de profundidade de penetração e carga passante total, não sendo possível estabelecer uma relação entre os dois parâmetros. Ao analisar os resultados separadamente, a correlação obtida foi ainda menor.

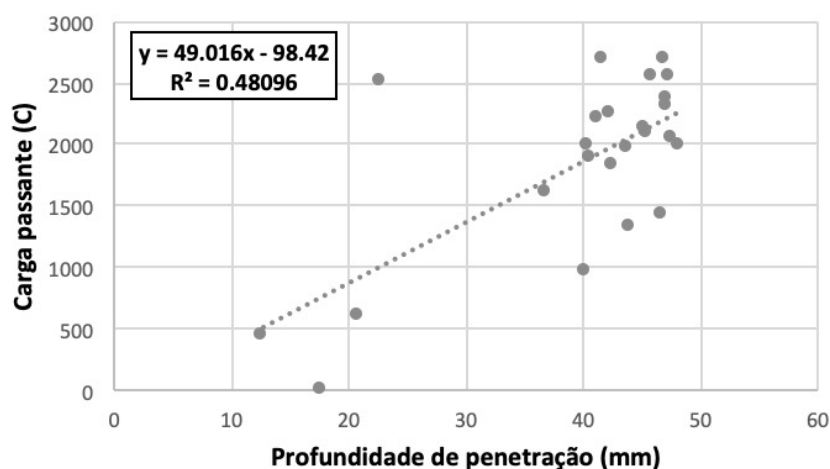


Figura 32 - Correlação entre profundidade de penetração e carga passante

4.2. CARBONATAÇÃO

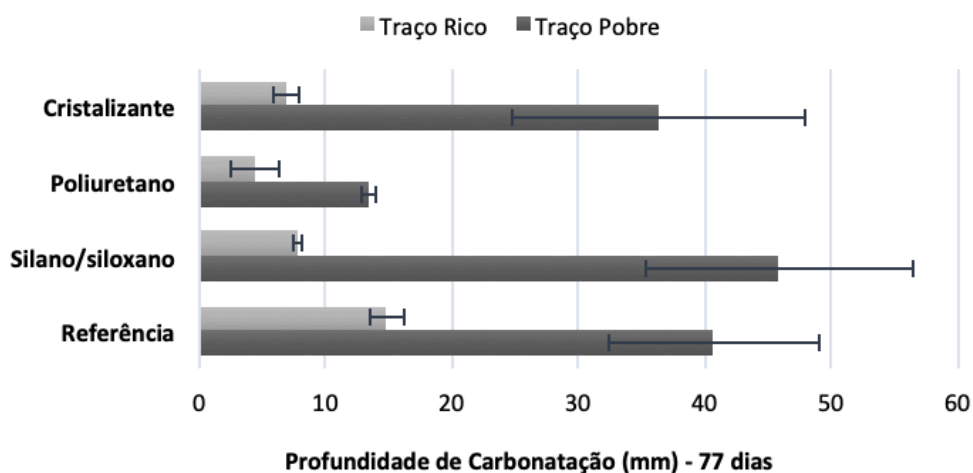
Os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das amostras aos 77 e 120 dias são apresentados na Tabela 7, Figuras 33 e 34.

Tabela 7 – Resultados de profundidade de carbonatação medidos aos 77 e 120 dias

	Prof. carbonatação (mm) – 77 dias	Desv. padrão	Prof. carbonatação (mm) – 120 dias	Desv. padrão
Referência pobre	40.69	8.30	50.07	0.21
Referência rico	14.84	1.34	7.82	0.10
Hidrofugante pobre	45.90	10.66	44.70	9.27
Hidrofugante rico	7.76	0.40	6.82	0.66
Poliuretano pobre	13.44	0.53	14.63	0.57
Poliuretano rico	4.41	1.86	3.80	0.39
Cristalizante pobre	36.41	11.60	36.04	3.30
Cristalizante rico	6.92	0.98	8.28	2.95

Foi constatada carbonatação total das amostras de referência e tratadas com silano/siloxano, além de grandes profundidades para amostras de traço pobre tratadas com cristalizante. As amostras de traço rico com aplicação de poliuretano foram as que apresentaram menores valores absolutos de profundidade de carbonatação.

