



**ANÁLISE DA PENETRABILIDADE DE INIBIDOR DE CORROSÃO EM
CONCRETOS COM DIFERENTES PERMEABILIDADES**

SÃO PAULO

2021



LETÍCIA SANTOS DE MORAIS
MÁRIO RUEDA JÚNIOR
TUANE DE SOUZA SCHUENKE

**ANÁLISE DA PENETRABILIDADE DE INIBIDOR DE CORROSÃO EM
CONCRETOS COM DIFERENTES PERMEABILIDADES**

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

Prof. Orientador: Luis César S. De Luca, M.Sc.

SÃO PAULO

2021

AGRADECIMENTOS

É extremamente difícil expressar em poucas palavras o nosso sincero agradecimento a todos que estiveram direta ou indiretamente envolvidos com o desenvolvimento do presente TCC e acreditaram na nossa conquista.

Ao nosso orientador, professor M.Sc. Luis César S. De Luca, pelos ensinamentos que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos nossos coorientadores, professor André Figueiró e professor Ricardo Faria, pelas contribuições e observações para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Paulo Helene e sua equipe pela atenção, disponibilidade, contribuição e sugestões.

Ao engenheiro especialista da Sika Igor Torres pelo apoio durante o desenvolvimento dos traços de concreto com observações quanto a metodologia a ser utilizada.

Ao professor M.Sc Cesar Daher pela disponibilidade e valiosa contribuição no desenvolvimento da metodologia deste trabalho.

Aos funcionários do laboratório de pesquisa da Sika, os laboratoristas Igor Amendoeira, André Siqueira, Adriano Tavares, pela disponibilidade de nos ajudar inúmeras vezes e formas na execução e desenvolvimentos dos ensaios.

À Sika pela disponibilidade de materiais, espaço físico e equipamentos na qual viabilizaram o andamento deste estudo.

Aos nossos queridos colegas e amigos de turma, na qual compartilharam conosco seus conhecimentos, contribuíram para nosso aprendizado e fizeram dessa jornada mais leve e divertida.

A todas que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho, nossos sinceros agradecimentos.

RESUMO

No Brasil, a manifestação patológica em estruturas de concreto armado mais frequente é a corrosão das armaduras. A despassivação das armaduras e a iniciação do processo de corrosão muitas vezes sinalizam o fim da vida útil das estruturas, porém recuperar e estender a essa vida útil se torna cada vez mais necessário. A utilização de inibidores de corrosão por impregnação pode ser uma alternativa em diversos casos, desde que utilizados em concretos que permitam sua penetração e seu alcance o nível das armaduras em quantidades suficientes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a penetrabilidade de um inibidor de corrosão, existente no mercado, em concretos com diferentes níveis de permeabilidade. Para tanto, utilizou-se quatro traços de concreto distintos, com permeabilidades diferentes medidas através do ensaio de absorção por lâmina de água conforme NBR 9779 (2012) e mediu-se a penetrabilidade do inibidor após 13, 26, 39 e 52 dias após a sua aplicação na superfície dos corpos de prova moldados. Para avaliação da penetrabilidade, utilizou-se um ensaio colorimétrico (qualitativo) desenvolvido pelo fabricante que indica se o inibidor está presente no concreto da amostra em quantidades suficientes. O ensaio foi realizado em 3 (três) fatias diferentes para cada corpo de prova, nas profundidades entre 1 e 2 cm, 3 e 4 cm e 5 e 6 cm. Os resultados dos ensaios indicaram que o inibidor penetrou em quantidades suficientes nos dois traços de menor porosidade na fatia de profundidade 1 a 2 cm, apenas após 52 dias. Para os dois traços de menor porosidade, não foram obtidos resultados significativos que indicassem sua penetração, assim como nenhum traço apresentou resultados representativos em tempo menor que 52 dias. Nenhuma das amostras apresentaram penetração do produto em quantidades suficientes para seu perfeito desempenho, em profundidades superiores aos 2 cm no tempo avaliado neste estudo.

Palavras chave: inibidor de corrosão, penetração, permeabilidade, concreto, durabilidade, reabilitação, impregnação, migração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de vida útil (TUUTTI, 1982)	20
Figura 2. Conceito de vida útil das estruturas de concreto (HELENE, 1993).....	20
Figura 3. Curva Gauss – Fonte: DOSAGEM DE CONCRETO	22
Figura 4. Gráfico de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e do cimento (RODRIGUES, 1998)	23
Figura 5. Estimativa de água por metro de concreto em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento da mistura (RODRIGUES, 1998)	24
Figura 6. Volumes compactados do agregado graúdo à seco (V_{pc}), por metro cúbico de concreto (RODRIGUES 1998).....	25
Figura 7. Proporções entre os agregados graúdos que permita o menor volume de vazios. (RODRIGO, 1998)	25
Figura 8. Estrutura interna do concreto endurecido – (FUSCO ,1976).....	27
Figura 9. Ação do ambiente em uma estrutura de concreto armado (BERTOLINI, 2010)	28
Figura 10. Evolução esquemática do teor de umidade no concreto	29
Figura 11. Fenômeno de transporte no interior dos materiais porosos.....	30
Figura 12. Dimensões dos poros relacionados com os principais mecanismos de transporte (HELENE, 1993).....	31
Figura 13. Extraída do Ciclo dos Metais. Fonte: http://abraco.org.br/corros11.htm	32
Figura 14. Diagrama de equilíbrio termodinâmico, Potencial x pH para o sistema Fe-H ₂ O a 25°C, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade (POURBAIX, 1961).....	34
Figura 15. Carepas na superfície do tarugo de aço (esquerda) e carepas eliminadas durante o processo (direita). https://www.scielo.br/pdf/rem/v59n1/a014.pdf - acesso 11/10/2020.....	36
Figura 16. Esquema de corrosão eletroquímica (CYTED, 1998).....	37
Figura 17. Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado (PORRERO, 1975 apud HELENE, 1993)	38
Figura 18. Esquema de formação da pilha de corrosão (ANDRADE, 1992).....	39
Figura 19. Esquematização do Diagrama de Evans (ANDRADE <i>et al.</i> , 1991)	40
Figura 20. Tipos de corrosão - A) Vista superior e B) Corte (ANDRADE,1992)	41
Figura 21. Tipos de corrosão (ANDRADE, 1992)	42

Figura 22. Variação das taxas de corrosão segundo a posição relativa da região de um mesmo elemento estrutural (HELENE, 1986).....	44
Figura 23. Representação esquemática de uma estrutura de concreto exposta à água do mar (MEHTA e MONTEIRO, 2008)	45
Figura 24. Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água / cimento (SORETZ apud HELENE, 1999)	47
Figura 25. Representação esquemática da carbonatação no concreto: a) poros secos; b) poros saturados e c) poros parcialmente saturados (umidade relativa normal do ambiente) e a área não hachurada indica a profundidade de carbonatação.....	48
Figura 26. Conteúdo crítico de cloretos (CEB/BI 152,1984)	49
Figura 27. Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto (CASCUDO, 1997).....	50
Figura 28. Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos: mecanismo de formação e propagação (BROOMFIELD, 1997)	51
Figura 29. Volumes relativos de ferro e de alguns de seus produtos de corrosão. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)	52
Figura 30. Efeitos produzidos que levam à fissuração e destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras (CASCUDO,1997)	53
Figura 31. Deterioração progressiva devido à corrosão das armaduras (SHAFFER, 1971 e CAIRONI, 1977)	53
Figura 32. Esquema de aplicação e funcionamento dos inibidores aplicados sobre a superfície. Fonte: Sika	55
Figura 33. Caracterização do agregado miúdo na qual contém a tabela de distribuição granulométrica do agregado miúdo conforme NBR 7211(2009).....	61
Figura 34. Caracterização do agregado graúdo na qual contém a tabela de distribuição granulométrica do agregado graúdo conforme NBR 7211 (2009).....	62
Figura 35. Esquema da quantidade de amostra retirada para cada traço.	69
Figura 36. Esquema gráfico e resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão segundo NBR 5379 (1994) por traço.....	72
Figura 37. Resultado da média dos pesos obtidos no ensaio de absorção capilar (g/cm^2)	74
Figura 38. Média dos valores de profundidade de penetração de água no ensaio de absorção capilar	75

Figura 39. Formação de sais esbranquiçados na superfície do corpo de prova após 24 horas de aplicação do inibidor 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores gastos com a construção de novas obras, manutenção e reparo das existentes (adaptado de UEDA, 2007)	15
Tabela 2. Definição do traço final segunda o Método de Dosagem ABCP.....	60
Tabela 3. Quantidade de CP's de cada traço de acordo com as atividades	60
Tabela 4. Quantidade de material utilizado na confecção de 20 CP's por traço	60
Tabela 5. Volume total de concreto para cada traço com a respectiva perda na hora da moldagem dos CP's.....	60
Tabela 6. Resultados das medidas dos abatimentos	63
Tabela 7. Especificação do inibidor de corrosão	64
Tabela 8. Características do revestimento epoxídico aplicado.	66
Tabela 9. Valores obtidos no ensaio de absorção por lâmina de água (NBR 9779/2012)	74
Tabela 10. Resultados dos ensaios de penetração do inibidor de corrosão	77

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	HIPÓTESE.....	13
1.4	JUSTIFICATIVAS	13
1.4.1	Tecnológicas.....	13
1.4.2	Econômicas.....	14
1.4.3	Ecológicas.....	15
1.4.4	Sociais.....	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS.....	19
2.2	DOSAGEM E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E OS MECANISMOS DE TRANSPORTE.....	21
2.2.1	Método ABCP de dosagem de concreto.....	21
2.2.2	As características do concreto armado e mecanismos de transporte	26
2.3	O PROCESSO DE CORROSÃO	31
2.3.1	Passivação e Despassivação das Armaduras	33
2.3.2	Natureza do processo de corrosão no concreto	35
2.3.3	Formas e tipos de manifestação da corrosão	41
2.3.4	Aspectos e fatores do processo de corrosão e sua interação com o meio ambiente	43
2.3.5	Ação da Carbonatação	46
2.3.6	Ação dos íons cloretos.....	48

2.3.7	Efeitos da corrosão e a presença das fissuras	51
2.4	INIBIDORES DE CORROSÃO PARA CONCRETO ARMADO	54
2.4.1	Inibidores aplicados na superfície de concreto	56
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
3.1	MATERIAIS E CONCRETO DO EXPERIMENTO	59
3.1.1	Concreto para o experimento	59
3.1.2	INIBIDOR DE CORROSÃO POR IMPREGNAÇÃO	63
3.3	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CONCRETO	65
3.4	ENSAIO DE PENETRABILIDADE DO INIBIDOR DE CORROSÃO	67
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
4.1	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO NBR 5379/1994	72
4.2	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO NBR 9779/2012	73
4.3	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO	76
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DE ENSAIO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SEGUNDO ABNT 5379/1994	89
	APÊNDICE B – TABELA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO SEGUNDO ABNT 9779 (2012)	90
	APÊNDICE C – SEQUÊNCIA DE FOTOS DA EXECUÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO E ENSAIO DE ABSORÇÃO	92
	APÊNDICE D– SEQUÊNCIA DE FOTOS DA APLICAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NOS CPS E REALIZAÇÃO DE TESTE QUALITATIVO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO	94

APÊNDICE E – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 13º DIA APÓS APLICAÇÃO (PRIMEIRA DATA DE MEDIÇÃO).....	96
APÊNDICE F – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 26º DIA APÓS APLICAÇÃO (SEGUNDA DATA DE MEDIÇÃO).....	97
APÊNDICE G – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 39º DIA APÓS APLICAÇÃO (TERCEIRA DATA DE MEDIÇÃO).....	98
APÊNDICE H – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 52º DIA APÓS APLICAÇÃO (QUARTA DATA DE MEDIÇÃO).....	99

1. INTRODUÇÃO

A partir do momento em que a estrutura tem sua construção finalizada, pode-se pensar que o desembolso de materialização do empreendimento cessou. Entretanto, devido à utilização ao longo do tempo, a estrutura necessitará de alguns serviços de manutenção com a finalidade de garantir sua segurança e desempenho nas funções para a qual foi pensada e projetada.

Nas condições normais de projeto, a armadura de aço encontra-se física e quimicamente protegida pelo cobrimento de concreto. No decorrer da sua execução e cura, o concreto pode sofrer algumas interferências como fissurações e aumento da rede de poros capilares, que podem inclusive serem superiores às condições estimadas durante o projeto da estrutura. Em um ambiente agressivo, esses poros capilares podem facilitar o ingresso de agentes agressivos, ocasionando manifestações patológicas como a corrosão das armaduras. O ataque por íons cloreto e o ataque por CO₂ (carbonatação) podem causar danos severos em pouco tempo, gerando assim, a necessidade de intervenções precoces e podendo inclusive comprometer a segurança das estruturas.

Pensando em materiais que reduzem ou detêm a corrosão gerada por esses ataques, os inibidores de corrosão por impregnação, depois de aplicados na estrutura, inibem o processo corrosivo através da formação de um filme passivador na armadura quando em contato com esta, aumentando a polaridade e diminuindo o potencial de corrosão no meio eletrolítico. Esse tipo de inibidor pode ser uma alternativa não invasiva de prolongar a expectativa de vida das estruturas

Desse modo, este trabalho analisa o avanço da penetrabilidade do inibidor de corrosão por impregnação em concretos de diferentes porosidades e o nível de penetração em 13, 26, 39 e 52 dias após a aplicação, já que a sua presença em quantidades suficientes na profundidade das armaduras é fator fundamental para que seu desempenho seja satisfatório.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os inibidores de corrosão por impregnação presentes no mercado necessitam penetrar no concreto e alcançar as armaduras em quantidades suficientes para serem eficientes. Sendo assim, a permeabilidade do concreto interfere na penetrabilidade do inibidor de corrosão no concreto?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a penetrabilidade do inibidor de corrosão por impregnação em concretos com diferentes permeabilidades.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar a profundidade de penetração do inibidor em quatro concretos com diferentes permeabilidades.
- Avaliar a velocidade de penetração do inibidor de corrosão em concretos com diferentes permeabilidades em um espaço de tempo de 13, 26, 39 e 52 dias conforme cronograma logístico de ensaios.

1.3 HIPÓTESE

Supostamente o traço de concreto que apresentar maior permeabilidade será o que apresentará maiores profundidades de penetração e maior velocidade de penetração do inibidor de corrosão.

1.4 JUSTIFICATIVAS

1.4.1 Tecnológicas

A revolução industrial modificou técnicas e trouxe novos materiais, um deles foi o concreto armado, na qual desde o início do século XX já se tem registros da sua utilização no Brasil. Essa técnica construtiva se tornou amplamente difundida a partir dos anos 50, por conta da sua resistência e versatilidade formal, o concreto além de desenvolver um papel importante na construção civil, tem sido largamente utilizado por causa da sua possibilidade de formatos, valorização estética e usos arquitetônicos diversos sem a aplicação de revestimento.

Com o passar do tempo e devido à exposição às intempéries, as estruturas de concreto começam a apresentar diversas manifestações patológicas e degradação, reduzindo sua integridade elevando à diminuição do tempo de vida útil e podendo até levar ao colapso. A rápida deterioração pode ser causada por meio de dois mecanismos de corrosão: pelo ingresso dos íons cloreto presentes em regiões litorâneas ou devido à presença de sais de degelo; ou por meio do processo de carbonatação devido à alta concentração de CO₂ presentes em regiões urbanas ou grandes pólos industriais.

A corrosão das armaduras é uma das principais manifestações patológicas das estruturas de concreto armado apresenta-se com uma elevada incidência de 14% a 58% (NINCE & CLÍMACO, 1996; RINCÓN *et al.*, 1998), por isso tem-se a necessidade de estudos e pesquisas sobre o tema, impulsionados pela evolução tecnológica dos sistemas construtivos e pela perspectiva de prolongamento da vida útil da estrutura.

Sendo assim, a fim de proporcionar o aumento da vida útil e uma proteção adicional, o uso de inibidores de corrosão estão se tornando mais frequentes devido à facilidade na aplicação, custo com material, mão de obra e eficácia. Dividem-se em inibidores anódicos, catódicos ou mistos por impregnação, é importante que no momento da escolha da melhor solução, leve-se em conta o tipo de mecanismo de corrosão, estudos e análises da permeabilidade da estrutura de concreto armado em que será aplicado.

1.4.2 Econômicas

Um estudo da empresa norte-americana CCTechnologies mostra o impacto da corrosão do aço na economia. A pesquisa concluiu que entre 1e 5% do PIB dos países é consumido pela corrosão. No Brasil, o número é de 4%, o equivalente a R\$ 236 bilhões em 2015, conforme aferiu a entidade International Zinc Association (IAZ), com o apoio da Universidade de São Paulo (USP). Em 2004, somente a Alemanha gastou aproximadamente 90 bilhões de euros com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado (UEDA & TAKEWAKA, 2007). A parcela dos gastos realizados com reparos e manutenção frente ao total gasto pela indústria da construção civil é em muitos países superior a 15%, podendo superar o montante gasto com construções novas, como é o caso da Itália, aonde a parcela dos gastos com manutenção e reparo chega a 57% (UEDA & TAKEWAKA, 2007), conforme mostra a Tabela 1.

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

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

Portanto, estudar métodos de prevenção e restauração das estruturas contra o processo de corrosão pode minimizar os impactos econômicos e sociais causados pelas intervenções pós-obra requeridas para reabilitar as estruturas degradadas.

Assim sendo, salienta-se que o uso de soluções eficazes contra a corrosão está inteiramente ligado à segurança de suas estruturas, garantindo o desempenho satisfatório de serviço, a durabilidade e vida útil, acompanhando e tentando minimizar as consequências causadas pela corrosão das armaduras e outras manifestações patológicas que surgem tanto por erros de projeto, construção e manutenção ou simplesmente devido ao fim da vida útil de serviço.

1.4.3 Ecológicas

A indústria da construção é uma das indústrias que geram mais resíduos no mundo. Esses resíduos são gerados na etapa de produção dos materiais, a citar, por exemplo, a produção do cimento que é altamente poluente e durante a etapa de execução das obras, na qual o desperdício de materiais é bastante alto. Prevenir a degradação prematura das estruturas é contribuir para uma redução desses resíduos, portanto minimizar retrabalhos construtivos e demolições depende de avaliarmos a durabilidade das edificações e zelar para que o tempo de serviço previsto em projeto seja atingido ou até superado.

Nenhum material é eternamente durável e o concreto não foge à regra. Com o decorrer do tempo as suas propriedades vão mudando, como resultado de interações ambientais e da sua estrutura interna (NEVILLE, 1997). A menor ocorrência de reparos e manutenção implica em redução do impacto ambiental, assim, podemos considerar menor utilização de recursos naturais em razão de menores exigências de manutenção e recuperação da edificação.

Portanto, assegurar características duráveis às edificações, minimizando retrabalhos construtivos e demolições não comprometem as questões ambientais com o descarte de entulhos e materiais diversos, pois a indústria cimentícia nacional é responsável por 1,4% das emissões totais de CO₂.

E ainda de acordo com AGOPYAN e JOHN (2012), quando um produto chega ao fim de sua vida útil, seja por degradação física ou por obsolescência funcional ou estética, transforma-se em resíduo e quase na totalidade dos casos precisa ser repostado, renovando os impactos ambientais associados à sua produção e ao seu transporte. Um aumento da vida útil implica em uma redução de velocidade do fluxo de materiais e por consequência, a demanda por matérias-primas, a geração de resíduos e todos os impactos associados ao processamento da matéria-prima e transporte são reduzidos.

1.4.4 Sociais

Sabendo-se que a maior parte das edificações do país é executada em concreto armado, torna-se necessário estudar novas soluções e premissas para a preservação das estruturas de concreto contra o ataque de agentes agressivos que estão presentes no ambiente.

Com o aumento da emissão de gases poluentes, notamos que edificações como hospitais, edifícios históricos, pontes e viadutos executados em concreto armado vêm sofrendo ainda mais deterioração por conta do processo de corrosão.

Utilizar soluções que reduzem a deterioração precoce ou prolongam a vida útil das estruturas proporciona maior conforto e segurança aos usuários do referido projeto, além de prolongarem a necessidade de intervenções invasivas, demolições, reconstruções que causam distúrbios sociais no meio e consomem recursos públicos que poderiam ser direcionado à outras esferas sociais.

AGOPYAN e JOHN (2012) relatam que a vida útil das construções tem um inequívoco e evidente significado social. Os clientes da construção, podendo ser pessoas físicas, empresas ou órgãos estatais, na maioria das vezes, não têm condições técnicas de estimar a vida útil do bem mais caro que adquirem. Para as soluções construtivas tradicionais, existe certa expectativa validada pela experiência passada, no entanto, pequenas e invisíveis alterações na constituição

de materiais ou em detalhes de projeto podem limitar drasticamente a vida útil do todo ou de partes da edificação.

Já quando se tratam de soluções inovadoras, a incerteza na vida útil é elevada, o que incentiva os clientes a fugirem dos riscos, impedindo a introdução de inovações, que eventualmente, poderiam trazer enormes benefícios econômicos e ambientais. É inegável que, uma estrutura com vida útil menor que a esperada traz significativos prejuízos aos usuários, tanto na forma de custos elevados e inesperados de manutenção, como nas formas de desvalorização do imóvel ou até de sua perda, muitas vezes, destruindo a poupança de toda uma vida.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para esse programa experimental, desenvolveram-se quatro traços de concreto distintos, com o objetivo de obter concretos com permeabilidades diferentes e posteriormente, aplicou-se o inibidor de corrosão por impregnação nos corpos de prova moldados conforme indicações do fabricante.

A permeabilidade dos concretos utilizados no estudo foi avaliada através do ensaio de absorção por lâmina de água conforme ABNT NBR 9779 (2012).

Após 13, 26, 39 e 52 dias, avaliou-se a penetrabilidade do inibidor através de um ensaio qualitativo colorimétrico desenvolvido pelo fabricante e observou-se para algumas profundidades escolhidas nos corpos-de-prova se houve penetração do produto em quantidades suficientes para cada uma das datas analisadas.

1.6 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 faz-se uma introdução do trabalho, apresenta-se o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como as justificativas básicas para a realização do objetivo deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica relacionada, incluindo características básicas do concreto e a correlação com a permeabilidade, os mecanismos de transporte e o funcionamento dos inibidores de corrosão e sua química envolvida.

No capítulo 3 apresenta-se a sistematização do programa experimental, nele mencionam-se as características dos concretos utilizados no procedimento, as características do inibidor de corrosão utilizado e os ensaios realizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios e faz-se a análise destes.

O capítulo 5 apresenta-se as considerações finais do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresentará a fundação teórica pertinente ao trabalho, onde serão apresentadas as características do concreto, os mecanismos de ingresso de agentes agressivos no concreto, conceitos de corrosão e funcionalidade dos inibidores de corrosão a fim de deter o processo corrosivo.

2.1 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

O desempenho e o comportamento de uma edificação e de seus sistemas poderão variar de um local para o outro e de um usuário para outro, já que podem estar relacionados com cuidados diferentes no uso e na manutenção. A durabilidade é a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções ao longo do tempo, ou seja, expressa o período no qual um produto tem potencial de cumprir as funções a que foi destinado.

Os problemas quanto à durabilidade dos edifícios geralmente expõem manifestações patológicas características, a partir das quais podemos propor ou estimar a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos. Em geral na maioria desses mecanismos podem resultar em corrosão das armaduras (HELENE, 1993).

Segundo MEIRA (2004), a degradação de estruturas de concreto frente ao problema da corrosão é algo que afeta a construção civil em todo mundo, com repercussão em função do volume de casos registrados, da precocidade com que ocorrem, bem como do montante de recursos envolvidos.

Conceitos similares para interpretar a durabilidade das estruturas com mecanismo de deterioração por corrosão das armaduras foram utilizados por TUUTTI (1982) que contribuiu para o estudo sobre a corrosão considerando a degradação por corrosão das armaduras sem um modelo teórico de previsão de vida útil para as estruturas de concreto armado, conforme a Figura 1.

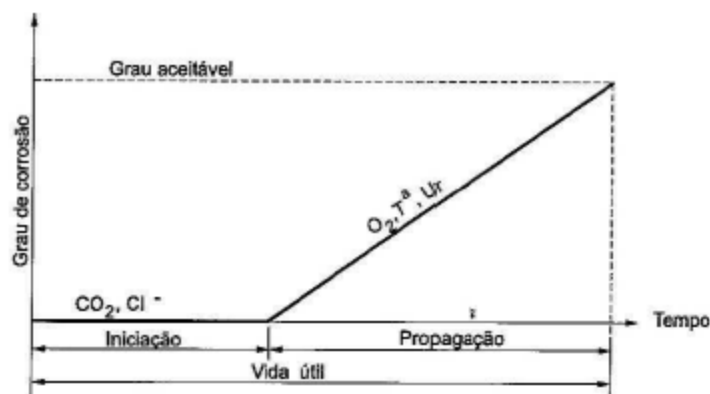


Figura 1. Modelo de vida útil (TUUTTI, 1982)

HELENE (1993) foi quem introduziu o conceito teórico de vida útil residual após o período de iniciação da corrosão, ou seja, espaço de tempo estimado em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, conforme Figura 2.

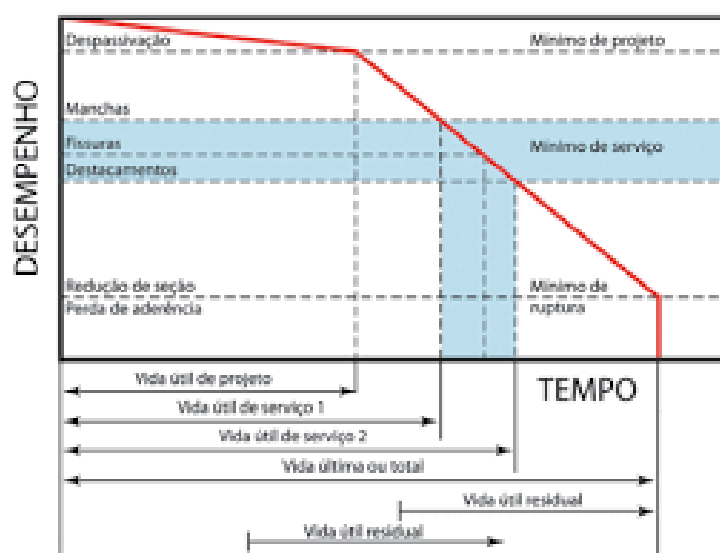


Figura 2. Conceito de vida útil das estruturas de concreto (HELENE, 1993)

Os íons cloreto, um dos principais agentes agressivos à armadura não é agressivo ao concreto, ou seja, não o ataca deletariamente, mas, por outro lado, os ácidos resultantes geram riscos de despassivação da armadura porque contribuem com a redução do pH. Também há outros fenômenos, como a reação álcali-agregado e o ataque por sulfatos que geram produtos expansivos e destroem o cobrimento do concreto expondo as armaduras. Atuam, portanto, de forma dupla, atacando diretamente o concreto e posteriormente a armadura (HELENE, 1997).

