

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
LETÍCIA LUZ LOBO

ANÁLISE DA CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
COM ADITIVO INIBIDOR DE CORROSÃO

CASCADEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
LETÍCIA LUZ LOBO

**ANÁLISE DA CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
COM ADITIVO INIBIDOR DE CORROSÃO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professora Orientadora: Mestre Eng. Civil Andréa Resende Souza

CASCADEL - PR

2017

ATA DE DEFESA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por estar sempre me guiando nesse caminho e me dando forças quando as dificuldades pareciam ser mais fortes, ajudando em qualquer obstáculo.

Em segundo lugar, agradeço a minha família, por nunca duvidar de minha capacidade e sempre me apoiar, desde primeira instância, a concretizar um projeto - cursar Engenharia civil. Em especial ao meu querido irmão falecido, que mesmo distante me acompanhou durante toda essa jornada.

Quero agradecer a professora e orientadora Andrea Resende Souza, por ajudar em todos os momentos e passar as devidas recomendações necessárias para que tudo desse certo e esse projeto pudesse ser concretizado.

Agradeço aos meus colegas, por me trazerem experiências e aprendizados para minha vida, além de me mostrarem como devemos aprender a lidar com as diferenças entre todos, que cada um contribui de alguma forma.

Por fim, menos importante, sou grata aos professores por me trazerem tanto conhecimento e por proporcionar desafios a mente do que é impossível.

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de analisar a corrosão na armadura do concreto autoadensável com aditivo inibidor de corrosão, verificando também a questão de sua trabalhabilidade e resistência à compressão, haja vista que o concreto autoadensável é um material considerado como novidade no Brasil. Por outro lado, a corrosão é considerada uma das manifestações patológicas mais incidentes e graves nas estruturas de concreto armado, sendo imprescindível analisar a durabilidade de concretos autoadensáveis contra a corrosão. A metodologia utilizada no trabalho consistiu em ensaios realizados em laboratório para dosagem e verificação das propriedades do concreto tanto no estado fresco como endurecido, com a utilização do aditivo inibidor Sika Ferrogard-901. Quanto a confecção do traço foi utilizado o CP V-ARI, o calcário, a areia, a brita 0, água e o aditivo superplastificante TEC-FLOW 7030 (1:0,25:2,10:1,70:0,45:1,25%) com adição de teores de 0 kg/m³, 10 kg/m³ e 14 kg/m³ de aditivo inibidor na massa de concreto. Desse modo, por meio da execução do ensaio pelo método de CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão modificada) verificou-se o grau de corrosão nos vergalhões de aço, por meio da moldagem de 21 corpos de prova, sendo 9 para o ensaio CAIM e 12 para o ensaio de compressão. No ensaio CAIM, as amostras ficaram submetidas ao ensaio por 28 dias, obtendo valores de grau de corrosão de 2,18%, 1,91% e 1,79% para os teores indicados. Quanto a resistência à compressão obteve-se valores máximos de 34,6 MPa, 29,1 MPa e 27,8 MPa para as mesmas adições respectivamente. Portanto, avaliando todos os ensaios tanto no estado fresco, quanto endurecido, o melhor teor para utilização foi de 10 kg/m³ por apresentar pouca diferença de 0,12% no grau de corrosão de 1,3 MPa na resistência em relação ao teor de 14 kg/m³, além de no estado fresco apresentar a fluidez e habilidade passante mais ideal.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Corrosão. Inibidor. CAIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cone de Abrams.	19
Figura 2: Instrumentos.	20
Figura 3: Caixa-L.	21
Figura 4: Funil-V.	22
Figura 5: Processo de corrosão eletroquímica na armadura do aço.	26
Figura 6: Ensaio CAIM nos corpos de prova.	29
Figura 7: Metodologia para confecção do concreto autoadensável.	34
Figura 8: Barras de aço.	38
Figura 9: Esquema de realização do ensaio CAIM.	38
Figura 10: Ensaio CAIM.	39
Figura 11: Corpos de prova a serem rompidos.	39
Figura 12: Limpeza das barras.	40
Figura 13: Ensaio de espalhamento do primeiro traço.	42
Figura 14: Ensaio de espalhamento do segundo traço.	43
Figura 15: Ensaio de espalhamento do terceiro traço.	43
Figura 16: Inspeção visual.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do agregado miúdo.....	32
Tabela 2: Características do pedrisco.	32
Tabela 3: Composição do traço.	34
Tabela 4: Classes de espalhamento (SF).....	36
Tabela 5: Classes de viscosidade plástica aparente (t500).....	36
Tabela 6: Classes de viscosidade plástica aparente funil-V.	37
Tabela 7: Resultados de espalhamento.	44
Tabela 8: Resultados de escoamento.	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Oxidação.....	28
Equação 2: Redução.....	28
Equação 3: Média aritmética dos diâmetros perpendiculares	36
Equação 4: Razão da habilidade passante pelas barras de aço	Erro! Indicador não definido.
Equação 5: Grau de corrosão nas armaduras.....	40

LISTA DE SIGLAS

CCV – Concreto Convencional

CAA – Concreto Autoadensável

CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1.1 INTRODUÇÃO	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	15
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
CAPÍTULO 2	16
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.1 Concreto Autoadensável	16
2.1.1.1 Cimento	17
2.1.1.2 Adições minerais	17
2.1.1.3 Agregados	18
2.1.1.4 Aditivos	18
2.1.2 Determinação das características do CAA no estado fresco	19
2.1.2.1 Método Cone de Abrams	19
2.1.2.2 Método da caixa-L	20
2.1.2.3 Método do funil-V	21
2.1.3 A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado	22
2.1.4 Deterioração das estruturas de concreto armado	23
2.1.5 Corrosão	24
2.1.5.1 Formas de corrosão	24
2.1.5.1.1 Corrosão química	25
2.1.5.1.2 Corrosão eletroquímica	25
2.1.6 Inibidores de corrosão	27
2.1.6.1 Classificação dos inibidores	28
2.1.6.1.1 Sika FerroGard-901	28
2.1.7 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)	29
CAPÍTULO 3	31
3.1 METODOLOGIA	31
3.1.1 Tipo de estudo	31
3.1.2 Caracterização dos materiais	31
3.1.2.1 Caracterização do concreto	31
3.1.2.2 Aditivo inibidor	33
3.1.3 Moldagem e cura	33
3.1.4 Ensaio no estado fresco	35
3.1.4.1 Método do cone de Abrams	35
3.1.4.2 Método do funil-V	36
3.1.5 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)	37
3.1.5.1 Moldagem dos corpos de prova	37
3.1.5.2 Execução do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)	38
3.1.6 Ensaio de resistência à compressão	40
3.1.7 Análise de dados	41
CAPÍTULO 4	42

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1.1 Caracterização do concreto autoadensável no estado fresco	42
4.1.1.1 Método do cone de Abrams	42
4.1.1.2 Método do funil-V	44
4.1.2 Caracterização do concreto no estado endurecido	45
4.1.2.1 Resistência à compressão.....	45
4.1.3 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)	46
CAPÍTULO 5.....	48
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CAPÍTULO 6.....	49
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS.....	50

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Mehta e Monteiro (1994), citam que o concreto é mundialmente conhecido como o material mais utilizado na construção civil, devido a inúmeras razões, tais como a sua resistência à água, a versatilidade na execução de elementos estruturais com diversos formatos e tamanhos, bem como seu emprego no canteiro de obras ser facilmente disponível e ter o custo mais baixo. Desse modo, é um material que possui diversos estudos disponíveis na atualidade, além de estar em constante evolução para melhorar suas características, dependendo do objetivo de cada obra.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015) foi desenvolvido no Japão o concreto autoadensável (CAA), uma tecnologia pouco conhecida e difundida no Brasil devido a diversos fatores, por acreditar-se que o custo é maior devido a maior utilização de finos e a aplicabilidade. Acrescenta-se que um concreto só será considerado autoadensável caso ele apresente três propriedades simultaneamente: a fluidez, a adesão intacta para que a mistura escoie inalterada perante as barras de aço e a resistência à segregação.

Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que o CAA pode ser utilizado tanto na indústria de pré-moldados, quanto nas situações moldado *in loco*. Além disso, sua dosagem pode ser realizada nas centrais de concreto e transportado via caminhão betoneira ou no próprio canteiro de obras. Normalmente, o CAA possui maior aplicabilidade em estruturas especiais, complicadas de se concretar com CCV, ou com alta quantidade de armaduras.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o concreto armado é aquele composto por barras de aço, projetadas de modo que considere os dois materiais resistam juntos aos esforços. Dessa forma, a conjunção desses materiais é usual na construção civil, haja vista que o aço tem a propriedade de resistir aos esforços de tração e o concreto aos esforços de compressão - além de assegurar o cobrimento da armadura para garantir a funcionalidade dos mesmos. No entanto, a corrosão dessas respectivas barras de aço pode estar associada a fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos, fazendo com que as patologias se manifestem nessas estruturas.

Gentil (2003), menciona que a definição de corrosão é a deterioração de um material, normalmente metálico, a qual é ocasionada por ação química ou eletroquímica do ambiente em que estão inseridos, associados ou não a esforços metálicos. Portanto, nas obras não há muito controle quanto a integridade das armaduras empregadas nos sistemas estruturais, sendo que a

interação físico-química do material e seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, podendo, muitas vezes, vir a colapso os elementos em questão e trazerem riscos prejudiciais aos usuários dessas edificações

Diante disso, o vigente estudo usou o método de ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), o qual analisa os corpos de provas imersos em solução salina para acelerar e verificar as condições das armaduras por diferença de potencial em concretos autoadensáveis. Ademais, foi verificado as propriedades do concreto autoadensável, como a sua fluidez, trabalhabilidade e adensabilidade no estado fresco, foram realizados os ensaios: método do cone de Abrams, método da caixa-L e o método do funil-V.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a mitigação da corrosão na armadura do concreto autoadensável com aditivo inibidor de corrosão.