Os resultados apontam uma grande diferença entre as amostras com traço rico e pobre para um mesmo sistema de proteção. Em todos os casos um maior consumo de cimento levou à redução significativa da profundidade de carbonatação.

**Figura 33** - Resultados de profundidade de carbonatação aos 77 dias

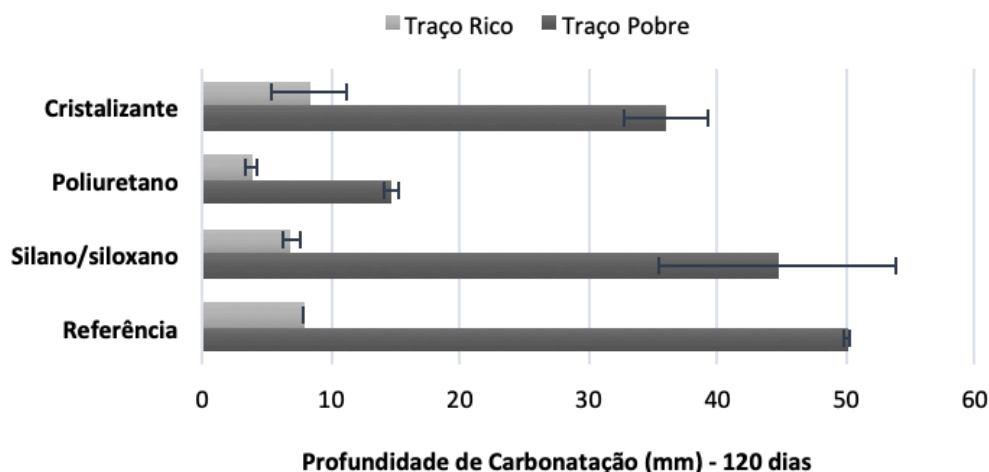


Figura 34 - Resultados de profundidade de carbonatação aos 120 dias

A variabilidade das medições devido a características intrínsecas às amostras e ao ensaio inviabilizam a comparação entre os sistemas de proteção do traço pobre. Entre as amostras com maior consumo de cimento, verifica-se uma tendência de redução na profundidade de carbonatação nas amostras tratadas, sendo o poliuretano o produto com menores profundidades absolutas.

4.3. MOLHABILIDADE

Os resultados de ângulo de contato obtidos a partir do ensaio de molhabilidade são apresentados na Tabela 8 e ilustrados na Figura 35.

Tabela 8 – Resultados de ângulo de contato calculados a partir do ensaio de molhabilidade

	Ângulo de contato (°)	Desvio padrão
Referência pobre	0.00	0.00
Referência rico	0.00	0.00
Hidrofugante pobre	132.18	2.79
Hidrofugante rico	128.44	4.05
Poliuretano pobre	80.06	6.32
Poliuretano rico	76.20	9.01
Cristalizante pobre	0.00	0.00
Cristalizante rico	0.00	0.00