2.2 DOSAGEM E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E OS MECANISMOS DE TRANSPORTE

2.2.1 Método ABCP de dosagem de concreto

Criado na década dos anos 80 pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) por meio de experimentos, este método foi baseado no método americano proposto pela ACI 211.1-81 (Standart Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete - 1985), considera tabelas e gráficos elaborados a partir de informações experimentais, que permitem a utilização dos agregados que se enquadram nas condições propostas pela norma NBR 7211 (1983) - Agregados para Concreto, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

De acordo com RODRIGUES (1998), este método de dosagem foi desenvolvido de maneira a fornecer para misturas plásticas, o mais baixo teor de areia. Sendo um dos princípios básicos deste método apontados por BOGGIO (2000), reside no fato de que o procedimento vincula as granulometrias do agregado miúdo e do gráudo um valor máximo do agregado total compactado por metro cúbico do concreto.

Por ser um método experimental, serve como uma prévia do quantitativo de cada componente, devendo se realizar uma mistura experimental para verificação e exigindo o conhecimento das seguintes informações e etapas:

- Tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento;
- Análise granulométrica e massa específica dos agregados;
- Dimensão máxima característica do agregado gráudo;
- Consistência desejada do concreto e
- Resistência da dosagem do concreto (f_{cj}).

A dosagem do concreto é realizada utilizando-se a resistência de dosagem, onde, de acordo com a NBR 12655 (2006), deve atender às condições de variabilidade prevalecentes durante a construção. Esta variabilidade é medida pelo desvio-padrão (S_d) e levada em conta no cálculo da resistência de dosagem. A NBR 6118 (2014) estabelece que o limite máximo dos corpos de prova com resistência inferior ao f_{ck} é 5%. Utilizando-se a Curva de Gauss (Figura 3), tem-se que a resistência de dosagem aos j dias de acordo com a Equação 1:

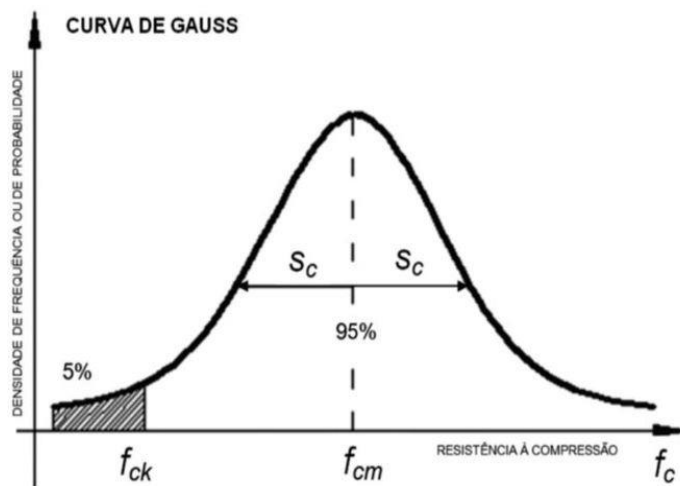


Figura 3. Curva Gauss – Fonte: DOSAGEM DE CONCRETO

MÉTODO ABCP – Talles Mello

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65S_d ;$$

Equação 1

Onde:

- f_{cj} : é a resistência para o qual devemos dosar um concreto para que, estatisticamente, em J dias esteja assegurado o f_{ck} em função do S_d , em Megapascal;
- f_{ck} : é a resistência característica do concreto à compressão, em Megapascal e
- O valor 1,65 corresponde ao quantil de 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos de prova que possuem $f_c < f_{ck}$, ou, ainda, 95% dos corpos-de-prova possuem $f_c \geq f_{ck}$;

S_d é o desvio-padrão da dosagem, em Megapascal.

Segundo a NBR 12655, o S_d é determinado pelo sistema de controle adotado na produção do concreto:

- Controle rigoroso ($S_d = 4,0$): Produção do concreto em massa com controle rigoroso da umidade dos agregados e com equipe bem treinada;
- Controle razoável ($S_d = 5,5$): Produção do concreto em volume com controle rigoroso da umidade dos agregados e com equipe bem treinada e
- Controle regular ($S_d = 7,0$): Produção do concreto em volume, não houve controle da umidade dos agregados e com equipe nova em fase de adaptação.

Feito o levantamento das características dos componentes do concreto e sua característica em relação a resistência de dosagem, deve-se obedecer às seguintes etapas para o desenvolvimento do Método (RODRIGUES, 1998):

- **RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (A/C)**

Este parâmetro atende como referência os critérios de resistência mecânica, durabilidade e adensamento requerido pelo concreto nas idades de interesse previstas pela norma NBR 6118 (2014).

Sendo a resistência o principal parâmetro a ser considerado, o valor da relação água/cimento deve ser estimado com base na curva de Abrams, conforme Figura 4 que por sua vez, deve ser determinado em função da resistência do próprio cimento pelo fcj.

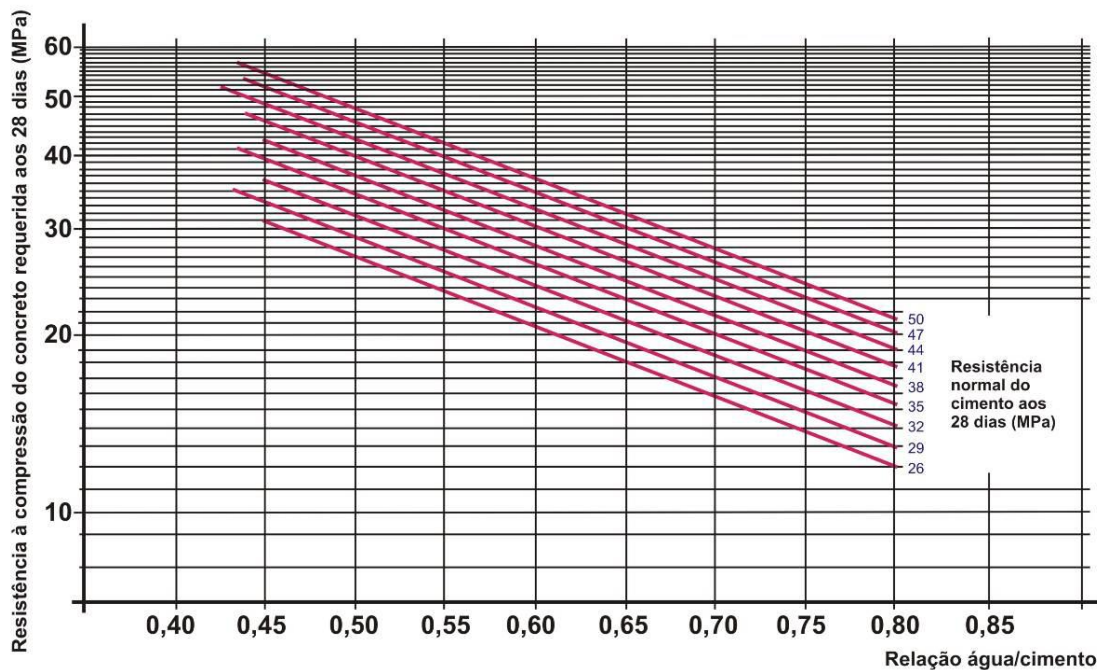


Figura 4. Gráfico de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e do cimento (RODRIGUES, 1998)

- **ESTIMATIVA CONSUMO DE ÁGUA;**

Segundo RODRIGUES (1998), a quantidade de água necessária para que a mistura adquira uma determinada consistência, medida pelo abatimento do tronco de cone, dependendo basicamente da granulometria dos grãos. A Figura 5, apresenta uma estimativa inicial do consumo de água por metro cúbico.

ABATIMENTO DO TRONCO DO CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (ϕ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
40 a 60mm	220 l/m³	195 l/m³	190 l/m³	185 l/m³	180 l/m³
60 a 80mm	225 l/m³	200 l/m³	195 l/m³	190 l/m³	185 l/m³
80 a 100mm	230 l/m³	205 l/m³	200 l/m³	200 l/m³	190 l/m³

OBSERVAÇÕES:

1 – Os valores acima são recomendados para concretos confeccionados com agregado graúdo britado (basalto), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 300kg/m³ e abatimento, medido pelo tronco de cone, entre 4mm a 100mm;

2 – Quando usado seixo rolado como agregado graúdo, os valores do consumo de água podem ser reduzidos de 5% a 10%;

3 – As areias pertencentes à zona 1 da NBR 7211 (muito fina), podem gerar aumentos de até 10% no consumo de água por metro cúbico de concreto.

Figura 5. Estimativa de água por metro de concreto em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento da mistura (RODRIGUES, 1998)

- ESTIMATIVA DO CONSUMO DO CIMENTO;

Após a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto é adotada a relação água/cimento, o consumo estimado do cimento pode ser obtido pela Equação 2.

$$Cc = \frac{C_{agua}}{\text{fator } a/c} \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

- Cc – Consumo do cimento por metro cúbico de concreto (kg/m^3);
- C_{agua} – Consumo de água por metro cúbico de concreto (L/m^3) e
- Fator a/c – Relação água/cimento (L/m^3).

- ESTIMATIVA DO CONSUMO DO CIMENTO

O método determina um teor ótimo do agregado graúdo na mistura proporcionalmente em relação ao agregado miúdo, partindo do princípio de colocar na mistura o máximo volume de agregado compactado seco por metro cúbico de concreto.

A Figura 6, apresenta volumes compactados do agregado graúdo à seco, por metro cúbico de concreto, em função do seu Diâmetro Máximo (ϕ_{max}) e o Módulo de Finura (MF) do agregado miúdo de acordo com ensaios experimental pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

OBSERVAÇÃO:
1 – Os valores acima foram obtidos experimentalmente na Associação Brasileira de Cimento Portland.

Figura 6. Volumes compactados do agregado graúdo a seco (V_{pc}), por metro cúbico de concreto (RODRIGUES 1998)

A estimativa do consumo do agregado graúdo por metro cúbico de concreto, é dado pela Equação 3.

$$C_g = V_{pc} \cdot MU \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

- C_g = Consumo do agregado graúdo por metro cúbico de concreto (kg/m^3);
- V_{pc} = Volume compactado do agregado graúdo à seco por metro cúbico de concreto e
- MU = Massa unitária compactada do agregado graúdo por metro cúbico de concreto (kg/m^3).

De acordo com RODRIGUES (1998), em caso de misturas que utilizam dois ou mais agregado graúdo, recomenda que adote um proporcional entre os agregados graúdos que permita o menor volume de vazios conforme Figura 6 abaixo.

BRITAS UTILIZADAS	PROPORÇÕES ENTRE BRITAS		
Brita 0 (B_0) – Brita 1 (B_1)	30% B_0	e	70% B_1
Brita 1 (B_1) – Brita 2 (B_2)	50% B_1	e	50% B_2
Brita 2 (B_2) – Brita 3 (B_3)	50% B_2	e	50% B_3
Brita 3 (B_3) – Brita 4 (B_4)	50% B_3	e	50% B_4

Figura 7. Proporções entre os agregados graúdos que permita o menor volume de vazios. (RODRIGO, 1998)

Determinado a estimativa do consumo do cimento, água e agregado graúdo, o consumo do agregado miúdo é formado pela somatória dos volumes absolutos dos materiais que o constituem do concreto. Sendo, para 1,0 metro cúbico de concreto, o volume do agregado miúdo é dado pela Equação 4:

$$Vm = 1 - \left(\frac{Cc}{\gamma_c} + \frac{Cg}{\gamma_g} + \frac{Cagua}{\gamma_{agua}} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde,

- Vm = volume de agregado miúdo;
- Cc = consumo de cimento;
- Cg = consumo de agregado graúdo;
- $Cagua$ = consumo de água;
- γ_c = massa específica do cimento;
- γ_g = massa específica do agregado graúdo;
- γ_{agua} = massa específica da água.

Já o consumo de areia em kg por metro cúbico de concreto, será o obtido em função do volume e massa específica conforme a Equação 5:

$$Cm = \gamma_m \times Vm \quad \text{Equação 5}$$

Onde

- Vm = volume de agregado miúdo;
- Cm = consumo de agregado miúdo (kg/m^3) e
- γ_m = massa específica do cimento (kg/m^3).

• APRESENTAÇÃO DO TRAÇO

A apresentação do traço é dada em função do valor unitário do cimento conforme Equação 6:

$$1 : \frac{Cm}{c} : \frac{Cg}{c} : (a/c) \quad \text{Equação 6}$$

2.2.2 As características do concreto armado e mecanismos de transporte

O concreto armado alia a qualidade do concreto simples com a ductilidade e excelente resistência à tração e à compressão da barra de aço. Sendo, o concreto simples um composto formado por cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e adições, permite que, antes do processo de endurecimento, ser modelado com as mais variadas formas e volumes, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obra.

Segundo FIGUEIREDO e MEIRA (2013), esta união permite que o concreto forneça ao aço uma proteção física, separando o aço do contato direto com o meio externo e uma proteção química conferida pelo elevado pH do concreto, o qual promove a formação de uma película passivadora que envolve o aço, formada por uma fina camada de óxidos, transparente e aderente ao aço.

A qualidade do concreto depende, principalmente, da relação água/cimento, da cura e do grau de hidratação, sendo esses os que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade, de migração de íons de difusividade de água e gases, bem como a maioria das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, à tração, o módulo de elasticidade, abrasão, dentre outras (HELENE, 1997).

Da estrutura interna, o concreto é um material artificial e poroso, com estrutura heterogênea composto principalmente de pasta de cimento endurecida e partículas de agregado, ou seja, é o material resultante da aglutinação de agregados resistentes por um cimento suficientemente estável.

A estrutura interna do concreto resultante é bastante heterogênea com retículos espaciais de gel endurecido, de grãos de agregado graúdo e miúdo de várias formas e dimensões que são envolvidos por grande quantidade de poros e capilares portadores de água que não entrou na reação química e, ainda, vapor de água e ar. Fisicamente, o concreto se apresenta como um material capilar poroso, sem continuidade de massa, no qual se acham presente os três estados de agregação e que são o sólido, o líquido e o gasoso, conforme Figura 8.

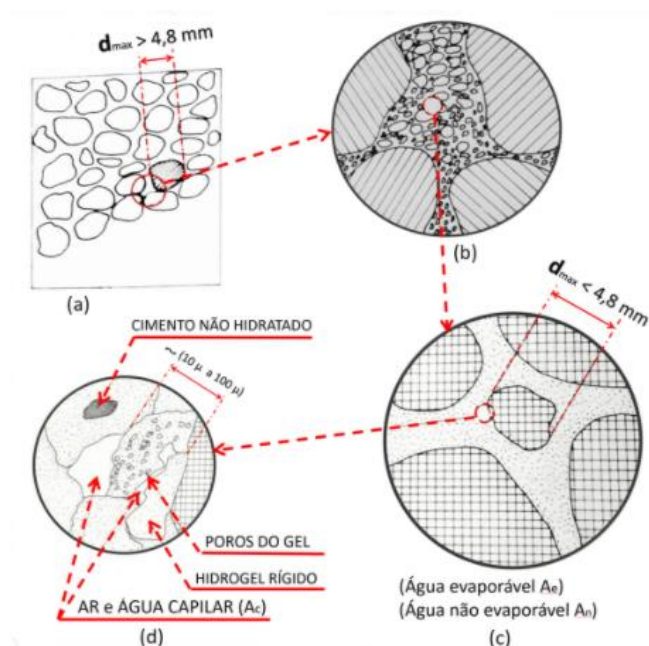


Figura 8. Estrutura interna do concreto endurecido – (FUSCO, 1976)

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), toda partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Segundo CARMONA (2013) fissuras e microfissuras no concreto surgem por efeitos de retração e assentamento plástico do concreto ainda fresco, mas também por retração plástica, deslocamentos da estrutura, dos esforços existentes na estrutura sejam eles devido às cargas impostas ou às variações volumétricas causadas pelas mudanças de temperatura.

BERTOLINI (2010) descreve os materiais porosos como uma microestrutura caracterizada pela presença de um sistema de poros de várias dimensões, através dos quais podem penetrar as substâncias presentes no ambiente, ou seja, uma fração do volume do material é constituída de vazios (ou poros) que podem ser preenchidos com líquidos e gases, assim quando o material está úmido há uma solução aquosa preenchendo os poros e quando o material está seco há preenchimento dos poros com ar. Essa estrutura porosa pode ser caracterizada por meio do volume percentual ocupado e dimensão dos poros, pela abertura ou comunicantes com a superfície externa e pelas interconexões presentes entre eles, conforme a Figura 9.

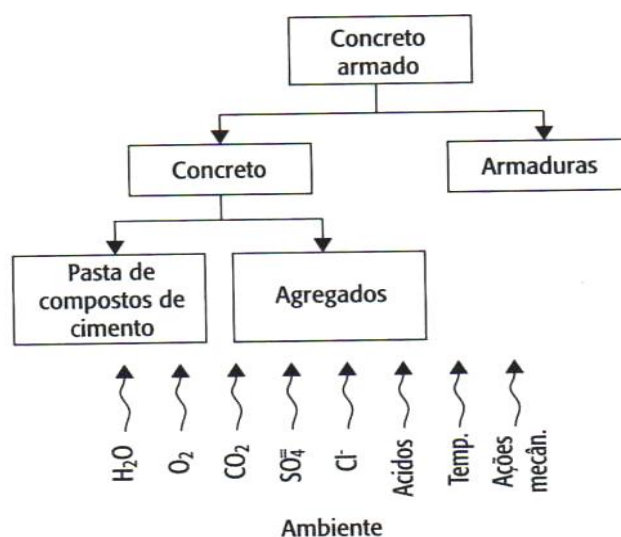


Figura 9. Ação do ambiente em uma estrutura de concreto armado (BERTOLINI, 2010)

Desse modo, esse tipo de estrutura permite a penetração de material agressivo presente no meio ambiente e por consequência, a degradação que não se limita apenas à superfície externa, com também por penetração, que pode ocorrer em profundidade, conforme Figura 10.

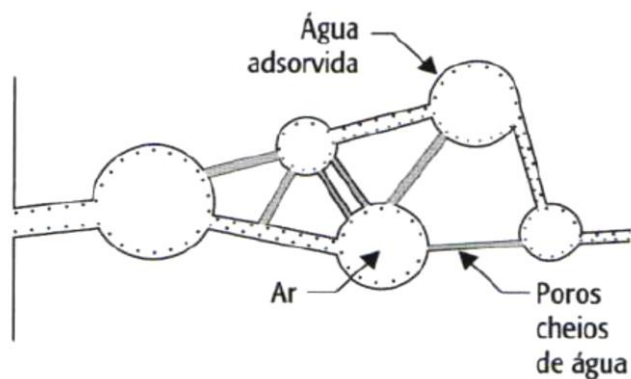


Figura 10. Evolução esquemática do teor de umidade no concreto

As substâncias gasosas podem penetrar facilmente através dos poros não saturados de água, já os agentes agressivos, quando dissolvidos, penetram junto com a água e ou quando inertes na superfície, podem penetrar depois, através dos poros cheios de água.

Existem diferentes mecanismos que podem favorecer o transporte de massa por um meio poroso (Figura 11), como o concreto, o ingresso pode ocorrer por meio de:

- Permeabilidade sob pressão

Ocorre quando existe uma diferença de gradiente de pressão agindo no sistema. A permeabilidade de um concreto está diretamente relacionada com a sua composição e condições de cura apontadas para a estrutura, por isso que quanto maior for o tempo disponível para a hidratação dos compostos do concreto menor será a sua permeabilidade. (BARBUDO, 1992; ANDRADE, 1993; HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; OLLIVIER, 1998; CABRAL, 2000; ANDRADE, 2001; RIBEIRO, 2001).

- Migração iônica:

Ocorre quando há a movimentação de íons em zigue-zague (similar ao Movimento Browniano) a partir do estabelecimento de um campo elétrico entre duas partes da estrutura e quando ocorre uma mínima diferença de potencial acarretada por pequenas e ocasionais cargas elétricas (ANDRADE, 1993; HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; CABRAL, 2000; ANDRADE, 2001; RIBEIRO, 2001).

- Difusão iônica:

Em tese, este o mecanismo ocorre em função da diferença de concentração existente entre dois meios aquosos, onde o movimento de íons ocorre de um meio de elevada concentração para um que possua uma concentração menor. (ANDRADE, 1993; HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; CABRAL, 2000; ANDRADE, 2001; RIBEIRO, 2001).

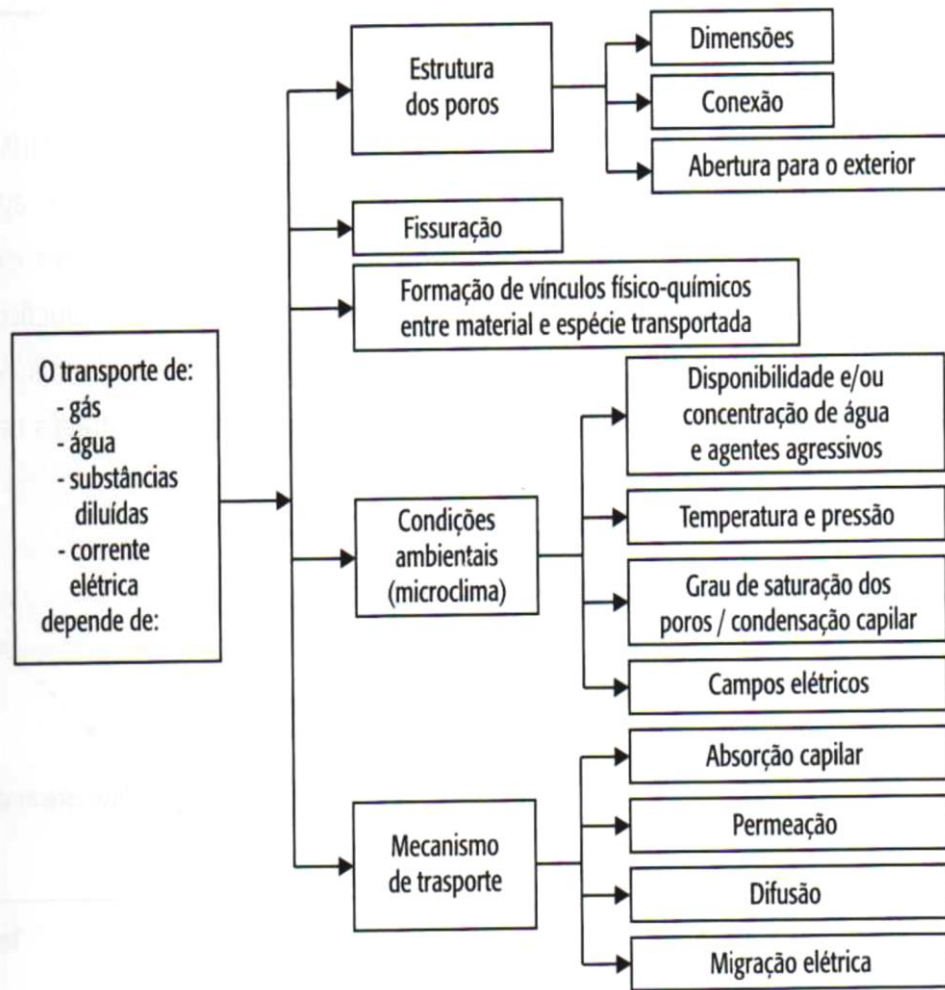


Figura 11. Fenômeno de transporte no interior dos materiais porosos

Na prática estes mecanismos podem ocorrer de forma individual ou até mesmo em conjunto, porém a relação água/cimento é um dos fatores que determina características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada (LOPES, 1999). Ou seja, quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e a permeabilidade do concreto. A absorção de água capilar é controlada principalmente pelas propriedades superficiais do concreto.

O tamanho, volume, continuidade dos poros e entendimento do mecanismo de transporte dos agentes agressivos, no concreto, são fatores importantes para avaliar a capacidade dos inibidores de corrosão por impregnação em penetrar na matriz do concreto. Na Figura 12, é apresentada a importância da dimensão de cada poro no respectivo fenômeno.

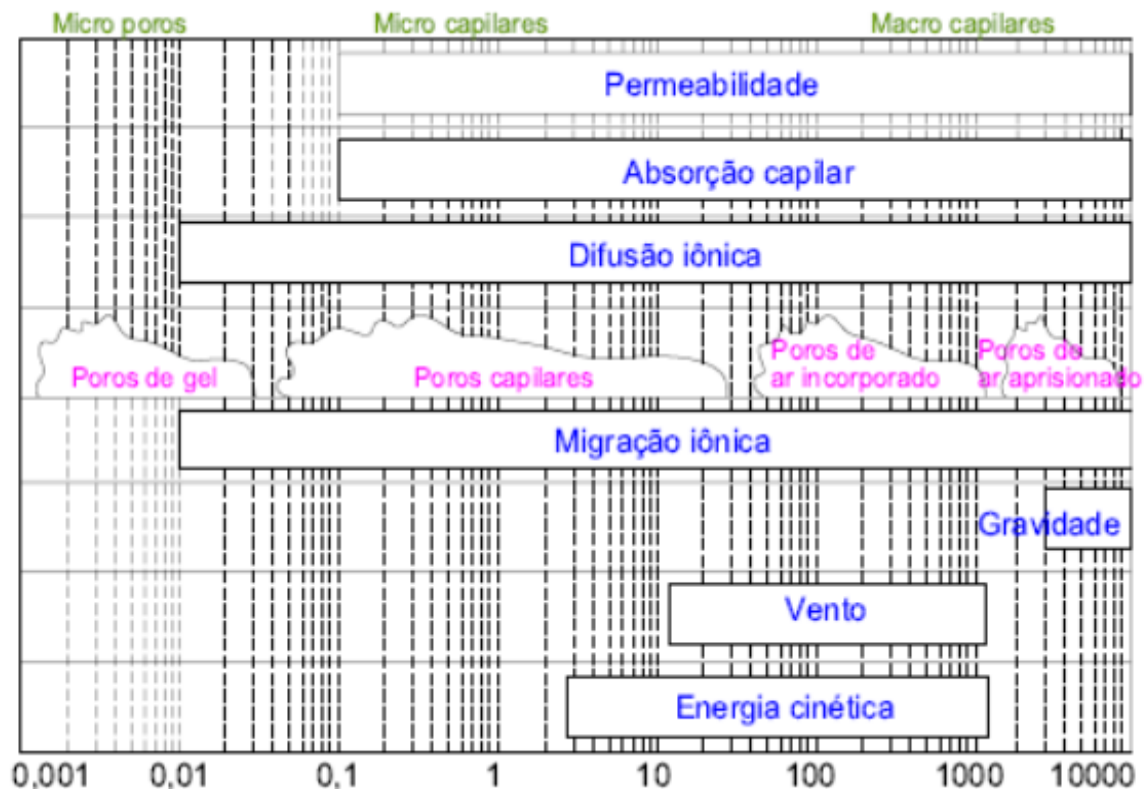


Figura 12. Dimensões dos poros relacionados com os principais mecanismos de transporte (HELENE, 1993)

2.3 O PROCESSO DE CORROSÃO

Na literatura técnica há várias definições e conceitos para o processo de corrosão e podemos encontrar FONTANA (1987) que considera a corrosão como destruição ou deterioração de qualquer material e a sua interação com o meio ambiente, gerando a partir desta interação reações químicas, e enfatiza que muitos autores consideram o termo corrosão apenas aos metais e devemos considerar o processo de corrosão tanto para os metais quanto para os não metais para a solução dos problemas de engenharia.