1.2.2 Objetivos específicos

Verificar a dosagem de um aditivo inibidor de corrosão para que haja uma ação eficiente;
Analisar o concreto autoadensável com aditivo inibidor de corrosão no estado fresco por meio dos ensaios: método do cone de Abrams, método da caixa-L e o método do funil-V;
Avaliar o nível de corrosão nas armaduras pelo método CAIM.

1.3 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por tecnologias e materiais que facilitem e propiciem evolução nos sistemas construtivos fazem com que ocorram cada vez mais estudos e pesquisas realizados para novos horizontes. Isto porque muitas patologias existentes em edificações são decorrentes da degeneração das estruturas, colocando em risco a vida dos usuários.

Segundo Repette (2008), a divulgação do uso do concreto autoadensável somente terá repercussão quando forem analisados todos os aspectos dessa tecnologia. Como resultado, os custos com vibradores são eliminados, já que não são utilizados e consequentemente possibilita uma redução do ruído na obra. É importante ressaltar que a reutilização de fôrmas é maior, visto

que sua remoção é mais fácil. Igualmente, os custos com reparos visuais são menores porque não há ninhos de concretagem e a presença de bolhas na superfície é reduzida. Além desses fatores, não há a necessidade do aumento da seção da armadura em elementos de concreto com elevada taxa de armadura.

Para Gentil (2003), a corrosão do concreto é de grande importância, pois provoca não somente a sua deterioração, como também pode afetar a estabilidade e durabilidade das estruturas. A armadura não é suscetível de sofrer corrosão, a não ser que ocorram contaminação e deterioração do concreto. Os constituintes do concreto inibem a corrosão do material metálico e se opõem à entrada de contaminantes. Logo, o ambiente, materiais constituintes da mistura e o cobrimento mínimo são fatores que interferem diretamente na qualidade do concreto.

De acordo com Sales *et al.* (2014), um intrigante trabalho realizado sobre a corrosão no Brasil, intitulado “Retrospectiva da Patologia no Brasil: Estudo Estatístico”, avaliou mais de 700 relatórios técnicos de casos de patologia em diversos estados do país, obtendo como base o faturamento das nove maiores empresas de recuperação do Brasil e os seis maiores escritórios de projeto de recuperação estrutural. Logo, nessa pesquisa encontraram o significativo valor de 28 milhões de dólares investidos no ano de 1987 em obras de recuperação e reforço. Sendo que, a corrosão de armaduras ocorreu em 27% do total de casos analisados.

Desse modo, é de suma importância o profissional da engenharia civil estar se respaldando quanto às técnicas e avaliações de qualidade e segurança nas obras. Portanto, este trabalho tem a finalidade de buscar conhecimento quanto à corrosão na armadura do concreto autoadensável com aditivo inibidor de corrosão, dado que esse tipo de concreto apresenta tecnologia pouco difundida no Brasil, mas que possui alto desempenho. Outrossim, tem o intuito de trazer aos pesquisadores uma nova alternativa de mitigação quanto à manifestação da corrosão, já que é um problema patológico que pode desencadear sérios riscos dependendo do grau observado, possibilitando um aumento da vida útil das estruturas e permitindo mais segurança aos usuários das edificações.

Nesse sentido, este trabalho pretende analisar a combinação do concreto autoadensável armado com o emprego de um aditivo inibidor de corrosão, fazendo com que novos experimentos sejam realizados, irrompendo uma nova lacuna a ser preenchida.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a eficiência do aditivo inibidor de corrosão em relação à proteção das armaduras no concreto autoadensável?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

As patologias decorrentes do processo de corrosão nas estruturas de concreto têm sido bastante registradas atualmente e acarretam sérios problemas. Devido a isso, pesquisas sobre possíveis aditivos inibidores de corrosão que sejam efetivos estão sendo procurados para minorar esse processo. Diante disso, a capacidade mitigadora do aditivo será eficiente, já que minimizará os processos corrosivos. Isso sem contar que o concreto autoadensável irá manter as suas propriedades no estado fresco, as quais são a elevada fluidez, a resistência à segregação e a capacidade de se manter coeso perante aos obstáculos.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa utilizou para o ensaio de trabalhabilidade do concreto autoadensável no estado fresco o método do cone de Abrams, para verificar a fluidez sem ocorrer a segregação, o método da caixa-L, para avaliar a habilidade passante pelas barras de aço e se manter coeso, e o método do funil-V, para medir o tempo que a mistura leva para escoar.

Além disso, para analisar a eficiência do aditivo inibidor de corrosão, Sika FerroGard-901, foi utilizado o método de ensaio eletroquímico CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada) - o qual os corpos de provas são imersos em solução contendo cloreto, sendo a migração de seus íons incitada por uma diferença de potencial entre o aço e a solução - com a adição de 10 kg/m³ e 14 kg/m³ de aditivo na mistura de concreto.

Sendo assim, para a aplicação do método foi usado o traço do concreto autoadensável já definido por Souza (2016), na proporção de 1:0,25:2,10:1,70:0,40:1,25% (cimento CP V-ARI: calcário: areia: brita 0: água: aditivo superplastificante TEC-FLOW 7030). Ressalta-se que todos esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Assis Gurgacz, localizado na cidade de Cascavel-PR.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Concreto Autoadensável

De acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2010), o concreto autoadensável tem a capacidade de fluir, adensar-se com a própria gravidade, de modo a preencher a fôrma e passar por obstruções (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua coesão (ausência de segregação) nas etapas correspondentes a mistura, transporte, lançamento e adensamento.

Para Tutikian e Dal Molin (2015), a alta fluidez do CAA faz com que ele flua dentro da fôrma de modo a ocupar todos os espaços; a habilidade passante é a capacidade da mistura escoar perante as armaduras de aço sem bloqueio do fluxo ou segregação na fôrma; a resistência à segregação é a propriedade do CAA de ser capaz de manter coesão ao passar dentro das fôrmas, com obstrução ou não no caminho. Portanto, esses fatores são essenciais para caracterizar um CAA. De maneira geral, o único artifício para esse concreto é usar seu peso próprio, ou seja, utilizar a ação da gravidade a seu favor, sem haver a segregação.

O CAA apresenta o atributo de possuir alta deformabilidade no estado fresco, ou seja, há possibilidade de ser moldado em diversas fôrmas, exclusivamente com a ação da gravidade. Portanto, isso faz com que ele possa percorrer até dez metros de distância horizontal, até mesmo com obstáculos no caminho (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

A grande resistência à segregação, juntamente com a fluidez do CAA, proporciona a remoção de macro defeitos, bolhas de ar e falhas de concretagem, os quais são diretamente responsáveis por perdas de desempenho mecânico do concreto e da durabilidade da estrutura (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

A inclusão de materiais finos no CAA melhora muitas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido, haja vista que os finos atuam como pontos de nucleação, quebrando a inércia do sistema, permitindo que a parcela de cimento reaja de forma mais rápida com a água e ocorram ganhos de resistência logo nas primeiras idades. Além disso, cresce a compacidade da pasta, dificultando desse modo a penetrabilidade de agentes externos agressivos e melhorando a zona de transição (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Normalmente, as utilizações os CAA são em estruturas especiais, complicadas de se concretar com o concreto convencional, sendo muito utilizado em pré-moldados, ou *in situ*, dependendo da destinação da obra (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.1.1.1 Cimento

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), não há critérios científicos no que tange ao cimento mais adequado para a mistura do CAA. O melhor cimento é aquele que proporciona a menor variabilidade em termos de resistência à compressão.

Como a demanda por finos para o CAA é grande devido à necessidade de ampliar a coesão da mistura, cimentos que apresentam maior superfície específica são mais propícios, mesmo que aumentem os requisitos em relação aos cuidados quanto ao calor de hidratação e retração do concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.1.1.2 Adições minerais

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), entende-se por aditivos minerais os materiais silicosos moídos finamente, os quais são adicionados no concreto em grandes quantidades significativas, geralmente na faixa de 20 a 100% da massa de cimento Portland.

Os aditivos minerais são divididos em pozolânicos, como a cinza volante com baixo teor de cálcio, cimentantes, como a escória granulada de alto-forno, e possuir ambas as classificações, como a cinza volante com elevado teor de cálcio. A descrição da composição mineralógica e a característica da partícula, mais do que a composição química ou origem do material, determinam a reação de efeito de um aditivo mineral no comportamento do concreto contendo-o (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

As adições minerais devem ser selecionadas por meio de uma análise técnica e econômica, podendo ser diversas, contanto que possuam áreas superficiais maiores que as do componente que substituem (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Além das adições minerais possuírem importância quanto a resistência à segregação da mistura, elas podem desempenhar uma função relevante de possibilitar a resistência e durabilidade do concreto, tanto química quanto fisicamente (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.1.1.3 Agregados

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a porosidade, a composição granulométrica, o formato e textura superficial dos agregados determinam as propriedades dos concretos no estado fresco. A composição mineralógica, assim como a porosidade, afeta diversas propriedades do concreto, como a resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade, entre outros. Desse modo, a microestrutura do material, as condições prévias de exposição e o processo de fabricação dos agregados influenciam diretamente na tecnologia do concreto a ser empregada.

Para Tutikian e Dal Molin (2015), a seleção do agregado miúdo está relacionada com a demanda de água, o qual é um princípio importante pelo fato da sua influência sobre a coesão e fluidez do concreto. Dessa forma, as partículas arredondadas e lisas são mais adequadas para a produção de CAA, já que para uma mesma quantidade de água, ampliam a fluidez da mistura.

2.1.1.4 Aditivos

Para Neville (1997), a definição de aditivo pode ser entendida como um produto químico que, com a exclusão de casos especiais, adiciona-se à mistura de concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento durante a mistura, ou numa mistura complementar antes do lançamento do concreto, com o intuito de obter-se alterações específicas, ou modificações das propriedades normais do concreto.