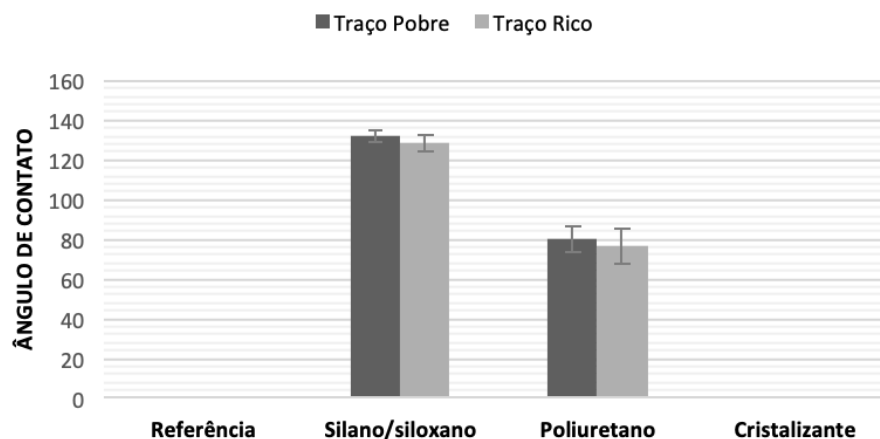


Figura 35 - Resultados de ângulo de contato da água

As amostras sem tratamento e com cristalizante não apresentaram valores de ângulo de contato devido à alta absorção da superfície analisada, como mostra a Figura 36.

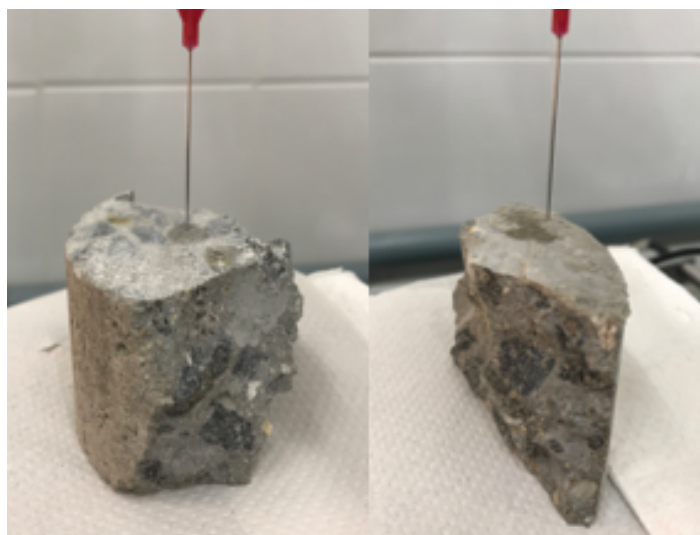


Figura 36 - Amostras de referência e com cristalizante de superfície durante o ensaio

Os resultados indicam que o silano/siloxano apresenta-se mais hidrófobo do que o poliuretano, com valores de ângulo de contato superiores a 120 graus (Figura 37). A superfície tratada com poliuretano apresentou-se mais hidrofílica, diminuindo o ângulo de contato com a superfície, como mostra a Figura 38.

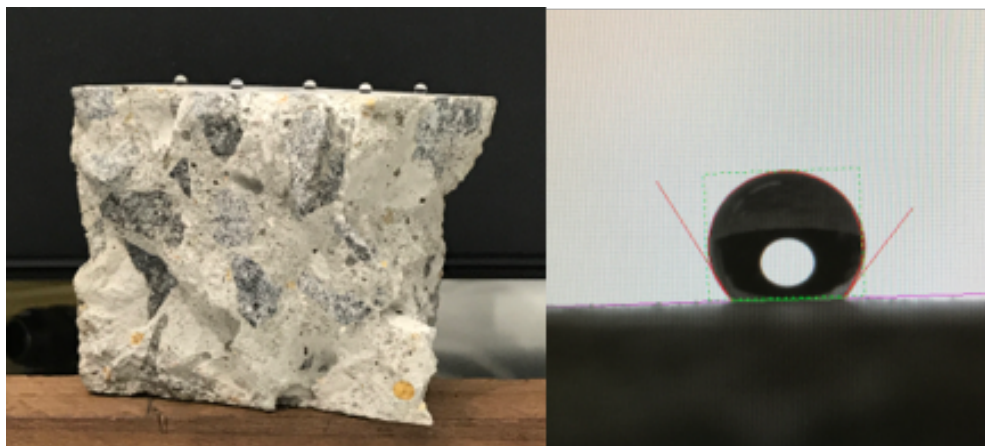


Figura 37 - Corpo de prova tratado com silano/siloxano após o ensaio e foto da gotícula de água sobre a superfície registrada pelo equipamento

