



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM ADIÇÃO DE VIDRO MOÍDO
SUBMETIDAS À CORROSÃO ACELERADA**

Leonardo Augusto Lehnen

Lajeado, Julho de 2020



Leonardo Augusto Lehen

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM ADIÇÃO DE VIDRO MOÍDO
SUBMETIDAS À CORROSÃO ACELERADA**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.^a M.^a Débora Pedroso Righi

Lajeado, Julho de 2020

Leonardo Augusto Lehen

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM ADIÇÃO DE VIDRO MOÍDO
SUBMETIDAS À CORROSÃO ACELERADA**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Ma. Débora Pedroso Righi – Orientadora
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Douglas Velho
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Me. Kassio Stein
Universidade federal do Rio Grande do Sul

Lajeado, Julho de 2020

AGRADECIMENTOS

A vida é repleta de etapas que devem ser vencidas e o trabalho de conclusão de curso é uma delas, sendo o último passo para a tão sonhada formatura da graduação.

Esta longa e árdua caminhada de sete anos e meio, não seria possível chegar ao fim com êxito sem o apoio de toda a família que sempre me apoiou nos momentos em que mais precisei, pai Ildo, mãe Ângela, Irmão Vitor.

A minha namorada Larissa, que esteve presente na parte final da graduação, sendo compreensiva nos momentos de ausência e pelos seus conselhos que foram fundamentais para finalizar com êxito esta etapa.

Não poderia deixar de fazer um agradecimento especial a minha mãe que nunca mediu esforços para me ajudar financeiramente, muitas vezes deixando os seus sonhos de lado para poder me ajudar a realizarmos juntos este nosso sonho. Também aos meus tios Rogério e Maira que no início da graduação tiveram um papel fundamental pois me proporcionaram um emprego e apoio financeiro para a realização dos estudos. E na parte final meu agradecimento vai para o meu primo Luis Henrique que também foi fundamental para a realização deste sonho.

Ao profissional Arquiteto Maicon Schu que me deu a oportunidade de trabalhar em seu escritório, me ensinando a parte prática e realização de projetos arquitetônicos, com certeza agregando muito aos meus conhecimentos.

À minha orientadora Débora Pedroso Righi, por toda a confiança em meu trabalho, pela dedicação e sabedoria em cada orientação. Muito obrigado por todo o apoio ao longo de todo o trabalho de conclusão de curso. Me sinto honrado em ser orientado por você e vou ter orgulho de dizer que você foi a minha orientadora.

Ao pessoal do Laboratório de Tecnologia da Construção da UNIVATES – LATEC, por estarem sempre dispostos a ajudar e por todo auxílio durante a realização dos ensaios.

RESUMO

Nos dias de hoje aumenta a busca por materiais que possam ser utilizados na construção civil que amenizem a degradação e a agressão ao meio ambiente. Com isso, vêm sendo realizados estudos de viabilidade econômica e técnica da utilização de resíduos reciclados em substituição dos materiais tradicionais não renováveis. Um destes resíduos seria o de vidro, material totalmente reciclável e que pode ser útil na composição do concreto. As garrafas de cerveja do tipo *long-neck* não são retornáveis e nem recolhidas, sendo destinadas aos aterros sanitários. Com o intuito de utilizar essas garrafas de cerveja, este material foi recolhido em casas de festas para a realização deste estudo que teve como objetivo analisar a resistência a íons cloretos, comparando um concreto convencional e um concreto com adições parciais de vidro moído em substituição à areia. Inicialmente definiu-se as características dos materiais, em seguida foi realizada a dosagem e concretagem de 4 traços distintos, onde foi substituído o agregado miúdo (areia) pelo resíduo de vidro das garrafas *long-neck* nas seguintes proporções 0%, 5%, 15% e 25%. Após este processo, foram moldados os corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20cm e duas vigas para cada traço, com dimensões de 100x15x10cm. Passados os 28 dias de cura, 4 das 8 vigas foram submetidas ao ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada por 30 dias. Posteriormente ao processo de corrosão, foi realizada a análise da resistência à flexão das vigas, análise da fissuração e análise da perda de massa da armadura positiva. A viga de referência submetida ao processo de corrosão demonstrou uma redução de resistência de 24,74%, quando comparada com a viga referência mantida em condição ambiente, enquanto que a viga com 5% de vidro moído não apresentou redução de resistência, a viga com 15% de vidro moído obteve uma redução de suporte de 18,35% e a viga com 25% de vidro moído obteve uma redução de resistência de 18,52%. Com isso, os resultados demonstram que a adição de resíduo de vidro provenientes de garrafas *long neck* no concreto, podem contribuir para a redução da deterioração das vigas de concreto armado.

Palavras-chave: Concreto; vidro moído; método CAIM; ensaios.

ABSTRACT

Nowadays the search for materials that can be used on civil engineering and that can also reduce the degradation and aggression to the environment is growing up. That way, studies are being done about the economic viability and technique of using recycle waste for replace the traditional materials that are not renewable. One of these residues would be glass, fully recyclable material that can be useful in the concrete's composition. The beer's long-neck bottles are not returnable neither collected, being destined to the landfills. With the purpose of utilizing those beer's bottles, this material was collected on party houses to perform this study that has the objective of analyzing the resistance to chloride ions, comparing a conventional concrete and another with partial addition of crushed glass replacing sand. Initially the material's features were defined, then the concrete dosage and concreting of four distinct traits were performed, where the added grains (sand) were replaced for the long-neck bottles' glass residues in the proportions of 5%, 15% and 25%. After that, the cylindrical samples were molded with the dimension of 10x20cm and two beams for each trait, with the dimension of 100x15x10cm. After 28 days of the ripening period, 4 of the 8 beams were submitted to the accelerated corrosion by modified immersion test for 30 days. After the corrosion process, were performed the analysis of the beams flexural strength, analysis of cracking and analysis of positive reinforcement mass loss. The reference beam that was submitted to the corrosion process showed a resistance reduction of 24,74%, when compared with the reference beam that was kept on ambient condition, while the 5% crushed glass beam did not show resistance reduction, the 15% crushed glass beam showed structure reduction of 18,35% and the 25% crushed glass beam had a resistance reduction of 18,52%. That way, the results demonstrate that the addition of long neck glass' waste on concrete, can contribute for deterioration reduction of reinforced concrete beams.

Keywords: Concrete; CAIM test; crushed glass; test;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo geral	11
1.1.1 Objetivos específicos	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Delimitação da pesquisa	13
1.4 Estrutura do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Durabilidade das estruturas	15
2.1.1 Vida útil das estruturas	16
2.1.2 Processos degradativos do concreto	18
2.1.2.1 Corrosão	19
2.1.2.2 Carbonatação	20
2.1.2.3 Ataques por sulfatos	22
2.1.3 Métodos de Avaliação da Degradação das Estruturas	24
2.1.3.1 Método Caim	24
2.2 Concretos com a utilização de materiais alternativos	28
2.2.1 Concreto com vidro moído	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1 Programa experimental	38
3.2 Materiais	40
3.2.1 Cimento	40
3.2.2 Areia	41
3.2.2.1 Determinação da massa específica e massa unitária da areia	41
3.2.2.2 Determinação granulométrica da areia	45
3.2.3 Brita	48
3.2.3.1 Determinação da massa específica e massa unitária do agregado graúdo	48
3.2.3.2 Determinação da granulometria do agregado graúdo.	53

3.2.4 Vidro	55
3.2.4.1 Moagem do vidro	57
3.2.4.2 Determinação da massa específica e massa unitária do vidro moído.	58
3.2.4.3 Determinação da granulometria do vidro moído	64
3.3 Confeção das vigas	66
3.3.1 Fôrmas	66
3.3.2 Armadura	66
3.3.3 Concreto	69
3.3.3.1 Dosagem	69
3.3.3.2 Moldagens dos corpos de prova	70
3.3.3.3 Cura	72
3.4 Ensaio	72
3.4.1 Resistência mecânica à compressão simples	72
3.4.2 Corrosão acelerada	73
3.4.3 Resistência à tração na flexão	75
3.4.4 Análise de fissuração	76
3.4.5 Determinação da perda de massa	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 Resistência à compressão simples	79
4.2 Resistência à tração na flexão	80
4.3 Análise de fissuração	83
4.4 Perda de massa	88
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Garcia e Garcia (2014) afirmam que os concretos convencionais, que possuem resistência à compressão entre 10 MPa e 50 MPa, são os mais utilizados em todo o mundo e sua utilização se dá principalmente por ter um baixo custo, porém, em vários casos ele apresenta uma série de manifestações patológicas, que acabam acarretando desconfortos visuais e degradações na estrutura da construção. Em muitos casos são submetido à ambientes agressivos e dessa forma, para que o mesmo possa continuar sendo utilizado em grande escala e em diversos campos, faz-se necessário o desenvolvimento de concretos especiais onde são realizadas alterações nas propriedades dos materiais, mudando suas características e podendo ainda ser utilizado uma variedade de cimentos, aditivos, adições, agregados em diversas formas de aplicação, trazendo deste modo avanços em relação ao convencional.