Os superplastificantes são comumente chamados de aditivos redutores de água de elevada eficácia, pois proporcionam redução no teor de água de três a quatro vezes em um determinado traço de concreto - em comparação aos aditivos redutores de água normais -, foram desenvolvidos na década de 70 e já possuem amplo conceito na indústria de concreto. São constituídos de tensoativos aniônicos de longa cadeia, os quais quando adsorvidos pelas partículas de cimento conferem uma forte carga negativa, a qual contribui na redução considerável da tensão superficial da água circundante e aumenta significativamente a fluidez do sistema (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os aditivos superplastificantes mais empregados no CAA são os que apresentam a base de policarboxilatos, haja vista que aperfeiçoam significativamente a dispersão das partículas do cimento em comparação aos aditivos de primeira e segunda geração caminho (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.1.2 Determinação das características do CAA no estado fresco

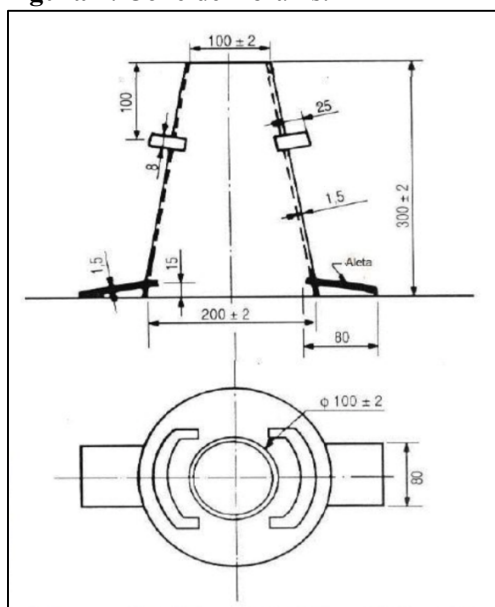
De acordo com Tutikian e Dal Molin (2015), é primordial o concreto autoadensável exibir trabalhabilidade no estado fresco para ter sua destinação correta, pois seu adensamento é feito apenas com o seu peso próprio, portanto reparos no local não serão possíveis, sendo necessário verificar a sua trabalhabilidade.

2.1.2.1 Método Cone de Abrams

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), o *slump flow test* é usado para avaliar a capacidade do CAA de fluir espontaneamente sem que ocorra segregação. O diâmetro do círculo formado pela mistura de concreto é a medida de fluidez a ser obtida do CAA.

A aparelhagem necessária é um molde, o Cone de Abrams, feito de metal não facilmente atacável pela pasta de cimento, com espessura igual ou superior a 1,5 mm, possuindo diâmetro da base inferior de (200 ± 2) mm; diâmetro da base superior (100 ± 2) mm e altura de (300 ± 2) mm, contendo aletas e alças, conforme Figura 1.

Figura 1: Cone de Abrams.

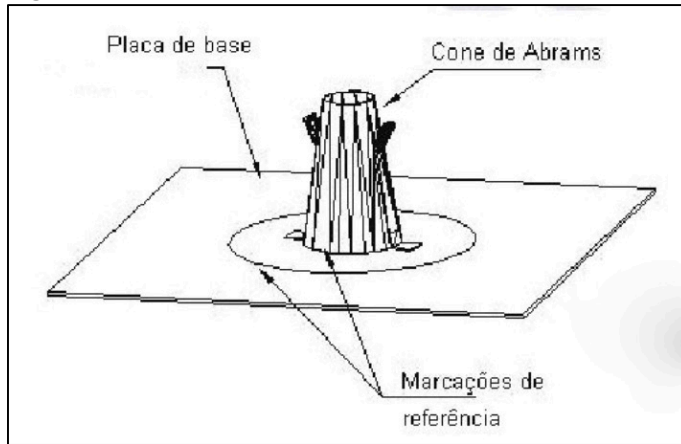


Fonte: NBR NM 67 (1998).

Para o apoio do molde deve haver uma chapa metálica quadrada de no mínimo 900 mm de lado, com a espessura de pelo menos 1,5 mm, provida com as marcações circulares necessárias, conforme a Figura 2. Sendo que para a execução dos ensaios é necessária uma

régua metálica de 1000 mm graduada; um recipiente com capacidade de 10 L; um complemento tronco-cônico; uma colher de pedreiro e um cronômetro (ABNT NBR 15823-Parte 2).

Figura 2: Instrumentos.

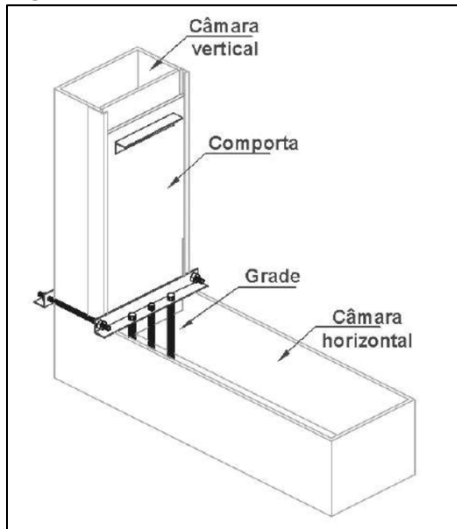


Fonte: ABNT NBR 15823–Parte 2 (2010).

2.1.2.2 Método da caixa-L

Para Tutikian e Dal Molin (2015), o teste da caixa-L avalia a fluidez do concreto juntamente com a habilidade de passar por obstáculos, mantendo-se coeso. Esse equipamento consiste numa caixa com o formato de “L”, possuindo uma porta móvel separando a parte vertical da horizontal, na qual juntamente com a divisória se localiza as barras de aço, com a pretensão de simular a armadura real da estrutura, criando um obstáculo à medida que o concreto circula.

A aparelhagem necessária é uma caixa de seção retangular com perfil em forma de L, possuindo um compartimento vertical e outro horizontal, conforme a Figura 3. Esta caixa deve apresentar superfícies planas e não deformar durante o ensaio, sendo de material não absorvente e reativo com os componentes do concreto. A caixa-L deve ser provida de dispositivos com formato de grade, que podem apresentar duas ou três barras metálicas lisas com diâmetro de $12,5 \pm 0,2$ mm, as quais devem ser equidistantes entre si, assim como em relação às laterais da caixa. Quando forem utilizadas duas barras, o espaçamento deve ser de 58 ± 1 mm e no caso de três barras 40 ± 1 mm. O dispositivo deve ser colocado verticalmente na caixa-L, conforme a Figura 3 ilustrada com a presença de 3 barras. Além disso, para executar esse ensaio é necessário um recipiente, uma colher de pedreiro e uma régua metálica de no mínimo 1000 mm de comprimento (ABNT NBR 15823 – Parte 4).

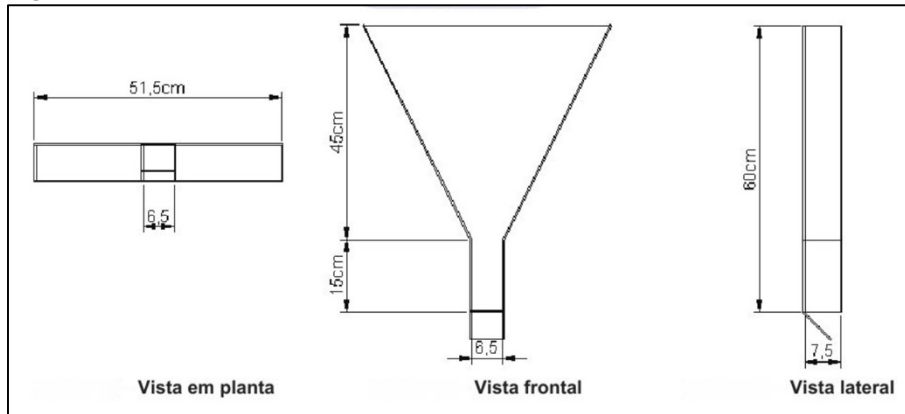
Figura 3: Caixa-L.

Fonte: NBR 15823-Parte 4 (2010).

2.1.2.3 Método do funil-V

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2015), é o equipamento utilizado para realizar esse teste tem a função de medir a viscosidade plástica aparente, sob fluxo determinado, por meio da fluidez do concreto, sendo pertinente para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm. Na extremidade inferior do equipamento deve haver uma porta, a qual pode ser deslizante ou com dobradiça, para manter o concreto no interior do aparato e seja aberta quando iniciar o ensaio. Deve-se cuidar com o aparelho, pois é bastante simples e no momento, ainda não há conhecimento se há alguma interferência provocada pelo ângulo interno e as paredes internas na fluidez do concreto.

O equipamento deve ser confeccionado com material que não seja absorvente ou quimicamente reagente com os componentes do concreto, em forma de funil de bases retangulares, podendo ser em chapa acrílica com espessura de 5 mm ou chapa metálica de pelo menos 1,5 mm de espessura, de acordo com a Figura 4. Ademais, deve haver um recipiente metálico de 12 L, uma concha metálica, uma colher de pedreiro e um cronômetro (ABNT NBR 15823–Parte 5).

Figura 4: Funil-V.

Fonte: ABNT NBR 15823–Parte 5 (2010).

2.1.3 A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado

Para Sales *et al.* (2014), pelo fato das interações das estruturas de concreto armado com o ambiente a qual estão inseridas sofrerem alterações com o decorrer dos anos, esse fenômeno faz com que haja comprometimento na estabilidade e consequentemente afete sua funcionalidade.

Os fatores problemáticos associados à durabilidade tendem a aumentar ao longo do tempo, já que a maioria das edificações das principais metrópoles brasileiras foi executada nas décadas de 1970 e 1980, ou seja, completam entre 30 a 40 anos de vida, momento em que os gastos com manutenção e reparos tornam-se mais recorrentes (SALES *et al.*, 2014).

Entende-se que a durabilidade de uma estrutura é determinada por certos elementos básicos como características da construção, agressividade do ambiente, critérios de desempenho desejados e ao longo do tempo, isto é, o comportamento durante a vida útil de certa estrutura. Uma simples analogia é dizer que a vida útil está para a durabilidade, do mesmo modo que a resistência do concreto está para o projeto estrutural (SALES *et al.*, 2014).