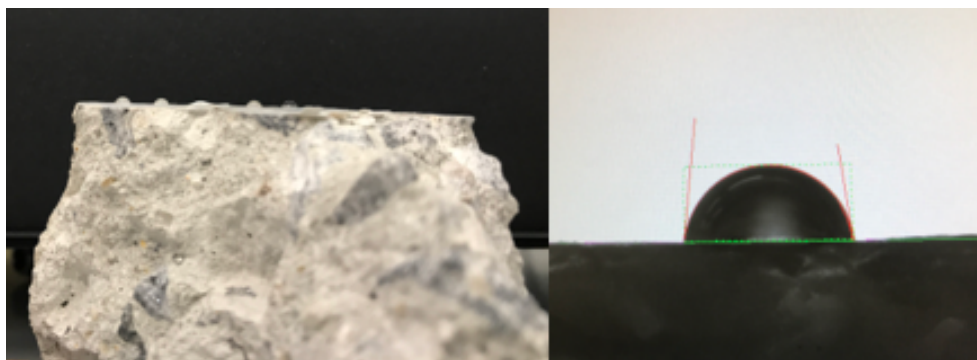


Figura 38 - Corpo de prova tratado com poliuretano após o ensaio e foto da gotícula de água sobre a superfície registrada pelo equipamento

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A avaliação da eficiência dos diferentes tratamentos de superfície para concreto foi viabilidade por meio da realização de ensaios acelerados de penetração de cloretos e carbonatação. Os resultados obtidos, de modo geral, confirmam a hipótese de que a aplicação de produtos de proteção no concreto é eficiente contra a entrada de agentes agressivos.

No caso do ensaio de migração de cloretos, observou-se uma tendência de redução da carga passante total e da profundidade de penetração com a aplicação dos tratamentos. Dos produtos estudados, o poliuretano foi o que apresentou redução significativa, independente do consumo de cimento, apresentando baixa penetrabilidade aos íons cloretos segundo a ASTM 1202/05. Os resultados também apontaram que, para amostras não tratadas, o aumento do consumo de cimento reduziu a carga passante total medida e a profundidade de penetração, fazendo com que as amostras fossem de um nível de penetrabilidade moderada para baixo.

Foi constatada a carbonatação total das amostras de referência e tratadas com silano/siloxano, além de profundidades elevadas para amostras com pouco cimento tratadas com cristalizante. Os menores valores absolutos de carbonatação foram observados nas amostras de traço rico em cimento com poliuretano. De modo geral, o aumento no consumo de cimento levou à redução da profundidade de carbonatação, podendo estar relacionada com a menor relação água/cimento observada neste traço.

Os resultados do ensaio de molhabilidade confirmam a propriedade hidro-repelente proporcionada pelo tratamento com silano/siloxano, indicando que este produto realmente modifica a tensão superficial do material e forma uma barreira efetiva contra a entrada de água no concreto. A superfície tratada com poliuretano também apresentou características hidrofóbicas, apontando que este produto também pode ser utilizado como barreira contra a entrada de água na estrutura.

Pode-se concluir que, dentre os produtos analisados, o poliuretano foi o que apresentou melhor desempenho contra a entrada de dióxido de carbono e íons cloretos, dentro das limitações desta pesquisa. Para redução da entrada de água, o produto com melhores propriedades hidro-repelentes foi o hidrofugante a base de silano/siloxano. Entretanto, é importante salientar que mudanças no traço do concreto (como redução da relação a/c e aumento do consumo de cimento) proporcionaram reduções ao ingresso de agentes agressivos tão significantes quanto a aplicação do poliuretano, por exemplo, sendo também uma alternativa como barreira quando dosado corretamente.