Em diferentes graus de contato e exposição, a maioria dos materiais experimenta algum tipo de interação com o meio ambiente e com frequência, tais interações comprometem a utilização do material e o resultado de suas propriedades mecânicas (por ex.: ductibilidade e resistência), de outras propriedades físicas, ou de sua aparência (CALLISTER Jr, 2000).

Para PEDEFERRI (1978, 2003), SHREIR, JARMAN e BURNSTEIN (1995) e POURBAIX (1973) os materiais metálicos estão sujeitos a corrosão quando em contato com ambientes agressivos e também citam a distinção entre a corrosão úmida e a corrosão seca.

Segundo HELENE (1993), a corrosão pode ser definida como a interação destrutiva de um material com o seu meio ambiente e por vários motivos, como a ação física, química, eletroquímica ou a combinação entre esses motivos.

Ao definir corrosão, ANDRADE (1992), correlaciona o processo de corrosão com a energia de Gibbs, que prevê a espontaneidade de uma reação química em 1883, onde para extrair o material metal é utilizado um processo de redução, o que requer aplicação de energia e a corrosão é um processo inverso, que corresponde com a oxidação, pelo qual o metal volta ao seu estado natural acompanhado de uma redução de energia, ou seja, através de uma reação espontânea. GENTIL (1996) diz que a corrosão pode ser o inverso do processo metalúrgico, conforme Figura 13.



Figura 13. Extraída do Ciclo dos Metais. Fonte: <http://abraco.org.br/corros11.htm>

Complementando o parágrafo anterior, grande parte dos metais “in natura”, como o ferro, na forma de compostos (óxidos e hidróxidos) apresenta um estado mínimo de energia e quando esses metais são processados passam a adquirir um estado metálico e, após essa transformação, entram em contato com o meio ambiente e desencadeia uma reação natural, transformando o material processado, novamente, em compostos (óxidos e hidróxidos) que é um estado menor de energia e desse modo, podemos dizer que a corrosão é um processo deletério espontâneo.

De uma forma geral, quando a atmosfera local, baseada em estudos ambientais e normas é classificada como agressiva, a corrosão das armaduras transforma-se em um fato preocupante, pois as condições de exposição são propícias ao ingresso de fluídos contaminados pela rede de poros do concreto de cobrimento da armadura (BERTOLINI, 2010).

Da interação destrutiva de um material com o meio ambiente, onde ocorre uma troca de elétrons entre o elemento químico do material e um elemento do meio em que está inserido, nas temperaturas ambientais usuais, acima de 5°C e abaixo de 65°C, o processo de corrosão é o resultado final das reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associados ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração. O processo de corrosão das armaduras, em concreto armado, é uma ameaça silenciosa que ocorre de dentro para fora e manifesta-se na forma de manchas superficiais causadas pelos produtos de corrosão, seguidas ou provocadas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção transversal e da resistência das armaduras, perda de aderência das armaduras principais, ou seja, deteriorações que levam a um comprometimento estético e da segurança estrutural ao longo do tempo (RIBEIRO *et al.*, 2020).

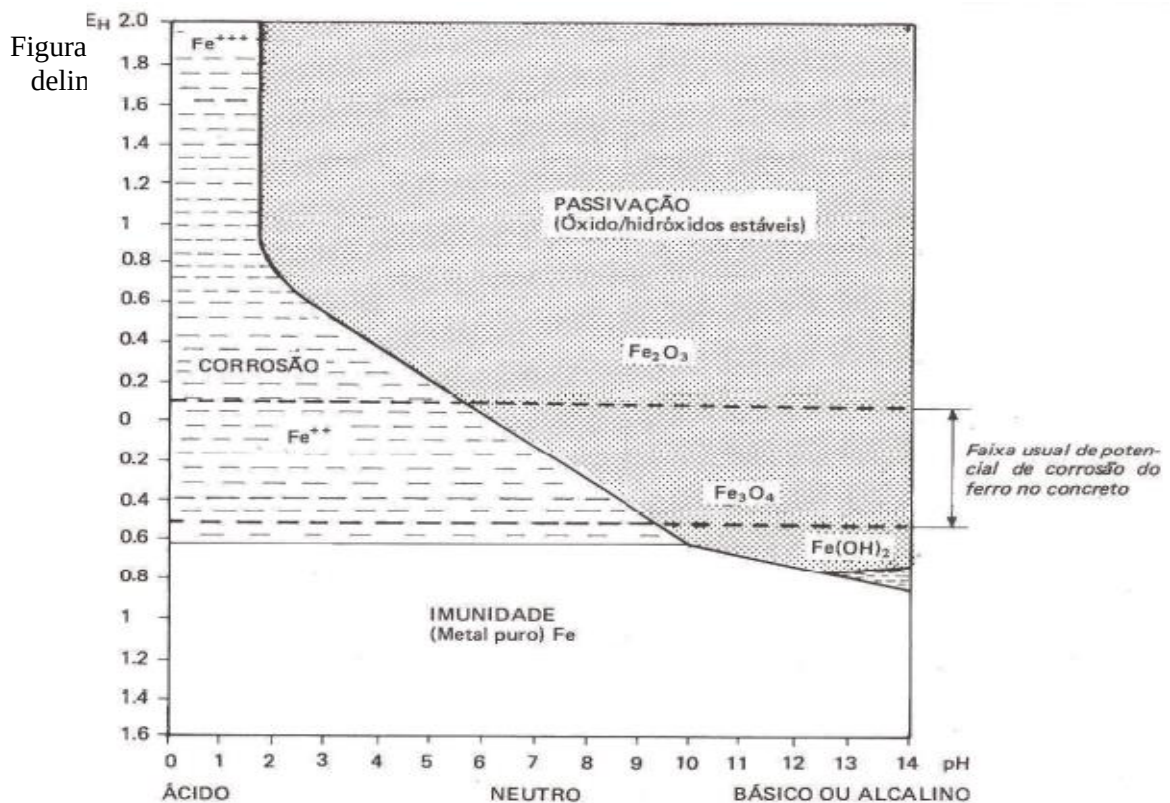
2.3.1 Passivação e Despassivação das Armaduras

O concreto representa uma dupla proteção para a armadura, uma proteção física, que separa o aço do meio externo e uma proteção química, em função do seu elevado pH, o qual, contribui para a formação e estabilidade da capa passiva que protege a armadura. O filme passivo é formado a partir de uma rápida e extensa reação eletroquímica, que gera produtos de corrosão agrupados em uma fina camada aderida à superfície do aço (POURBAIX, 1987).

Segundo HELENE (1983), em um ambiente altamente alcalino, é formada uma película protetora de caráter passivo, e essa película passivante é o ferrato de cálcio que é resultado da associação da ferrugem superficial ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Essa película ou filme passivo é muito aderente ao aço, delgada e invisível a olho nu, devido à sua pequena espessura variando de $10^{-3} \mu\text{m}$ a $10^{-1} \mu\text{m}$ (SAGOE-CRENTSIL *et al.*, 1990).

A armadura encontra-se no interior do concreto em meio altamente alcalino e essa alcalinidade provém da fase líquida constituinte dos poros do concreto, a qual, nas primeiras idades, basicamente é uma solução saturada de hidróxido de cálcio, a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sendo esta oriunda das reações de hidratação do cimento (CASCUDO, 1997).

POURBAIX (1974) estudou o desenvolvimento do filme passivante e em que condições o ferro apresenta-se em processo de corrosão ou passivado, considerando os dados obtidos da termodinâmica, desenvolveu as relações entre o potencial de eletrodo e o pH das soluções, para os sistemas de equilíbrio, e com esses dados desenvolveu as relações que foram interpretadas e denominadas graficamente em um diagrama, conforme a Figura 14.



Os diferentes estados reportados no diagrama de Pourbaix foram explicados por ANDRADE (1992) e HELENE (1993), conforme relacionado:

- O estado de “passividade” supõe que o metal se recobre de uma capa de óxidos que é transparente, aderente, imperceptível e que atua como uma barreira impedindo a oxidação, onde as duas retas tracejadas paralelas representam a região de estabilidade da água, sendo que acima dela é de domínio do oxigênio e abaixo o do hidrogênio, ambos os produtos da decomposição da água;
- O estado de “corrosão” representa situações onde pode ocorrer corrosão do aço e;
- O estado “imunidade” assume que o aço não reage com o meio, qualquer que seja a natureza deste, ácida, neutra ou alcalina, e é o estado em que se situam os metais submetidos à proteção catódica.

Assim, a corrosão das armaduras é o resultado da incapacidade do concreto exercer sua função de proteção, onde a armadura poderá perder a proteção oferecida pelo concreto, a

despassivação, geralmente, através da ação dos elementos agressivos contidos ou originários de fontes externas que atuam sobre o concreto, reduzindo a alcalinidade ou rompendo a película protetora. Após a despassivação da armadura, o progresso do processo de corrosão depende de diversas condições termodinâmicas que podem determinar a velocidade e a intensidade da corrosão, pois, neste caso, o controle de condensação e evaporação da água no interior do concreto depende da temperatura que desempenha um fator importante do conteúdo de água. Para o caso das armaduras, os cloretos e a carbonatação do concreto são os principais iniciadores da corrosão (HELENE, 1993).

2.3.2 Natureza do processo de corrosão no concreto

A corrosão é a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica. Basicamente, são dois os processos principais de corrosão que podem sofrer as armaduras de aço no concreto armado: a oxidação e a corrosão propriamente dita (HELENE, 1986).

PANOSSIAN (1993) define o processo de corrosão é a transformação de um material por ação química, eletroquímica ou física e a deterioração do material é devida à sua reação com o meio ambiente.

Para PEDEFERRI (1978, 2003), SHREIR, JARMAN e BURNSTEIN (1995) e POURBAIX (1973) os materiais metálicos estão sujeitos a corrosão quando tem contato com ambientes agressivos e também se distingue a corrosão úmida da corrosão seca.

CASCUDO (1997) destaca a corrosão como uma interação destrutiva ou uma interação que implica na inutilização para o uso, seja por reação química ou eletroquímica, na relação de um material com o ambiente. Se essa transformação ocorrer no caso de um metal, ele será convertido a um estado não metálico e com isso, o metal perde as suas qualidades essenciais como resistência mecânica, ductibilidade e elasticidade.

A corrosão de natureza química ou corrosão seca ocorre a partir do contato entre o material metálico e o agente agressivo. É uma reação gás/metál que produz uma película de óxido na superfície, é um processo lento que geralmente não provoca uma deterioração substancial, é associado à temperatura ambiente, ocorre sem a formação de corrente elétrica e sem a presença de uma solução aquosa (eletrólito). Como demonstra a Figura 15, este fenômeno também ocorre durante a fabricação de fios e barras de aço que ao sair do processo de

laminação, em altas temperaturas, tem contato direto com o ar do ambiente, provocando uma forte reação de oxidação e formando uma superfície escura e escamosa que é a carepa.

A formação de carepa de laminação no processo siderúrgico é um exemplo de corrosão química, em que o aço, a altas temperaturas, reage com o oxigênio do meio ambiente, formando uma película de óxidos, compacta, uniforme e pouco permeável (HELENE, 1993)



Figura 15. Carepas na superfície do tarugo de aço (esquerda) e carepas eliminadas durante o processo (direita). <https://www.scielo.br/pdf/rem/v59n1/a014.pdf> - acesso 11/10/2020

A corrosão de natureza eletroquímica ou corrosão úmida é caracterizada pela transferência de elétrons e íons entre duas regiões distintas do metal, ocorre em meio aquoso e produz óxidos e hidróxidos de ferro, em um meio com presença de oxigênio e um eletrólito, que permite a dissolução e movimentação dos íons ao longo das regiões anódicas e catódicas (Figura 16). Isso ocorre por causa da formação de pilhas ou células de corrosão devido à disponibilidade de um eletrólito, oxigênio e o surgimento de uma diferença de potencial entre os trechos da superfície da barra de aço.

A equação de reação anódica representa a dissolução do metal (oxidação) e a equação de reação catódica representa como característica o consumo de elétrons produzidos na reação anódica. Essas reações demonstram o processo de corrosão eletroquímica e o controle de qualquer das reações significa um controle sobre esse processo de corrosão. Portanto, nesse tipo de corrosão, há sempre uma reação de oxidação e outra de redução e a circulação de íons através de um eletrólito (ANDRADE, 1988).

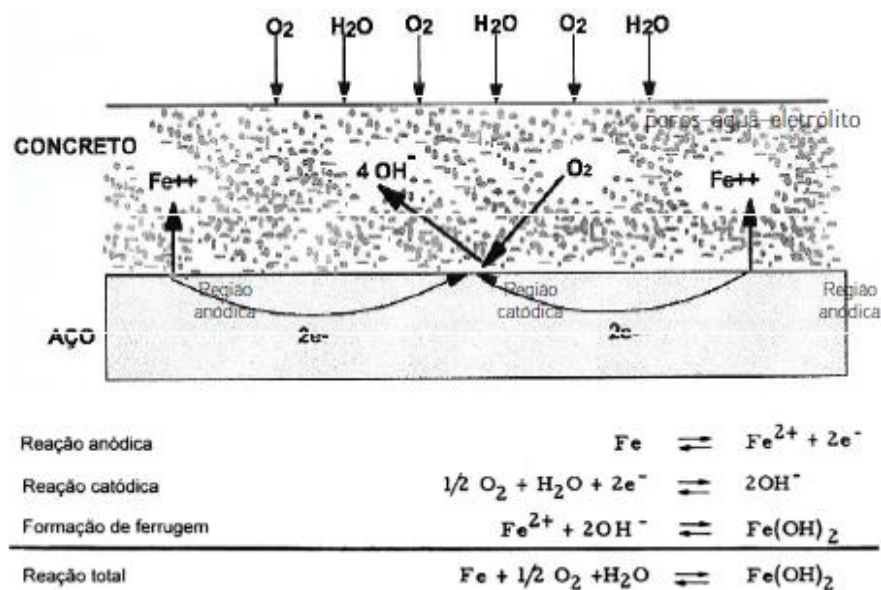


Figura 16. Esquema de corrosão eletroquímica (CYTED, 1998)

Podemos entender como meio aquoso a água doce ou do mar, soluções ácidas ou alcalinas, ou qualquer ambiente que contenha água, como o solo, o concreto, as atmosferas úmidas, entre outros (RIBEIRO *et al.*, 2020).

Os processos de corrosão química e eletroquímica têm diferenças bem distintas e podemos observar essas características quando analisamos a condutividade e a interação do metal com o meio ambiente em que ele se encontra inserido.

A corrosão química a capa de óxido que se desenvolve sobre o metal atua simultaneamente como condutora de elétrons e de íons, essa reação acontece quando a barra quente, ao sair da laminação, é submetida ao intemperismo local e sofre uma forte reação de oxidação, forma uma película delgada de água por condensação, oriunda da umidade ambiente, onde o ferro é dissolvido, reage com a água e junto com o oxigênio do ar formando os óxidos e hidróxidos de ferro, podemos chamar essa corrosão de oxidação e que é uma corrosão lenta à temperatura ambiente e não provoca uma deterioração considerável da superfície metálica e não é o principal fenômeno de corrosão das estruturas convencionais.

Eletroquímica é a ciência que estuda as consequências da transferência de cargas elétricas de uma fase para a outra, particularmente aquelas resultantes das propriedades elétricas que ocorrem na interfase. Assim, na corrosão eletroquímica os elétrons se movimentam na parte interna do metal, deslocando-se das regiões anódicas (que cede os elétrons) para as regiões catódicas (que consome os elétrons) e desse modo, fecha um circuito elétrico através de um

condutor iônico que é a película de eletrólito formada sobre a superfície da armadura. A água do ambiente que penetrou pela porosidade do concreto, deixou o meio úmido e desencadeou a formação dessa película de eletrólito. As reações anódicas e catódicas são reações parciais, que ocorrem simultaneamente e na mesma velocidade sobre a superfície do metal. A corrosão eletroquímica é o principal tipo de corrosão e dependendo do agente agressor provoca uma deterioração rápida e localizada. A Figura 17 demonstra graficamente a produção de uma pilha ou célula de corrosão e podemos observar como a corrosão se desenvolve.

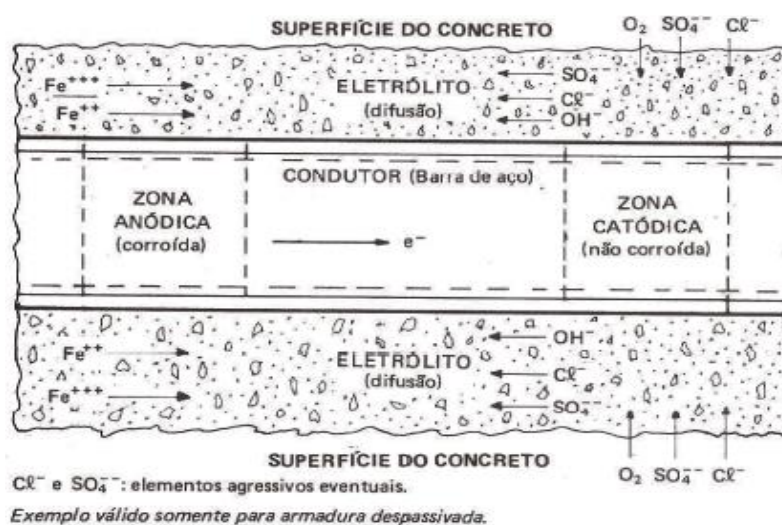


Figura 17. Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado (PORRERO, 1975 apud HELENE, 1993)

A Figura 18 esquematiza uma condição para formação de uma pilha ou célula de corrosão onde existe um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e o eletrólito, portanto qualquer que seja a diferença de potencial entre as zonas catódicas e anódicas causam o desenvolvimento de uma corrente elétrica, e dependendo da amplitude desta corrente elétrica e do acesso do oxigênio, poderá ou não haver o processo de corrosão.

Os elementos básicos e necessários para a propagação de uma corrosão são o eletrólito, o oxigênio, a diferença de potencial e dependendo da situação ambiente pode existir algum agente agressivo que amplie o desenvolvimento da corrosão (RUSH apud HELENE, 1986), esses elementos juntos com a armadura conduzem a formação de óxidos e hidróxidos de ferro e que tem características pulverulenta, porosa e avermelhada.

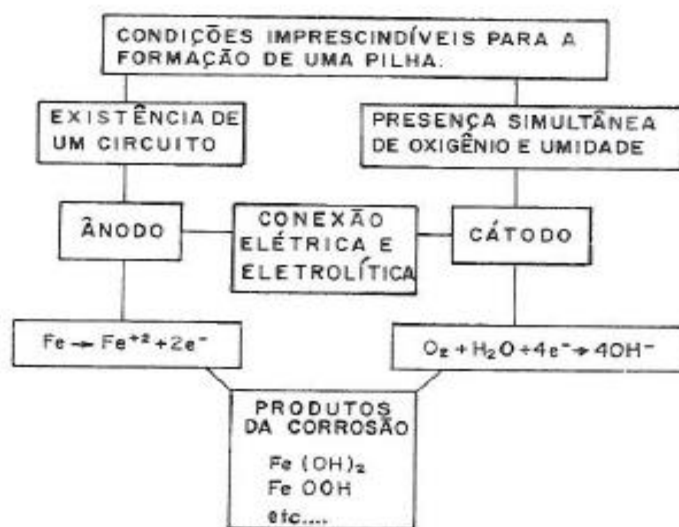


Figura 18. Esquema de formação da pilha de corrosão (ANDRADE, 1992)

O eletrólito tem grande importância sobre o processo de corrosão instalado, é uma solução condutora ou um condutor iônico que envolve simultaneamente as áreas anódicas e catódicas, é eletricamente condutiva e fecha o circuito eletroquímico, ou seja, quanto mais eletrólito no local mais acelerado será o processo de corrosão, pois o eletrólito facilita uma maior corrente iônica. Sempre haverá água no concreto por causa da sua porosidade, principalmente nas regiões da estrutura que ficam expostas às intempéries ou por causa dos produtos da hidratação do cimento, como a portlandita que é solúvel em água, forma nos poros e capilares uma solução saturada que constitui um bom eletrólito. A umidade no interior do concreto é um fator importante para ser controlado, pois a presença de baixa quantidade de eletrólito aumenta a resistividade do sistema e desse modo reduzindo a velocidade de corrosão.

O oxigênio, quando presente na região catódica, tem um papel importante nas reações de redução para a formação de óxidos e hidróxidos de ferro. A reação catódica provoca a redução do oxigênio, que é básico no caso da corrosão do aço no concreto, e possibilita o consumo de elétrons provenientes das áreas anódicas, produzindo a hidroxila (OH^-) que irá reagir com íons de ferro para formar os produtos de corrosão. Desse modo, poderemos ter um controle catódico no processo de corrosão pela carência de oxigênio, onde a menor disponibilidade de oxigênio provocaria uma diminuição nas reações de redução e por consequência o controle da velocidade de oxidação do metal e do consumo de elétrons produzidos na zona catódica.

A diferença de potencial revela um desequilíbrio de cargas entre dois pontos, neste caso na barra da armadura, indicando que ambos têm um potencial elétrico diferente e essa diferença

é essencial ao processo de corrosão. A formação da pilha ou célula eletroquímica depende dessa diferença de potencial, pois a natureza eletroquímica do fenômeno corrosão implica na formação e movimento de partículas com carga elétrica na presença de um eletrólito que é o condutor. Neste caso isso ocorre porque a armadura está em contato com uma solução, o eletrólito, e parte dos átomos de ferro tende a passar para a solução, isso ocorre na região anódica, de potencial mais eletronegativo, a qual se caracteriza pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico, ocorrendo a oxidação, e liberando os elétrons para a região catódica onde serão consumidos, ocorrendo a redução.

A velocidade da reação eletroquímica é limitada por vários fatores físicos e químicos, consequentemente, é dito que uma reação eletroquímica é polarizada ou retardada por estes fatores ambientais (FONTANA *et al.*, 1978). E uma vez estabelecida uma diferença de potencial entre duas regiões eletricamente conectadas, como é o caso de áreas anódicas e catódicas da armadura, o fluxo de corrente que surge na célula de concreto e origina um processo chamado de polarização.

Com base na teoria de potenciais mistos, em decorrência dos fenômenos de polarização, a célula de corrosão tende a atingir um estado eletroquímico estacionário, no qual a velocidade das reações anódicas se iguala à velocidade das reações catódicas, ou seja, as densidades de corrente de ambos os processos são idênticas e conforme o diagrama de Evans, na Figura 19, o potencial característico deste estado corresponde ao chamado potencial de corrosão ou misto (E_{corr}) e podemos observar ainda que este potencial está associada a uma densidade de corrente, que é denominada de corrente de corrosão (I_{corr}).

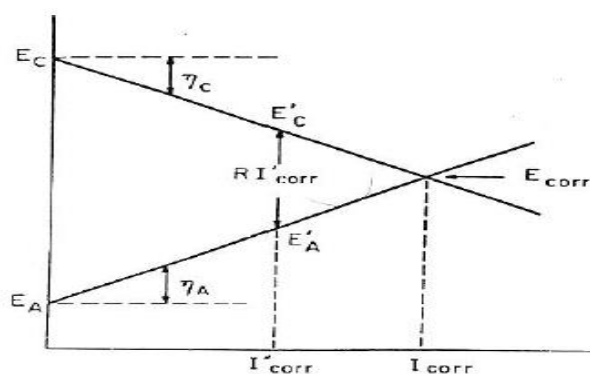


Figura 19. Esquematização do Diagrama de Evans (ANDRADE *et al.*, 1991)

Os parâmetros que determinam a velocidade ou taxa de corrosão, ou seja, a cinética da reação é, dentre outros, a natureza do eletrólito, a resistividade elétrica do meio e a

disponibilidade de oxigênio (ANDRADE, 1992), assim, uma avaliação de processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão.

2.3.3 Formas e tipos de manifestação da corrosão

Os processos de corrosão metálicos são essencialmente eletroquímicos, e ocorrem, geralmente, na superfície de contato entre o metal e o meio corrosivo. As formas de corrosão definem a aparência da superfície corroída (FONTANA, 1987). A corrosão pode ser classificada em generalizada (uniforme ou irregular) e localizada (pites e fissuras), onde a generalizada causa um desgaste do material e pode ocorrer de forma mais ou menos uniforme e se processa em extensas áreas do metal, já na localizada o desgaste se processa em uma superfície limitada e tende a se aprofundar, conforme a Figura 20.

A corrosão generalizada produz um ataque de grande extensão superfície no metal, na qual existem vários ânodos e cátodos, provocando a formação de micro pilhas que mudam a todo o tempo, com perda de seção pode ser uniforme.

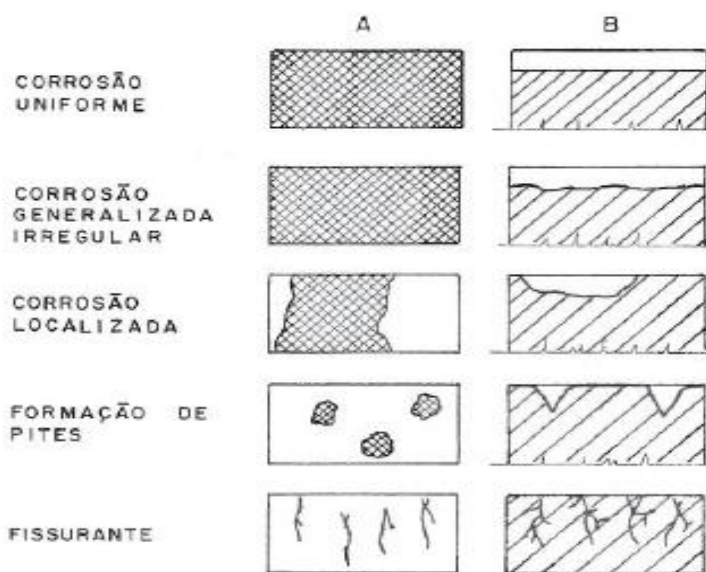


Figura 20. Tipos de corrosão - A) Vista superior e B) Corte (ANDRADE, 1992)

A corrosão localizada produz um ataque intermediário entre a corrosão uniforme e a corrosão por pites, ela se desenvolve em grandes e pequenas extensões do material e que são basicamente anódicas em relação às demais corrosões e pode ocorrer pela mudança ou heterogeneidade da composição química do material ou do eletrólito.

A corrosão por pites produz um ataque em pequenas e discretas zonas do material, as quais são mais ativas do que o resto da superfície, é comum na ação de contaminantes que têm a capacidade de romper a camada passivadora em pontos específicos, como no caso dos cloretos.

A corrosão com a formação de fissuras ocorre quando o metal se encontra submetido a tensões importantes de tração, além das condições próprias para a corrosão, desse modo, surgem fissuras no material que se propagam na direção transversal à carga e produzindo ruptura com níveis baixos de tensão.