A escassez de recursos naturais e uma maior preocupação com o meio ambiente, fez com que todos os segmentos da sociedade buscassem alternativas de crescimento mais sustentáveis. O consumo desordenado de matérias primas e o grande volume de resíduos descartados anualmente tem como alternativa a sua reciclagem e dessa maneira a uma redução dos impactos ambientais. Para reduzir esses danos e fazer o uso do material de forma sustentável é importante o desenvolvimento de processos e técnicas para reaproveitamento e reciclagem destes resíduos. As garrafas de cerveja do tipo *long-neck* podem ser reaproveitadas por ser fabricadas com vidro, tendo como principais propriedades a sua dureza e a

resistência. Tais propriedades que permitem que o material seja empregado nas mais variadas aplicações, tanto como material na construção civil, como também na indústria de alimentos (CEBRACE, 2017).

O número de embalagens de vidro que são produzidos anualmente no Brasil chega a aproximadamente 980 mil toneladas. Onde desta produção são reciclados apenas 45% de vidro em forma de cacos, que são recolhidos de empresas e vidraçarias, e outra pequena parte recolhida pela coleta seletiva de municípios. A dificuldade de separação nos processos de triagem é devido às mais variadas propriedades, colorações e composições do material que talvez justifique os 55% de resíduo de vidro que não são reciclados anualmente (CEMPRE, 2017).

Seguindo as novas tendências da construção civil, como a utilização de matérias primas renováveis junto à antiga maneira de se construir com resíduos sólidos (SANTOS; BORJA, 2005). Com a finalidade de preservar o meio ambiente, suavizando o impacto ambiental que o resíduo de vidro descartado gera, assim como as garrafas de vidro do tipo *long-neck*, várias pesquisas já foram realizadas visando a substituição do agregado miúdo do concreto por resíduo de vidro. No entanto neste trabalho será substituído parcialmente a areia por resíduo de vidro de garrafas de cerveja do tipo *long-neck*. Esta substituição tem a finalidade de realizar testes, tais como resistência a compressão e resistência a cloretos.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso do vidro moído oriundo de garrafas de cerveja do tipo *long-neck* em substituição parcial do agregado miúdo natural, em vigas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada, método CAIM.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar as características físicas dos materiais a serem utilizados no concreto;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores (0%, 5%, 15% e 25%) de substituição em massa de agregado miúdo por vidro moído;
- Comparar a resistência mecânica entre vigas de concreto armado submetidas e não submetidas ao ensaio de corrosão acelerada;
- Avaliar a fissuração e a perda de massa das barras da armadura positiva;

1.2 Justificativa

Vêm se tornando cada vez mais necessário a racionalização dos recursos naturais de forma a preservar o meio ambiente. No intuito de poupar estes recursos e diminuir os custos, a reciclagem é uma das maneiras para se atingir o desenvolvimento sustentável. Para Chen et al (2013), a sustentabilidade tornou-se um dos principais assuntos abordados por indústrias, política e meios acadêmicos. As ações humanas vêm causando grandes transformações na natureza como a poluição do ar e da água, o aquecimento global e o alto consumo de recursos naturais de fontes não renováveis. Sendo o setor da construção civil um dos principais contribuintes para tal transformação do meio ambiente pois a sua principal função é transformar um ambiente natural em um ambiente adequado ao desenvolvimento de diversas atividades (JOHN e AGOPYAN, 2000).

Conforme Barboza et al (2008), para que os resíduos sejam utilizados na construção civil, é necessário que os mesmos atendam as exigências mecânicas, físicas e de durabilidade conforme especificado em norma e que suas propriedades sejam similares ou superiores aos produtos já existentes no mercado.

Conforme a resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) o vidro é pertencente a classe B de reciclagem. Correspondente a um material que deve ser reutilizado, encaminhado ou reciclado. Contudo já foram realizados diversos estudos onde é incorporado resíduo de vidro em novos materiais da construção civil. No

Quadro 1 se encontra algumas das possíveis utilizações de resíduo de vidro na construção civil.

Quadro 1 - Possíveis utilizações de resíduo de vidro na construção civil.

RESIDUO	UTILIZAÇÃO
VIDRO	Pozolanas Sistemas de drenagem Agregados Fibra de vidro Bases e sub-bases de rodovias e ferrovias

Fonte: CALMON (2007).

Com isso, este estudo busca diminuir ou substituir a quantidade de recurso natural utilizada no concreto sem que haja prejuízos em suas suas propriedades, assim diminuindo a quantidade de lixo aterrada. Para isso com os resultados desta pesquisa pretende-se confirmar a viabilidade técnica de uso do resíduo do vidro proveniente de garrafas do tipo *long-neck* como substituição parcial do agregado miúdo natural (areia) no preparo de concretos na construção civil. Com o aproveitamento do resíduo, a pesquisa estará contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor.

1.3 Delimitação da pesquisa

O trabalho delimita-se na comparação da resistência mecânica à compressão de corpos de prova com substituição parcial de resíduo de vidro (0%, 5%, 15%, 25%) pelo agregado miúdo natural. E na comparação da resistência mecânica de 4 vigas com as mesmas composições anteriormente citadas, submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada durante trinta dias, e outras 4 vigas com as mesmas proporções, não submetidas ao processo de degradação.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho se estrutura inicialmente em 5 capítulos, introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, cronograma da pesquisa, resultados esperados e considerações finais, onde serão abordados os temas pertinentes ao assunto. Serão apresentadas ainda as referências utilizadas para o embasamento da pesquisa.

- Capítulo 1 – Introdução: contém as considerações iniciais sobre o tema a ser desenvolvido por meio de pesquisa científica. No capítulo são apresentados os objetivos, justificativas e delimitações do tema;
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: contempla os conhecimentos teóricos necessários para a compreensão do estudo proposto;
- Capítulo 3 – Materiais e métodos: são apresentados os ensaios e procedimentos experimentais que serão desenvolvidos em laboratório, para a caracterização dos materiais utilizados no concreto, tanto quanto do próprio concreto;
- Capítulo 4 - Cronograma: Seção responsável pela definição do tempo necessário para passar para a próxima fase, planejando as ações do início ao final, prevendo o tempo necessário em cada etapa.
- Capítulo 5 - Resultados esperados: São apresentados resultados obtidos em estudos já realizados com o mesmo tema.
- Capítulo 6 - Considerações finais: apresenta o fechamento da pesquisa, com considerações pertinentes da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Durabilidade das estruturas

De acordo com Fusco (2008), a durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada com a sua capacidade de resistir à agressividade do meio que está imposta e aos materiais utilizados na sua fabricação. Onde podem ser deterioradas por mecanismos de natureza química ou física, caso tenha a presença de água e disponibilidade de oxigênio no ar para que aconteça as reações.

Os mecanismos de condução de agentes agressivos assim como a durabilidade estão relacionados com a pasta de cimento, em função da ligação dos poros do concreto e da porosidade onde a uma transição entre os agregados e a pasta. Estes poros capilares tem como sua principal característica formar um conduto de entrada e saída de água do interior das estruturas de concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Para Souza e Ripper (1998), as características do concreto como densidade, porosidade, permeabilidade, resistência mecânica e capilaridade, que definem a qualidade deste material, estão totalmente relacionadas a quantidade de água utilizada em relação ao cimento na mistura.

E conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade é definida como a “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em

conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

2.1.1 Vida útil das estruturas

Conforme NBR 6118 (NBR, 2014), o conceito de vida útil de projeto deve ser aplicado a todos os tipos de estruturas de concreto e suas partes. Onde usualmente é definida como o período de tempo em que as estruturas de concreto se mantêm em condições adequadas de uso, desde de que atenda aos requisitos de manutenção e uso, delimitados pelo construtor e projetista.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), às características do concreto definem a vida útil das estruturas. Portanto com a finalidade de obter a durabilidade estabelecida em projeto, as estruturas de concreto armado devem obedecer alguns requisitos mínimos. Para isso a norma apresenta a Tabela 1 que expressa os riscos de deterioração das estruturas, grau de agressividade e os ambientes aos quais estão expostas.