O estudo realizado não trata de comparação de impermeabilidade entre os produtos avaliados, mas sim de avaliação de desempenho frente à diferentes agentes agressivos. Pode-se observar que um mesmo produto pode ter desempenhos distintos quando exposto à diferentes ambientes, o que confirma a necessidade de identificar corretamente a que agentes a estrutura está exposta e fazer a escolha do tratamento baseada no que foi identificado. Além disso, tratamentos duplos com diferentes produtos podem ser considerados em casos específicos, ampliando ainda mais o leque de possibilidades para o profissional responsável.

Um estudo mais aprofundado sobre o desempenho de produtos semelhantes frente ao ataque por sulfatos é uma alternativa para trabalhos futuros, visto que se trata de um ambiente de alta agressividade e grande demanda de recuperação devido à baixa vida útil das estruturas expostas. Além disso, é interessante avaliar a influência da relação água/cimento e do consumo de cimento nos resultados obtidos de modo a identificar qual das duas propriedades é mais relevante para aumento da proteção contra a entrada de agentes agressivos no concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. ASTM C-1202. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2005.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1047-1055, 2000.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

BAZZAN, G. C. G. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo**. Monografia (Pós Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CAVALCANTI FILHO, A. N. **Contribuição ao controle tecnológico de concretos estruturais de cimento Portland, em ambientes marítimos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. **Poliuretanos como materiais de revestimento de superfície**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p.41-48, 1999.

DE MUYNCK, W.; KATHELIJN, C.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. **Construction and Building Materials**, 22:875-885, 2008.

FERREIRA, F. G. S.; HELENE, P. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada a partir de um programa interlaboratorial. 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais.... IBRACON** - Outubro, 2014.

FIGUEIREDO, E. J. P., HELENE, P., ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da Corrosão da armadura do concreto**. Boletim Técnico BT/PCC/121 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

FIGUEIREDO, E. P., MEIRA, G. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. Boletín Técnico 06 – Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT, Mérida, 2013.

GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. **Tratamento de superfície e pintura**. Série Manual de Construção em Aço - Instituto Brasileiro de Siderurgia, Rio de Janeiro, 2003.

GOMES, N. A. **Estruturas de Concreto Armado em Ambiente Urbano: Avaliação da Carbonatação à Luz das Recomendações da NBR 6118 (2003)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras**. Boletim Técnico – Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção das estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência). São Paulo: EPUSP, 1993.

HELENE, P. P. Protección y Mantenimiento de las Superfícies de Hormigón. In: CASANOVAS, X. **Manual de Diagnóstico e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado**. 2000.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. Metodologia para a avaliação da proteção contra a carbonatação conferida por tintas e vernizes aplicados sobre estruturas de concreto. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 6., 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** p. 699-704. Rio de Janeiro: ANTAC, 1995.

MEDEIROS, M.H.F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. H.; HELENE, P. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. **Materials and Structures**, v. 41, p. 952-962, 2006.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Durabilidade e proteção do concreto armado. Revista Técnica 151 - Outubro, 2009.

MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; QUARCIONI, V. A.; HELENE, P. Concreto com proteção de superfície e exposto à solução de cloretos: Espessura de cobrimento equivalente. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 3, p. 219-233, 2015.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; YAZIGI, R.; MEDEIROS, M. H. F. Carbonation depth in 57 years old concrete structures. **Steel and Composite Structures**, v. 19, p. 953-966, 2015.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1^a ed. PINI, 1994.

MEIRA, G. R; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., 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 & Concrete Composites**, v. 27, p. 667-676, 2007.

NEVES, R. D.; BRANCO, F; BRITO, J. **Desempenho de diferentes tintas na proteção do betão face à acção do dióxido de carbono**. Encontro Nacional – Conservação e Reabilitação de Estruturas, 2010.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente Construído, c.7, n.4, p. 7-20, Porto Alegre, 2007.