Nos casos de corrosão em concreto armado, de natureza eletroquímica, podemos destacar a corrosão generalizada irregular provocada pela carbonatação e é uma corrosão que se estende ao longo da superfície da armadura e a corrosão puntiforme ou por pites, provocada pela ação dos íons cloreto e é uma corrosão que tem uma ação localizada ou pontual e relação à camada passivadora da armadura.

Essas formas de corrosão são extremamente graves quando existe a ação conjunta de solicitações mecânicas e um meio corrosivo, pois ocasionam a corrosão sob tensão fraturante. A Figura 21 mostra uma representação esquemática de cada tipo de corrosão.

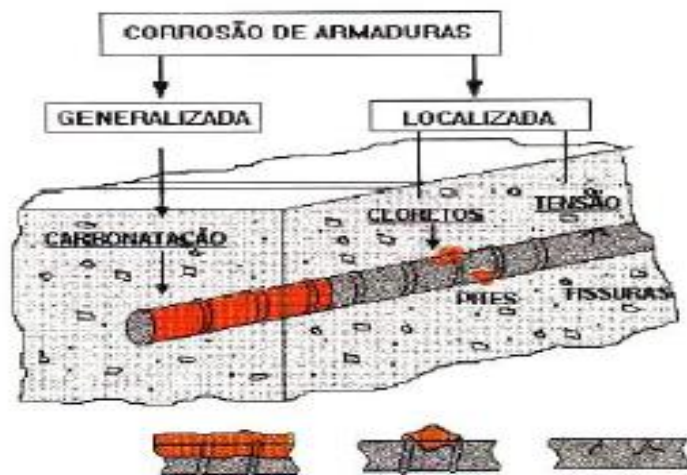


Figura 21. Tipos de corrosão (ANDRADE, 1992)

As formas de corrosão eletroquímica que as armaduras podem sofrer são:

- Uniforme: corrosão em toda a superfície da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo com a consequente diminuição da espessura e podemos dizer que a perda de espessura é aproximadamente a mesma em toda a superfície metálica;

- Puntiforme ou por pite: os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades de pequena extensão e razoável profundidade, sendo extremamente perigosa;
- Intragranular: é processada entre os grãos dos cristais do metal, onde existe um caminho preferencial para a corrosão na região do contorno dos grãos, e quando os vergalhões sofrem, principalmente, tensões de tração, podem fissurar ou fraturar perdendo sua estabilidade;
- Transgranular: que se realiza no interior do grão do metal, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos.

A corrosão tem como consequência uma diminuição da seção transversal da armadura e causa uma fissuração no concreto em direção paralela a armadura, essas fissuras ocorrem porque os produtos da corrosão ocupam maior espaço que o aço original.

2.3.4 Aspectos e fatores do processo de corrosão e sua interação com o meio ambiente

A microrregião em que a estrutura está inserida ou mesmo dentro de uma determinada construção, cada região dos membros estruturais que compõe a estrutura possui características próprias em relação aos parâmetros que influenciam o processo de corrosão, como a umidade, a temperatura, o acesso de oxigênio e a ventilação (HELENE, 1986).

As ações ambientais sobre um elemento estrutural dependem, de forma complexa, dos diversos fatores que podem se interagir, ligados tanto a macroclima como às condições microclimáticas locais que a própria estrutura de concreto pode criar. A agressividade ambiental pode ser determinada pelas condições climáticas, que definem as condições externas e internas de umidade e temperatura, além da presença ou não de substâncias agressivas (RIBEIRO *et al.*, 2020).

As estruturas novas têm uma umidade relativa mais elevada que as estruturas antigas, devido à umidade natural dos elementos e processos construtivos das construções convencionais. Frequentemente é verificado o surgimento de um processo de corrosão na base de pilares e que podem se alastrar para as regiões superiores tornando o processo de corrosão mais intenso. Os locais por natureza mais úmidos e com maior risco de condensação costumam a apresentar os sintomas de corrosão mais rápida e mais intensa que os locais mais secos da mesma construção.

A exposição maior ou menor do oxigênio é um fator que contribui para diferentes graus de corrosão em um mesmo elemento estrutural, a Figura 22 mostra essa exposição em dois meios distintos.

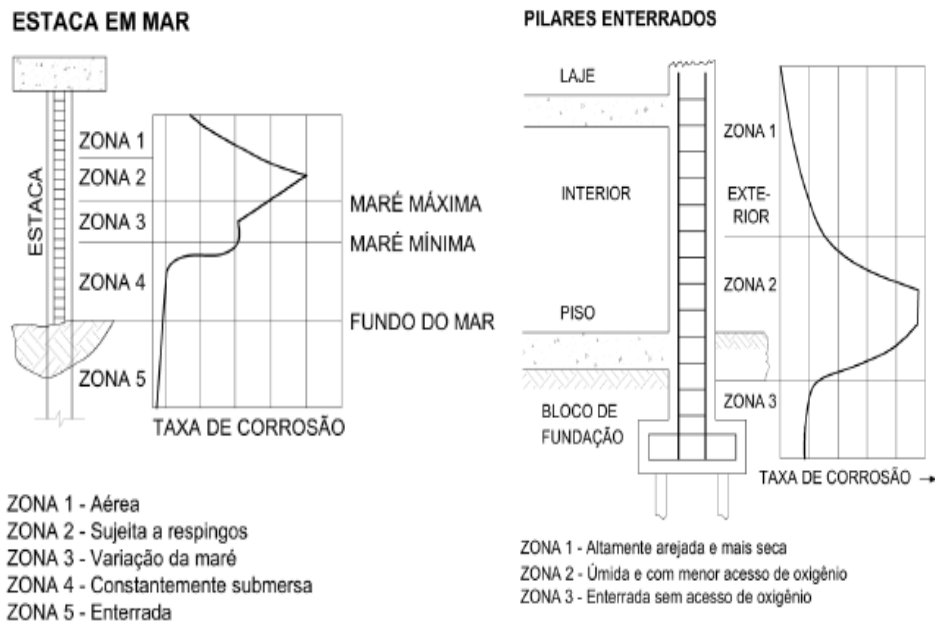


Figura 22. Variação das taxas de corrosão segundo a posição relativa da região de um mesmo elemento estrutural (HELENE, 1986)

Podemos observar que uma estaca construída em um ambiente marinho e submetida aos diferentes níveis de marés e o pilar de uma construção tradicional está submetida a diferentes graus de umidade e ventilação, mas destacamos que as regiões mais críticas aos efeitos do processo corrosivo são aquelas submetidas a condições de exposição alternada de umidade e de acesso ao oxigênio, ou seja, locais com repetidos níveis de molhagem e secagem.

A interação do ambiente-estrutura da condição de verificarmos como a estrutura reage às condições ambientais que a circunda e as formas de contato com os agentes agressivos. Os agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, podendo ser qualquer substância gasosa, líquida ou sólida, que venha a se depositar na superfície ou penetre na estrutura porosa do concreto, contribuem sensivelmente para acelerar a corrosão. Dentre os principais agentes agressivos podemos citar: os íons sulfetos (S^{2-}), os íons cloretos (Cl^-), o dióxido de carbono (CO_2), os nitritos (NO_3^-), o gás sulfídrico (H_2S), o cátion amônio (NH_4^+), os óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3), fuligem e outros. (HELENE, 1986).

A corrosão e a deterioração do concreto, além das condições ambientais, estão associadas a vários fatores como os mecânicos, biológicos, físicos e químicos, esses diversos fatores contribuem, simultaneamente, na deterioração dos elementos estruturais e podem até somar seus efeitos e a Figura 23 apresenta um perfil esquemático de uma estrutura de concreto exposta às ações da água do mar, ilustrando os possíveis efeitos destas sobre a estrutura de concreto (RIBEIRO *et al.*, 2020).

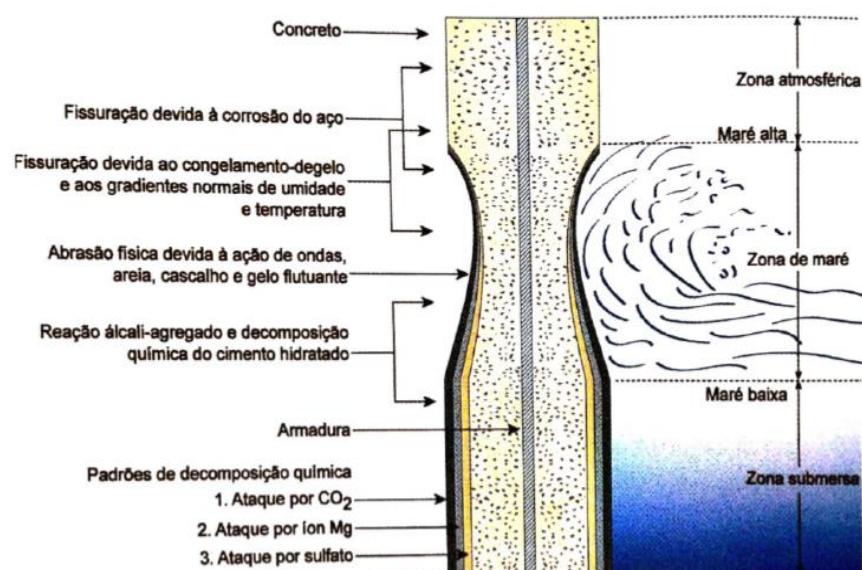


Figura 23. Representação esquemática de uma estrutura de concreto exposta à água do mar (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Dentre os fatores mecânicos podemos exemplificar a vibração e a erosão, onde a vibração causa a fissuração do concreto e possibilita o contato da armadura com ambiente externo, onde pode haver umidade, possibilitando a penetração desta umidade contendo partículas em suspensão e agentes agressivos, e a erosão é o desgaste pela ação de um fluido em movimento contendo partículas suspensas que colidem com o concreto causando um desgaste superficial e quando menor for a resistência à compressão do concreto maior será o efeito da erosão e deste modo, abrindo caminho para a penetração de agentes agressivos.

Como fator biológico, podemos citar os microrganismos, as bactérias que produzem em seu processo de metabolismo ácidos orgânicos, gás sulfídrico e o ácido sulfúrico, promovendo assim, um ataque ácido nas estruturas de concreto causando a dissolução da portlandita e dos silicatos hidratados.

Os fatores físicos, como a variação térmica ambiental, podem ocasionar o aparecimento de fissuras devido à grande variação de temperatura, contração e dilatação volumétrica, gerando esforços de tração e a formação de fissuras ativas. Outro fator físico que podemos relacionar é a retração hidráulica e térmica que causam fissurações por causa da alta relação água/cimento, alto calor de hidratação, excesso de vibração, diminuição do volume do concreto e surgimento de fissuras passantes nos elementos de concreto.

O mecanismo de deterioração químico é associado à ação de substâncias químicas sobre os componentes não metálicos dos elementos de concreto como a reação álcalis-agregados (RAA) que ocasiona aumento do volume dos elementos do concreto e a perda de resistência

devido à desagregação do concreto, causando microfissuras internas e fissuras superficiais na forma de rede, isso ocorre por causa da reação expansiva provocada pela concentração de sílica reativa, dos agregados, que reage com os hidróxidos alcalinos, provenientes da hidratação do cimento, que estão na pasta do concreto, e que foram dissolvidos na solução dos poros capilares do concreto, associados a presença de grande quantidade de umidade, pois quanto maior a concentração de água, maior é a formação de gel expansivo.

2.3.5 Ação da Carbonatação

A porosidade da matriz de concreto interage com as condições de umidade do ambiente e isso tem reflexo na velocidade penetração de carbonatação e no transporte dos íons cloretos, os mais frequentes agentes agressivos que atacam o concreto armado.

O CO_2 presente na atmosfera reage com os produtos da hidratação do cimento, na presença de umidade, formando produtos de menor alcalinidade que os compostos originais do concreto, desencadeando o fenômeno conhecido como frente de carbonatação (BARBOSA *et al.*, 2005).

As profundidades de carbonatação aumentam inicialmente, com grande rapidez, prosseguindo mais lentamente e tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima, de acordo com a Figura 24 (SORETZ apud HELENE, 1999). E essa estabilização pode ser explicada pela hidratação crescente do cimento, que aumenta gradativamente a compacidade do concreto desde que haja água suficiente e o concreto, quando exposto aos gases como o CO_2 pode ter reduzido o pH da solução existente nos seus poros. O pH de precipitação do CaCO_3 é aproximadamente 9,4 (à temperatura ambiente), o que altera as condições de estabilidade química da película passivadora da armadura (RIBEIRO *et al.*, 2020).

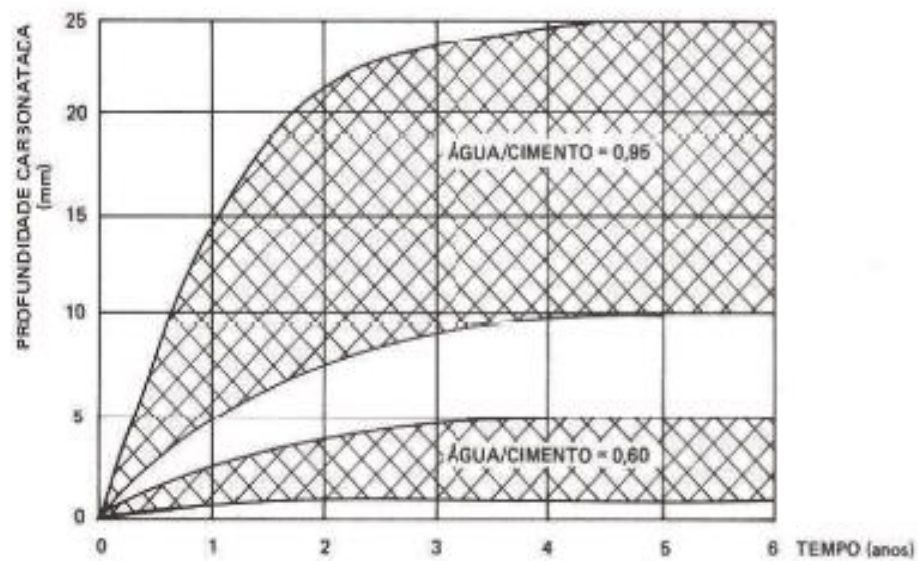


Figura 24. Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água / cimento (SORETZ apud HELENE, 1999)

O mecanismo determinante da velocidade de carbonatação ou do avanço da frente de carbonatação é a difusão do CO_2 pelos poros do concreto, se os poros estiverem secos, o CO_2 penetra o concreto, mas a carbonatação não ocorre, pois falta água para o processamento das reações, se os poros estiverem saturados, a carbonatação fica comprometida pela baixa velocidade de difusão do CO_2 na água e se os poros estiverem parcialmente preenchidos por água, o que é mais comum devido aos ciclos de molhagem e secagem, a frente carbonatação avança até onde os poros se mantenham nesta condição de favorecer a penetração e assim, o grau de saturação dos poros desempenha um fator decisivo na evolução do processo, pois o coeficiente de difusão do CO_2 na água é 10^4 vezes mais baixa que comparada a sua difusão no ar (CASCUDO, 1997).

A relação água / cimento, o tempo de cura e a concentração de CO_2 também influenciam na velocidade de carbonatação por causa da permeabilidade dos poros, pois o fluxo de CO_2 e água ocorrem entre os poros interconectados do concreto, com uma cura ideal podemos diminuir a porosidade e a permeabilidade e o cuidado com o ambiente em que o concreto está inserido. Considerando também que o avanço da carbonatação é inversamente proporcional a quantidade disponível da reserva alcalina pertencente na matriz da pasta de cimento hidratada.

O processo de carbonatação ocorre de fora para dentro do concreto e para verificarmos visualmente a frente de avanço da carbonatação ao utilizarmos um ensaio simples com uma solução aquoalcoólica contendo fenolftaleína que indica a mudança de coloração entre os

valores de pH de 8,3 a 9,5. Para as zonas carbonatadas o indicador é incolor (pH inferior a 8,3) e róseo-avermelhado para as zonas não carbonatadas (pH superior a 9,5).

A Figura 25 apresenta as três situações de saturação dos poros com água e os seus prováveis estados de carbonatação.

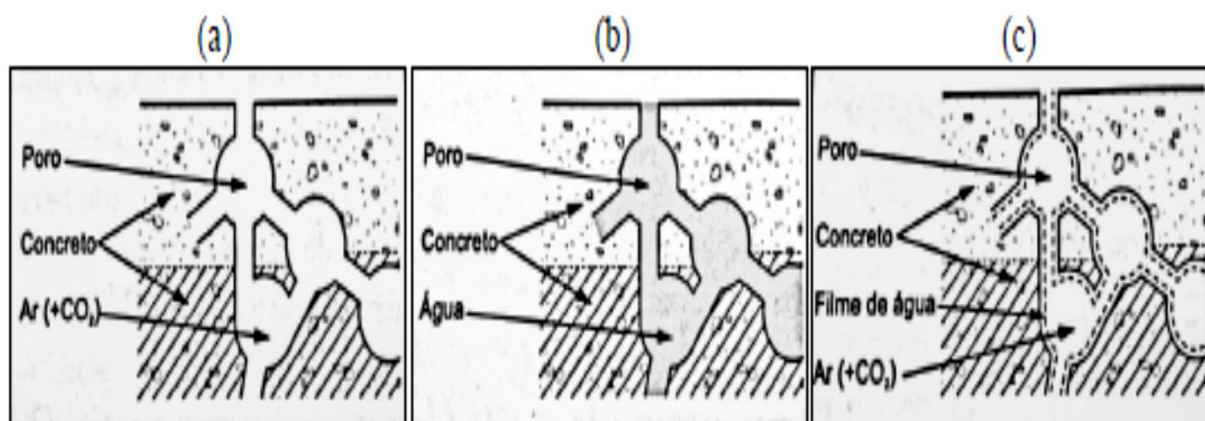


Figura 25. Representação esquemática da carbonatação no concreto: a) poros secos; b) poros saturados e c) poros parcialmente saturados (umidade relativa normal do ambiente) e a área não hachurada indica a profundidade de carbonatação

A carbonatação não é a responsável diretamente pelo processo de corrosivo, mas pode contribuir decisivamente para o surgimento de uma degradação das estruturas de concreto, onde a presença de eflorescência na superfície do concreto evidencia um processo de degradação.

2.3.6 Ação dos íons cloretos

Nos estudos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado, verifica-se que a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais sérios que pode ocorrer na natureza (HELENE, 1993), (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os cloretos podem alcançar o interior da massa do concreto por adições no ato do amassamento ou durante o processo de endurecimento e por isso é muito importante a compreensão do seu comportamento no interior do concreto e também, o seu mecanismo de atuação. Os íons cloreto podem acessar o concreto de diversas formas com as adições no uso de aceleradores de pega a base de CaCl_2 , na incorporação de impurezas indesejáveis nos agregado e na água de amassamento ou durante o processo de endurecimento provenientes da água do mar, atmosfera marinha e no uso de sais de degelo e processos industriais.

As normas, que variam de um país para o outro, definem um limite para a presença de cloretos no concreto fresco. Isso acontece porque há uma dificuldade de estabelecer um limite seguro para que não ocorra a despassivação da armadura, pois esse limite depende de muitas

variáveis como o tipo de cimento, relação a/c, umidade, entre outros. A Figura 26 resume em condições que podem afetar o limite de cloretos capazes de despassivar as armaduras e as normas sempre se referem aos limites de cloretos “totais”, porque os cloretos combinados podem voltar à dissolução por efeito de processos como a carbonatação, pois os cloretos presentes na fase de amassamento associam-se com as fases alumino-ferrítica formando os cloro-aluminatos, que ficam inertes e incorporados nas fases sólidas do cimento hidratado até que entre em contato com a umidade novamente e tornando-se perigosos para a armadura.

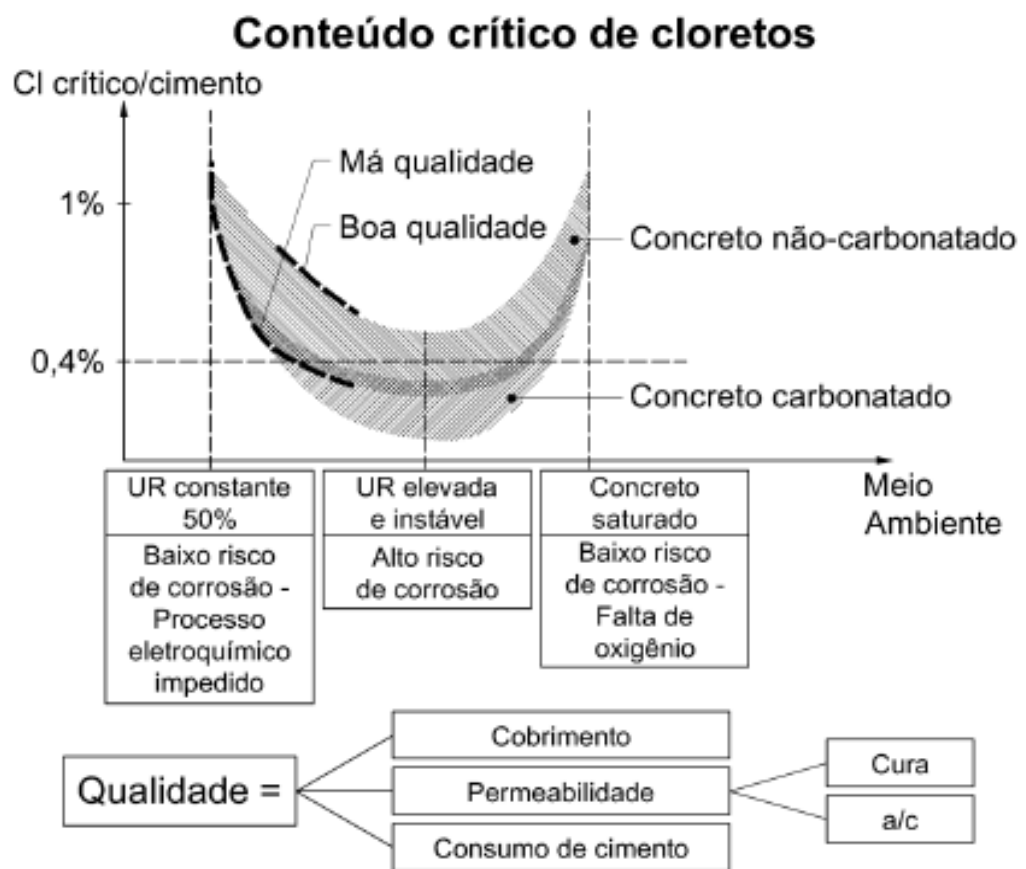


Figura 26. Conteúdo crítico de cloretos (CEB/BI 152,1984)

Há vários fatores que podem desencadear a corrosão e que atuam através da redução da alcalinidade do concreto, como a carbonatação ou a exposição das estruturas em ambientes ácidos, mas os íons cloreto têm a capacidade de despassivar a armadura em condições de pH elevado.

Os íons cloreto, ao ingressarem no concreto e alcançarem a armadura em quantidades suficientes, em conjunto com água e oxigênio, rompem pontualmente a camada de passivação do aço, iniciando o processo de corrosão por pites (MEIRA, 2017). Segundo BOHNI (2005), a presença de cloretos também reduz o pH nos poros do concreto como consequência da redução

da solubilidade do Ca(OH)_2 , aumenta a umidade interna do concreto devido às propriedades higroscópicas dos sais presentes no concreto e aumenta a condutividade elétrica do concreto.

Podemos encontrar os íons cloreto no interior do concreto em três formas distintas, quimicamente ligado ao aluminato tricálcico (C_3A) ou sal de Fridel, que é um composto insolúvel, fisicamente adsorvido na superfície dos poros e sob a forma de íons livres e essa última forma causa maiores preocupações, já que os íons livres sempre estarão presentes na fase líquida do concreto. E podemos observar as três formas de presença de cloretos no concreto indicados na Figura 27.

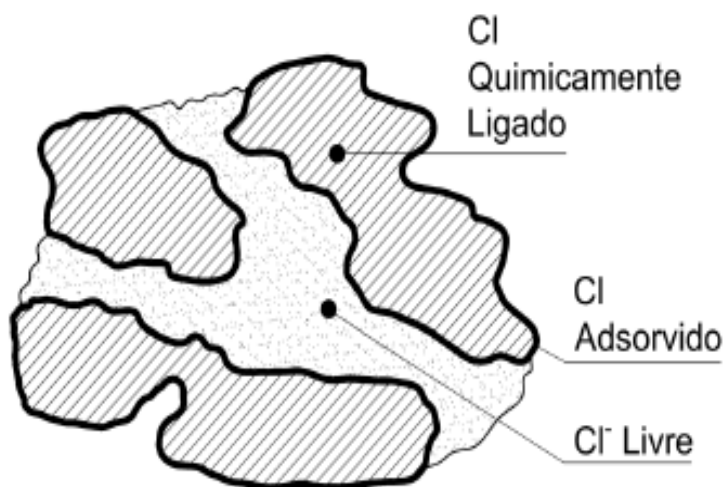


Figura 27. Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto (CASCUDO, 1997)

Pequenas concentrações de cloretos na solução dos poros de concreto conseguem despassivar a armadura de concreto e dar início à corrosão e acelerar permanentemente, assim, pequenas quantidades de cloretos podem desencadear grandes corrosões. O cloreto de sódio é um eletrólito muito forte, ocasionando um aumento na condutividade que é fundamental para o processo eletroquímico da corrosão. O processo de progressão e ingresso dos cloretos pode ser explicado por ação de um mecanismo duplo, pela sucção e depois pela difusão (Lei de Fick) e a presença de umidade nos poros, pois se o concreto tiver uma elevada resistividade ou estiver seco não terá umidade suficiente para o transporte dos íons cloreto até a armadura. Neste caso, o processo corrosivo não ocorrerá, mesmo com a presença de grandes concentrações de cloreto no interior do concreto (RIBEIRO *et al.*, 2020).

Como os íons cloreto atacam de forma pontual, ocasionando uma corrosão localizada, ou por pites, como é demonstrada na Figura 28.