É muito importante que as estruturas de concreto suportem as solicitações que lhes foram determinadas, mantendo a função e resistência que se aguarda, por um tempo de vida esperado, ou relativamente razoável. Diante disso, o concreto deve resistir o máximo possível ao processo de deterioração ao qual venha sofrer, sendo considerado durável (NEVILLE, 1997).

Cada vez mais os custos com reparo e substituição em estruturas devido a falhas nos elementos têm se tornado expressivo no orçamento total das obras. Em países industrialmente desenvolvidos avalia-se que mais de 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam investidos no reparo e manutenção de elementos já existentes, sendo menos de 60% aplicados em novas instalações. Devido ao crescimento significativo na substituição de estruturas e o

destaque nos custos do ciclo de vida ao invés do custo inicial, os engenheiros estão sendo forçados a tomarem consciência das características de durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

É usual associar o problema atual da pouca durabilidade das construções à falta de conhecimento quanto aos materiais e componentes das estruturas de concreto. Quanto aos materiais e componentes comumente utilizados, é importante recorrer a métodos de ensaio que simulem o seu uso em obra, devido a estimativa de sua vida útil. Para estes, a durabilidade é um dos requerimentos dos usuários que tem sido menos atendida, isso ocorre porque é um resultado da interação de um material ou componente com o ambiente em que está inserido. Esse fenômeno acarreta em alterações na capacidade de atendimento das demais necessidades dos usuários, isto é, pode provocar uma degradação (SALES *et al.*, 2014).

2.1.4 Deterioração das estruturas de concreto armado

Segundo Neville (1997), a deterioração é originada por fatores externos ou um conjunto de fenômenos que ocorrem no interior do concreto, pelo fato de ter uma durabilidade inapropriada. Essas ações podem ser físicas, químicas ou mecânicas. A deterioração mecânica pode se manifestar devido ao impacto, erosão, abrasão ou até mesmo cavitação. Outrossim, as ações químicas da deterioração podem ocorrer pelas reações álcali-sílica e álcali-carbonato. Desse modo, devido às ações de íons agressivos, como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono, muitos líquidos e gases naturais e industriais, fazem com que ocorra o ataque químico. Por fim, os fatores químicos englobam as elevadas temperaturas ou diferentes coeficientes de dilatação térmica dos elementos.

A expansão, fissuração e finalmente lascamento do cobrimento são anomalias causadas pela corrosão da armadura. Além da perda do cobrimento, uma estrutura de concreto armado pode sofrer dano estrutural pelo fato de ocorrer à perda de aderência entre os componentes, aço e concreto, e apresentar diminuição na área da seção transversal do aço. Desse modo, esses danos se apresentam em tais proporções que o colapso da estrutura é inevitável (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1.5 Corrosão

De acordo com Sales *et al* (2014), a corrosão pode ser determinada como um processo que ocorre devido a deterioração do material por meio da ação química ou eletroquímica do meio ambiente, ocasionando a perda de massa do material.

É esperado que os problemas relativos à corrosão do aço, entre outros, não se manifestassem caso a armadura estivesse protegida do ar por uma camada espessa de concreto com baixa permeabilidade. No entanto, na prática é bem diferente, já que as estruturas de concreto armado e protendido continuam a sofrer danos devido à corrosão do aço (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O efeito da corrosão em um material metálico acarreta em um custo adicional significativo, seja pela necessidade de substituir o material corroído, ou até mesmo pelas consequências dos danos indiretos causados pela corrosão, como a manutenção, uso de insumos onerosos mais resistentes à corrosão, entre outros. Quanto à armadura de aço de uma estrutura de concreto, além de danificar as propriedades mecânicas do aço, geralmente ocasiona a formação do Fe_2O_3 hidratado, o qual pode resultar no desprendimento da camada de concreto devido a uma pressão exercida (SALES *et al.*, 2014).

2.1.5.1 Formas de corrosão

Segundo Gentil (2003), as formas de corrosão eletroquímica do aço, empregado nas armaduras, podem se apresentar de modo uniforme, ou seja, atingir toda a extensão da armadura, quando exposta ao meio corrosivo; puntiforme, caracterizada por um desgaste localizado sob a forma de pites ou alvéolos; intergranular, que ocorre entre os grãos da rede cristalina do material metálico, quando as armaduras estão sujeitas a solicitações mecânicas e podem sofrer fratura frágil, perdendo o material e toda condição de utilização; transgranular, a qual se processa intragrãos da rede cristalina, ocasionando fratura quando houver solicitação mecânica; e, fragilização pelo hidrogênio, corrosão causada por hidrogênio atômico, o qual se difunde para o interior do aço da armadura, possibilitando fragilização com consequente perda de ductibilidade e possível fratura da armadura.

As três últimas manifestações de corrosão são muito graves quando há o meio corrosivo combinado com a ação de solicitações mecânicas, pois ocorrerá a corrosão sob tensão fraturante, consequentemente há a fratura da armadura e reflexos na estabilidade das estruturas de concreto armado, principalmente no protendido. Já a corrosão uniforme não causa

geralmente graves consequências, por se apresentar distribuída. No entanto, a corrosão por pite, por ser localizada, ocasiona a formação de gravidades que podem atingir profundidades significativas, e os pites podem agir como áreas de concentração de solicitações mecânicas, resultando na corrosão sob tensão fraturante (GENTIL, 2003).

2.1.5.1.1 Corrosão química

De acordo com Dias (2002), a corrosão química ocorre caso uma superfície metálica entre em contato com um gás, e, havendo uma reação entre os dois componentes, tem-se a formação de um sal ou óxido. Esse óxido irá formar uma camada sobre a superfície do metal, a qual poderá ser permeável ou impermeável à difusão do oxigênio. Ocorre a difusão de íons do metal e do oxigênio na camada de óxido e, caso essa camada for removida por algum processo, como a abrasão, a oxidação irá persistir e a espessura do metal diminuirá progressivamente.

2.1.5.1.2 Corrosão eletroquímica

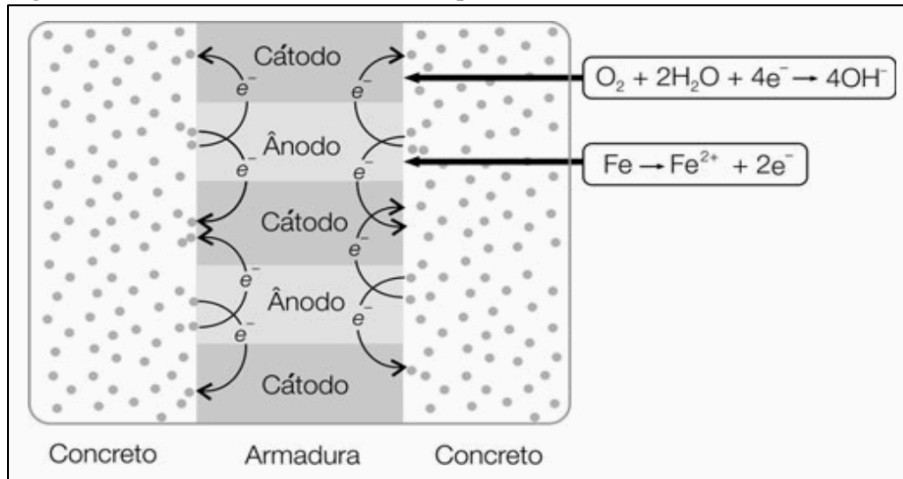
Para Sales *et al.* (2014), o processo que ocorre na armadura de aço é uma corrosão eletroquímica, a qual se manifesta basicamente por um fluxo de elétrons e íons entre a região catódica e a região anódica.

Em uma superfície metálica há determinados pontos ou regiões com diferentes potenciais elétricos decorrentes de singelas modificações na composição do metal, variações de temperatura ou até mesmo alterações do meio ambiente. Tais pontos constituem pequenas regiões anódicas ou catódicas na superfície do metal, assemelhando-se a contatos elétricos abertos, ainda inativos (GENTIL, 2003).

Numa estrutura de concreto armado, na armadura de aço, a reação anódica geralmente envolve a oxidação do Fe, e a reação catódica se trata da redução do oxigênio em meio alcalino, pelo fato do pH do concreto ser alcalino. A cobertura de concreto normalmente não evita o contato do oxigênio e a água com a armadura de aço.

A Figura 5 demonstra o processo de corrosão que se manifesta na armadura de aço envolta pelo concreto, envolvendo as reações de oxidação Equação 1 e de redução Equação 2 (SALES *et al.*, 2014).

Figura 5: Processo de corrosão eletroquímica na armadura do aço.



Fonte: SALES *et al.* (2014).



Onde:

Fe = ferro;

Fe^{2+} = composto ferroso;

e^- = elétron.



Onde:

O_2 = oxigênio;

H_2O = água;

e^- = elétron;

OH^- = hidroxila.

A presença da região anódica e catódica implicam na formação de uma pilha eletroquímica. Desse modo, pelo fato de estar presente um grande número de microrregiões anódicas e catódicas na superfície metálica, forma-se uma grande quantidade de pilhas eletroquímicas. Os diferentes potenciais eletroquímicos que resultam na formação da pilha decorrem das heterogeneidades físicas e/ou químicas na superfície do metal. Dessa forma, na

armadura de aço, as heterogeneidades são ocasionadas principalmente pela diferença de concentração de íons como cloreto, oxigênio e álcalis (SALES *et al.*, 2014).

É bom evitar a presença no concreto de condições que possibilitem a pilha eletroquímica, devido à corrosão. Dentre elas, pode-se citar a existência de eletrólitos, aeração diferencial, contato entre diferentes materiais metálicos, áreas diferentemente deformadas ou tensionadas e correntes elétricas. As consequências inconvenientes dessas condições são extremamente graves para qualquer tipo de concreto (GENTIL, 2003).