RASHEEDUZZAFAR et al. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.20, p 723-738, 1990.

SALOMÃO, M. C. F.; SILVA, T. J. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto**. In: XII Seminário de Iniciação Científica. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

SILVA, F. T., PIMENTEL, R. L., BARBOSA, N. P. Análise de patologias em estruturas de edificações da cidade de João Pessoa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45°, 2003, Vitória. **Anais: IBRACON**, 2003.

THOMPSON, J. L.; SILSBEE, M. R.; GILL, P. M.; SCHEETZ, B. E. Characterization of silicate sealers on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, 10: 1561-1567, 1997).

UEMOTO, K. L.; AGOPYAN, V. Influence of latex paint compositions on concrete against chloride penetration. In: Repair, Rehabilitation, and Maintenance of Concrete Structures, and Innovations in Design and Construction, 2000, Korea. **Anais...** . p. 79-94. Korea: American Concrete Institute, 2000.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados

CARBONATAÇÃO - 77 DIAS															100% carbonatado				
Laterais															100% carbonatado				
Topo e base															100% carbonatado				
Diâmetro															100% carbonatado				
Altura															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Lat.															100% carbonatado				
D. Pad.															100% carbonatado				
M. Topo															100% carbonatado				

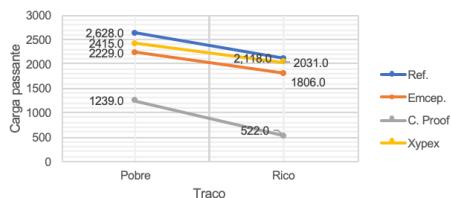
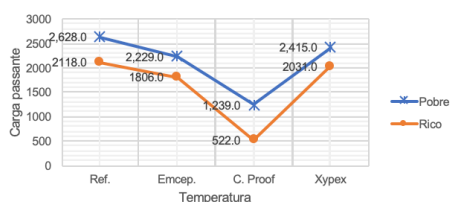
APÊNDICE B – Tabelas ANOVA

ANOVA - TWO-WAY CARGA PASSANTE

Tratamento de superfície									
Traço do conc	Ref.		Emcep.		C. Proof		Xypex		Tl.
	Pobre	2502	2691	2097	2043	1332	963	2313	2376
		2691	7884	2547	6687	1422	3717	2556	7245
		2628		2229.00		1239.00		2415.00	
Rico		2259	1890	1836	1602	603	441	1998	2124
		2205	6354	1980	5418		1044	1971	6093
T.j.		2118.00		1806.00		522.00		2031.00	
		14238		12105		4761		13338	
		2373.00		2017.50		880.50		2223.00	

TC	85873538	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	F	F tab	H0
SQA	958874	Conc. Pobre (A)	958874	1	958874.18	15.17	5.32	FALSO
SQB	6518872	Conc. Rico (B)	6518872	3	2172957.38	34.37	4.07	FALSO
SQAB	537760	AB	537760	3	179253.37	2.84	4.07	VERDADEIRO
SQT	8521270	Resíduo	505764	8	63220.50			Se H0 é VERDADEIRO, não há diferença significativa
SQR	505764	Total	8521270	15				Se H0 é FALSO, há diferença significativa

16 5%



	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Diferença em relação à referência		
Pobre	2628.0	2229.0	1239.0	2415.0	-399.0	-1389.0	-213.0
Rico	2118.0	1806.0	522.0	2031.0	-312.0	-1596.0	-87.0
Dif		-510.0	-423.0	-717.0			
SY	148.29						
Ld	444.87						

5.0 Significativa
4.0 Não significativa

	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex
Pobre	2628.0	2229.0	1239.0	2415.0
Rico	2118.0	1806.0	522.0	2031.0