Tabela 1 - Classe de Agressividade Ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

E conforme a Tabela 2 apresentada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), define-se algumas características do concreto como a relação a/c e a classe de resistência de acordo com a agressividade ambiental. E na Tabela 3 é definido o cobrimento mínimo a ser aplicado, protegendo assim a armadura que está disposta no elemento estrutural.

Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 3 - Cobrimento mínimo para estruturas de concreto armado

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ²⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os concretos expostos a condições especiais devem atender ao que está prescrito na Tabela 4, obedecendo a máxima relação água/cimento (a/c) e valor mínimo de resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}).

Tabela 4 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.1.2 Processos degradativos do concreto

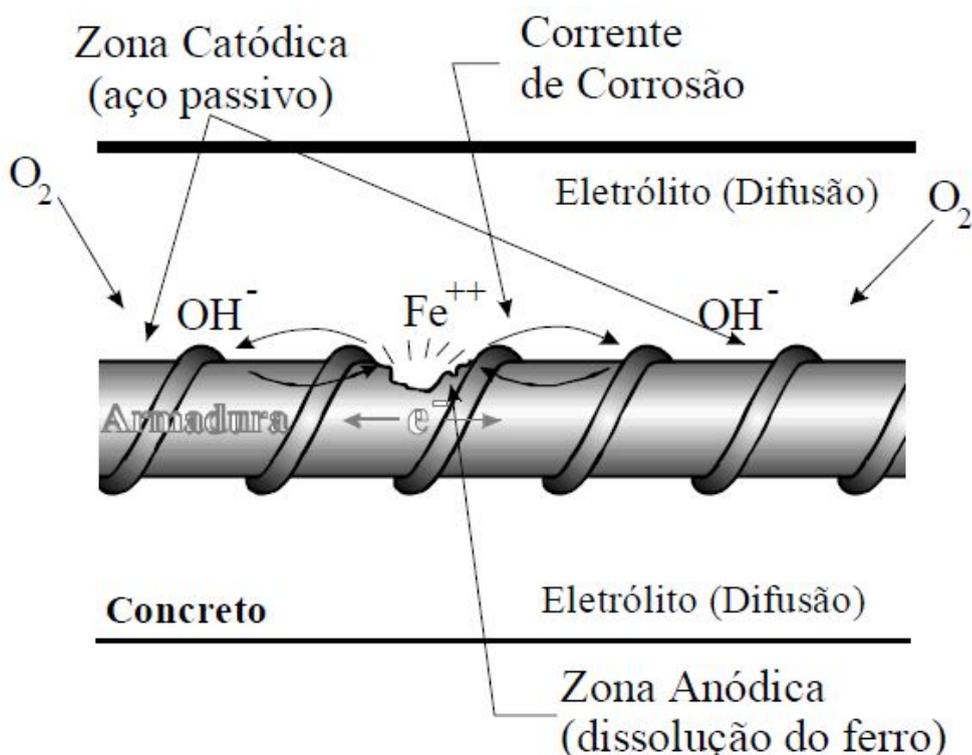
Para Brandão (1999), o processo de degradação das estruturas de concreto pode ser considerado como o antônimo de durabilidade, pois para que não haja a deterioração das estruturas é preciso que o material tenha a capacidade de suportar as condições às quais está concebido, sem que sofra danos ao decorrer do período determinado.

Ainda para Brandão (1999), os principais problemas com durabilidade das estruturas está relacionado com o aumento de esbeltez dos elementos estruturais. Com o avanço da tecnologia e aumento da resistência do concreto passou-se a reduzir as seções dos elementos estruturais assim diminuindo o cobrimento de concreto sobre as armaduras, facilitando a estrada de agentes agressivos, algo que não acontecia nas construções antigas, onde se utilizava concretos com baixas resistências, porém as seções transversais dos elementos, em geral, eram mais robustas assim como o cobrimento de concreto sobre a armadura.

2.1.2.1 Corrosão

A corrosão pode ser definida como sendo a deterioração de um material, e acontece de duas maneiras, por ação eletroquímica proveniente do meio ambiente podendo ou não estar sob esforços mecânicos ou por meio de uma ação química. A corrosão eletroquímica ou aquosa acontece devido a formação de uma célula de corrosão ou pilha, onde ao longo da superfície do aço os trechos sofrem diferentes potenciais, contendo eletrólitos devida a presença de umidade no concreto e com este fenômeno, algumas partes do metal se tornam anódicas e outras catódicas, conforme a Figura 1, sendo este um dos maiores problemas nas obras civis. Já a corrosão química é causada por uma reação gás metal, também conhecida por oxidação ou corrosão seca. É basicamente a formação de uma película de óxido que geralmente não provoca deterioração das superfícies metálicas, salvo quando se tratar de gases extremamente agressivos (GENTIL, 1996 e CASCUDO, 1997).

Figura 1 - Formação das zonas anódicas e catódicas.



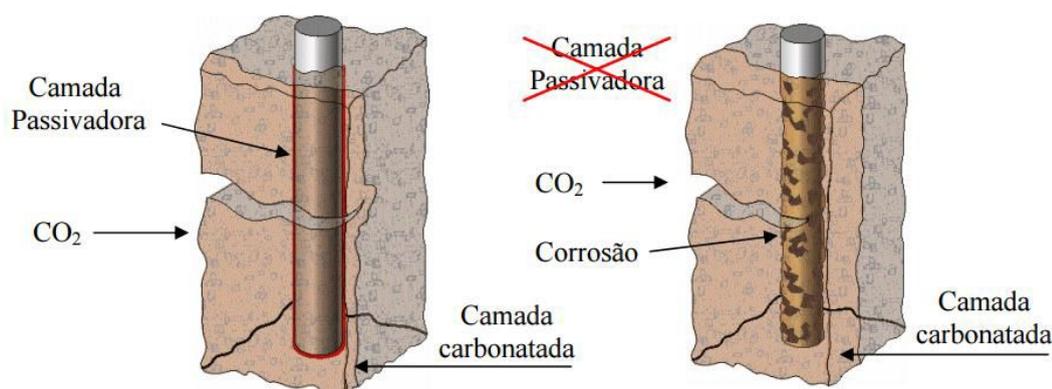
Fonte: CASCUDO (1997).

Portanto a corrosão das barras de aço acontece por conta do acúmulo de agentes agressivos na superfície do concreto. Que penetram pelas fissuras e poros e quando entram em contato com a umidade reagem formando ácidos que reduzem o pH e desestabiliza a camada passivante de óxidos, onde por sua vez faz com que a camada de óxidos aumente de volume, resultando em elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando o deslocamento e a fissuração do concreto de cobrimento. E também com isso há uma diminuição da seção transversal das barras de aço e perda de aderência entre o concreto e a sua armadura, prejudicando assim a transferência de esforços e consequentemente podendo levar essa estrutura ao colapso (FIGUEIREDO, 1994 e AITCIN, 2000).

2.1.2.2 Carbonatação

Segundo Andrade (1992), por meio de difusão o CO_2 penetra nos poros do concreto. Com isso o gás carbônico reage com o hidróxido de cálcio e acaba diminuindo a alcalinidade da camada de cobrimento da superfície exposta dando início a carbonatação do material. Os níveis de pH do concreto podem chegar próximos a 9, que faz com que a camada passivadora que envolve a armadura perca as suas condições de estabilidade. Como pode ser visto na Figura 2 o avanço da frente de carbonatação.

Figura 2 - Representação do avanço da frente de carbonatação



Fonte: Tula (2000).

Helene (1993) e Figueiredo (1994), destacam vários fatores que influenciam na carbonatação do concreto, elencando as seguintes variáveis:

- Tempo de cura: Quanto maior a hidratação do cimento, menor será a porosidade e a permeabilidade, diminuindo a possibilidade de carbonatação. Por isso a importância de respeitar o tempo de cura dos concretos.
- Relação a/c: Este fator é que delimita a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido. Ou seja quanto menor a relação a/c, menor será a porosidade e a permeabilidade de um concreto, diminuindo assim a penetração de CO₂ para o interior do material.
- Umidade relativa (UR) do ambiente: Este parâmetro condiciona a velocidade de difusão de CO₂ através dos poros de material, levando em conta a quantidade de água ali contida. Define-se as maiores velocidades de frente de carbonatação com uma UR variando entre 60% a 80%. Pois quando os poros estão secos (baixa UR), o CO₂ difunde até as regiões mais internas sem dificuldades: por outro lado as reações de frente de carbonatação não ocorre devida a falta de água. E quando os poros estão saturados a frente de carbonatação progride lentamente, por conta da baixa difusibilidade de CO₂ na água. Mas quando os poros estão parcialmente preenchidos com água, a frente de carbonatação avança rapidamente devida a existência simultânea de água e da possibilidade de difusão de CO₂.
- Concentração de CO₂: A velocidade de carbonatação aumenta conforme a quantidade de CO₂ presente no meio ambiente, principalmente em concretos com relação a/c elevada. Como por exemplo para efeitos práticos, em um ambiente rural temos como base um teor de CO₂ de 0,03%, em volume. Enquanto isso nas grandes cidades este teor está na ordem de 0,3 %, em volume.