A ocorrência da aeração diferencial pode ser pela permeabilidade do concreto ou em áreas onde há presença de fissuras no concreto, até atingir a armadura – no fundo dessas fissuras, o ferro oxida-se e tem-se além da corrosão da armadura, a deterioração do concreto devido à pressão de expansão. Por outro lado, o contato entre diferentes materiais metálicos pode ocasionar a criação de filhas galvânicas, ocorrendo a corrosão localizada do ferro. Já no caso de áreas com diferentes deformações ou tensões, sabe-se que nas áreas de concentração de esforços tem-se a corrosão mais acentuada, acelerando o processo (GENTIL, 2003).

2.1.6 Inibidores de corrosão

De acordo com Gentil (2003), o inibidor é uma substância ou mistura de vários elementos, os quais quando estão em proporções adequadas no meio corrosivo, restringe ou elimina a ação da corrosão. Sendo assim, tais substâncias têm sido muito utilizadas para proteção contra corrosão, estimulando a indústria a fabricar novos compostos.

Para seu uso devem-se avaliar os aspectos como as causas da corrosão no sistema, o custo da sua utilização, as propriedades e os mecanismos de ação dos inibidores a serem usados, as condições adequadas de adição e controle, para que resultem num uso satisfatório (GENTIL, 2003).

Aceita-se que o uso de inibidores, em concentrações apropriadas, atrasa o fenômeno de corrosão, aumentando a vida útil das estruturas. Todavia, para proteger os vergalhões de aço - esses produtos além de inibirem o processo corrosivo em meio alcalino ou em meio neutro na temperatura ambiente – devem ter a habilidade de se difundir pelo concreto até a posição da armadura. Ademais, essa substância não pode prejudicar as propriedades físicas e químicas do concreto, como a sua resistência mecânica (SALES *et al.*, 2014).

Existem diversos produtos para o uso em estruturas novas e existentes de concreto armado. Em elementos novos, como prevenção, de modo a evitar ou retardar o início do processo corrosivo nas armaduras, os inibidores podem ser acrescentados, em proporções

adequadas, na mistura original do concreto fresco. Em estruturas existentes, e dependendo do tipo de substância, pode-se adicionar nas argamassas ou concretos de reparo, os quais são aplicados na superfície do concreto ou inseridos em furos ou sulcos feitos em sua face com a finalidade de agilizar a sua difusão por meio da camada de recobrimento das armaduras (SALES *et al.*, 2014).

2.1.6.1 Classificação dos inibidores

Para Gentil (2003), há diversas classificações para os inibidores, as quais se baseiam na composição e comportamento. Elas podem estar classificadas quanto à composição, inibidores orgânicos e inorgânicos; e quanto ao comportamento, inibidores oxidantes, não-oxidantes, anódicos, catódicos e de adsorção.

Os inibidores anódicos reprimem a reação do ânodo, funcionam normalmente por meio da reação com o produto de corrosão formado no início, resultando num filme aderente e altamente insolúvel na superfície do metal, causando a polarização anódica (GENTIL, 2003).

Os inibidores catódicos são substâncias que propicia íons metálicos com capacidade de reagir com alcalinidade catódica, resultando em compostos insolúveis, os quais ficam envoltos da área catódica, reprimindo a difusão do oxigênio e a condução de elétrons, inibindo o processo catódico e provocando uma acentuada polarização catódica (GENTIL, 2003).

Os inibidores de adsorção têm função de agir como películas protetoras. Alguns produtos são capazes de produzir películas sobre as áreas anódicas e catódicas, prejudicando a ação eletroquímica. Nesse conjunto estão inclusas substâncias orgânicas com grupos altamente polares que dão lugar à formação de metais pesados e substâncias orgânicas com átomos de oxigênio, nitrogênio ou enxofre, podendo mencionar os aldeídos, aminas, compostos heterocíclicos nitrogenados, ureia e toureia substituídas (GENTIL, 2003).

2.1.6.1.1 Sika FerroGard-901

De acordo com o fabricante Sika (2010), essa substância é um aditivo líquido verde transparente, destinado ao concreto armado e argamassas, o qual atua como um inibidor de corrosão da armadura de aço, aumentando significativamente a vida útil e durabilidade das estruturas de concreto armado.

As características desse produto são de que reduz tanto as reações anódicas, quanto catódicas nos processos de corrosão eletroquímica, proporcionando a formação de um filme na

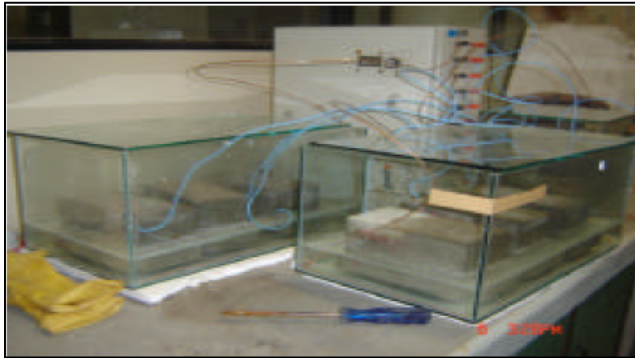
superfície do vergalhão de aço, impedindo a dissolução do metal e reduzindo a taxa de corrosão. Além disso, esse produto é uma combinação de inibidores de corrosão orgânicos.

As vantagens desse composto são a proteção da armadura especialmente contra a corrosão e seus efeitos destrutivos; e de não prejudicar as características do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido.

2.1.7 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

De acordo com Torres (2006), o ensaio CAIM é um método eletroquímico que consiste em acelerar o processo de corrosão nas estruturas de concreto, podendo avaliar diretamente o efeito da mesma sobre as barras de aço. O ensaio consiste em imergir os corpos de prova prismáticos – com barras de aço da classe CA 50 em seu interior – em solução salina, contendo uma certa quantidade de NaCl para simular a salinidade das águas do oceano Atlântico, com a indução de corrente elétrica por meio de uma fonte através de fios de cobre, conforme Figura 6.

Figura 6: Ensaio CAIM nos corpos de prova.



Fonte: TORRES (2006).

Considera-se que esse ensaio possui uma técnica com elevado potencial de utilização para a análise da degradação provocada pela corrosão em armadura das estruturas de concreto. Devido as suas características, trata-se aparentemente de um ensaio sensível, o qual pode ser utilizado de forma eficiente para obter dados comparativos de desempenho (TORRES, 2006).

Pode considerar-se o método CAIM como um ensaio que possibilita uma análise rápida, haja vista que permite avaliar visualmente o comportamento da corrosão nas armaduras dos elementos de concreto no decorrer do tempo. Seu método permite analisar a intensidade da

corrosão do aço e determinar a perda de massa do aço, fator importante para avaliar os efeitos deletérios do processo corrosivo (TORRES, 2006).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo

O trabalho se trata de uma pesquisa quantitativa, visando analisar os dados de trabalhabilidade e da eficiência do concreto autoadensável com aditivo inibidor de corrosão, constituindo-se de um estudo experimental, o qual foi realizado em laboratório.

3.1.2 Caracterização dos materiais

3.1.2.1 Caracterização do concreto

Os materiais utilizados para o preparo do concreto autoadensável foram o cimento CP V-ARI, o calcário, a areia, a brita 0, água e o aditivo superplastificante TEC-FLOW 7030, na proporção de 1:0,25:2,10:1,70:0,45:1,25%, respectivamente, o qual é um traço de referência determinado por Souza (2016), que foi escolhido devido as suas características conhecidas. Além disso, foi feita uma adição de 0 kg/m³, 10 kg/m³ e 14 kg/m³ de Sika FerroGard-901, na mistura de concreto.

O cimento utilizado é o CP V-ARI, da marca Cauê, o qual é o mais acessível para o desenvolvimento da pesquisa, sendo que a caracterização física química e mecânica do cimento respeitam os requisitos da ABNT NBR 5733 (1991)

Os materiais que foram utilizados como agregados, são oriundos da região oeste do Paraná, sendo areia natural o agregado miúdo e o agregado graúdo a brita 0, os quais atendem a ABNT NBR 7211 (2005).

Nos gráficos abaixo encontram-se a composição granulométrica do agregado miúdo e do pedrisco, juntamente com suas propriedades, para caracterização desses materiais e uso no concreto autoadensável.

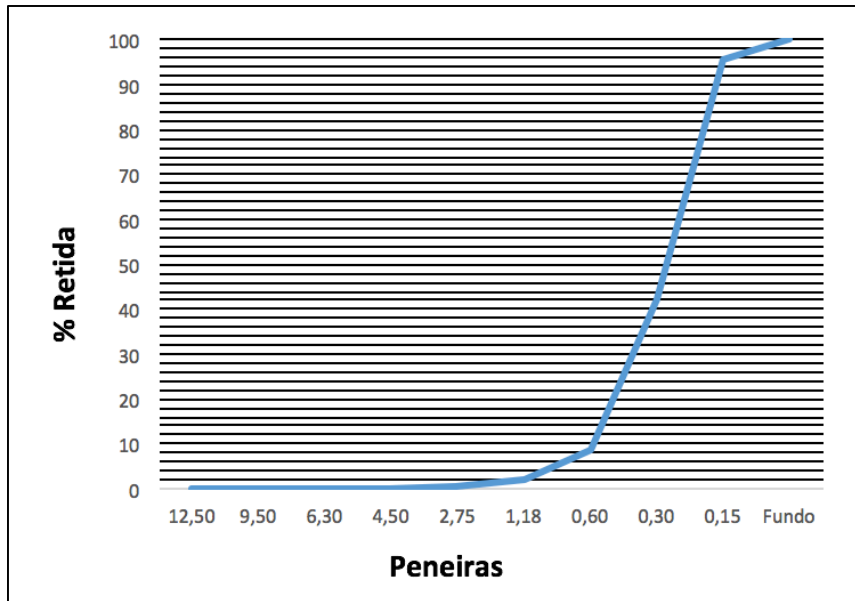


Tabela 1: Características do agregado miúdo.