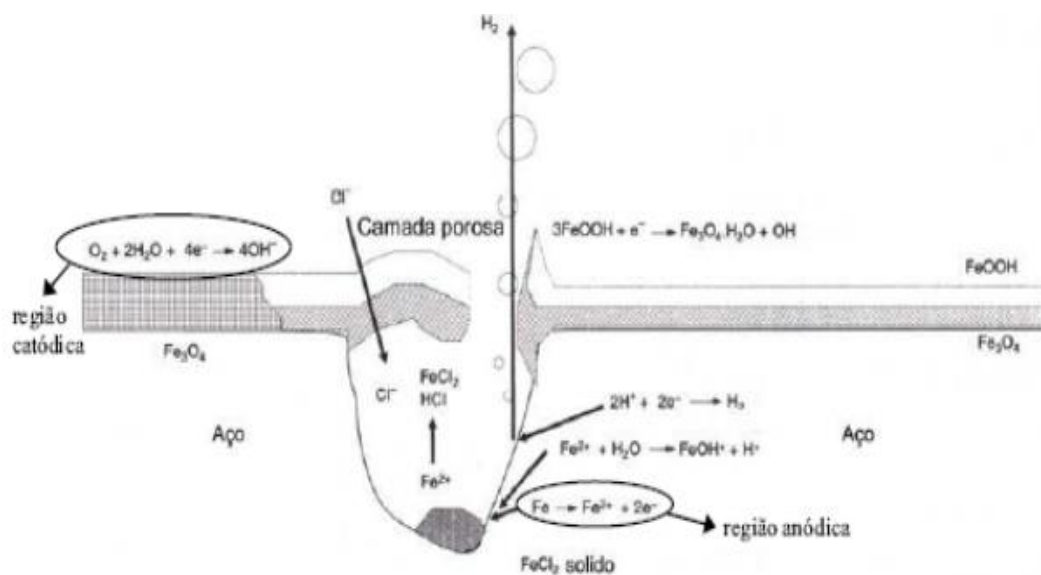


Figura 28. Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos: mecanismo de formação e propagação (BROOMFIELD, 1997)

Conforme ilustrado, a propagação da corrosão por íons cloreto envolve a dissolução do metal pela região anódica no fundo do pite e o balanceamento pela região catódica na superfície adjacente e assim, para manter a neutralidade dentro do pite ocasionada pelo aumento de cátions metálicos, ocorre a migração de ânions (neste caso, o Cl^-) para dentro do pite formando cloreto metálico (FeCl_2). Este cloreto é hidrolisado, formando hidróxido metálico (FeOH) e ácido livre responsável pela diminuição do pH no interior do pite (HCl). Assim, dependendo da concentração dos íons cloreto e das características dos elementos de concreto como a porosidade e a permeabilidade, sua ação poderá ser fatal sobre a armadura do concreto.

2.3.7 Efeitos da corrosão e a presença das fissuras

Segundo ANDRADE (1992) os efeitos da corrosão se manifestam de três formas diferentes sobre o aço como uma diminuição de sua capacidade mecânica, sobre a aderência do aço/concreto e sobre o concreto quando está fissurado.

Quando há uma diminuição da capacidade mecânica o aço fica comprometido devido a redução da tensão de escoamento do material e devido à redução da área de aço da seção transversal da barra.

CAVALERA apud HELENE (1986) afirma que segundo suas próprias experiências, a aderência aço/concreto de barras corrodas, seja qual foi o grau de corrosão, é sempre maior que a de barras não corroídas e isso pode ser explicado pela maior superfície de concreto oferecida pela barra corroída em relação à não corroída e existem alguns autores que consideram prejudiciais à aderência, o fato das barras já possuírem, em sua superfície, produtos de corrosão (crostas) destacáveis. Mais importante que a remoção dessas crostas por razões de aderência, o

que nem sempre é justificável, parece ser a necessidade de uma comprovação experimental da não alteração da capacidade resistente da armadura.

Com relação ao terceiro efeito CASCUDO (1997) afirma que os produtos de corrosão são uma gama variada de óxidos e hidróxidos de ferro que passam a ocupar, no interior do concreto, volumes de 3 a 10 vezes superior ao volume original do aço das armaduras, conforme ilustrado na Figura 29, podendo causar tensões internas maiores que 15 MPa.

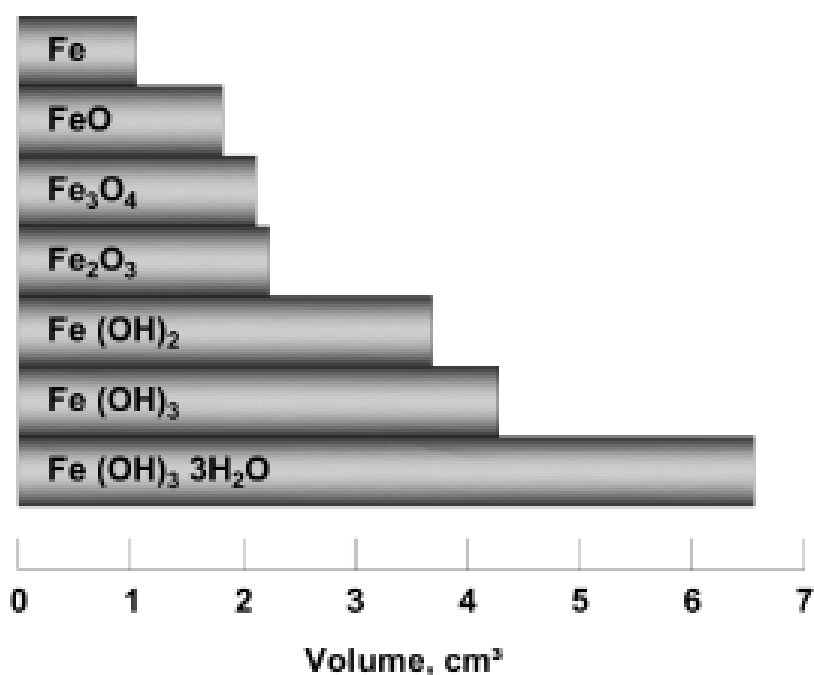


Figura 29. Volumes relativos de ferro e de alguns de seus produtos de corrosão. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Segundo GENTIL (2006) os grandes volumes ocupados pelos produtos da corrosão exercem uma pressão de expansão de 32 MPa sobre o concreto, fraturando-o CÁNOVAS (1988) afirma que essas tensões podem atingir valores de até 40 MPa. A Figura 30 ilustra os esforços produzidos pelos produtos da corrosão de armaduras e que levam à fissura e destacamento do concreto.

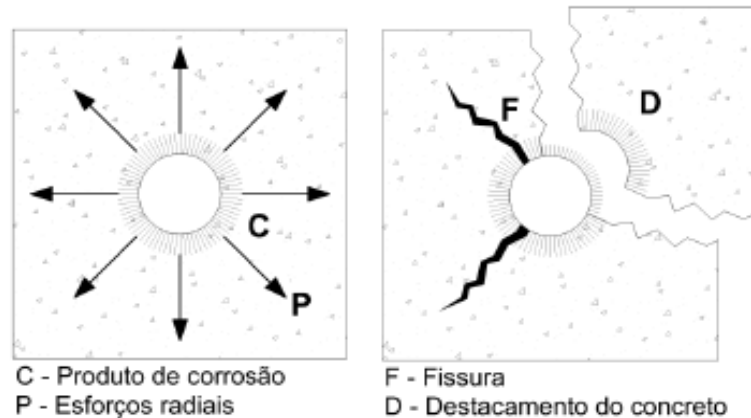


Figura 30. Efeitos produzidos que levam à fissuração e destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997)

CASCUDO (1997) explica que as fissuras produzidas por estas tensões se estabelecem na direção paralela à barra corroída e essas fissuras são classificadas como fissuras ativas progressivas, isto porque tem aberturas que vão aumentando com o decorrer do processo corrosivo. Esta evolução das fissuras implica o posterior lascamento do concreto, com comprometimento do monolitismo estrutural, conforme a Figura 31.

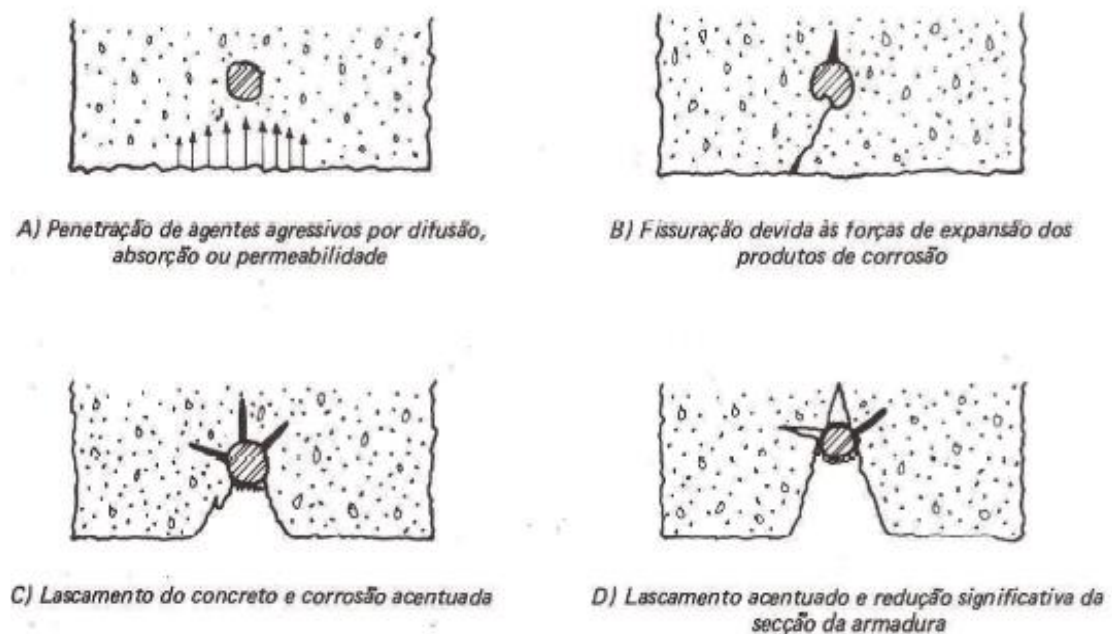


Figura 31. Deterioração progressiva devido à corrosão das armaduras (SHAFFER, 1971 e CAIRONI, 1977)

Contudo, CASCUDO (1997) afirma que nem sempre se produz fissuração quando as armaduras se corroem. Caso o concreto esteja muito úmido, os óxidos são gerados a uma velocidade constante e podem migrar através da rede de poros, aparecendo na superfície sob a

forma de machas marrom-avermelhas, que inclusive podem não coincidir com a posição das armaduras. Nesta situação, a durabilidade das estruturas é basicamente afetada pela perda de seção das armaduras e pelo comprometimento à aderência aço/concreto.

2.4 INIBIDORES DE CORROSÃO PARA CONCRETO ARMADO

Inibidores de corrosão são substâncias que reduzem as taxas de corrosão de metais, que quando adicionadas a um ambiente formam uma película de passivação no metal para prevenir a corrosão (NACE International). Segundo LEE *et al.* (2018) dentre as diversas técnicas de prevenção da corrosão e aumento da vida útil das estruturas, o uso dos inibidores de corrosão é um dos métodos mais apropriados e eficientes para proteção contra corrosão em estruturas de concreto armado devido à facilidade de aplicação, baixo custo e excelente efeito de resistência à corrosão.

Segundo RIVETTI *et al.* (2018), os inibidores de corrosão são químicos que, quando presentes em quantidades suficientes, são capazes de promover redução das taxas de corrosão sem alterar consideravelmente a concentração de agentes agressivos. Eles podem atuar no processo de corrosão de duas maneiras: Atrasando a despassivação das armaduras, reforçando a película de passivação ou reduzindo as taxas de corrosão após a despassivação.

Os inibidores de corrosão podem ser classificados segundo a sua composição química (orgânicos ou inorgânicos), seu mecanismo de proteção (anódico, catódico ou misto) ou seu método de aplicação (misturado ao concreto e aplicado superficialmente) e também podem ser agrupados em uma classificação chamada inibidores verdes (RIVETTI *et al.*, 2018). Os inibidores misturados ao concreto são mais utilizados como prevenção ou em reparos. Já os inibidores aplicados superficialmente podem ser utilizados em estruturas antigas ou novas para proteger contra a corrosão. A Figura 32 mostra de maneira esquemática a aplicação de inibidor de corrosão sobre a superfície de concreto e o efeito da migração do produto até atingir as armaduras.

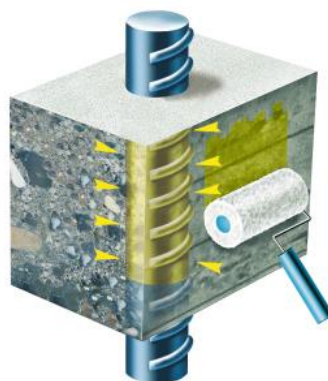


Figura 32. Esquema de aplicação e funcionamento dos inibidores aplicados sobre a superfície. Fonte: Sika

De acordo com MYRDAL (2010) a classificação dos inibidores em três classes eletroquímicas (anódicos, catódicos ou mistos) depende se afetam as reações anódicas, catódicas ou ambas. Segundo MONTICELLI (2018), como resultado, causam uma alteração no potencial de corrosão do metal na respectiva região anódica, catódica ou substancialmente mantêm o potencial de corrosão do metal mais ou menos sem alterações. O mesmo autor cita que a inibição da reação catódica ou anódica pode ser devido à redução da área ativa do metal e/ou pela mudança na energia de ativação da oxidação ou redução no processo de corrosão. A combinação de inibidores de corrosão catódicos e anódicos geralmente resultam em maior proteção e permite redução das concentrações de inibidor. SARASWATHY e SONG (2007) estudaram o efeito de inibidores anódicos, catódicos e mistos, através de diversas técnicas aceleradas em curto e longo prazo. Em suas análises os inibidores mistos foram os que demonstraram menores taxas de corrosão.

Não há norma brasileira que fale de recuperação ou proteção superficial de estruturas, porém a norma européia EN 1504 (2008) descreve produtos e sistemas para a proteção e recuperação de estruturas de concreto além de definir requisitos, controle de qualidade e avaliação de conformidade. A norma descreve diversos princípios para proteção e recuperação de estruturas e descreve no Princípio 9 o controle de áreas catódicas para prevenir a corrosão nas armaduras e no Princípio 11 o controle das áreas anódicas para prevenir a corrosão das armaduras. Segundo essa norma, a proteção das áreas catódicas ocorre através da limitação de acesso do oxigênio nas áreas potencialmente catódicas para a reação de corrosão. Já para a proteção das áreas anódicas, a norma cita a utilização de substâncias inibidoras e ressalta que os inibidores aplicados na superfície de concreto devem penetrar até o nível das armaduras para serem eficientes.

O sódio nitrato, inibidor anódico, foi o primeiro a ser utilizado em concreto a mais de 50 anos. Desde então, muitas substâncias químicas foram testadas, dos quais nitratos, fosfatos, aminas, alcanolaminas e ácidos carboxílicos são os mais investigados. Nos dias de hoje, misturas de sais de nitritos e nitratos (preferencialmente de cálcio) são os inibidores para mistura em concretos mais comumente comercializados fora da Europa (MYRDAL, 2010).

MYRDAL (2010) também cita que nas últimas duas décadas, aminas e alcanolaminas se tornaram os inibidores para mistura em concretos mais comuns no mercado europeu. Estes são inibidores mistos, na qual supressão tanto as reações anódicas quanto catódicas. O mesmo autor menciona que nos últimos anos, os estudos sobre o efeito dos sais carboxílicos em meio alcalino se intensificaram. Assim como os grupos de amina, os grupos de carboxilatos possuem o potencial de adsorção em superfícies metálicas, formando uma película orgânica em toda a superfície e atuando como um inibidor misto. Recentemente, compostos carboxílicos são encontrados em inibidores comerciais para mistura em concreto fresco, tipicamente como produtos base amina (MYRDAL, 2010).

LEE *et al.* (2018) descreve que inibidores orgânicos podem ser adsorvidos quimicamente ou fisicamente. Adsorção química é resultado de uma reação química entre pontos ativos de corrosão, metal e inibidor, na qual é carregada pela polaridade do inibidor e na qual as cargas do metal e dos óxidos de metal formados no concreto são compartilhadas. Assim, o inibidor orgânico forma uma fina película bloqueando a superfície do metal de agentes agressivos através de fortes ligações químicas. A adsorção física resulta na formação de uma barreira mecânica de inibidor orgânico.

2.4.1 Inibidores aplicados na superfície de concreto

Segundo MYRDAL (2010), os chamados inibidores de migração, de aplicação superficial ou de impregnação são aplicados na superfície de concreto endurecido e devem penetrar no cobrimento de concreto. Para essa categoria de inibidores, é essencial que as substâncias tenham capacidade de penetração de forma que possam penetrar na estrutura de concreto pelos poros intersticiais até alcançar a armadura de reforço.

RIVETTI *et al.* (2018) cita que dentre os inibidores aplicados em estruturas de concreto existentes estão os produtos líquidos, geralmente fosfatos. Já segundo GOODWIN *et al.* (2020) há muitas tecnologias diferentes dentre os inibidores de corrosão aplicados superficialmente. Amino-álcoois base água podem ser aplicados na superfície e são citados como produtos que possuem pressão de vapor suficiente para penetrar no concreto em forma de vapor. Amino-álcoois se mantêm solúveis em água e são suscetíveis a possuíram evaporação de vapor para o

meio externo ao mesmo tempo em que penetram lentamente no concreto. Materiais base água podem deixar resíduos na superfície de concreto que devem ser removidos antes da aplicação de revestimentos sobre o concreto, o que explica os resultados diversos existentes quanto ao uso dos inibidores de aplicação superficiais base água (GOODWIN *et al.*, 2020). Segundo MYRDAL (2010), os inibidores por migração presentes no mercado são em sua maioria misturas de aminas e alcanolaminas e ácidos carboxílicos, exemplo amino-carboxilatos.

LEE *et al.* (2018) comenta que os inibidores por migração penetram no concreto por três mecanismos distintos: Difusão, migração elétrica e transporte por sucção capilar e gradiente de pressão. Esses inibidores existentes no mercado são geralmente compostos de base orgânica. Segundo HAIBING *et al.* (2012) os inibidores dessa categoria, base amino-álcool penetram rapidamente nos poros do concreto e protegem as armaduras formando uma película hidrofóbica adsorvida. São considerados produtos apropriados para utilização em projetos de reabilitação de estruturas de concreto armado devido à facilidade de aplicação, baixo custo e segurança.

MORRIS *et al.* (2003) realizaram testes com inibidores por migração de base química alcanolamina em segmentos de concreto armado com diferentes relações a/c e diversos conteúdos de cloretos no concreto. A eficiência do inibidor foi acompanhada durante 1000 dias através de medições de potencial de corrosão, densidade de corrente, resistividade elétrica e espectroscopia de impedância eletroquímica e os resultados demonstraram uma redução na taxa de corrosão para as amostras com conteúdo de cloretos menor que 0,16% (em massa de cimento) e um aumento de eficiência à medida que a relação a/c aumentou. A eficiência dos produtos testados aumentou nas amostras na qual se aplicou o dobro de consumo de inibidores sobre a superfície. Os autores também relataram nenhum efeito positivo do inibidor em amostras com conteúdo de cloretos superior a 0,43% (massa de cimento).

HEIVANTUDUWA *et al.* (2006) realizaram avaliações em laboratório por 11 meses com aplicação de inibidor na superfície de concreto antes e depois da carbonatação acelerada do concreto na qual obteve-se que o inibidor orgânico utilizado foi capaz de reduzir a velocidade de corrosão e retardar o início da corrosão em concreto carbonatado. Os autores também realizaram análises em campo durante 9 meses, em estruturas carbonatadas já com início de corrosão das armaduras e obtiveram redução significativa da taxa de corrosão nas estruturas tratadas quando comparado com as estruturas não tratadas.

Apesar dos diversos resultados positivos dos inibidores por migração, de acordo com MYRDAL (2010), diversos relatórios sobre os inibidores por migração lidam com a capacidade de penetração do inibidor no cobrimento do concreto endurecido. O autor comenta que há um

debate acontecendo se esses produtos realmente atuam como deveriam devido aos fatores que influenciam a capacidade de penetração do produto em quantidades suficientes. BROOMFIELD (2020) cita que diversos métodos para acelerar o transporte dos inibidores foram sugeridos e ressalta que a aplicação de inibidores diretamente na superfície do concreto é muito provavelmente dependente da qualidade do concreto e da umidade presente neste concreto.

De acordo com ORMELLESE *et al.* (2011), a efetividade na penetrabilidade dos inibidores depende do cobrimento de concreto existente, da porosidade do concreto, umidade e volatilidade do produto aplicado. Produtos com alto conteúdo de voláteis podem não somente aumentar a taxa de migração no cobrimento de concreto, mas também aumentar a perda do produto para a atmosfera. Em experimentos realizados, os autores concluíram que um inibidor comercial orgânico testado, base amina terciária com compostos fosfóricos inorgânicos penetrou principalmente pelo mecanismo de absorção capilar, em uma profundidade máxima de 20 mm.

Segundo TANNER (2013), a profundidade de penetração dos inibidores de corrosão base amino-álcool pode ser avaliada quantitativamente utilizando-se um espectrômetro de massa para medir quantidades de nitrogênio. Um fabricante de um inibidor desenvolveu um kit de medição qualitativa de penetração utilizando a cromatografia, em método similar aos utilizados para medição bioquímica de aminoácidos.

Por outro lado, HAIBING *et al.* (2012) realizaram diversos ensaios na qual avaliou-se o efeito da aplicação dos inibidores aplicados superficialmente no concreto na absorção de água, resistência a penetração de cloretos e avanço da carbonatação utilizando ensaios acelerados e os resultados demonstraram aumento da resistência ao ingresso de água e contaminantes e consequentemente, melhora na durabilidade do concreto. Os resultados obtidos podem representar efeitos secundários destes inibidores na redução da velocidade de corrosão.

Segundo GOODWIN *et al.* (2020), os inibidores de corrosão de aplicação na superfície de concreto são um dos métodos mais simples de lidar com problemas de corrosão nas estruturas de concreto armado, no entanto não há um protocolo industrialmente aceito para avaliação da efetividade ou comparação com outros materiais. A norma EN 1504 (2008) - Parte 9 comenta no princípio 11 que não há atualmente normativas para a utilização de inibidores de corrosão, portanto informações sobre a efetividade dos produtos devem ser obtidas antes de especificar esse tipo de produto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizados ensaios em laboratório com a finalidade de avaliar a penetrabilidade dos inibidores de corrosão por impregnação em concretos de diferentes relações água/cimento e diferentes porosidades. Os traços utilizados foram desenvolvidos seguindo o Método de Dosagem da ABCP, em corpos cilíndricos 10x20cm e adotou-se um intervalo nas idades dos corpos de prova, de 13 em 13 dias (13, 26, 39 e 52 dias) por causa da logística e disponibilidade do laboratório utilizado e três profundidades alternadas (de 1 a 2 cm, 3 a 4 cm e 5 a 6 cm) devido ao volume de ensaios e visando reduzir a quantidade de amostras.

3.1 MATERIAIS E CONCRETO DO EXPERIMENTO

3.1.1 Concreto para o experimento

O concreto para este experimento foi produzido em laboratório, seguindo o Método de Dosagem da ABCP. Para desenvolver o concreto do experimento foi utilizado o Cimento Portland CP II F-32. Com a sua composição 90% a 94% de clínquer e gesso e de 6% a 10% de material carbonático ou filler, este tipo de cimento é o mais utilizado devido suas propriedades atenderem desde as estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. (PEREIRA, 2013).

Os agregados selecionados para o concreto foram a brita 1 e a areia grossa, cujas respectivas dimensões foram de 9,5 mm a 19 mm e entre 0,6 mm e 2,0 mm.

Para obter um concreto com diferentes índices de porosidade, fixamos a relação a/c em 0,4, 0,5, 0,6 e 0,7, definimos o Slump 10 +/- 2 e optamos pela utilização do aditivo plastificante de pega normal de alto desempenho na proporção de 0,8% sob o peso do cimento. Este aditivo tem como finalidade a redução de água no concreto, permitindo trabalhar diversos tipos e teores de relação a/c.

Feita a seleção dos materiais a serem utilizados e após o estudo de Dosagem pelo Método ABCP, obteve-se a definição de cada traço do experimento, conforme mostra a Tabela 2.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Quantidade de cimento (kg)	1	1	1	1
Quantidade de água (kg)	0,4	0,5	0,6	0,7
Massa agregado graúdo (kg)	2,05	2,57	3,08	3,60
Massa agregado miúdo(kg)	1,79	2,44	3,10	3,76

Tabela 2. Definição do traço final segunda o Método de Dosagem ABCP

Após a definição do traço, calcularam-se as quantidades necessárias de CP's para cada traço (Tabela 4) e as quantidades de material (Tabela 5) de acordo com o volume necessário para cada traço de concreto (Tabela 7).

Atividade	Números de CP's por traço
Ensaio Compressão	4
Ensaio Inibidor – aplicação	8
Ensaio Absorção	4
Amostra Padrão	4
Total por traço	20

Tabela 3. Quantidade de CP's de cada traço de acordo com as atividades

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Relação A/C	0,40	0,50	0,60	0,70
Quantidade de cimento (kg)	16,650	13,320	11,100	9,514
Quantidade de água (kg)	6,660	6,660	6,660	6,660
Massa agregado graúdo (kg)	34,211	34,211	34,211	34,211
Massa agregado miúdo (kg)	29,720	32,565	34,461	35,816
Aditivo RM 300 (0,8% sobre o peso do cimento) (kg)	0,1332	0,1066	0,0888	0,0761

Tabela 4. Quantidade de material utilizado na confecção de 20 CP's por traço

Volume de concreto por CP (m³)	0,00157
Volume total por Traço (m³)	0,0314
Volume total por Traço (m³) + ~15%	0,036

Tabela 5. Volume total de concreto para cada traço com a respectiva perda na hora da moldagem dos CP's

Com as quantidades, de cada componente, pesadas e separadas, iniciamos a execução do concreto para o experimento. Para “rodar” o traço, foi utilizada uma betoneira de 150L – marca Grupo Megotti 220v. As condições climáticas no local da pesagem, da mistura e da moldagem eram medidas no interior do laboratório e no momento da execução a temperatura era de 23°C e a umidade relativa do ar de 64%.As Figura 33 e Figura 34 mostram a caracterização da areia e brita utilizada. O cimento utilizado nos traços foi o CP II F–32.