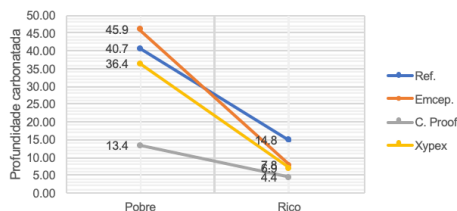
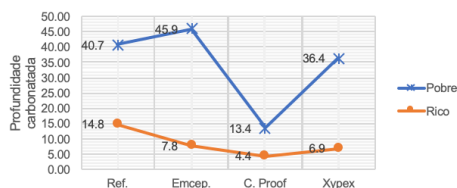
	Ref.	Emcep.	Xypex	C. Proof
Pobre	2628.0	2229.0	2415.0	1239.0
Rico	2118.0	1806.0	2031.0	522.0

ANOVA - TWO-WAY CARBONATAÇÃO - 77 DIAS

Tratamento de superfície									
Profundidade carbonatada	Ref.		Emcep.		C. Proof		Xypex		Tl.
	Pobre	50.17	37.18	51.52	52.57	13.89	13.58	30.11	49.81
		34.72	122.0725	33.60	45.90	12.86	40.32833	29.33	109.2383
		40.69				13.44		36.41	
Rico		16.38	14.21	8.19	7.71	3.89	6.47	5.79	7.55
		13.92	44.51	7.40	23.29333	2.86	13.22	7.44	20.77
T.j.		14.84		7.75		4.41		6.92	
		166.5825		160.9842		53.54833		130.0083	
		27.76		26.83		8.92		21.67	

TC	10885.29	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	F	F tab	H0
SQA	3941	Conc. Pobre (A)	3941	1	3940.78	0.06	5.32	VERDADEIRO
SQB	1354	Conc. Rico (B)	1354	3	451.30	0.01	4.07	VERDADEIRO
SQAB	670	AB	670	3	223.31	0.00	4.07	VERDADEIRO
SQT	6612.401	Resíduo	648	8	80.97			Se H0 é VERDADEIRO, não há diferença significativa
SQR	648	Total	6612.401	15				Se H0 é FALSO, há diferença significativa

16 5%



	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Diferença em relação à referência		
Pobre	40.7	45.9	13.4	36.4	5.2	-27.3	-4.3
Rico	14.8	7.8	4.4	6.9	-7.1	-10.4	-7.9
Dif		-25.9	-38.1	-9.0			
SY	5.20						
Ld	15.59						

5.0 Significativa
4.0 Não significativa

	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex
Pobre	40.7	45.9	13.4	36.4
Rico	14.8	7.8	4.4	6.9

	Ref.	Emcep.	Xypex	C. Proof
Pobre	40.7	45.9	36.4	13.4
Rico	14.8	7.8	6.9	4.4

ANOVA - TWO-WAY CARBONATAÇÃO - 120 DIAS

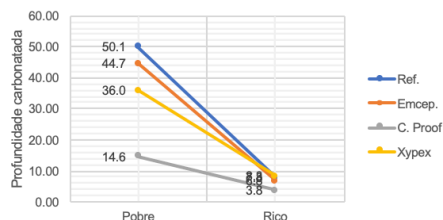
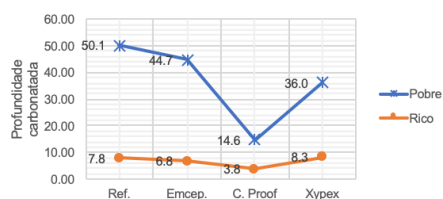
Tratamento de superfície

	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Tl..
Pobre	49.96 50.31 50.07 150.1975	50.20 33.99 44.70 134.0883	14.72 14.03 14.63 43.89333	37.02 32.36 38.73 108.105	436.2842 36.36
Rico	7.76 7.93 7.82 23.44667	7.47 6.83 6.16 20.46167	3.74 4.22 3.44 11.395	7.81 5.59 11.44 24.83167	80.135 6.68
T.j.	173.6442 28.94	154.55 25.76	55.28833 9.21	132.9367 22.16	516.4192 21.52