Dmáx =	2,75 mm
Dmin =	0,15 mm
Módulo finura =	1,49
Massa específica=	2,82 g/cm ³

Fonte: AUTORA (2017).

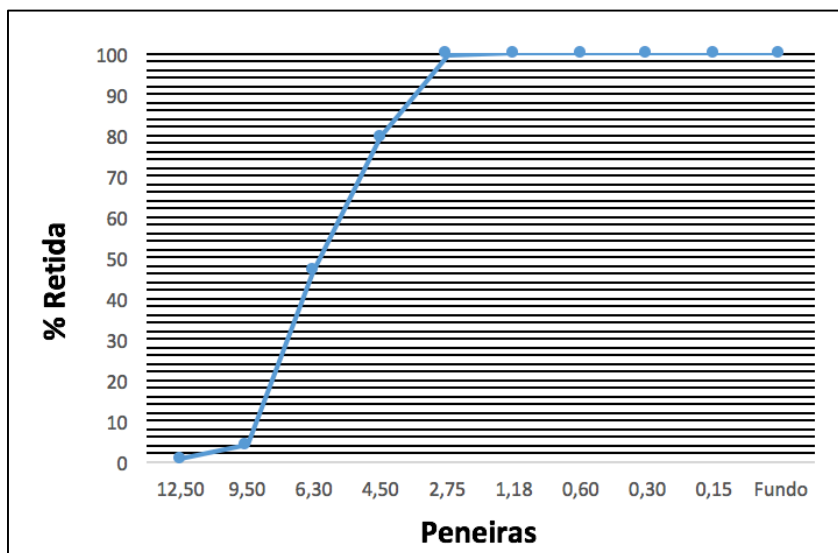


Tabela 2: Características do pedrisco.

Dmáx =	9,5 mm
Dmin =	2,75 mm
Módulo finura =	5,83
Massa específica=	2,62 g/cm ³

Fonte: AUTORA (2017).

A água utilizada também é proveniente da região oeste do Paraná, a qual atende os requisitos impostos pela ABNT NBR 15900 (2009).

O aditivo plastificante empregado é de última geração, TEC-FLOW 7030, obedecendo a ABNT NBR 11768 (1992), com teor máximo de utilização de 2,0% e massa específica de 1,04-1,08 g/cm³, possui coloração alaranjada.

3.1.2.2 Aditivo inibidor

Para a realização da inibição da corrosão pelo do método de CAIM adicionou-se o aditivo Sika FerroGard-901 na mistura de concreto autoadensável nas proporções de 10 kg/m³ e 14 kg/m³ a cada betonada, sendo que um traço sem adição desse produto também foi realizado para comparar os resultados, portanto totalizaram-se três traços.

Os teores de adição foram escolhidos devido a indicação do fabricante de utilizar o teor de 12 kg/m³ na massa de concreto para utilização, o qual possui densidade de 1,06 kg/litro com pH 10 ± 1 , coloração verde. Desse modo, analisar uma porção abaixo (10 kg/m³) e outra acima desse valor (14 kg/m³), além do traço sem a adição desse produto (0 kg/m³), se faz necessário para verificar os resultados de eficiência de mitigação da corrosão desse aditivo.

3.1.3 Moldagem e cura

Foram confeccionados para cada traço citado anteriormente 3 corpos de prova para o ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) e 4 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão. Como decorrência, resultou-se em 9 corpos de prova para o método de CAIM e 12 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão. Em função dos ensaios para caracterização do material confeccionou-se ao todo 0,048 m³ de concreto, sendo que o consumo de cimento CP V-ARI pela massa de concreto foi de 438,10 kg/m³, com resistência estimada de 40 MPa.

No entanto, o traço utilizado como base foi modificado para alcançar as propriedades do concreto autoadensável, mudando apenas a quantidade de água e aditivo superplastificante, portanto empregou-se o traço de 1:0,25:2,10:1,70:0,50:1,8% (cimento, calcário, areia, pedrisco, água, aditivo superplastificante). Portanto, a Tabela 1 apresenta a quantidade de material utilizado para cada traço, onde o traço 1 é o CAA de referencia sem adição do aditivo inibidor e o traço 2 e 3 com adição de inibidor no teor de 10 e 14 kg/m³ de concreto, respectivamente.

Tabela 3: Composição do traço.

Traço	1	2	3
Cimento (kg)	7	7	7
Calcário (kg)	1,75	1,75	1,75
Areia (kg)	14,7	14,7	14,7
Pedrisco (kg)	11,9	11,9	11,9
Água (kg)	3,5	3,5	3,5
Superplastificante (kg)	126	126	126
Aditivo Mitigador (kg/m³)	0	10	14

Fonte: AUTORA (2017).

A metodologia para a mistura foi proposta por Velasco para a mistura de todos os insumos na betoneira, conforme a Figura 7.

Figura 7: Metodologia para confecção do concreto autoadensável.

Etapas	Procedimento	Duração (segundos)
1	Mistura dos agregado graúdo com 80% da água	30
2	Adição do filer calcário	30
3	Adição do cimento	30
4	Adição do agregado miúdo	180
5	Para parar a raspagem das pás e parede do misturador	60
6	Adição da água juntamente com aditivo superplastificante	420
7	Adição da adição mitigadora	180

Fonte: VELASCO (2008).

A moldagem seguiu o recomendado pela ABNT NBR 5738 (2008), para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos de dimensões de 10 x 20 cm. No entanto, foi realizado o preenchimento em apenas uma camada e sem o adensamento. Por seguinte, após as 24h os corpos de prova foram armazenados em local protegido de intempéries, sendo que após sua identificação foram armazenados na câmara úmida. Por fim, foi realizado o capeamento por frisagem para realização dos ensaios.

3.1.4 Ensaios no estado fresco

Para a análise do concreto autoadensável no estado fresco se faz necessário analisar as suas propriedades de trabalhabilidade, como a alta fluidez, a resistência à segregação e a capacidade de se manter coeso ao passar pelas obstruções no caminho. Portanto, foram necessários dois ensaios para avaliar tais características: o método do cone de Abrams e o método do funil-V. O ensaio da caixa-L, para avaliar a habilidade passante não foi realizado, devido a falta de tempo para confeccionar os corpos de prova conforme o prazo.

3.1.4.1 Método do cone de Abrams

A NBR ABNT 15823-2 (2010) especifica o ensaio para avaliar o tempo de escoamento do concreto autoadensável, o qual a execução consiste em:

- 1) Posicionar o cone de Abrams sobre a placa da base, colocando-o no diâmetro de 300 mm;
- 2) Preencher molde, o qual deve ser fixado por meio de suas aletas pelos pés do operador, sem realizar o adensamento, de modo contínuo e uniforme, com o auxílio do complemento cônico e da concha de pedreiro;
- 3) Remover o excesso da amostra com a colher de pedreiro, limpando imediatamente a placa da base;
- 4) Retirar o tronco de cone erguendo na direção vertical e com cuidado o cone de Abrams, em até 5s, sendo que todo o processo de preenchimento até desmoldagem não deve ultrapassar 1 min;
- 5) No instante da retirada do molde, acionar o cronômetro no momento em que o molde foi erguido, parando no momento em que o concreto cobriu totalmente o diâmetro de 500 mm na placa da base, registrando este tempo (t_{500}) em segundos;
- 6) Medir duas vezes o diâmetro final de espalhamento do concreto, sendo uma medida no maior e outra no menor valor.

Para o resultado do espalhamento (SF), usou-se a média aritmética dos diâmetros perpendiculares, conforme a Equação 3 a seguir e verificou-se em que classe está inserida de acordo com o valor encontrado, como mostra a Tabela 1.

$$\bar{x} = \frac{d1 + d2}{2} \quad (3)$$

Onde:

$\bar{x}$: Média aritmética (mm);

$d1$: Diâmetro 1 (mm);

$d2$: Diâmetro 2 (mm).

Tabela 4: Classes de espalhamento (SF).

Classe	Espalhamento mm	Método de ensaio
SF1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2010).

A Tabela 2 determina a classe de acordo com o tempo registrando em s.

Tabela 5: Classes de viscosidade plástica aparente (t_{500}).

Classe	t_{500} s	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS 2	> 2	

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2010).

3.1.4.2 Método do funil-V

A NBR ABNT 15823-5 (2010), relata sobre a determinação da viscosidade do concreto autoadensável. O ensaio fundamentou-se em preencher o funil-V de forma uniforme e sem adensamento, sendo que o excesso de concreto foi retirado com colher de pedreiro, respaldando as superfícies. O recipiente metálico deve estar sob o funil-V, e a abertura da comporta deve ser efetuada em até 30s após o preenchimento, sendo que o cronômetro foi acionado imediatamente após a abertura e parado ao final do escoamento. O intervalo de tempo do escoamento total da massa de concreto ($T_{30\text{ seg}}$) foi registrado.

No entanto, em casos especiais pode repetir-se o ensaio, realizando a medida do tempo de escoamento 5 minutos após o preenchimento do funil-V ($T_{5\text{ min}}$). Imediatamente após a

medida do tempo de escoamento de $T_{30\text{ seg}}$, a comporta deve ser fechada e repetir-se o processo de preenchimento sem necessidade de limpeza ou umedecimento. A comporta deve ser aberta após 5 minutos e registrado o intervalo de tempo de escoamento ($T_{5\text{ min}}$).

A Tabela 3 especifica as classes de acordo com o tempo registrado em segundos.

Tabela 6: Classes de viscosidade plástica aparente funil-V.

Classe	Funil V s	Método de ensaio
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5
VF 2	9 a 25	

Fonte: ABNT NBR 15823-5 (2010).

3.1.5 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

Para análise do grau de corrosão nas barras de aço para os traços citados anteriormente, foi realizado o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada, conforme a metodologia de Pereira (2008).

3.1.5.1 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensões de 10 cm x 20 cm para cada traço - com o aditivo Sika FerroGard-901 nas proporções de 0 kg/m³, 10 kg/m³ e 14 kg/m³, resultando em 9 amostras. Esses corpos de prova receberam em seu interior o espaçador para garantir o cobrimento de 2,5 cm e posteriormente colocou-se sobre ele a barra de aço CA 50, com 10 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento.