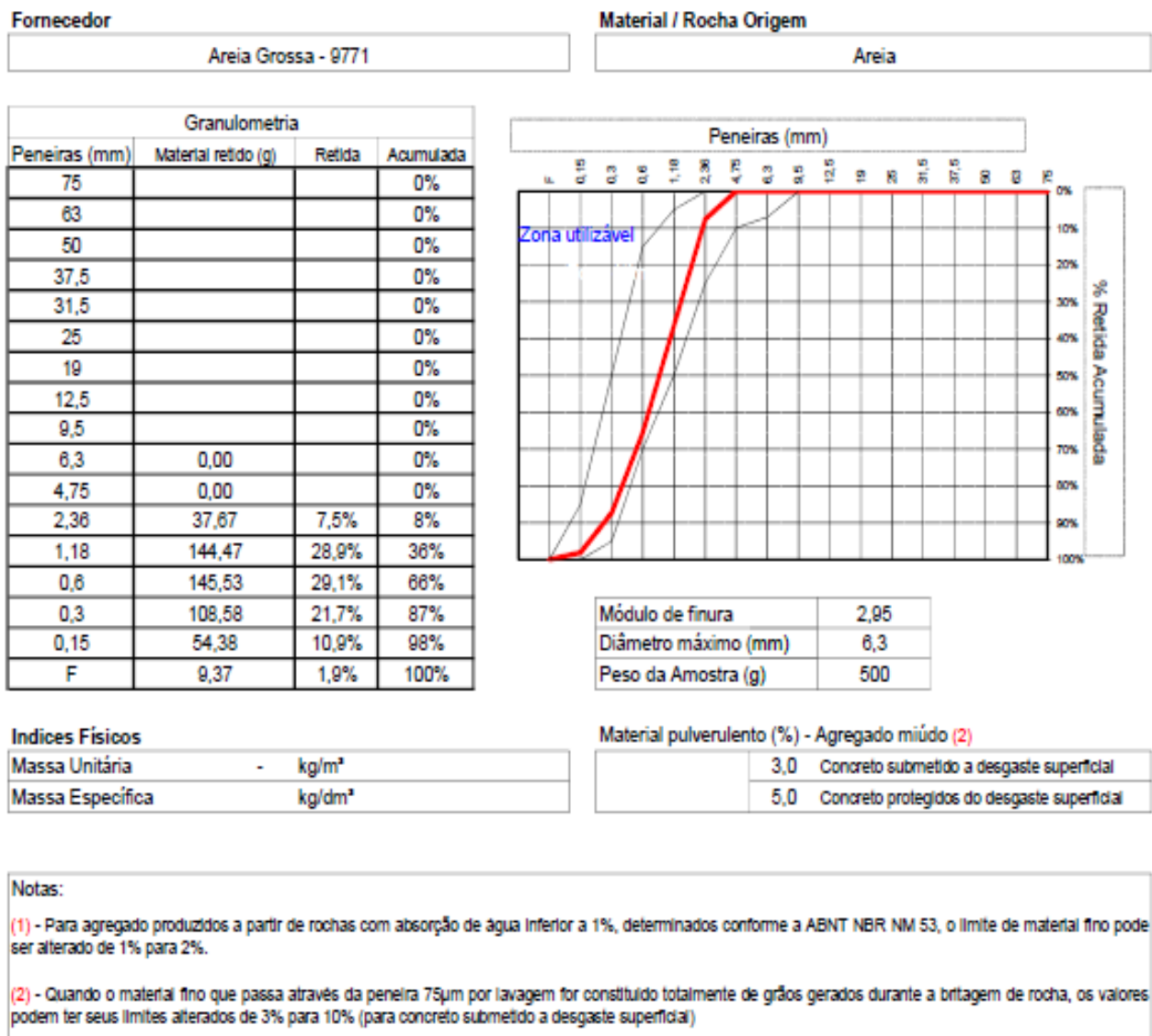


Figura 33. Caracterização do agregado miúdo na qual contém a tabela de distribuição granulométrica do agregado miúdo conforme NBR 7211(2009)

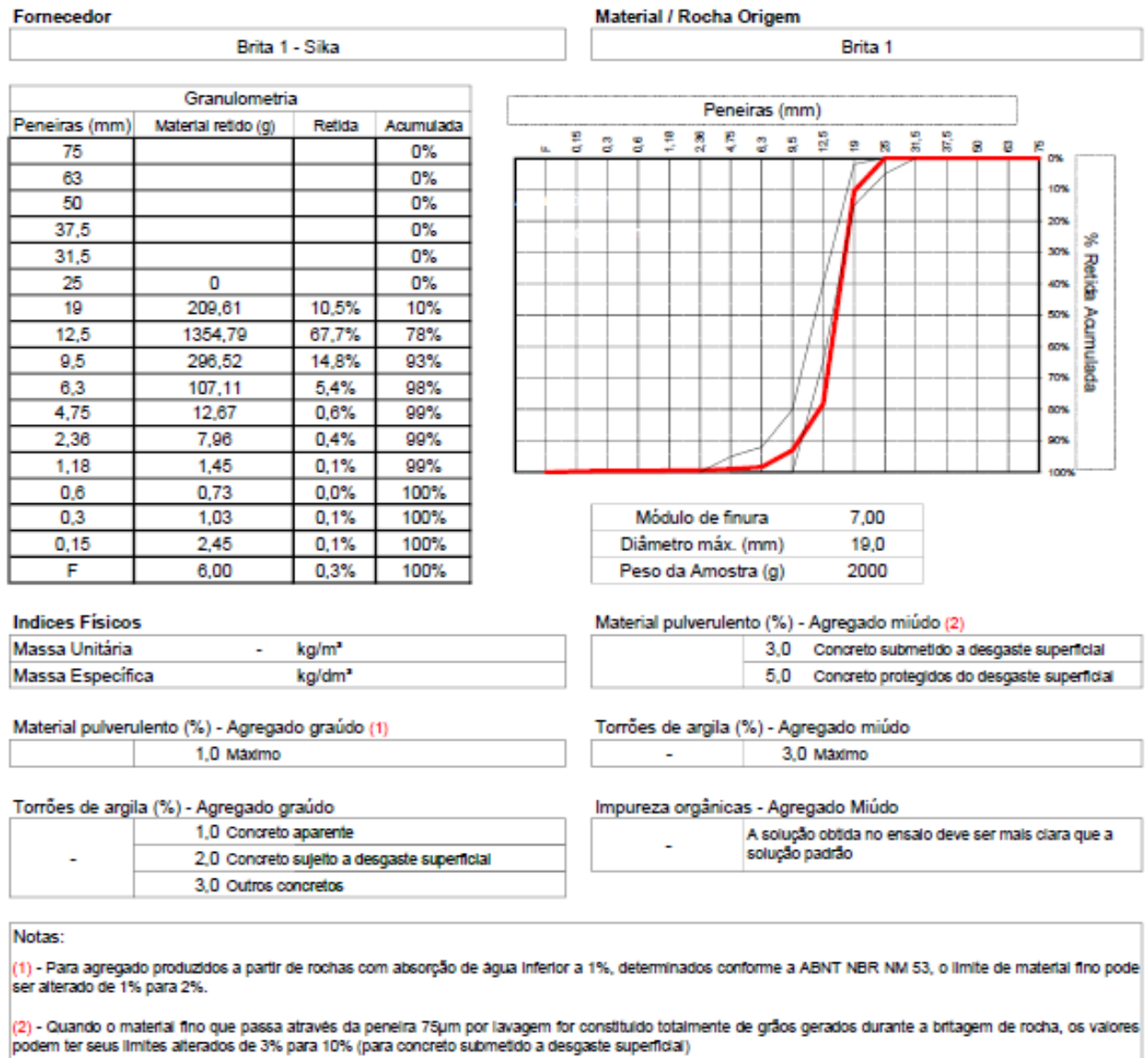


Figura 34. Caracterização do agregado graúdo na qual contém a tabela de distribuição granulométrica do agregado graúdo conforme NBR 7211 (2009)

Após a mistura dos componentes, executamos o ensaio de Tronco de Cone para a verificação do abatimento e moldagem, de acordo com a NBR 5738 (2015) e suas referências normativas, os valores de abatimento estão demonstrados na Tabela 6. Após 24 horas a moldagem dos CP's, realizou-se a desforma dos exemplares e o transporte para a câmara úmida, com sensor de temperatura entre 23+/-2°C e umidade relativa do ar superior a 95%, conforme estabelecido pela NBR5738 (2015). Passados 28 dias, retirou-se da câmara para a realização dos procedimentos de secagem, realização do ensaio de absorção, realização do ensaio de compressão (ruptura) e a aplicação do inibidor de corrosão. O revestimento base epóxi ao redor dos CP's foi aplicado 7 dias antes da aplicação do inibidor, com 21 dias de idade para garantir a cura completa do revestimento no momento da aplicação do inibidor de corrosão. Nessa data,

os CP's foram retirados da câmara apenas para o processo de aplicação e poucas horas depois, retornaram à câmara úmida.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Slump 10+/-2	9	11	12	11

Tabela 6. Resultados das medidas dos abatimentos

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi realizado, conforme a norma NBR 5379 (2018), aos 28 dias de idade e nos corpos de prova cilíndricos e segundo as dimensões descritas no item 3. Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida para secagem até a realização dos ensaios (24h) e houve a necessidade de retificá-los, tornando a face do corpo de prova plana e perpendicular ao seu eixo longitudinal. A resistência à compressão foi determinada utilizando a Máquina EMIC para 200 tf.

3.1.2 INIBIDOR DE CORROSÃO POR IMPREGNAÇÃO

O inibidor de corrosão por impregnação utilizado neste estudo é descrito pelo fabricante como sendo um inibidor de corrosão misto, para proteção das armaduras em estruturas de concreto armado. É constituído por compostos orgânicos e quando aplicado sobre a superfície de concreto, penetra até as armaduras e forma uma camada protetora monomolecular na superfície do aço. As características técnicas do produto estão descritas na

Tabela 7. Especificação do inibidor de corrosão Segundo o fabricante, o inibidor age com duplo efeito, atrasando o início da corrosão e diminuindo a velocidade com que esta deteriora o aço. As características do produto estão descritas na tabela abaixo:

Base Química	Solução aquosa de amino álcoois e sais de amino álcoois
Embalagem	Tambor de 220 kg
Aspecto/cor	Líquido transparente incolor, levemente amarelado
Densidade	~1,05 kg/l (a 20°C)
Valor do pH	~10
Viscosidade (Brookfield RVT, spindle 2, 100 rpm)	~20 mPa.s (23 °C)
Consumo recomendado	Geralmente 0,5 kg/m ²

Temperatura ambiente para aplicação	De +5°C a +40°C
Temperatura do substrato para aplicação	De +5°C a +40°C

Tabela 7. Especificação do inibidor de corrosão

O fabricante informa em sua documentação técnica que o inibidor penetra no concreto a uma taxa de alguns milímetros ao dia, a uma profundidade de aproximadamente 25 a 40 mm em 1 a 2 meses, podendo ser maior ou menor dependendo da porosidade do concreto. Também descreve que seu transporte é pelos mecanismos de difusão tanto na fase líquida quanto gasosa.

O teor de cloretos máximo admissível descrito pelo fabricante é de 1% (correspondente a 1,7% de cloretos de sódio). Acima deste limite, de acordo com as condições do concreto e com o nível corrosão, o aumento do consumo do inibidor pode ser considerado. O fabricante também destaca que devem ser efetuados ensaios e monitoramentos da atividade de corrosão para confirmação de consumo e eficiência nessas condições. Em ambiente marinho, quando já se apresentam cloretos perto da armadura, a concentração de inibidor nas armaduras deverá ser no mínimo de 100 ppm quando medido por cromatografia iônica para proteção eficiente e controle da corrosão. Não é recomendada a aplicação em zonas de maré ou em concretos saturados com água. Deve-se evitar a aplicação com sol direto e/ou vento forte e/ou chuva e não aplicar sobre concreto em contato direto com a água potável.

O procedimento de aplicação do produto é descrito a seguir:

A base deve estar livre de poeira, material solto, óleo, gordura, eflorescências, impregnações e qualquer tipo de pintura ou revestimentos antigos que possam prejudicar a aderência do material. A base deve estar seca antes da aplicação do inibidor.

O inibidor é fornecido pronto para uso e não deve ser diluído. Não se deve agitar o produto antes de usar. O produto deve ser aplicado até a saturação com pincel, rolo, jateamento de baixa pressão. Não é conveniente aplicar sob radiação solar direta. Logo após a aplicação da última demão de produto, assim que a superfície estiver liberada, deve-se molhar o substrato com jatos de baixa pressão. Um dia após a aplicação, as superfícies tratadas devem ser lavadas com jato de água sob pressão (~10 MPa - 100 bar) para remover quaisquer vestígios de sais solúveis, que podem ter sido depositados na superfície. O número recomendado de demãos varia com o teor de umidade e porosidade do substrato e das condições meteorológicas locais. Em superfícies verticais normalmente recomenda-se de 2 a 3 demãos, até alcançar o consumo requerido. Para substratos densos podem ser necessárias demãos adicionais. Em superfícies horizontais, recomenda-se saturar superfície com 1 a 2 camadas, evitando a formação de

empoçamento. O tempo de espera entre demãos depende da porosidade do substrato e das condições meteorológicas, normalmente entre 1 a 6 horas. Em todas as fases do processo, só pode ser usada água potável fria.

Para o estudo em questão, padronizou-se o consumo de 500 g/m² pesado em balança de precisão em todas as amostras e foram aplicados com um pincel, em quantidade de demãos suficientes para atingir o consumo estabelecido. Após a aplicação do consumo total, os corpos de prova foram molhados utilizando-se um recipiente graduado com quantidades iguais de água, visando simular a molhagem com jato de baixa pressão recomendado pelo fabricante logo após a aplicação. 24 horas após a aplicação do inibidor, os corpos de prova foram colocados embaixo da torneira por 1 segundo para simular a lavagem recomendada pelo fabricante no procedimento de aplicação.

3.3 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CONCRETO

3.3.2 Ensaio de Absorção de Água por Sucção Capilar (NBR 9779 - 2012)

A absorção por meio de sucção capilar é um dos principais mecanismos de penetração dos agentes agressores na estrutura, sendo assim, este ensaio tem como objetivo determinar a permeabilidade de concretos e argamassas endurecidas. A aplicação deste ensaio no estudo foi realizada para analisar influência da absorção capilar de cada traço de concreto em relação a penetração do inibidor de corrosão. Os procedimentos do ensaio são estabelecidos na NBR 9779 (2012). Os corpos de prova de concreto devem ser moldados e curados de acordo com a NBR 5738 (2015), totalmente isentos de óleo ou outros materiais aderidos durante a etapa de moldagem. Após 21 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, permanecendo em temperatura ambiente por 24 horas para a aplicação do revestimento epoxídico. Após a aplicação do revestimento, os CP's retornaram à câmara úmida para completarem os 28 dias de cura.

Para a realização do ensaio, os corpos receberam aplicação do revestimento epoxídico em todo seu período com a uma altura de aproximadamente 8 cm, conforme APENDICE C. As características do revestimento base epóxi estão descritas na Tabela 8. Para aplicação seguiu-se as instruções do fabricante do epóxi, tais como: homogeneizar separadamente os componentes e em seguida, misturando-se os componentes A e B na própria lata da embalagem manualmente, por aproximadamente 5 minutos, obtendo-se uma mistura final homogênea e sem grumos. A aplicação dos corpos de prova foi realizada utilizando-se pincel garantindo preenchimento de toda a área aplicada.

Base Química	Resina epóxi
Embalagem	Latas bicomponentes de 1 kg no total
Consistência	Baixa viscosidade
Cor	Cinza claro
Densidade	1,55 kg/l (A+B)
Resistência a compressão (ASTM D695)	60 MPa (24 horas) 80 MPa (7 dias)
Resistência a flexão (ASTM C580)	50 MPa (7 dias)
Resistência adesiva a tração	Em concreto: > 13 MPa (14 dias, ASTM C882) Em concreto: 3,8 MPa, falha no concreto (7 dias, pull off) Em aço: ~12 MPa (pull off)
Pot life (Embalagem 1 kg)	45 minutos a 23°C

Tabela 8. Características do revestimento epoxídico aplicado.

Foi utilizado para este ensaio, um recipiente aberto cujas dimensões permitiam o distanciamento entre os corpos de prova, além de um dispositivo garantindo o nível de água constante. Os corpos de prova foram colocados sobre suportes e o recipiente preenchido com água, de modo que o nível de água permaneça constante em (5 ± 1) mm acima da face apoiada dos corpos de prova, evitando a absorção de água pela superfície lateral de cada corpo de prova, conforme mostra o APENDICE C.

A resposta do ensaio é medida a partir da pesagem dos corpos de prova, após secagem da superfície em contato com a água com um pano úmido, ao longo do tempo de exposição à lâmina de água do recipiente. Estas pesagens devem ser realizadas nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, conforme ilustrado no APENDICE B e APENDICE C.

A absorção de água é calculada de acordo com a Equação 7 abaixo:

$$Q = \frac{At-B}{s} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Q = absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

At = massa do corpo de prova pesado no tempo t (g);

B = massa do corpo de prova seco (g) e

S = área da seção transversal (cm²).

Ao final das pesagens, realizou-se a ruptura diametral dos CP's e mediu-se a profundidade de penetração da água em cada uma das amostras com auxílio de um paquímetro. O Apêndice B apresenta de maneira visual o processo de moldagem do concreto e medição da absorção dos CP's.

3.4 ENSAIO DE PENETRABILIDADE DO INIBIDOR DE CORROSÃO

Com o objetivo de simular que as amostras de concreto estariam confinadas nas estruturas de concreto, aplicou-se um revestimento epóxi, em uma demão, para simular uma barreira de vapor antes da aplicação do inibidor de corrosão e, desse modo, evitar possíveis perdas de inibidor pelo perímetro do corpo de prova. Utilizamos para simular essa barreira o mesmo produto do ensaio de absorção de água e essa aplicação foi realizada 7 dias antes da aplicação do inibidor de corrosão.

Ainda não há um ensaio estabelecido nas normativas internacionais para avaliação da capacidade de penetração dos inibidores por migração, portanto os fabricantes dos produtos são atualmente os responsáveis por fornecer grande parte das informações técnicas referentes aos ensaios compatíveis para identificação da capacidade de migração dos produtos para cada tipo de projeto.

O procedimento de ensaio realizado neste estudo foi desenvolvido pelo fabricante do inibidor e é utilizado para facilitar a realização das análises de penetrabilidade e validação de especificações em projetos. Segundo o fabricante, a análise é qualitativa e tem o objetivo de identificar se há presença do produto em quantidades adequadas no concreto, e não a quantidade exata de produto existente.

Para a realização do ensaio utilizam-se os seguintes equipamentos:

- Serra circular;
- Marreta (1kg) e placa de aço;
- Secador;
- Balança de precisão;
- Seringas descartáveis estéreis de 1 ml;
- Pequenos frascos de vidro 5 de ml;
- Filtros para seringa com poros de tamanho 0,45 µm e diâmetro de 13 mm, não estéril, membrana de nylon;
- Micropipetas 10 ml (capilares);

- Papéis de cromatografia SIL G/UV254 tamanho 4 x 8 cm, folhas de plástico revestidas com gel de sílica;
- Frasco com água destilada;
- Frasco com solução padrão do inibidor de corrosão;
- Frasco com spray de “solução A”;
- Frasco com spray de “solução B” e
- EPI's.

A água destilada, a solução padrão do inibidor de corrosão e os reagentes, “solução A” e “solução B”, utilizados neste estudo foram fornecidas pelo fabricante do produto e como os reagentes possuem fórmulas confidenciais a empresas e reservou a não informar a base química utilizada nestes produtos. A solução padrão de inibidor de corrosão utilizada foi composta por ~70 ppm do produto (inibidor) dissolvido em água destilada e, nesta concentração específica, representa a quantidade mínima de produto que deveria ser encontrada no nível das armaduras para que tenhamos o efeito inibidor e resultados satisfatórios em termos de controle de corrosão.

Primeiramente, realizou-se a medição da umidade superficial dos CP's com medidor de umidade para garantir que a superfície estivesse seca antes de aplicar o inibidor. Todos os CP's apresentaram umidade superficial menor que 4% medidos com equipamento de medição de umidade superficial *Tramex*.

Sobre as faces livres (sem epóxi) dos corpos de prova moldados, foi aplicado o inibidor de corrosão utilizando-se um pincel em consumo total de 500 g/m² pesado na balança de precisão, ou seja, um consumo de 3,93 g por corpo de prova.

Durante a aplicação do inibidor de corrosão notou-se a necessidade de aplicar um maior número de demãos na superfície daqueles CP's com menor porosidade, com o objetivo de obter-se o consumo esperado e recomendado na ficha técnica do fabricante sem empoçamentos. Dessa forma, aplicou-se entre 2 a 4 demãos sobre a superfície exposta dos CP's até obter-se o consumo de 500g/m² e para que não ocorresse acúmulo e perda de material por escorrimento nas laterais.

A aplicação foi realizada em ambiente interno, no laboratório do fabricante e no momento da aplicação a temperatura no local era de 21,9°C e a umidade relativa de 80%.

Para cada traço, foram mantidos 4 corpos de prova sem aplicação de inibidor de corrosão para utilização como amostra de referência no ensaio.

Após a aplicação do consumo total do inibidor de corrosão, os corpos de prova foram molhados com uma mangueira de baixa pressão por um período aproximado de 1 segundo, visando simular a molhagem com jato de baixa pressão recomendado pelo fabricante logo após a aplicação do produto. Após aproximadamente 24 horas após a aplicação do inibidor, os corpos

de prova foram molhados com mangueira de maior pressão para simular a lavagem final recomendada após um dia de aplicação.

Após a molhagem, os corpos de prova foram armazenados, todos juntos, em temperaturas e umidades ambiente dentro do laboratório do fabricante, sem contato direto com sol.

Foram realizadas 6 medições de penetração para cada traço de concreto, ou seja, 3 medições para cada CP, em 4 datas diferentes e com intervalo de 13 dias entre os ensaios, visando avaliar a velocidade de penetração do produto nas diferentes relações a/c. O último ensaio foi realizado 52 dias após a aplicação do inibidor de corrosão. O período entre análises foi estabelecido baseado no cronograma disponível do laboratório e de maneira que fosse compatível com o cronograma deste estudo.

Para cada traço de concreto foram analisados um total de 8 corpos de prova. Foram avaliadas amostras de profundidades entre 1 e 2 cm, entre 3 e 4 cm e entre 5 e 6 cm, retirando-se fatias dos corpos de prova nessas profundidades. Foram analisados dois corpos de prova por traço para cada data selecionada, totalizando 6 amostras para cada traço em cada data. A Figura 35 mostra de maneira esquemática a quantidade de amostras e datas segundo os CP's moldados para cada traço.

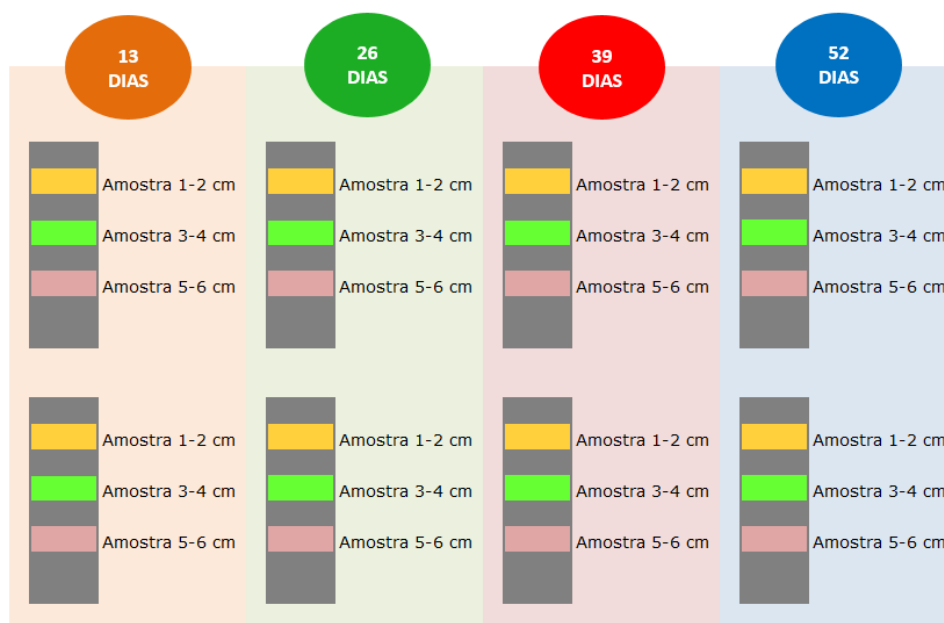


Figura 35. Esquema da quantidade de amostra retirada para cada traço.

As análises visuais foram realizadas conforme procedimento indicado pelo fabricante. Primeiramente, os CP's foram rompidos diametralmente para facilitar a retirada das amostras nas profundidades determinadas e no centro dos CP's. As amostras foram retiradas utilizando-

se uma serra circular e cortando-se uma fatia em cada profundidade do corpo de prova a ser avaliada. Cada amostra de concreto retirada foi moída utilizando-se uma placa de aço e uma marreta até obter-se partículas muito pequenas, com dimensões menores que 1 mm de diâmetro. Os agregados graúdos encontrados nas amostras foram descartados e o pó de concreto obtido foi acondicionado em um papel limpo e em seguida separou-se 1 g do material (pesado na balança de precisão) que foi depositado em frascos de vidro de 5 ml devidamente identificados. Também foram retiradas amostras de um corpo de prova sem presença de inibidor para comparação, a amostra de referência, e seguiu-se o mesmo procedimento de moagem e separação.

Entre cada coleta de material de cada corpo de prova os equipamentos utilizados (disco de serra circular, placas de aço e a marreta) eram limpos com papel e álcool líquido.

Em cada frasco contendo o pó das amostras, adicionou-se água destilada com auxílio de uma seringa de maneira que o nível de água ficou aproximadamente 5 mm acima do nível do pó de concreto moído. Para garantir a igualdade no volume de água destilada em cada frasco, utilizou-se a própria seringa para medição do volume exato de água em cada amostra. Os frascos foram tampados e agitados com a mesma intensidade por um período de 30 segundos, posteriormente os frascos ficaram em repouso por 5 minutos, sendo agitados novamente por mais 30 segundos com a mesma intensidade. Após o segundo período de agitação os frascos ficaram em repouso por uma hora e passado esse tempo de repouso, retirou-se a água turva do frasco sem agitá-lo com o auxílio de uma seringa, essa água foi filtrada para um novo frasco de vidro limpo e identificado.

Para a análise colorimétrica, cada corpo de prova foi avaliado em um único papel de cromatografia, na qual foram realizadas 5 marcações em sequência: uma para a solução padrão (inibidor em concentração de 70 ppm), uma para a profundidade 1 a 2 cm, uma para a profundidade 3 a 4 cm e a uma para a profundidade 5 a 6 cm e a última para a amostra de referência (concreto sem presença de inibidor). Utilizando as micropipetas (capilares) foram coletadas amostras dos líquidos filtrados e adicionados ao papel de cromatografia, de maneira que as gotas não excederam o diâmetro de 5 mm. Em seguida, o papel foi aquecido intensamente utilizando-se um secador de cabelo até a secagem completa de cada ponto de solução. Esse procedimento foi repetido 5 vezes, adicionando-se novas gotas das respectivas soluções sobre as anteriores.

Após a sequência descrita, aplicou-se por duas vezes seguidas a solução “A” sobre o papel de cromatografia, utilizando-se o spray em baixo consumo, e a solução foi seca utilizando-se o secador em baixa potência a uma distância de 30 cm. Em seguida, aplicou-se

por duas vezes seguidas a solução “B” sobre o papel de cromatografia, utilizando-se o spray em baixo consumo e utilizou-se novamente o secador de cabelo, dessa vez em alta potência e mantendo-o próximo ao papel em movimento de aproximar e afastar por aproximadamente 2 minutos, até que a solução padrão do inibidor mudasse de cor para tonalidade rosa.

O ensaio estabelece que quando a coloração atingida no papel de cromatografia para a amostra apresentar tonalidade igual ou mais intensa que a solução padrão significa que há presença suficiente de inibidor na amostra de concreto. O procedimento de ensaios se repetiu para todos os traços e nos intervalos de 13, 26, 39 e 52 dias

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir da descrição do procedimento experimental e dos ensaios realizados em laboratório.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO NBR 5379/1994

Com base na NBR 5379 (1994), realizou-se o ensaio de resistência à compressão do concreto visando avaliar o comportamento dos traços desenvolvidos segundo essa variável e caracterizar os concretos moldados. Romperam-se 4 corpos de prova para cada traço de modo a obter maior confiabilidade nas análises. Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na Figura 36.