TC	11112	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	F	F tab
SQA	5285	Conc. Pobre (A)	5285	1	5285.09	0.08	5.32
SQB	1349	Conc. Rico (B)	1349	3	449.71	0.01	4.07
SQAB	876	AB	876	3	292.05	0.00	4.07
SQT	7723	Resíduo	213	8	26.62		
SQR	213	Total	7723.303	15			

H0
VERDADEIRO
VERDADEIRO
VERDADEIRO
Se H0 é VERDADEIRO, não há diferença significativa
Se H0 é FALSO, há diferença significativa

16 5%



	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Diferença em relação à referência		
Pobre	50.1	44.7	14.6	36.0	4.0	-26.1	-4.7
Rico	7.8	6.8	3.8	8.3	-8.0	-11.0	-6.6
Dif		-42.3	-37.9	-10.8	-27.8		
SY	2.98						
Ld	8.94						

				5.0	Significativa
Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	4.0	Não significativa

	<i>Ref.</i>	<i>Emcep.</i>	<i>Xypex</i>	<i>C. Proof</i>
Pobre	50.1	44.7	36.0	14.6
Rico	7.8	6.8	8.3	3.8

ANOVA - TWO-WAY PENETRAÇÃO DE CLORETOS

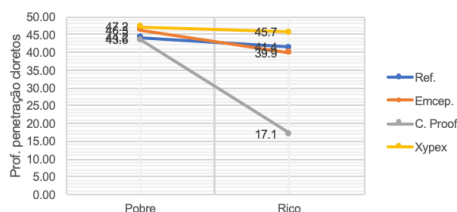
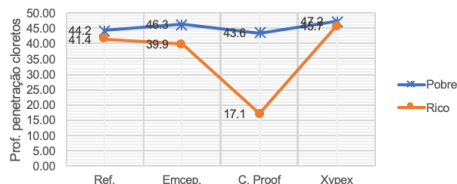
Tratamento de superfície

	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Tl..
Pobre	44.18 46.85 44.20 132.592	45.49 47.57 46.29 138.866	44.04 40.21 43.62 130.872	47.03 47.21 47.16 141.488	543.818 45.32
Rico	42.39 40.63 41.42 124.248	42.43 36.87 39.90 119.704	20.85 12.64 17.08 51.236	48.12 45.26 45.75 137.246	432.434 36.04
T.j.	256.84 42.81	258.57 43.10	182.108 30.35	278.734 46.46	976.252 40.68

TC	39711.17	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	F	F tab
SQA	517	Conc. Pobre (A)	517	1	516.93	0.01	5.32
SQB	902	Conc. Rico (B)	902	3	300.79	0.00	4.07
SQAB	616	AB	616	3	205.28	0.00	4.07
SQT	2133.642	Resíduo	98	8	12.31		
SQR	98	Total	2133.642	15			

H0
VERDADEIRO
VERDADEIRO
VERDADEIRO
Se H0 é VERDADEIRO, não há diferença significativa
Se H0 é FALSO, há diferença significativa

16 5%



	Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	Diferença em relação à referência		
Pobre	44.2	46.3	43.6	47.2	2.1	-0.6	3.0
Rico	41.4	39.9	17.1	45.7	-1.5	-24.3	4.3
Dif		-2.8	-6.4	-26.5	-1.4		
SY	2.03						
Ld	6.08						

				5.0 Significativa
Ref.	Emcep.	C. Proof	Xypex	4.0 Não significativa

	<i>Ref.</i>	<i>Emcep.</i>	<i>Xypex</i>	<i>C. Proof</i>
Pobre	44.2	46.3	47.2	43.6
Rico	41.4	39.9	45.7	17.1