Para a realização do ensaio CAIM, foram confeccionadas as barras conforme as medidas necessárias para o corpo de prova, já realizando a conexão do fio de cobre antes da concretagem, conforme a Figura 8, antes da concretagem cada barra foi pesada para que fosse analisado a corrosão por inferência da perda de massa.

Figura 8: Barras de aço.

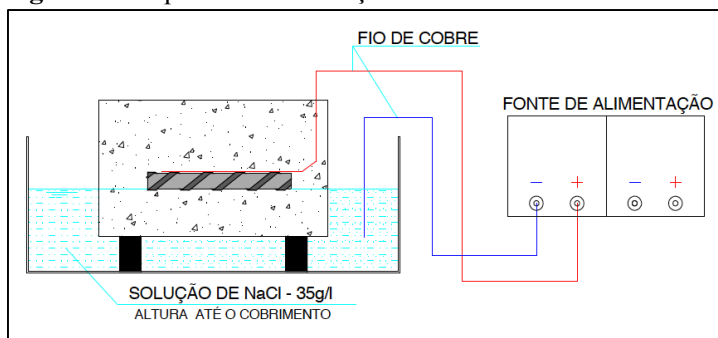


Fonte: AUTORA (2017).

3.1.5.2 Execução do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

Para a conexão elétrica, posicionou-se um fio de cobre sobre a barra de aço antes da moldagem dos corpos de prova, conectando-se no polo positivo da fonte. Em seguida, foi colocado outro fio de cobre - na solução salina contendo 35 g/l de NaCl -, conectando-se no polo negativo da fonte, conforme a Figura 7. Em virtude disso, a altura da solução salina é em razão do cobrimento escolhido. Por consequência, a intensidade da corrente de utilização deveria ser de $300 \mu A/cm^2$, no entanto, devido a problema com o aparelho, os corpos de prova ficaram submetidos à uma voltagem de 1,25 V.

Figura 9: Esquema de realização do ensaio CAIM.



Fonte: PEREIRA (2009).

Após a concretagem e realização dos ensaios para verificar se o concreto autoadensável atende os requisitos mínimos, as barras de aço foram posicionadas no interior dos moldes e os mesmos foram preenchidos com concreto sem adensamento. Desse modo, depois de 24h foram desmoldados e submetidos ao ensaio CAIM por 28 dias, com a aplicação de uma tensão contínua de 1,25 V, como demonstra a Figura 10.

Figura 10: Ensaio CAIM.



Fonte: AUTORA (2017).

Após os 28 dias os corpos de prova foram secos ao ar para que fosse realizado a ruptura do corpo de prova para remoção das barras como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Corpos de prova a serem rompidos.



Fonte: AUTOR (2017).

Em seguida à ruptura realizou-se a limpeza das barras, deixando-as submersas na solução de 1l de ácido clorídrico (37%) por 45 min, conforme a Figura 12. Depois foram escovadas e lavadas em água corrente, para estimular a evaporação da água ficaram 30 min em estufa.

Figura 12: Limpeza das barras.



Fonte: AUTORA (2017).

Após a limpeza das barras foi realizado a inspeção visual e a sua pesagem para a obtenção do grau de corrosão, utilizou-se a Equação 4:

$$GC(\%) = \frac{m_{cons}}{m_{inic}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

GC : grau de corrosão (%);

m_{cons} : massa consumida no processo de corrosão (g);

m_{inic} : massa inicial da barra de armadura (g).

3.1.6 Ensaio de resistência à compressão

As doze amostras resultantes de cada traço citado anteriormente foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Para o ensaio de resistência à compressão, seguiu-se a ABNT NBR 5739 (2007), a qual se determina o diâmetro do corpo de prova e a altura longitudinal, incluindo o capeamento. Antes de iniciar, limpou-se as faces dos pratos e posicionou-se o corpo de prova centralizado no prato inferior. Iniciou-se o ensaio com o carregamento aplicado continuamente e sem choques, com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Consequentemente, utilizou-se a Equação 5 para determinar a resistência à compressão dos 34 dias.

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (5)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão (MPa);

F : força máxima alcançada (N);

D : diâmetro do corpo de prova (mm)

3.1.7 Análise de dados

Após a realização de todos os ensaios, com os dados obtidos foram efetuados gráficos e planilhas no *software* Microsoft Office Excel para analisar e organizar os dados experimentais.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a metodologia proposta para a conclusão dos objetivos, foram realizados os ensaios de caracterização do concreto autoadensável a fim de se comparar com a especificação das normas regentes, para verificar se atende as condições mínimas exigidas e realizar o comportamento do CAA quando empregado um aditivo inibidor de corrosão.

4.1.1 Caracterização do concreto autoadensável no estado fresco

4.1.1.1 Método do cone de Abrams

No ensaio de espalhamento do primeiro traço, sem o aditivo mitigador de corrosão, observou-se que logo após a retirada do molde, foram necessários 2s para o material atingir o diâmetro de 500 mm (t_{500}), portanto faz parte da classe de viscosidade plástica aparente VS1, e foi obtido um diâmetro médio de 730 mm enquadrando-se na classe de espalhamento SF2, conforme a Figura 9.

Figura 13: Ensaio de espalhamento do primeiro traço.



Fonte: AUTORA (2017).

No próximo traço realizado, com a concentração de 10 kg/m³ na massa de concreto, constatou-se que após 1,5s o material atingiu o diâmetro de 500 mm (t_{500}), portanto faz parte

VS1. Além disso, obteve-se um diâmetro médio de 795 mm, sendo classificado como classe de espalhamento SF3, como demonstra a Figura 10.

Figura 14: Ensaio de espalhamento do segundo traço.



Fonte: AUTORA (2017).

O último traço confeccionado, com concentração de 14 kg/m³ na massa de concreto, observou-se que levou 1s para o concreto atingir o diâmetro de 500 mm (t_{500}), tendo a classificação de viscosidade plástica aparente VS1, assim como assumiu um diâmetro médio de 832,5 mm enquadrando-se na classe de espalhamento SF3, de acordo com a Figura 11.

Figura 15: Ensaio de espalhamento do terceiro traço.



Fonte: AUTORA (2017).

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados para o espalhamento do CAA.

Tabela 7: Resultados de espalhamento.

Traço	T₅₀₀ (s)	Slump Flow (mm)	Classe
0	2	730	VS1 / SF2
1	1,5	795	VS1 / SF3
2	1	832	VS1 / SF3

Fonte: AUTORA (2017).

O espalhamento do traço 1 aumentou 8,90% em relação ao traço 0, enquanto o espalhamento do traço 2 teve um acréscimo de 14,04% em relação ao traço 0. Diante disso, nota-se que a quantidade da concentração do aditivo é diretamente proporcional à fluidez do concreto, aumentando o espalhamento da mistura. Apesar dessa condição constatada, todos os traços respeitaram os limites das classes de espalhamento conforme a norma.

4.1.1.2 Método do funil-V

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados para o espalhamento do CAA.

Tabela 8: Resultados de escoamento.

Traço	T (s)	Classe
0	5	VF1
1	3,5	VF1
2	2,5	VF1

Fonte: AUTORA (2017).

Conforme a NBR 15823-5 (2010) o tempo de escoamento no funil deve ser inferior à 9s, todas as misturas atendem o requisito e são classificadas como VF1. Desse modo, houve uma diminuição de 30% do tempo confinado do traço 1 em relação ao traço 0, enquanto o traço 2 reduziu em 50% o tempo com relação traço 0.

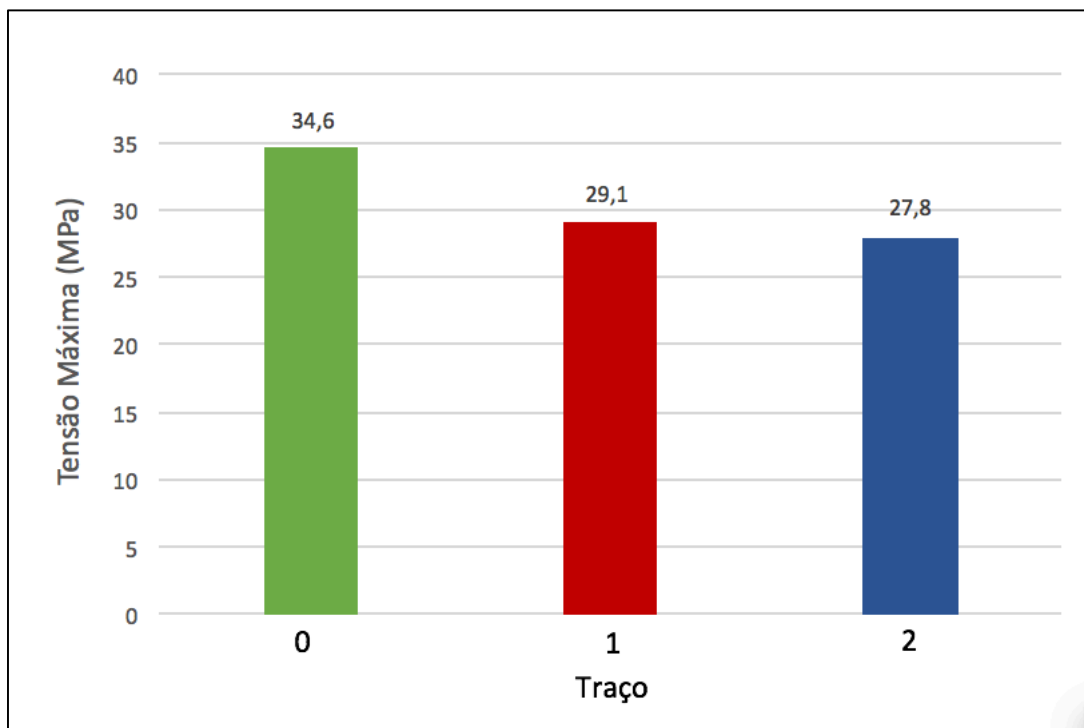
Portanto, observa-se que o ensaio do funil-V e do cone de Abrams estão condizentes, visto que conforme aumenta o espalhamento do concreto, por ele estar mais fluido, diminui-se o escoamento.