Ainda conforme os autores, é possível medir a frente de carbonatação nas estruturas através da utilização de indicadores químicos, como a timolftaleína ou a fenolftaleína em solução. Que em contato com a solução alcalina do concreto, os

indicadores adquirem colorações diferentes a partir da determinação do pH da solução. A fenolftaleína atinge uma coloração vermelha carmim com o pH superior a 9,5, enquanto a timolftaleína adquire uma coloração azulada para um valor de pH da ordem de 10,5.

2.1.2.3 Ataques por sulfatos

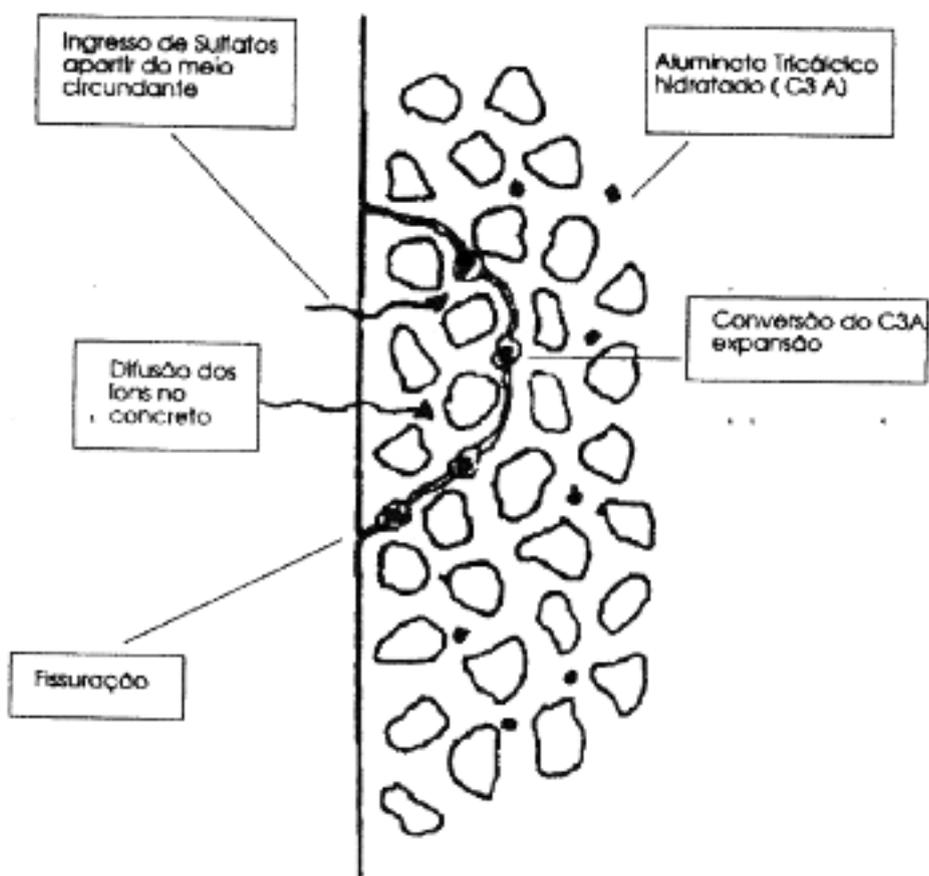
Conforme Tuthill (1988), íons sulfatos (SO_4) estando em contato com o concreto pode causar grandes deteriorações no material cimentício, com isso os ambientes onde há concreto em contato com o sulfato vêm sendo estudados desde a década de 20. Portanto é de fundamental importância a adoção de medidas para evitar este problema.

Segundo Canova (1988), a degradação do concreto causada por íons sulfatos começa no momento em que a água conduz este material para o interior do concreto já hidratado, causando uma reação, e esta manifestação pode ser observada de duas maneiras distintas:

- Perda de massa e redução acelerada da resistência
- Expansão do concreto

Após a realização de ensaios utilizando corpos de prova em contato com soluções de sulfatos pode-se constatar que o Aluminato Tricálcico (C_3A) proveniente da hidratação dos compostos do cimento, contém correlações com a deterioração do concreto, formando etringita (trisulfoaluminato hidratado de cálcio). O que explica a expansão do elemento de concreto, pois esta reação aumenta o volume e gera o tensionamento da matriz (TUTHILL, 1988), como podemos observar na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática do ataque de sulfatos



Fonte: CEB (1989).

De acordo com Mehta (1993), conforme a análise dos ensaios foi observado que seria preciso alterar a composição do material cimentício pois seria preciso desenvolver um cimento resistente a sulfatos, onde basicamente teria que ser reduzido o teor de *C3A* do cimento portland comum. Que a partir da década de 30 passou a ser comercializado dois tipos de cimento resistente a sulfatos, sendo os mesmos regulamentados pela norma NBR 5737:

- Cimento de alta resistência a sulfatos (ARS), com teor de *C3A* máximo inferior a 5%.
- Cimento de moderada resistência aos sulfatos (MRS), com teor de *C3A* limitado a 8%

2.1.3 Métodos de Avaliação da Degradação das Estruturas

2.1.3.1 Método Caim

Conforme Graeff (2007), em 1990, pesquisadores da UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, criaram um método de aceleração da corrosão de elementos de concreto armado. O mesmo é conhecido como método CAIM - corrosão por imersão modificada, onde o ensaio basicamente consiste em expor corpos de prova a uma solução agressiva de cloretos e juntamente aplicado a uma diferença de potencial (d.d.p), fazendo com que o processo de corrosão acelere.

Ainda de acordo com a autora, o método CAIM foi criado por conta da limitação do tempo para a realização de experimentos em laboratório e devido o tempo que é necessário para que haja o processo de corrosão em estruturas reais. O resultado utilizando este método pode ser obtidos em poucos dias, porém todo ensaio acelerado distorce as condições de agressividade, o que dificulta a correlação do ensaio com as condições naturais, impossibilitado uma relação do tempo de ensaio com a vida útil da estrutura.

Métodos antigos como a norma americana ASTM 1202 C (1999), previam resultados em apenas 7 dias, utilizando diferenças de voltagem elevadas, onde era aplicado uma d.d.p de 60V que estimula os cloretos migrarem de uma célula para a outra de uma forma muito acelerada, fazendo com que os corpos de prova tenham um forte aquecimento, assim, ocorrendo uma distorção da dinâmica do processo de corrosão, principalmente em concretos com relação água/cimento elevada, baixa resistência, com fissuras e altos níveis de contaminação de cloretos (AMLEH e MIRZA (1999).

Passou a ser discutido a utilização de uma d.d.p elevada por conta dos efeitos negativos, com isso Cabrera (2014), desenvolveu um método que prevê a utilização de voltagem mais baixa, alongando o ensaio, e reduzindo, entretanto, as distorções geradas. Para isso os corpos de prova são imersos em uma solução de 35,0 g/L de NaCl, utilizando uma barra de cobre para a distribuição de uma voltagem de 250 ma para a estrutura.

Na Figura 4 é possível visualizar o ensaio sendo realizado, à esquerda pode ser visto a fonte de corrente contínua e ao seu lado os corpos de prova.