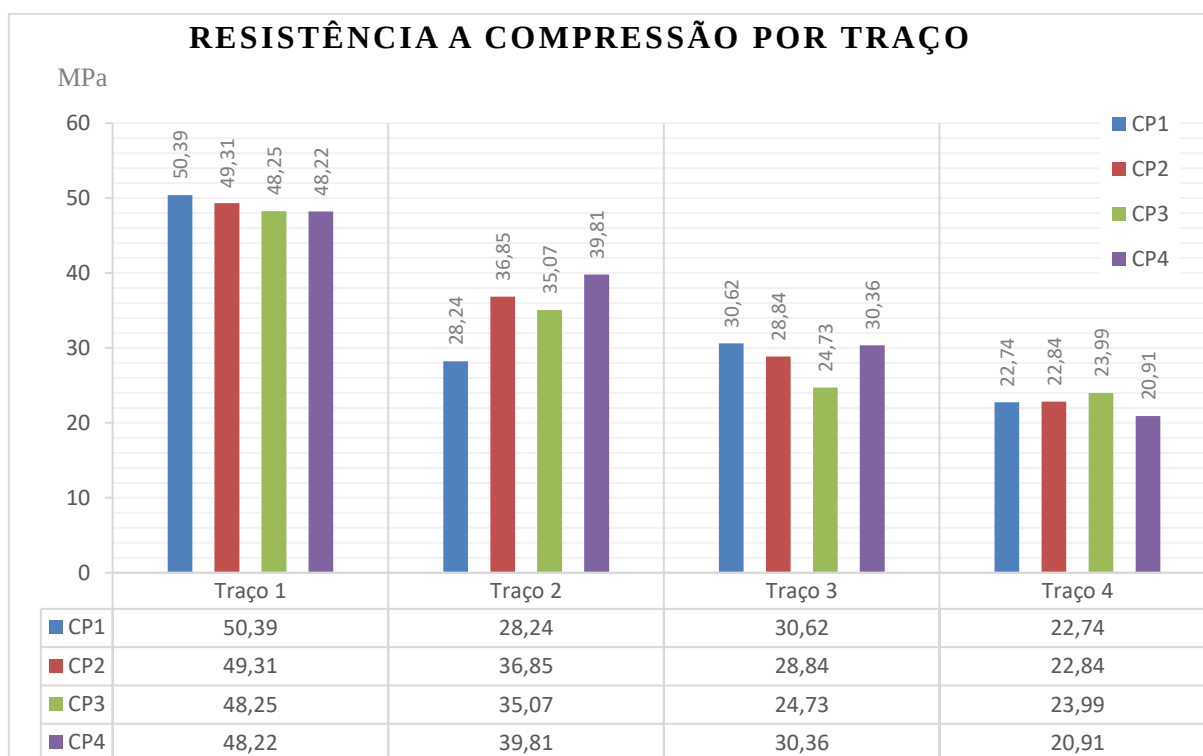


Figura 36. Esquema gráfico e resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão segundo NBR 5379 (1994) por traço

Analisando os valores obtidos, no ensaio de resistência à compressão, chegamos às médias de:

T1 = 48,78 MPa;

T2 = 35,96 MPa;

T3 = 29,60 MPa;

T4 = 22,79MPa.

Com os resultados apresentados, podemos observar que as resistências a compressão obtidas diminuem a medida que a relação a/c aumenta corroborando com a expectativa do estudo de dosagem, presumindo-se que a porosidade dos CP's é maior a medida que a relação a/c aumenta e a resistência diminui.

Também podemos verificar que o T2CP1 (CP 1 do traço 2) e o T3CP3 (CP3 do traço 3) apresentaram resultados de rompimento à compressão abaixo da média calculada, comparados com os corpos de prova de mesmo traço e ficando com 22% e 17% abaixo das respectivas médias calculadas. Não temos como avaliar pontualmente a razão dessa diferença apresentada nos resultados de resistência a compressão do T2CP1 e do T3CP3, pois cada corpo de prova de um mesmo traço faz parte de uma mesma betonada, com as quantidades calculadas na Tabela 4 e volume calculados na Tabela 5. Todos os corpos de prova, de cada traço, tiveram os seus componentes pesados, lançados, betonados, moldados e curados juntos e sem a adição de qualquer outro componente que possa alterar a sua composição básica. Portanto, as variações obtidas muito provavelmente estão associadas a variáveis como heterogeneidade do concreto, variações do próprio ensaio, e outros, porém não se descarta a possibilidade de um erro pontual nas respectivas moldagens ou cura desses corpos de prova.

O relatório completo do ensaio de resistência a compressão está apresentado no APÊNDICE A.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO NBR 9779/2012

O ensaio de absorção de água por capilaridade, com base na norma NBR 9779 (2012), realizou-se o ensaio em 4 corpos de prova de cada traço, aos 28 dias de idade, curados na câmara úmida. Esse ensaio avalia a absorção de água por capilaridade de duas maneiras distintas: Através da variação de peso ao longo do tempo quando a superfície está em contato com a lâmina de água e ao final das 72 h mede-se a altura da água dentro de corpo de prova. Os resultados obtidos durante o ensaio estão descritos na Tabela 9.

Aditivo cristalizante	Nº CP	MASSA APÓS TEMPOS DE IMERSÃO (g)						PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	
		27/10/2020			28/10/2020	29/10/2020	30/10/2020		
		09:00	12:00	15:00	09:00	09:00	09:00		
		inicial	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas	Profundidade (mm)	Máxima (g/cm²)
Traço 1	1_1	3721,4800	3725,4900	3725,9300	3727,5500	3728,5800	3729,5800	11,000	8,100
	1_2	3738,1000	3742,0300	3742,4200	3744,2900	3745,2800	3746,1500	15,000	8,050
	2_1	3723,2900	3727,1600	3727,5100	3729,2300	3730,0500	3730,8900	10,000	7,600
	2_2	3764,2900	3768,9200	3769,4300	3771,7300	3772,7500	3773,7700	15,000	9,480
Traço 2	1	3707,7300	3713,5700	3714,3200	3716,8200	3718,4800	3719,8300	23,000	12,100
	2	3673,8000	3677,6900	3678,3800	3680,6800	3682,0900	3683,2000	20,000	9,400
	3	3649,8900	3654,4700	3655,0400	3657,2600	3658,5800	3659,5200	18,000	9,630
	4	3658,4700	3663,5900	3664,0400	3666,5900	3667,5700	3668,7100	20,000	10,240
Traço 3	1	3670,2200	3676,3800	3676,9400	3679,3900	3681,4000	3682,8300	24,000	12,610
	2	3610,2600	3616,0600	3616,6900	3619,2600	3621,1000	3622,3000	21,000	12,040
	3	3599,7900	3605,7400	3606,4500	3609,3600	3611,0000	3612,4300	21,000	12,640
	4	3576,7700	3583,2300	3583,9300	3587,3300	3588,8300	3590,3000	20,000	13,530
Traço 4	1	3541,1200	3546,0200	3547,5600	3550,8200	3552,5900	3554,2300	23,000	13,110
	2	3590,4600	3596,2300	3596,9200	3600,2400	3602,1400	3603,6000	27,000	13,140
	3	3532,5200	3538,3100	3538,8800	3541,7000	3543,3400	3544,6700	27,000	12,150
	4	3567,0400	3572,3000	3572,9400	3575,7600	3576,4600	3577,7500	26,000	10,710

Tabela 9. Valores obtidos no ensaio de absorção por lâmina de água (NBR 9779/2012)

A primeira medição da taxa de absorção capilar foi realizada em função dos tempos medidos após pesagem dos corpos de prova respectivamente no início (peso inicial do CP), 3 horas, 6 horas, 14 horas, 48 horas e 72 horas após sua imersão em lâmina de água e as taxas de absorção capilar foram mensuradas pela quantidade de gramas de água absorvida por área exposta à lâmina de água. A Figura 37 mostra os valores médios de absorção obtidos durante o ensaio (em peso de água).

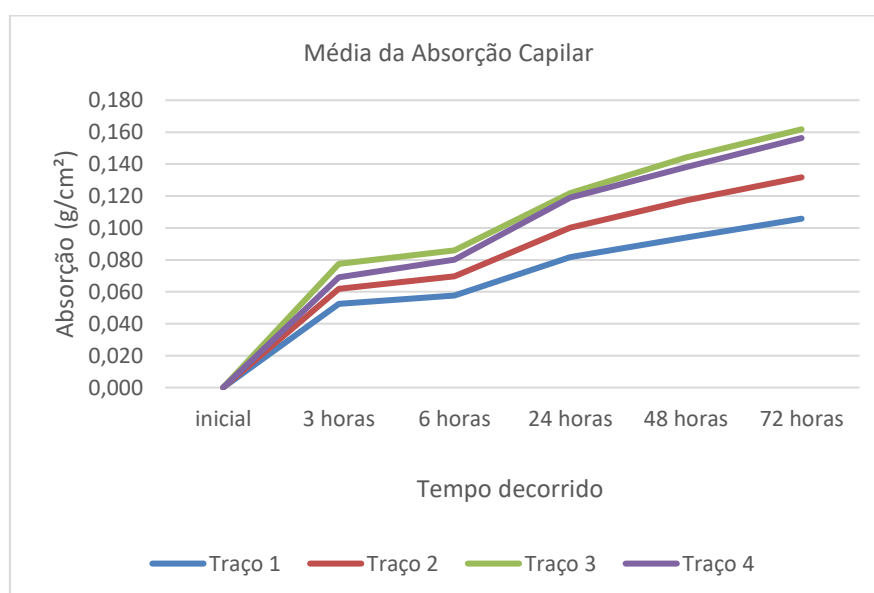


Figura 37. Resultado da média dos pesos obtidos no ensaio de absorção capilar (g/cm²)

A segunda medição da taxa de absorção capilar, em milímetros (mm), foi efetuada imediatamente após a última pesagem e depois de transcorridas às 72 horas de imersão dos corpos de prova em lâmina de água, as taxas de absorção capilar foram mensuradas medindo as alturas máximas de ascensão utilizando um paquímetro manual e visualmente. Esse procedimento foi realizado em seguida ao rompimento diametral do corpo de prova. A Figura 38 mostra a média dos valores obtidos. O APÊNDICE B mostra os resultados completos obtidos durante o ensaio.

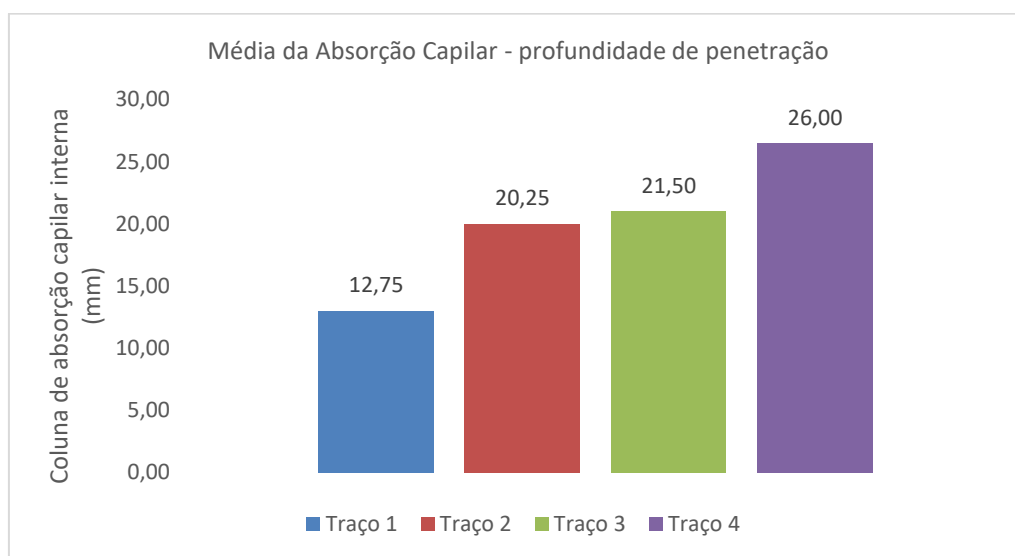


Figura 38. Média dos valores de profundidade de penetração de água no ensaio de absorção capilar

Os quatro traços apresentaram índices de absorção compatíveis com o esperado, já que a absorção de água aumentou a medida que a relação a/c aumentou.

Podemos verificar que conforme mostram os dados do ensaio de absorção por capilaridade, houve um pequeno desvio na tendência da absorção de água por capilaridade do traço 3. Tanto na medição visual da permeabilidade na qual a taxa de absorção é medida através de paquímetro manual quanto na medição feita pela pesagem dos corpos de prova em balança de precisão mostrou que o traço 3 apresentou uma permeabilidade muito próxima ao traço 4 e tem grande possibilidade de obter resultados de penetração do inibidor de corrosão muito próximos ao do traço 4, como se observa na Figura 37, na qual a curva apresentada pelos dois traços são extremamente semelhantes e próximas entre si.

Sendo assim, confrontando os resultados obtidos nos ensaios de ruptura de corpo de prova à compressão com os resultados do ensaio absorção de água por capilaridade podemos presumir que há condições para que os corpos de prova sejam porosos, que desenvolveram

poros comunicantes com a superfície e que na sua estrutura interna exista porosidade apropriada para que ocorra a penetração do inibidor de corrosão em todos os traços.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO

Após 24 horas da aplicação do inibidor de corrosão, notou-se a presença de cristais com aspecto esbranquiçado na superfície dos corpos de provas decorrente a alta concentração do inibidor de corrosão, conforme Figura 39. Este acúmulo de produto poderia estar relacionado à diversas situações, incluindo a posição da superfície horizontal facilitando um acúmulo de produto durante a aplicação, o pouco tempo de secagem ao ar antes da aplicação do inibidor e a presença da barreira de vapor ao redor dos corpos de prova, que possibilita a presença interna de uma determinada quantidade de umidade confinada nos CP's podendo dificultar a absorção do inibidor de corrosão, a lavagem simulada em condições de laboratório, na qual pode não ter sido suficiente para simular uma lavagem com jato de água a pressão.



Figura 39. Formação de sais esbranquiçados na superfície do corpo de prova após 24 horas de aplicação do inibidor

Os ensaios de avaliação da penetração de inibidor de corrosão foram realizados em 4 datas diferentes com intervalos de 13 entre as análises, sendo: 13, 26, 39, 52 dias após a aplicação do inibidor de corrosão. Em cada data realizou-se a análise de 2 corpos de prova por traço. Para a realização dos ensaios nomeamos as amostras de T1CP1 e T1CP2, T2CP1 e T2CP2, T3CP1 e T3CP2 e T4CP1 e T4CP2 e com três profundidades alternadas (de 1 a 2 cm, 3 a 4 cm e 5 a 6 cm). A Tabela 10 mostra o resultado positivo ou não para presença de inibidor de corrosão em cada uma das amostras analisadas e correlacionando com os dados de relação água/cimento, absorção capilar e resistência à compressão.

Ensaio de penetração de inibidor de corrosão																	
Corpos de prova moldados conforme Método ABCP	CP's	1		2		3		4		5		6		7		8	
		T1CP1		T1CP2		T2CP1		T2CP2		T3CP1		T3CP2		T4CP1		T4CP2	
Relação	água / cimento	0,40				0,50				0,60				0,70			
NBR 5379 / 2018	MPa - médio	49,04				34,99				28,64				22,62			
NBR 9779 / 2012	Média de peso (g/cm²)	8,31				10,54				12,71				12,68			
	Média da profundidade (mm)	12,75				20,25				21,50				25,75			
Ensaio realizado em papéis de cromatografia, onde:	13 dias	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N
		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N	
I - Consta início de penetração	26 dias	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N
		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N	
N - Não consta início de penetração e S - consta quantidade suficiente inibidor	39 dias	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 I	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 I	3_4 N
		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N	
	52 dias	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 S	3_4 N	1_2 N	3_4 N	1_2 S	3_4 N	1_2 S	3_4 N
		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N		5_6 N	

Tabela 10. Resultados dos ensaios de penetração do inibidor de corrosão

Iniciando a primeira bateria de ensaios no 13º dia após a aplicação do inibidor, nenhuma amostra retirada dos CP's de todos os traços (T1, T2, T3 e T4) apontou a presença de inibidor de corrosão em quantidade suficiente nas profundidades estudadas.

Com 26 dias após a aplicação do inibidor, realizou-se a segunda bateria de ensaios para análise de penetração e notou-se que ainda não se apresentaram quantidades suficientes de inibidor em nenhum dos traços e amostras ensaiadas. Segundo informado pelo fabricante em documentações técnicas, o inibidor pode penetrar no concreto aproximadamente 25 a 40 mm em um período de 1 a 2 meses. Baseados nessa informação, podemos verificar que aos 26 dias para a primeira camada estudada de 10 a 20 mm, a não identificação da presença do inibidor de corrosão era um resultado esperado e alinhado com as informações técnicas do produto para essa data de medição.

Na terceira bateria de ensaios para a análise de profundidade, com 39 dias após a aplicação do inibidor, percebe-se que houve uma reação no papel de cromatografia do inibidor nas amostras T4CP2 (traço 4, CP2) e T3CP1 (traço 3, CP1) na profundidade 1-2 cm cuja relação a/c é respectivamente 0,6 e 0,7 e possui alto índice de absorção superficial já que são os traços com maior absorção superficial dentre os avaliados. Entretanto, essa reação não foi considerada uma quantidade suficiente de produto, pois a coloração ficou menos intensa que a amostra padrão representada no papel de cromatografia. Ou seja, não se pode afirmar que houve penetração suficiente do inibidor nessa profundidade aos 39 dias.

Na quarta e última bateria de ensaios proposta para o estudo com 52 dias após a aplicação do inibidor de corrosão constatou-se que as amostras T3CP1, T4CP1 e T4CP2 apresentaram quantidades suficientes de inibidor de corrosão nas fatias de profundidade entre 1 e 2 cm. As demais amostras não apresentaram a influência de inibidor em nenhuma

profundidade, com isso, não foi possível analisar a penetração do produto nos traços com menor porosidade. Dessa forma, considera-se que o concreto de traço 4, aquele com maior absorção superficial, permitiu maior penetração que os demais concretos avaliados aos 52 dias, visto que as duas amostras coletadas demonstraram que houve penetração do inibidor de corrosão em uma profundidade de pelo menos 1 cm no tempo avaliado. O traço 3 acusou em uma das amostras (T3CP1) penetração suficiente na fatia de profundidade 1 a 2 cm aos 52 dias e outra amostra (T3CP2) que não identificou penetração do produto em quantidades suficientes, podendo essa diferença estar relacionada com a heterogeneidade natural do concreto. Portanto, baseado nos resultados obtidos, considera-se que o concreto que apresentou o maior valor de absorção foi aquele que demonstrou maior penetração do inibidor de corrosão visto que o produto foi encontrado nas duas amostras na profundidade de pelo menos 1 cm.

As fotos com todos os resultados obtidos nos ensaios, visto que no papel de cromatografia, estão apresentadas nos APÊNDICES E, F, G e H.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que foram atingidos os objetivos propostos no início desta pesquisa e que a hipótese foi corroborada, afinal pôde-se observar que:

- Nos ensaios de absorção de água por capilaridade deste experimento, as amostras do traço 3 e 4, com respectiva relação a/c de 0,6 e 0,7, apresentaram um índice absorção superficial superior em relação aos demais traços ensaiados e que os traços 3 e 4 apresentaram uma suficiente quantidade de inibidor de corrosão por impregnação entre as profundidades de 1 a 2 cm;
- Ressalta-se que no traço 3, com uma relação a/c de 0,6, apenas a amostra T3CP1 apresentou a presença de inibidor de corrosão em quantidades suficientes na profundidade 1-2 cm aos 52 dias após a sua aplicação. Logo, devemos destacar que essa distorção pontual, apresentada nos resultados, também estava presente no ensaio de compressão e de absorção capilar deste traço. Os demais traços, segundo o ensaio colorimétrico, não apresentaram quantidade suficiente de inibidor de corrosão em nenhuma das profundidades estudadas, porém não podemos descartar a hipótese de que o inibidor de corrosão esteja presente na camada superior de 0 a 1 cm dos CP's, já que esta profundidade foi descartada da avaliação deste estudo;
- O período de 52 dias, determinado para a realização dos ensaios neste procedimento experimental, pode ter sido insuficiente para que algum dos traços apresentasse uma penetração de inibidor de corrosão de pelo menos 50 mm, cobrimento máximo previsto na norma ABNT NBR 6118 (2014) para estruturas de concreto armado. Podemos dizer que conseguimos atingir o cobrimento de 10 mm neste período máximo adotado neste experimento no traço de menor absorção capilar;
- O fato de que os CP's foram retirados da câmara úmida 24 horas antes da aplicação do inibidor de corrosão e que os corpos de prova já possuíam a aplicação de uma barreira epóxi neste momento, utilizada para proteger contra a perda do inibidor de corrosão, pode ter influenciado na umidade interna dos corpos de prova. Apesar da medição de umidade superficial realizada na área exposta ao ambiente dos corpos de prova ter apresentado resultados abaixo dos 4%, há possibilidade de que no momento da aplicação ainda havia bastante

umidade encapsulada nos CP's e deste modo, essa umidade pode ter afetado tanto a velocidade quanto a profundidade de penetração do inibidor de corrosão.

- Com esse estudo, pode-se validar parcialmente a hipótese de que a penetração do inibidor de corrosão por impregnação é mais rápida em concretos com índices de porosidade maiores. Do mesmo modo, não foi possível observar que os concretos pouco porosos permitem a penetração do inibidor de corrosão por impregnação através da metodologia adotada.
- Também não foi possível observar penetração maior que 2 cm no procedimento experimental proposto e dentro do tempo avaliado neste estudo.
- Com os resultados obtidos, podemos destacar que para utilizar uma proteção contra corrosão tal como o inibidor por impregnação, devemos levar em consideração a porosidade do concreto que será aplicado para garantir o melhor desempenho e um resultado satisfatório.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros, recomenda-se as seguintes análises:

- Aumentar o tempo entre as medições e a aplicação do inibidor visando validar se a penetração segue avançando após 52 dias;
- Realizar a análise da quantidade de inibidor na profundidade entre 0 a 1 cm visando validar a presença do inibidor superficialmente;
- Reduzir o consumo por demão e aumentar o número de demãos visando evitar acúmulos de produtos;
- Comparar a penetração dos inibidores de impregnação em concretos secos e concretos úmidos para avaliar a influência da umidade na penetração do inibidor;
- Realizar o estudo em amostras de concretos com a presença de íons de cloretos para analisar se há influência da presença de cloretos na penetração do inibidor;
- Avaliar a penetrabilidade do inibidor de corrosão em concretos já carbonatados;
- Realizar a análise da penetrabilidade do inibidor em testemunhos de concreto retirados de estrutura existente já com alguns anos de uso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **“O desafio da sustentabilidade na construção civil”**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222 **“ACI manual of concrete practice”**. Detroit, 1991. V.1: Corrosion of metals in concrete.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 211.1-81 **“Standard Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”**. Michigan, 1985. Part 1 – Materials and General Properties of Concrete, 32pp.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J.A. **“Tendencias actuales en La investigación sobre corrosión de armaduras”**. Informes de la Construcción, v. 40n. 398p. 7-14 nov.dic., 1988.

ANDRADE, C.; FELIU, S.; Fundamentos teóricos de la corrosión. In: **“Corrosión y Protección Metálicas”**, Coord.. Carmen Andrade; Sebastián Feliu. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1991, p. 3-25.

ANDRADE, C. **“Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras”**. Trad. de Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, 1992.

ANDRADE, C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. Cement and Concrete Research, v. 23, 1993. p. 724-742.

ANDRADE, J. J. O. **“Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos”**. Porto Alegre, 2001 (Tese).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica”**. NBR 9778. Rio de Janeiro. 2005 - Versão corrigida em 2009 e Versão confirmada em 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade”**. NBR 9779. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado”**. NBR 7480. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”**. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2015 - Versão corrigida - 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”**. NBR 5739. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento ”**. NBR 12655. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”**. NBR 8802. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Agregado para Concreto”**. NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Execução de estruturas de concreto - Procedimento”**. NBR 14931. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Água para amassamento do concreto”**. NBR 15900-1. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos”**. NBR 6118. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”**. NBR NM 67. Rio de Janeiro 1998.

BARBOSA, D.C.; BARDELLA, P.S.; CAMARINI, G. **“Avaliação da Carbonatação natural em concretos produzidos com e sem sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura”**. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto. 2005. p. 15.

BARBUDO, M. A. S. **“Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón”**. Madrid, 1992. Tese (Doutorado) - Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias químicas. Instituto de la construccion y del cemento - Eduardo Torroja.

BERTOLINI, L. **”Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção”** – São Paulo-SP: Editora Oficina de Textos, 414p. 2010.

BOGGIO, Aldo J. **“Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concreto”**. Dez, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre.

BOHNI, H. **“Corrosion in reinforced concrete structures”**. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, 2005.

BROOMFIELD, J. P. **“Corrosion of steel in concrete – Understanding, investigation and repair”**, 1ed., Londres, E & FN SPON, 1997.

BROOMFIELD, J. **“Corrosion Inhibitors”**. Dr J P Broomfield, 2020. Disponível em: <http://www.jpbroomfield.co.uk/pages/corrosion-inhibitors.php>. Acesso em 17/10/2020.

CABRAL, A. E. B. **“Avaliação dos Sistemas de Reparo Utilizados em Estruturas Atacadas por Cloretos Através da Resistência de Polarização”**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

CAIRONI, M. **“Patologia e restauro dei conglomerati in ambiente marino”**. L’Industria Italiana del Cemento. Roma, 48(9): 2 - 9. 1977.

CALLISTER, JR.W. D. **“Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”**. 5ª. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC Livros Técnicos e Científicos S/A, 2000.

CÂNOVAS, M. F. **“Patologia e terapia d Concreto Armado”**. São Paulo-SP: Editora PINI, 1998.

CARMONA, A; CARMONA, T. **“Boletim Técnico 03 – Fissuração nas Estruturas de Concreto”**. Mérida, México: ALCONPAT Internacional, 2013. 20p.

CASCUDO, O. **“O controle da corrosão de armaduras em concreto”**. 1ª. ed. Goiânia: PINI e UFG, 1997.

CEB 1984. **“Durability of Concrete Structures”**. Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, Mai, 1983; CEB-Bulletin D’Information, N.º 152, 1984.

CHEMICAL INHIBITORS. Nace International. Disponível em: <https://www.nace.org/resources/industries-nace-serves/chemical-inhibitors#articles>. Acesso em: 19/10/2020.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 1504-1: Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições**. Bruxelas, 2005.

CYTED. **Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico de corrosion en estructuras de hormigón armado**. Programa Iberoamericano d Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprogrma XVCorrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales. 2. ed. Julho, 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1504-9: Products and systemas for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 9: General principles for the use of products and systems**. Brussels, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1504-11: Products and systemas for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part : General principles for the use of products and systems**. Brussels, 2008.