4.1.2 Caracterização do concreto no estado endurecido

4.1.2.1 Resistência à compressão

Após o nivelamento das faces dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de compressão axial aos 34 dias, devido a problemas na prensa axial para realizar o ensaio. Desse modo, foram obtidos os resultados conforme o apêndice A - Tensão máxima do ensaio de compressão axial, para cada traço.

Para comparar as resistências de cada traço, o gráfico abaixo apresenta o valor alcançado de cada corpo de prova rompido aos 34 dias, conforme indicativo da NBR 5739 (2007).



Fonte: AUTORA (2017).

Diante disso, observou-se que em relação ao traço estimado de resistência à compressão de 40 MPa: o traço 0 perdeu 13,75%, já o traço 1 diminuiu 27,25% da, enquanto o traço 2 teve um decréscimo de 30,50% da resistência. Sendo assim, notou-se que o aditivo inibidor interferiu na resistência à compressão, tendo a maior perda significativa no traço 2, visto que teve maior teor de aditivo.

4.1.3 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

Após os 28 dias de ensaio e após a limpeza foi realizada a inspeção visual das, para verificar a degradação das barras, como mostra a Figura 17, as barras foram então pesadas e assim foi possível determinar o grau de corrosão.

Figura 16: Inspeção visual.

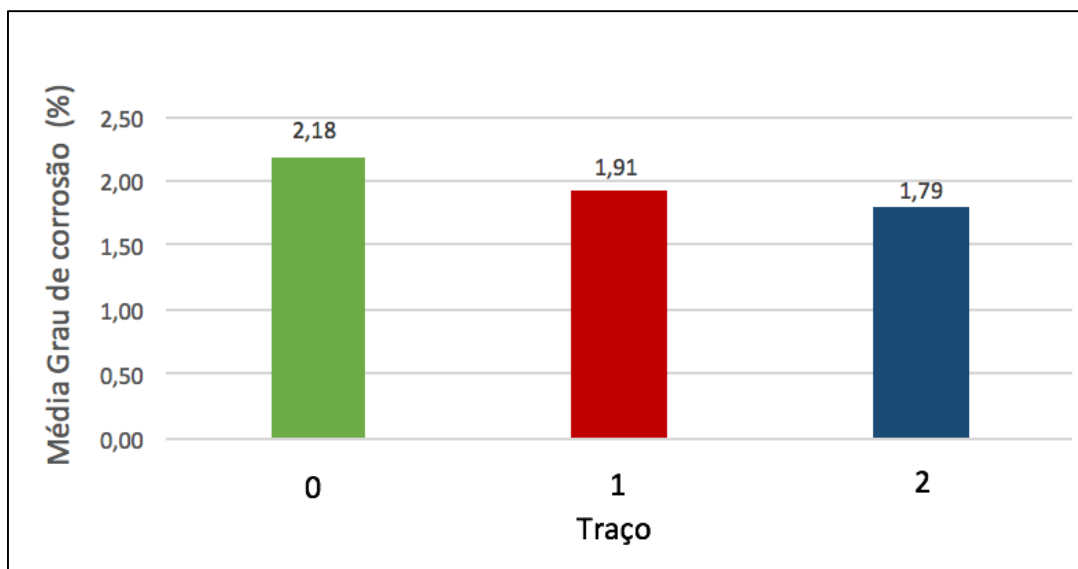


Fonte: AUTORA (2017).

Após a inspeção foi realizado a pesagem das barras e aplicação da Equação 3 para determinar o grau de corrosão de cada uma das barras. No entanto, na inspeção visual as barras só apresentaram material superficial depositado de corrosão. O apêndice B - Determinação do grau de corrosão, apresenta a média das perdas de massa para cada traço.

Analisando o gráfico a seguir, verifica-se que o aditivo inibidor de corrosão atende ao propósito de reduzir o potencial de corrosão das armaduras dentro do concreto. Apresentando pouca diferença quanto a redução da corrosão, o traço 1 diminuiu 12,38% da corrosão em relação ao traço 0, enquanto o traço 2 diminuiu 17,89%. No entanto, deve-se levar em

consideração que a corrente elétrica não foi tão intensa quanto a recomendada, reduzindo a agressividade do meio.



Fonte: AUTORA (2017).

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a confecção do concreto autoadensável se enquadrar em suas devidas classes, alguns aspectos da metodologia proposta foram modificados, como o traço, o qual influenciou diretamente na resistência à compressão, que foi submetido aos 34 dias – devido a problemas na prensa. Sendo assim, notou-se que houve uma diferença de 5,4 MPa para o traço sem adição, não alcançando a resistência estimada de 40 MPa, visto que a quantidade de água e aditivo superplastificante influenciaram nesse resultado, além do aditivo em análise, mudando a fluidez da mistura.

Os traços com adição do aditivo mitigador de corrosão tiveram pouca diferença entre suas resistências, independente de sua concentração, alcançando valores máximos de 29,10 MPa e 27,80 MPa (adições de 10 kg/m³ e 14 kg/m³ respectivamente), apresentando 3,75% de diferença entre si. Portanto, observa-se que o aditivo Sika Ferrogard-901 altera a resistência do concreto, no entanto, o maior foco de aplicação desse concreto é a fluidez e a habilidade passante, nem sempre é a alta resistência.

Quanto ao ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada, devido a problemas no aparelho de indução elétrica, a tensão máxima contínua obtida foi de 1,25 V, provocando uma degradação menor nas barras de aço. No entanto, os resultados quanto ao grau de corrosão foram satisfatórios, mesmo que foram poucos dias para realizar o ensaio. Desse modo, a eficiência do aditivo Sika Ferrogard-901 é comprovada quanto a diminuição da corrosão, chegando a valores de redução de 0,27% e 0,39% no grau de corrosão (entre 0 kg/m³ e 10 kg/m³, e 0 kg/m³ e 14 kg/m³ de aditivo), respectivamente.

A incorporação do Sika Ferrogard-901 influenciou nas características no estado fresco do CAA, sendo que aumentou o espalhamento em 8,90% e 14,04% (teores de 10 kg/m³ e 14 kg/m³ em relação ao traço sem esse aditivo) e o tempo de escoamento no funil-V diminuiu em 30% e 50% respectivamente para as mesma condições.

Diante desse panorama, avaliando todos os ensaios e resultados conquistados, o teor de 10 kg/m³ é o mais indicado para aplicação, por apresentar resultados satisfatórios e pouca diferença em relação a adição de 14 kg/m³. Portanto, as diferenças obtidas nos ensaios foram de 5,14% no ensaio do cone de Abrams, 20% no ensaio do funil-V, 0,12% no grau de corrosão, além disso o teor de 14 kg/m³ reduziu 1,3 MPa na resistência à compressão. Por mais que o teor de 12 kg/m³ seja o indicado pelo fabricante, a adição de 10 kg/m³ já é satisfatória.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A engenharia visa maximizar os resultados, diminuindo os gastos e o tempo de execução, mas ao mesmo tempo não perder a qualidade. Diante disso, estudar outros tipos de variáveis para mitigação da corrosão no concreto de alto desempenho é uma alternativa para se enquadrar nessa realidade. Portanto, algumas possíveis relações são:

- a) - Estudo dos silanos como material de proteção à corrosão;
- b) - Interferência dos cobrimentos no concreto autoadensável para diminuir a corrosão;
- c) - Outros métodos de ensaio de corrosão;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1:** Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4:** Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa-L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5:** Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil-V. Rio de Janeiro, 2010.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de Aço**. 4. ed. São Paulo: Editora Zigue, 2002.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994.

PEREIRA

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

PEREIRA, E. **Avaliação do Processo de Corrosão Acelerada para Diferentes Dosagens de Concreto e Espessuras de Cobrimento**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

REPETTE, W. L. **Concreto Auto-adensável – Características e Aplicação**. Revista: Técnica em jun. 2008. Disponível em < <http://technepini.com.br/engenharia-civil/135/artigo285721-3.aspx> > Acesso em: 27 de mar. 2017.

RIBEIRO, D.V.; SALES, A.; SOUSA, C.A.C.; ALMEIDA, F.C.R.; CUNHA, M.P.T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Editora: Elsevier, 2014.

SIKA. **Aditivo inibidor de corrosão para concreto armado**. São Paulo: Fabricante Sika, 2010.

SOUZA, A. R. **Retração em Concreto Autoadensável: Contribuição de Produtos Mitigadores**. 2016. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TORRES, A. S. **Avaliação da Sensibilidade do Ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – Frente ao Processo de Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 2006. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TUTIKIAN B.F.; DAL MOLIN D.C. **Concreto Autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 2015.

APÊNDICE A - Tensão máxima do ensaio de compressão axial.

Aditivo mitigador (kg/m ³)	Tensão Máxima (MPa)	Média (MPa)
0	31,5	30,73
0	34,6	
0	28,1	
0	28,7	
10	24,6	25,78
10	27	
10	22,4	
10	29,1	
14	23,7	25,03
14	27,8	
14	25,9	
14	22,7	

ÂPENDICE B - Determinação do grau de corrosão.

Barra	Aditivo mitigador (kg/m ³)	m inic (g)	m final (g)	m cons (g)	GC (%)	média GC (%)
1	0	122,1	117,7	4,4	3,60	
2	0	123	120	3	2,44	2,18
3	0	121,1	120,5	0,6	0,50	
4	10	122,1	120,4	1,7	1,39	
5	10	121,1	119,2	1,9	1,57	1,91
6	10	122,2	118,8	3,4	2,78	
7	14	122,9	120,7	2,2	1,79	
8	14	121,5	120,8	0,7	0,58	1,79
9	14	122,7	119	3,7	3,02	