Figura 4 - Realização do ensaio CAIM - vista dos corpos de prova e da fonte

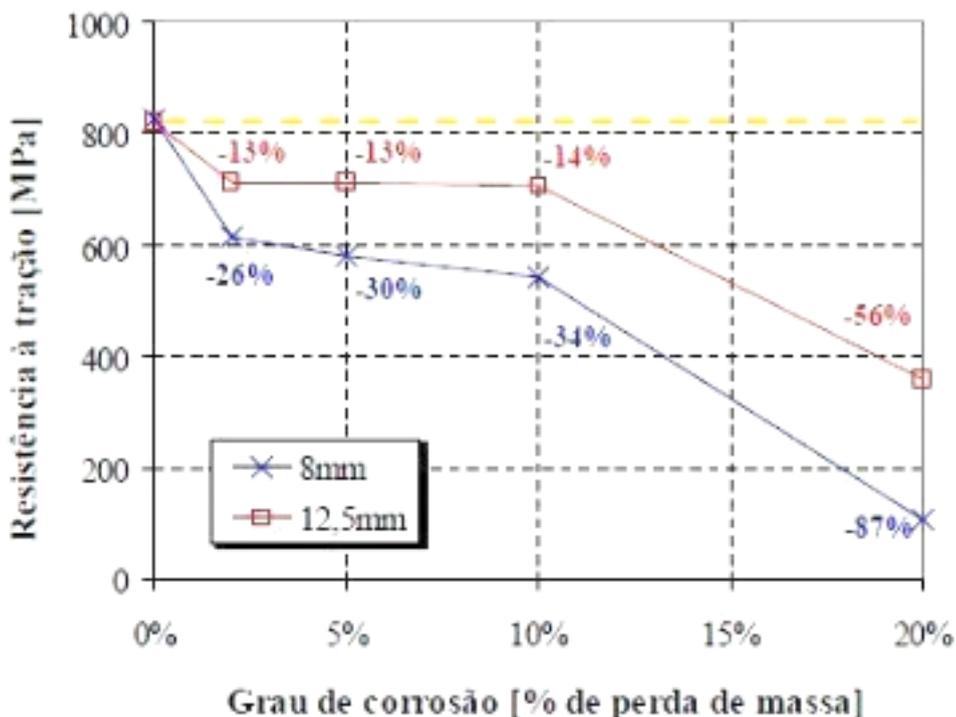


Fonte: Stein (2016).

Autores como Graeff (2007), Stein (2016), e Berton (2019), analisaram em suas pesquisas concretos armados submetidos a corrosão, utilizando a mesma taxa de corrente constante em seus ensaios, com o intuito de exercer um maior controle sobre o grau de corrosão, mantendo uma corrente de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Entretanto cada autor utilizou diferentes materiais e adições em suas misturas.

Graeff (2007), realizou em sua pesquisa ensaios onde correlacionou os graus de corrosão da armadura de 0% a 20% em duas barras de aço distintas, de 8 mm e 12,5 mm, fazendo uma relação com a capacidade de resistência à tração, utilizando concretos convencionais. Para isso, moldou corpos de prova de 70x140x1300mm que foram submetidos ao ensaio e obtiveram os resultados expressos na Figura 5, onde pode-se observar que a partir do grau de corrosão de 10% obteve-se uma decrescente significativa de resistência a tração em ambas as barras.

Figura 5 - Resistência à tração x grau de corrosão.



Fonte: Graeff (2007).

Já conforme Stein (2016), que na sua pesquisa utilizou as mesmas dimensões de corpos de prova e traço de Graeff (2007), realizou seus ensaios aplicando diferentes correntes, onde inicialmente utilizou uma corrente de 10 mA e posteriormente uma corrente final de 320 mA, em determinados períodos. Primeiramente rompeu a viga de testemunho na qual não houve agressões de corrosão e obteve-se uma resistência de tração de 39,7 KN. E posteriormente rompeu-se o corpo de prova submetido a corrente inicial por uma semana e a corrente final por mais três semanas, obteve-se uma perda de massa de armadura de aproximadamente 9%, rompendo com uma carga de 37,6 KN.

Em seguida rompeu-se a viga submetida ao ensaio onde previamente foi submetida a uma corrente inicial de 10 mA por duas semanas e a uma corrente final de 320 mA por mais duas semanas, onde teve uma perda de massa de armadura de aproximadamente 14% e rompeu com uma carga de 34,5 KN (STEIN, 2016).

E para Berton (2019), que utilizou traço e corpos de prova distintos aos de Graeff (2007) e Stein (2016). Onde optou por realizar dois ensaios na sua pesquisa um no qual introduziu 10% de cinza de casca de arroz e o outro onde utilizou 10% de sílica ativa, utilizando corpos de prova de dimensões de 100 x 150 x 1000mm. Para a realização do ensaio foi utilizada uma corrente contínua de 250 mA conforme delimitado por Graeff (2007).

Para a obtenção de resultados Berton (2019) correlacionou a força (KN) e o deslocamento (mm), com isso por métodos matemáticos é possível chegar a uma resistência de tração. Para facilitar o entendimento as diferentes misturas foram separadas por nomenclaturas conforme Figura 6.

Figura 6 - Nomenclatura adotada para as vigas

Denominação	Código
Referência não corroída	REFNC
10% Cinza de casca de arroz não corroída	10CCANC
10% Silica ativa não corroída	10SANC
Referência corroída	REFC
10% Cinza de casca de arroz corroída	10CCAC
10% Silica ativa corroída	10SAC

Fonte: Berton (2019).

Na Figura 7 é possível visualizar os resultados de carga máxima de ruptura e também o deslocamento máximo (flecha máxima), obtidos durante o ensaio de tração na flexão (BERTON, 2019).

Figura 7 - Resistência à tração na flexão

Viga/ traço	Carga de Ruptura (MPa)	Flecha máxima (mm)
REFNC	26,28	16,81
REFC	14,10	15,99
10CCANC	27,88	16,94
10CCAC	26,96	17,27
10SANC	27,68	17,51
10SAC	20,92	17,14

Fonte: Berton (2019).

Conforme Figura 7 e de acordo com Berton (2019), houve uma diminuição da perda de resistência a tração nas vigas com adições em relação a viga de referência, na viga de testemunho (REFC) a perda de resistência chegou a 46,35% enquanto que na viga com adição de sílica ativa (10SAC) a perda foi de 24,43% e na viga com adição de cinza de casca de arroz (10CCAC) foi de apenas 3,3%.

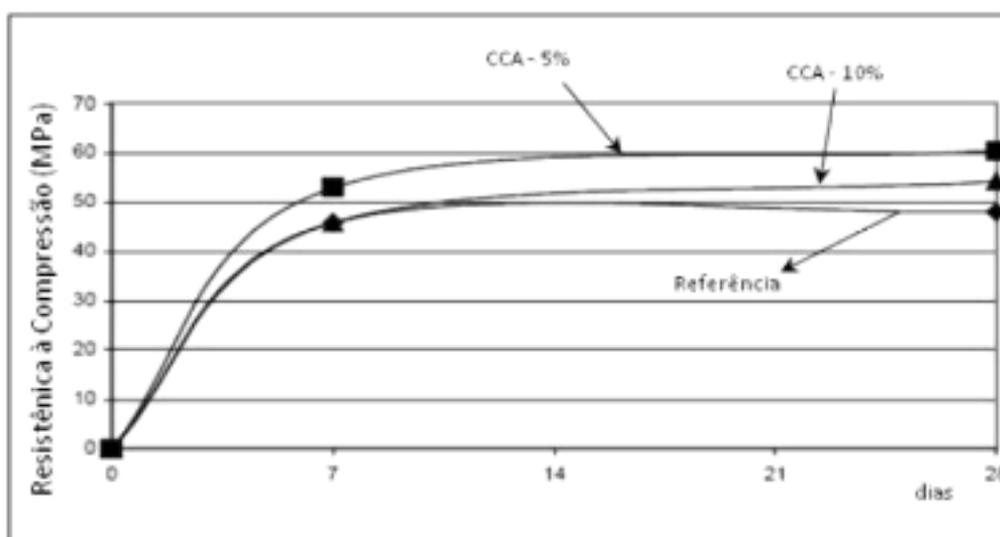
2.2 Concretos com a utilização de materiais alternativos

Vêm se observando que nas regiões das grandes cidades já se têm a falta de agregados naturais que juntamente com a necessidade de aperfeiçoar as características do concreto como a resistência, flexibilidade, leveza, custos e outras. Passou a se utilizar novos materiais como cinza de casca de arroz, escória de alto forno e sílica ativa, que além de melhorar as propriedades do concreto, pode-se aliar a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento econômico (MODRO, 2009).

Conforme Sosbai (2010), arroz é um dos alimentos mais consumidos pelos humanos, tendo uma grande produção em âmbito mundial. Conforme Gonçalves (2009), na etapa de beneficiamento é gerado diferentes tipos de resíduos, onde a cinza de casca do arroz se destaca pelo grande volume gerado, pouca procura e baixo valor comercial gerando problemas no descarte deste material.

Estudos como de Mehta (1994) demonstram que além de reduzir a segregação e exsudação, melhorando a trabalhabilidade deste material, a cinza de casca de arroz ainda acelera o ganho de resistência do concreto. Conforme a pesquisa de Thashima et al (2004) utilizando 5% a 10% de cinza de casca de arroz se tem um aumento na resistência inicial e nas idades maiores, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Resistência à compressão utilizando cinza de casca de arroz.



Fonte: Thashima et al (2004).