FELIÚ, S. **“Principios de corrosión electroquímica y tipos de ataque”**. In: FERNANDEZ, J.A. G. (Ed.) **“Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión”** 3ª. Madrid: CSIC, 1984. p. 10 – 44.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. **“Boletim Técnico 06 – Corrosão das armaduras de Concreto”**. Mérida, México: ALCONPAT Internacional, 2013. 30p.

FONTANA, M. G.; GREENE, N. D. **“Corrosion Enginneering”**. Editora MC Graw Hill. 2 ed. Singapura. 1978.

FONTANA, M. G. **“Corrosion”**. 3ª. ed. MacGraw Hill International Edition, 470p., 1987.

FUSCO, P. B. **“Estruturas de Concreto – Fundamentos do Projeto Estrutural”**.. Editora. USP – McGraw-Hill do Brasil – São Paulo, 1976.

GENTIL, V. **“Corrosão”**. 3ª. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC Livros Técnicos e Científicos S/A, 1996.

GENTIL, V. **“Corrosão”**. 4ª. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC Livros Técnicos e Científicos S/A, 2006.

GOODWIN, F; HUANG, I. **“Significance of Evaluation Methods for Surface-Applied Inhibitors”**. *Materials Performance*, 2020. Disponível em: <https://materialsperformance.com/articles/chemical-treatment/2019/05/significance-of-evaluation-methods-for-surface-applied-inhibitors>. Acesso em: 11/10/2020.

HAIBING, Z.; LI W. **“The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete”**. *Construction and Building Materials*, 2012.

HEIYANTUDUWA, R.; ALEXANDER, M. G.; MACKECHNIE, J.R. **“Performance of a penetrating corrosion inhibitor in concrete affected by carbonation induced corrosion”**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006;18(6):842-850. DOI: 10.1061/(ASCE)08991561(2006)18:6(842

HELENE, P. R. L. **“Corrosão de armaduras para concreto armado”**. São Paulo: Pini / IPT, 1986.

HELENE, P. R. L. **“Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **“Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto”**. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. Anais... São Leopoldo, 1997.

HELENE, P. R. L. **“Corrosão de armaduras para concreto armado”**. 4. ed. São Paulo: Pini, 1999, 48p.

LEE, H; SARASWATHY, V; KWON, S; KARTHICK, S. **“Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review”**. Intech, 2018. Disponível em: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/58232.pdf>. Acesso em: 11/10/2020.

LOPES, A. N. M. **“Avaliação comparativa de concreto com e sem sílica ativa para resistência 50 d 60 MPa”**, Brasília, 1999. 170p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia de Brasília.

MEDEIROS, M. H. F. **“Estimativa da elevação da vida útil do concreto armado através de difusão de cloretos”**. – BT/PCC/504 - Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - EPUSP, 2008.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. **“Durabilidade e proteção do concreto armado”**. *Téchne: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo)*, v. 151, pp. 50-54, 2009b.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. R. L. **“Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete”**. *Materials and Structures*, v. 41, n.1, p. 59-71, 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P., J., M. **“Concreto: estrutura, propriedade e materiais”**. São Paulo. Ed. PINI, 573p. 1994.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **“Concreto: microestrutura, propriedades e materiais”**. 2008.

MEIRA, G., R. **“Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado”**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MEIRA, G., R. **“Corrosão de armaduras em estruturas de concreto – Fundamento, Diagnóstico e Prevenção”**. João Pessoa. Ed IFPB, 2017. 130p.

MYRDAL, R. **“Corrosion Inhibitors – State of the Art.”** COIN Project report 22, SINTEF Building and Infrastructure, 2010.

MONTICELLI, C. **“Corrosion Inhibitors”**. Encyclopedia of Interfacial Chemistry, 2018.

MORRIS, W.; VICO, A.; VÁZQUEZ, M. **“The performance of a migrating corrosion inhibitor suitable for reinforced concrete”**. Journal of Applied Electrochemistry, 2003.

NEVILLE, A. M. **“Propriedade do Concreto”**. 2.ed. São Paulo. PINI, 1997. 828p.

NINCE, A. A. & CLIMACO, J. C. T. S. **“Levantamento de Dados sobre Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste do Brasil”**. In: International Congress on High - Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. Proceedings. Florianópolis. jun. 1996. p. 414-424.

NUNES, L. P. **“Corrosão e proteção anticorrosiva”**. Rio de Janeiro. Apostila Petrobras, 1982. p.116.

OLLIVIER, J. P. **“Durability of Concrete”**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/192. São Paulo, 1998. 129p.

ORMELLESE, M.; GOIDANICH, S.; BOLZONI, F.; PEDEFERRI, M.P. **“Corrosion inhibitor in reinforced concrete structures Part 3 – Migration of inhibitors into concrete”**. Corrosion Engineering Science and Technology, 2011.

PANOSSIAN, Z. **“Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas”**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT2032, 1993.

PEDEFERRI, P. **“Corrosione e protezione dei materiali metallici”**. Clup, 1978.

PEDEFERRI, P. **“Corrosione e protezione dei materiali metallici”**. In: apostila de aula no curso de Engenharia de Materiais, ano acadêmico, 2003.

PEREIRA, C. **“Tipos de cimento: Características e especificações”**. Escola Engenharia, 2013. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>. Acesso em: 10 de novembro de 2020

PORRERO, J. I. **“Causas que em la pratica producen la corrosión de las armaduras de concreto”**. Caracas - Boletim Del IMME, 12 (49): 25-49 (1975).

POURBAIX, M. **“Curso sobre corrosão eletroquímica”**. Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Industrial, 90p., 1961.

POURBAIX, M. **“Lectures on Corrosion”** New York: Plenum Press, 1973.

POURBAIX, M. **“Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions”**. Brussels: CEBELCOR, 1974. 644 p.

POURBAIX, M. **“Lecciones de corrosión electroquímica”**. 3. ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987. 387 p.

RIBEIRO, F.H.M. **“Desempenho de inibidores de corrosão como método de prevenção e reparo para estruturas de concreto armado”**. 2001. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

RIBEIRO, D. V.; HELENE, P. R. L.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASCUDO, O. **“Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção”** Rio de Janeiro. Ed. LTC, 370p. 2020.

RINCÓN, I. T. *et al.* **“Manual de Inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado”**. Rio de Janeiro, CYTED, 1998. p. 13.

RIVETTI, M; ANDRADE, J; AMORIM, N; RIBEIRO, D.V. **“Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete”**. Intech, 2018.

RODRIGUES, P. F. P. **“Parâmetros de Dosagem do Concreto”**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; GLASSER, F. P. **“Analysis of the steel: concrete interface”**. In: PAGE, C. L.; TREADAWAY, H. W. J.; BAMFORTH, P. B.; **“Corrosión of reinforcement in concrete”**. London: Society of Chemical Industry, Elsevier Applied Science, 1990. p. 74 – 86.

SARASWATHY, V.; SONG, H-w. **“Improving the durability of concrete by using inhibitors”**, Building and Environment. Building and Environment. 2007;42(1):464-472. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.08.003

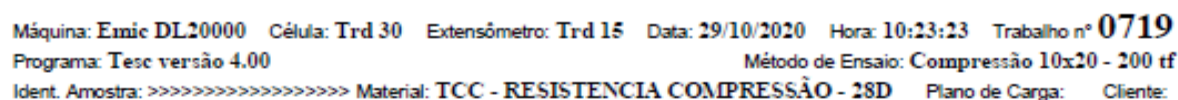
SHAFFER Jr, T. F. **“Aço galvanizado para estruturas de concreto armado”**. In: Simpósio Sul-Americano de Corrosão Metálica, 2, Rio de Janeiro, 1971, Anais. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Corrosão, Instituto Brasileiro de Petróleo, p. 233-39.

SHREIR, L.L.; JARMAN, R.A.; BURNSTEIN, G.T. **“Corrosion”**. 3ª. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

TANNER, P.; MACKECHNIE, J.; SCOTT, A. **“The role of corrosion inhibitors in maintaining concrete durability – 15 years’ experience in New Zealand and around the world”**. NZ Concrete Industry Conference, 2013.

TUUTTI, K. **“Corrosion of steel in concrete”**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469p.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. **“Performance-based standard specifications for maintenance and repair of concrete structures in Japan”**. Structural Engineering International, v. 4, p. 359-366, 2007.



**APÊNDICE B – TABELA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO
SEGUNDO ABNT 9779 (2012)**

nº CP	inicial	(3hs-inicial)			(6hs-inicial)			(24hs-inicial)			(48hs-inicial)			(72hs-inicial)			Média profundidade de penetração (mm)
		3hs	dif (g)	(%)	6hs	dif (g)	(%)	24hs	dif (g)	(%)	48hs	dif (g)	(%)	72hs	dif (g)	(%)	
1-1	3721,48	3725,49	4,01	0,10775	3725,93	4,45	0,11958	3727,55	6,07	0,16311	3728,58	7,10	0,19	3729,58	8,10	0,22	11
1-2	3738,10	3742,03	3,93	0,10513	3742,42	4,32	0,11557	3744,29	6,19	0,16559	3745,28	7,18	0,19	3746,15	8,05	0,22	15
2-1	3723,29	3727,16	3,87	0,10394	3727,51	4,22	0,11334	3729,23	5,94	0,15954	3730,05	6,76	0,18	3730,89	7,60	0,20	10
2-2	3764,29	3768,92	4,63	0,12300	3768,43	4,14	0,10998	3771,73	7,44	0,19765	3772,75	8,46	0,22	3773,77	9,48	0,25	15
1	3707,73	3713,57	5,84	0,15751	3714,32	6,59	0,17774	3716,82	9,09	0,24516	3718,48	10,75	0,29	3719,83	12,10	0,33	23
2	3673,80	3677,69	3,89	0,10588	3678,38	4,58	0,12467	3680,68	6,88	0,18727	3682,09	8,29	0,23	3683,20	9,40	0,26	20
3	3649,89	3654,47	4,58	0,12548	3655,04	5,15	0,14110	3657,26	7,37	0,20192	3658,58	8,69	0,24	3659,52	9,63	0,26	18
4	3658,47	3663,59	5,12	0,13995	3664,04	5,57	0,15225	3666,59	8,12	0,22195	3667,57	9,10	0,25	3668,71	10,24	0,28	20
1	3670,22	3676,38	6,16	0,16784	3676,94	6,72	0,18310	3679,39	9,17	0,24985	3681,40	11,18	0,30	3682,83	12,61	0,34	24
2	3610,26	3616,06	5,80	0,16065	3616,69	6,43	0,17810	3619,26	9,00	0,24929	3621,10	10,84	0,30	3622,30	12,04	0,33	21
3	3599,79	3605,71	5,92	0,16445	3606,45	6,66	0,18501	3609,36	9,57	0,26585	3611,00	11,21	0,31	3612,43	12,64	0,35	21
4	3576,77	3583,23	6,46	0,18061	3583,93	7,16	0,20018	3587,33	10,56	0,29524	3588,83	12,06	0,34	3590,30	13,53	0,38	20
1	3541,12	3546,02	4,90	0,13837	3547,56	6,44	0,18186	3550,82	9,70	0,27392	3552,59	11,47	0,32	3554,23	13,11	0,37	23
2	3590,46	3596,23	5,77	0,16070	3596,92	6,46	0,17992	3600,24	9,78	0,27239	3602,14	11,68	0,33	3603,60	13,14	0,37	28
3	3532,52	3538,31	5,79	0,16391	3538,88	6,36	0,18004	3541,70	9,18	0,25987	3543,34	10,82	0,31	3544,67	12,15	0,34	27
4	3567,04	3572,30	5,26	0,14746	3572,94	5,90	0,16540	3575,76	8,72	0,24446	3576,46	9,42	0,26	3577,75	10,71	0,30	26

APÊNDICE C – SEQUÊNCIA DE FOTOS DA EXECUÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO E ENSAIO DE ABSORÇÃO



Pesagem da água de amassamento, conforme NBR 15900-1 (2009)



Separação do agregado miúdo após pesagem – Areia Grossa



Separação do agregado graúdo após pesagem – Brita 1



Pesagem do aditivo plastificante



Pesagem do cimento CP II F - 32



Aplicação de desmoldante nas formas



Adensamento manual do concreto nas formas



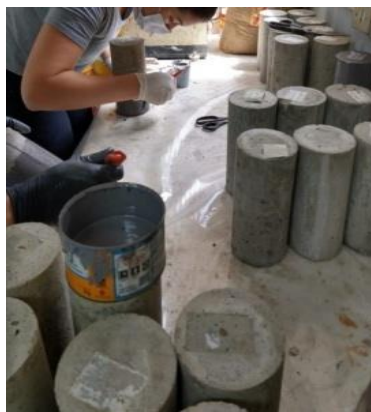
Final da moldagem dos CP's



CP's na câmara úmida após desforma



Aplicação parcial do revestimento epóxi no perímetro dos CP's para ensaio de absorção



Aplicação de revestimento epóxi no perímetro dos CP's para ensaio de absorção.



Ensaio de absorção de água por capilaridade e recipiente com a lâmina d'água e espaçadores no fundo



Detalhe da secagem do ensaio de absorção de água por capilaridade



Detalhe da pesagem dos CP's durante o ensaio de absorção de água por capilaridade



Rompimento à tração por compressão diametral para medição da absorção (visual)



Medição da profundidade de penetração no ensaio de absorção - visual



Aplicação do revestimento epoxídico no perímetro e face superior dos CP's para formação de barreira de vapor antes da aplicação do inibidor



Revestimento epoxídico no perímetro e face superior dos CP's para formação de barreira de vapor antes da aplicação do inibidor

APÊNDICE D – SEQUÊNCIA DE FOTOS DA APLICAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NOS CPS E REALIZAÇÃO DE TESTE QUALITATIVO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO



Aplicação do Inibidor de Corrosão na face sem epóxi dos CP's utilizando pincel e com medição de consumo por peso



Inibidor aplicado sobre a superfície do corpo de prova, ainda úmido



Lavagem superficial dos CP's nas 24 horas após a aplicação do inibidor de corrosão.



Marcação das fatias para utilização no ensaio



Rompimento do corpo de prova à tração por compressão diametral para facilitar retirada das amostras



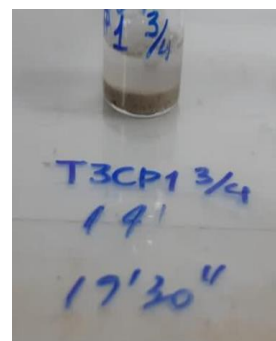
Corte das fatias com utilização de serra de corte



Detalhe das fatias e da retirada das amostras dos CP's



Esmagamento da amostra do concreto para obter pó menor de 1mm



Mistura da amostra com água deionizada e marcação do tempo de agitação de cada amostra e repouso



Separação das seringas para utilização no ensaio de penetração do inibidor



Coleta e filtragem do líquido da amostra após agitação e repouso



Capilares utilizados para aplicação das amostras no papel de cromatografia



Aplicação das amostras no papel de cromatografia



Aplicação do reagente A sobre o papel de cromatografia



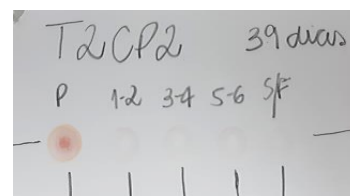
Secagem do reagente A com secador em baixa potência a 30 cm de distância do papel



Aplicação do reagente B sobre o papel de cromatografia

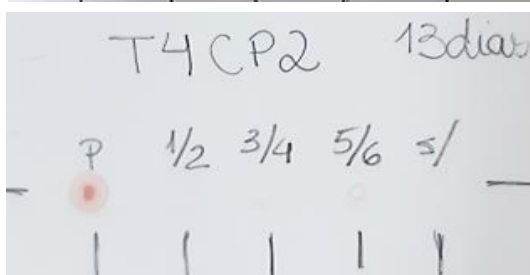
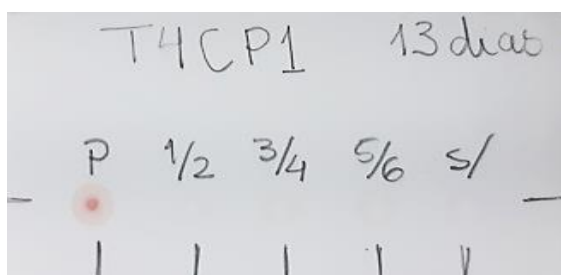
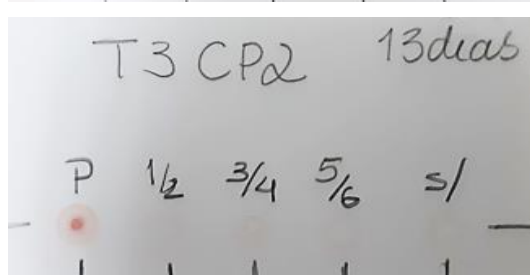
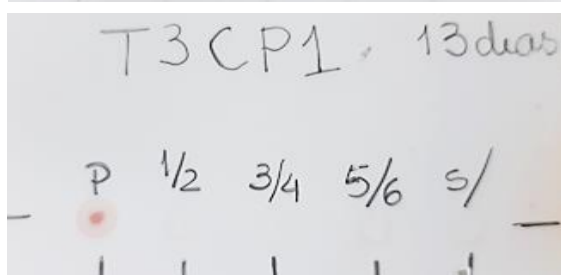
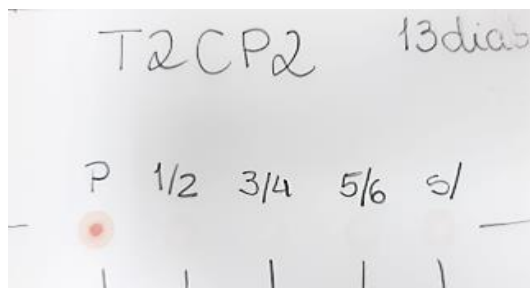
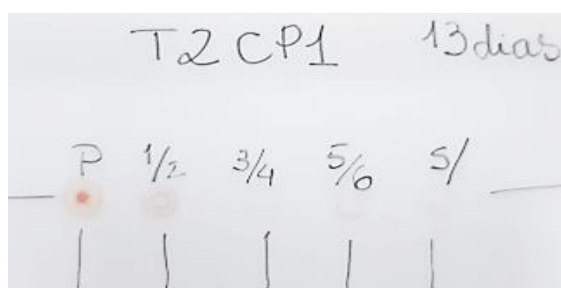
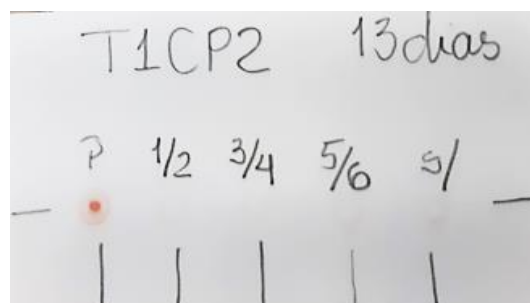
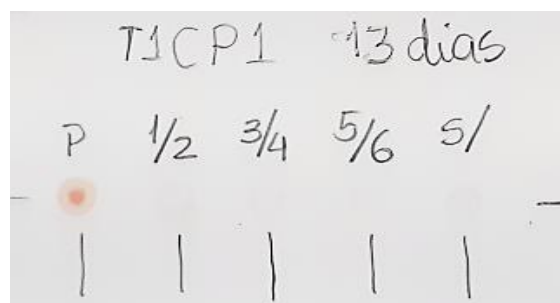


Aquecimento do papel de cromatografia após aplicação do reagente "B" com secador em alta potência

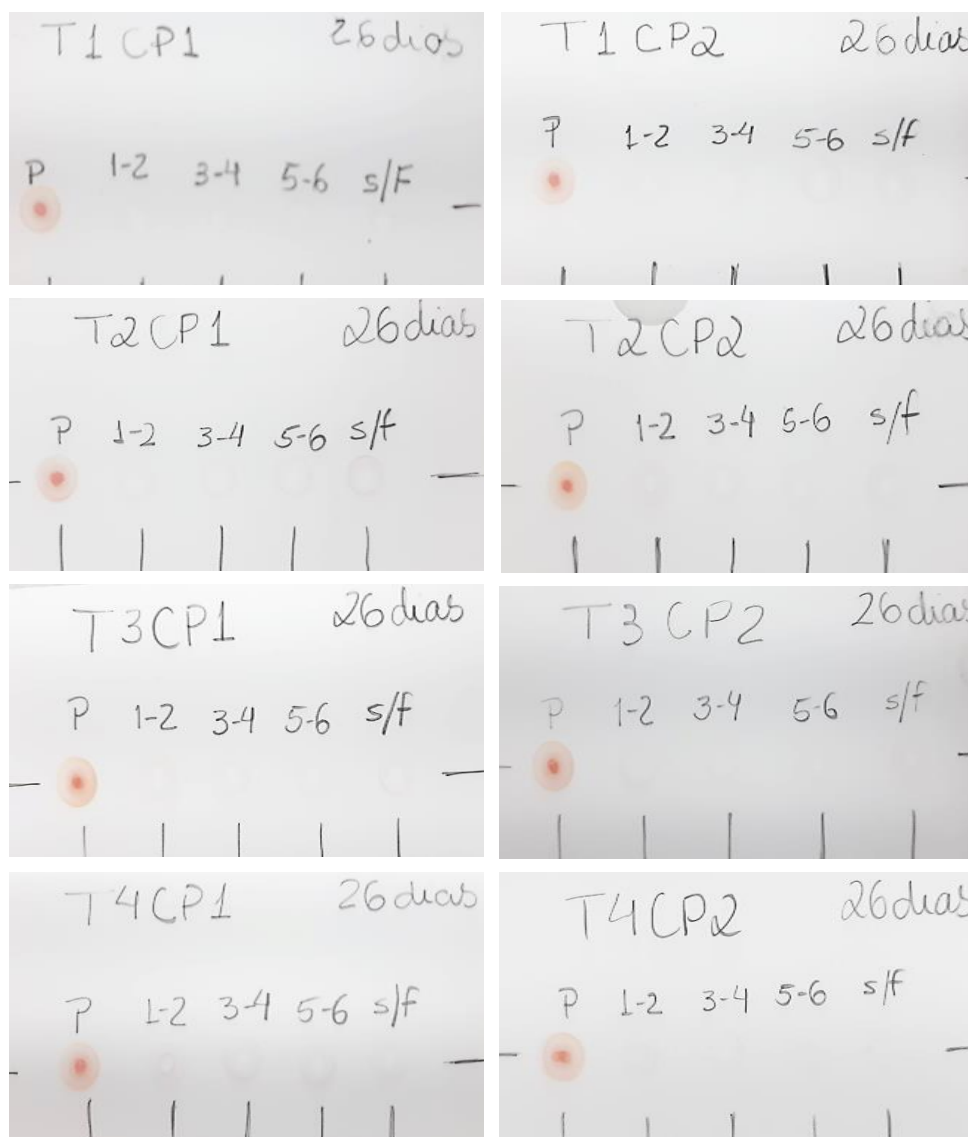


Papel de cromatografia após aquecimento. Consta-se que há quantidades suficientes de inibidor quando a amostra apresenta coloração rosada igual ou mais forte que a amostra padrão "P"

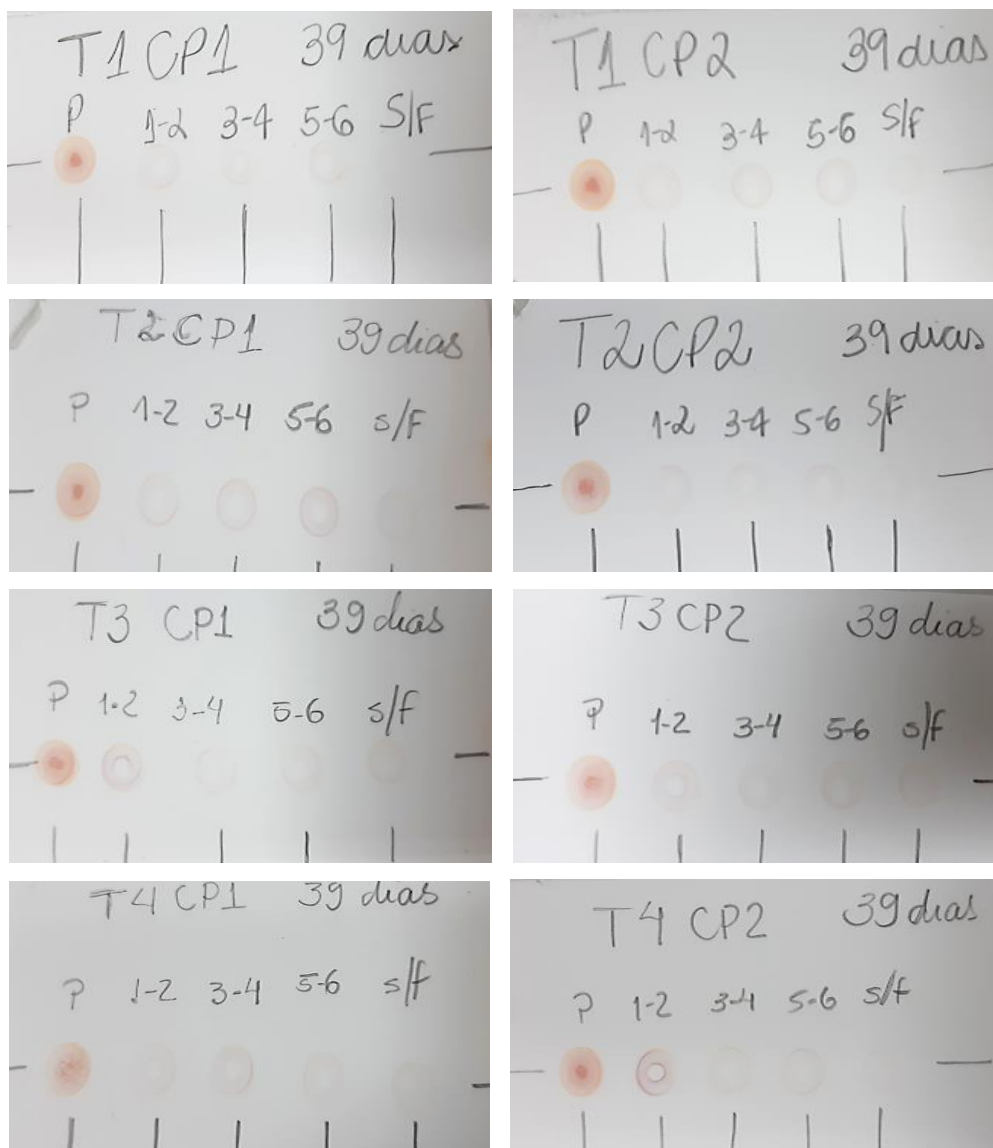
APÊNDICE E – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 13º DIA APÓS APLICAÇÃO (PRIMEIRA DATA DE MEDIÇÃO)



APÊNDICE F– FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 26º DIA APÓS APLICAÇÃO (SEGUNDA DATA DE MEDIÇÃO)



APÊNDICE G – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 39º DIA APÓS APLICAÇÃO (TERCEIRA DATA DE MEDIÇÃO)



APÊNDICE H – FOTOS DOS PAPÉIS DE CROMATOGRAFIA COM RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO INIBIDOR DE CORROSÃO NO 52º DIA APÓS APLICAÇÃO (QUARTA DATA DE MEDIÇÃO)