Outro material que está sendo utilizado em grande escala no concreto é a escória de alto-forno (ALMEIDA, 2009). Devido às suas propriedades que beneficiam as características do concreto e por conta da abundância deste resíduo proveniente da produção de ferro gusa, onde a cada tonelada de ferro produzido é gerado na faixa de 210 a 310 Kg deste resíduo (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

Conforme Osborne (1999), como principais vantagens da utilização de escórias de alto forno, destaca-se a economia de energia referente a redução do calor de formação do clínquer, diminuição de gases como o CO₂, baixo custo tratando-se de um resíduo siderúrgico industrial e as melhorias nas propriedades do

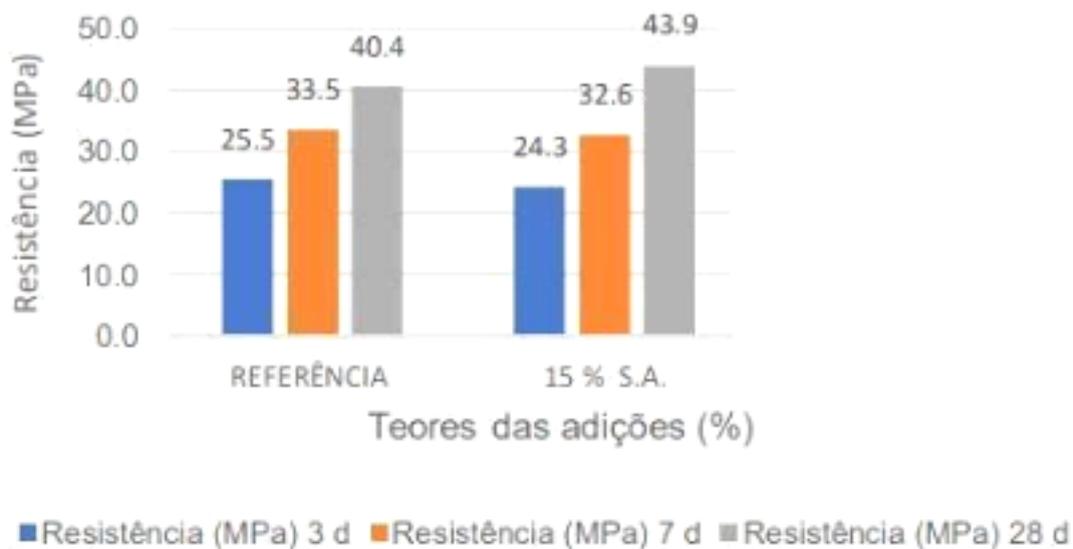
concreto como redução do calor de hidratação, aumento de resistência à compressão em maiores idades, aumento da impermeabilidade, aumento da resistência a ataques de sulfatos e reação álcali agregados e diminui a penetração de íons cloretos.

Conforme Junior (2009), concretos de cimento Portland que contém adições de escórias de alto forno, podem ser até 100 vezes mais eficientes em relação ao cimento Portland comum, quando submetido a penetração de íons agressivos, sendo então significativamente resistente a corrosão.

De acordo com Hermann et al (2016), a sílica ativa é uma das adições minerais mais utilizadas em concretos, principalmente quando se trata de um concreto de alto desempenho, onde além da busca por ganho de resistência mecânica o objetivo é também diminuir a permeabilidade e porosidade, aumentando a durabilidade do material.

Os teores de adição de sílica ativa no concreto variam de 5% a 15% sobre a massa de cimento, nestas porcentagens a sílica ativa contribui para a trabalhabilidade do concreto em estado fresco e ganho de resistência mecânica (HERMANN et al, 2016). Conforme pesquisa de Santana et al (2018), as adições de sílica ativa na proporção de 15% fazem com que a resistência mecânica de maior idade deste concreto seja superior a concretos convencionais, conforme pode-se observar na Figura 9.

Figura 9 - Teor de 15% de sílica ativa no concreto



Fonte: Santana et al (2018).

2.2.1 Concreto com vidro moído

No Brasil, em média é produzido 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, sendo que apenas 45% deste volume é reutilizado. A não reciclagem deste material está ligada diretamente a facilidade e baixo custo de depositá-lo em aterros sanitários e também devido a abundância de matéria prima de construção civil no país (CEMPRE ,2009).

Metha e Monteiro (2008), alegam que os estudos estão sendo realizados em diversos resíduos vítreos diferentes, pois as propriedades da argamassa e concreto variam com a utilização de diferentes vidros. Entretanto, algo que não sofre muita alteração é a quantidade de sílica em cada material, por conta de ser o principal material.

Vários autores, como Simões (2013), Fávero (2009), Cordeiro e Montel (2015), Matos et al. (2016) e Nascimento et al. (2014), demonstram em suas pesquisas as possibilidades de utilização de resíduo de vidro de diversos lugares, como vidro de sucata de vidraçarias, resíduos de vidro domésticos e vidros de parabrisas que já foram introduzidos em concretos.

Simões (2013), em seu estudo constatou que a utilização de resíduo de vidro na forma de pó em compostos de cimento alcança os melhores resultados. Ainda conforme o autor, a substituição parcial de cimento por resíduo de vidro obteve maior destaque, por conta da melhor atividade pozolânica do material vítreo.

Conforme Crentsil et al. (2001), o vidro em substituição do agregado miúdo na mistura de concreto em construções civis já foi estudado, e vem sendo utilizado por países como a Austrália. Utilizam em seus concretos o vidro moído proveniente de reciclagem e aterros sanitários.

Neste estudo será utilizado o resíduo de vidro de garrafas de cerveja do tipo *long-neck* em substituição parcial do agregado miúdo, mas também a estudos onde fizeram aplicações de material vítreo ao concreto sob forma de agregado graúdo e como adição ou substituição ao cimento.

Conforme Righi et al. (2012), a utilização do resíduo de vidro com granulometria superior a 300 μm em substituição de agregado miúdo, não traz resultados satisfatórios, por conta da perda de resistência devido a reação álcalis da sílica do vidro com o cimento, ocasionando a expansão do material.

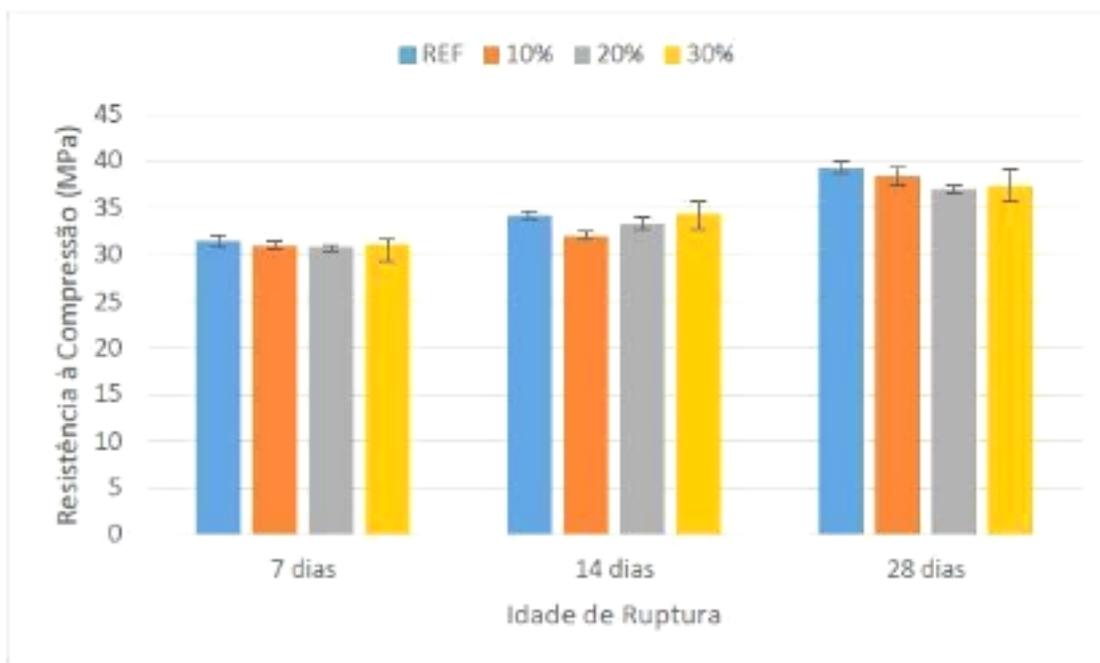
Lopez et al. (2005), com o intuito de comprovar a eficácia da utilização de resíduo de vidro como agregado em concretos estruturais, realizaram um estudo onde compararam a influência deste material utilizando diferentes granulometrias, realizando os ensaios em duas etapas. Onde em cada etapa se manteve a mesma relação a/c. Na primeira etapa, fez-se a substituição de 5% do agregado miúdo (areia) por vidro moído com faixa granulométrica de 0 - 15 mm; 0,15 - 0,3 mm e 0,3 - 0,60 mm. Tendo melhores resultados de resistência à compressão a faixa granulométrica de 0,15 - 0,30 mm, onde obteve-se um aumento de resistência de 21% em relação ao concreto de referência. Na segunda etapa, com base nos resultados da primeira etapa utilizando a faixa granulométrica de maior resistência, substituiu-se 5, 10, 15 e 20% do agregado natural por vidro moído. Nesta análise observou-se uma correlação proporcional entre o aumento do teor de substituição e a resistência à compressão, na medida que aumenta a porcentagem de utilização de vidro a resistência a compressão dos corpos de prova diminui, entretanto ainda se

tem resultados melhores do que os resultados obtidos nos corpos de prova sem adição de vidro.

Os autores ainda relatam que na medida em que a porcentagem de utilização de vidro aumenta a trabalhabilidade do concreto diminui, portanto a relação a/c também deveria ser aumentada, isso se dá por conta do aumento de partículas finas que contém uma área superficial maior para ser hidratada.

Ensaio de substituição de agregado miúdo por vidro moído também foram realizados por Vian (2018), onde em sua pesquisa abordou uma substituição de 10, 20 e 30% do agregado miúdo natural (areia) por resíduos de vidro de garrafas de cerveja do tipo *long-neck*, obtendo resultados de resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 - Resistência à compressão simples



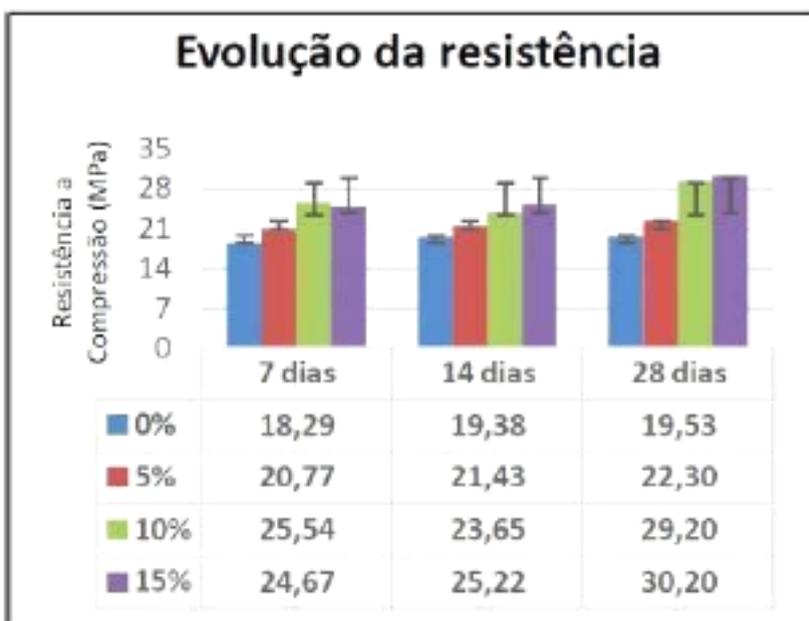
Fonte: Vian (2018).

É possível observar no gráfico 1, que todos os traços com porcentagem de substituição do agregado miúdo natural (areia) por resíduo de vidro, obtiveram uma menor resistência à compressão em relação ao concreto de referência que não

possui vidro em seu traço. Porém analisando é possível destacar que os melhores resultados podem ser vistos na idade de 28 dias nos traços de 10 e 30%, onde em relação a sua resistência aos 7 dias, obtiveram um aumento de 20% da sua resistência à compressão.

Em estudo Cordeiro e Montel (2015), também demonstram a evolução da resistência à compressão do concreto quando substituído parcialmente o seu agregado miúdo natural por resíduo de vidro nas porcentagens de 0%, 5%, 10% e 15%. Conforme o Gráfico 2, é possível observar o ganho de resistência nas porcentagens de 5, 10 e 15% em relação ao traço de referência.

Gráfico 2 - Evolução de resistência do concreto



Fonte: Cordeiro e Montel (2015, p. 118).

Tendo a consciência da necessidade da preservação do meio ambiente e visto o descarte inadequado das garrafas de cerveja do tipo *long-neck* bem como a sua abundância, Righi et al. (2012), realizaram ensaios onde substituíram em 5, 10, 15, 20 e 100% do agregado miúdo pelo vidro moído das garrafas de *long-neck*. Para o entendimento de cada traço utilizado segue a Tabela 5.

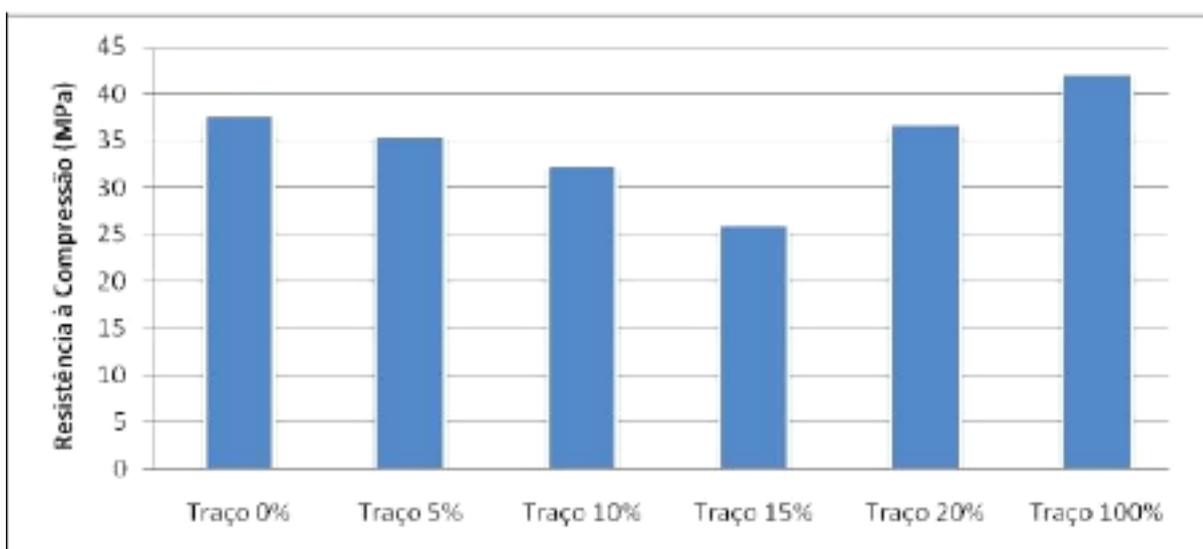
Tabela 5 - Traços de substituição de areia por vidro moído

TRAÇO	VIDRO (%)	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	VIDRO (kg)	BRITA (kg)	ÁGUA (L)
0% Vidro	0	10,52	20,40	0,00	32,18	4,73
5% Vidro	5	10,52	19,38	1,02	32,18	4,73
10% Vidro	10	10,52	18,36	2,04	32,18	4,73
15% Vidro	15	10,52	17,34	3,06	32,18	4,73
20% Vidro	20	10,52	16,32	4,08	32,18	4,73
100% Vidro	100	10,52	0,00	20,70	32,18	4,73

Fonte: Righi et al. (2012, p. 6).

Os resultados dos ensaios expressos no Gráfico 3, relatam o que os autores já esperavam, conforme o embasamento bibliográfico.

Gráfico 3 - Resultados dos testes de compressão

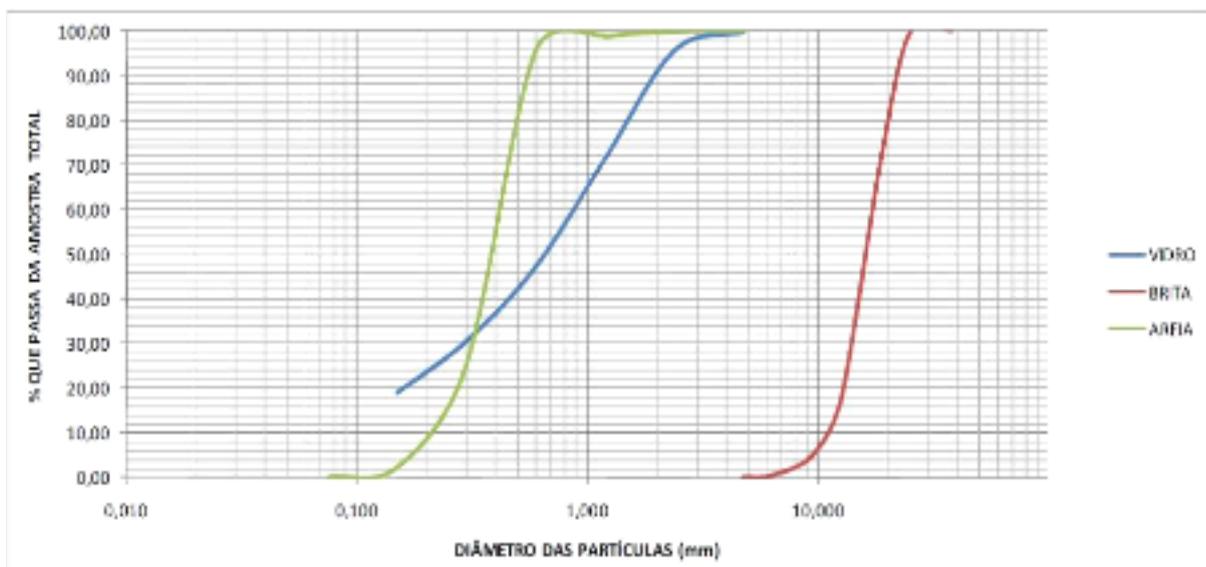


Fonte: Righi et al. (2012, p. 8).

Conforme os autores os traços com substituição de até 15% de resíduo de vidro obtiveram resultados inferiores aos de referência, porém os quais utilizaram 100% de resíduo de vidro como agregado miúdo obtiveram resultados de resistência à compressão superiores aos tido como referência. Portanto entendem que o

aumento da resistência na utilização de somente resíduo de vidro como agregado miúdo se dá pelo aumento da utilização de finos, que é observada na curva granulométrica da areia e do vidro no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Curva granulométrica da brita, areia e vidro



Fonte: Righi et al. (2012, p. 6).

Portanto é possível a utilização do vidro em substituição do cimento, tanto quanto ao agregado miúdo, porém é preciso tomar cuidado com a reação do álcali-sílica, também conhecido como álcali-agregado.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a reação álcali-agregado para acontecer depende de alguns fatores como a granulometria das partículas, do tempo e ainda da temperatura. Pois a sílica presente no vidro moído encontra-se em estado amorfo. Ainda de acordo com os autores, esta reação álcali-agregado pode causar deterioração no concreto, por conta da absorção de água por osmose que forma um gel sílico-alcálico que acaba gerando uma expansão.

Segundo Ribeiro (2015), a reação álcali-agregado, acontece devido a combinação de agregados que podem ser reativos ou potencialmente reativos com os álcalis do cimento, tendo uma presença constante de umidade. E para Tiecher (2006) a reação álcali-agregado acontece devido ao contato de partículas de

hidróxidos alcalinos presentes na água de amassamento, no cimento, nas pozolanas e etc..., estando em contato com materiais que geralmente são utilizados como agregados em produtos cimentícios.

Righi et al. (2012), enfatizam que por conta do vidro possuir sílica em sua composição química, na presença de umidade ele pode reagir com os álcalis do cimento. Para Fávero (2009), concretos que utilizam o vidro moído como agregado juntamente com adição de pozolanas, pode reduzir ou até eliminar as reações álcali-agregado, sendo que este vidro seja acrescentado em forma de pó, garantindo as propriedades pozolânicas, conforme a porcentagem que for adicionado, essa reação é reduzida ou até mesmo inibida.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentadas as características dos materiais, equipamentos e os ensaios realizados a fim de atender os objetivos propostos, além do programa experimental do presente trabalho.

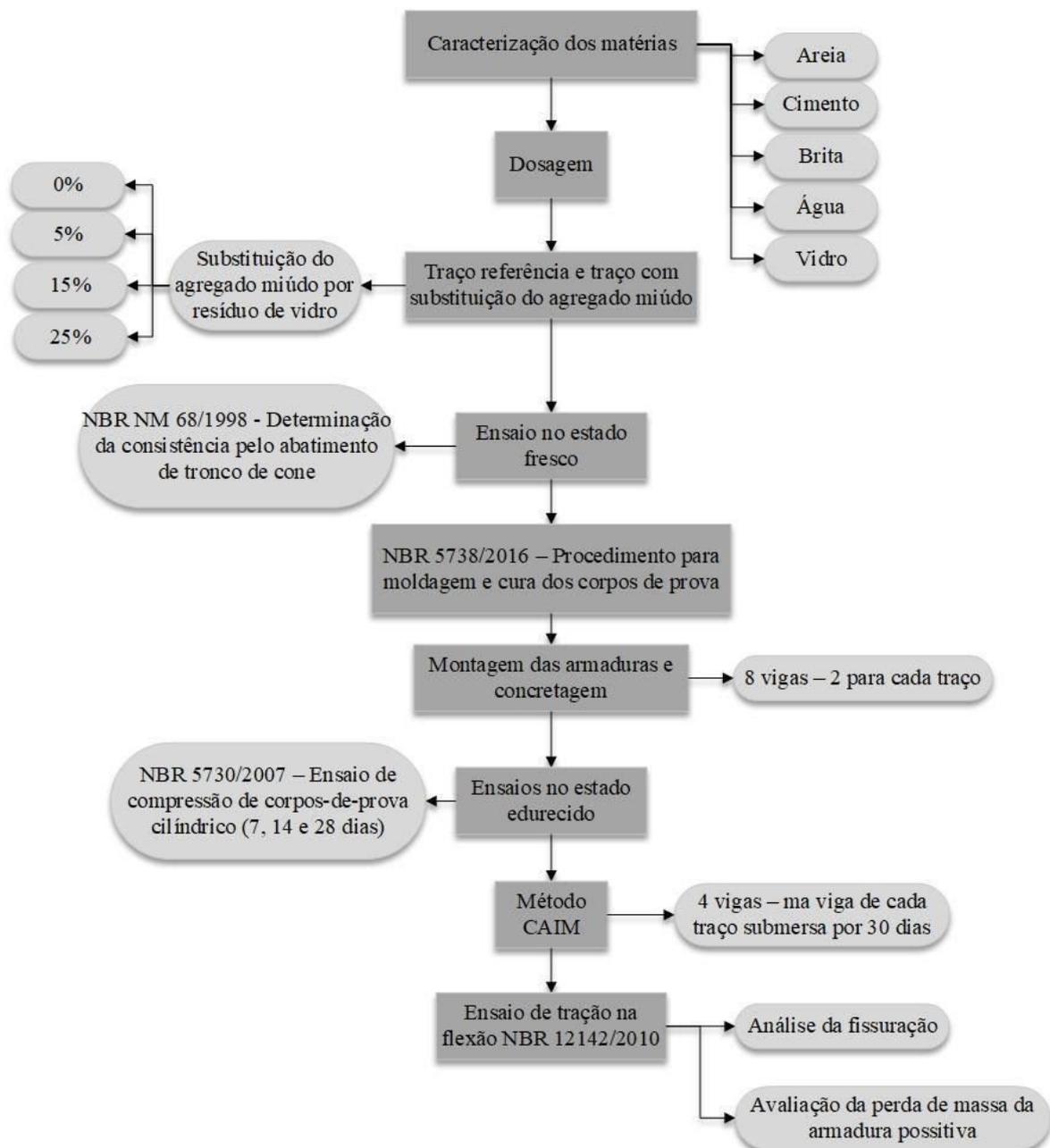
3.1 Programa experimental

Este estudo tem como principal objetivo avaliar a durabilidade de vigas submetidas à corrosão acelerada pelo método CAIM. Os ensaios e procedimentos foram realizados nas dependências do laboratório de Tecnologias da Construção da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES.

Foram moldadas 8 viga com dimensões de 100 x 15 x 10 cm, duas sendo de traço de referência, e as demais foram moldadas com diferentes porcentagens de substituição de agregado miúdo (areia) por vidro moído, oriundo de garrafas de cerveja do tipo *long-neck*, onde foram realizadas 2 vigas para cada traço de 5%, 15% e 25%. Estas vigas foram colocadas em imersão em tanques para corrosão acelerada e para cada um dos traços foram moldados 9 corpos de prova, com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro para a verificação da resistência à compressão simples. Passado os 28 dias de cura em ambiente controlado, quatro das oito vigas moldadas, sendo uma de cada traço foram encaminhadas para a imersão conforme o método CAIM, onde permaneceram por 30 dias. Durante esse período foi acompanhado visualmente a dissipação da corrosão nas mesmas. Passado o

tempo de ensaio da aceleração da corrosão, foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão também conhecido como flexão a 4 pontos. Posteriormente foi analisado a fissuração das vigas e a perda da massa das mesmas. O programa experimental e suas etapas está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Programa Experimental



Fonte: Do autor (2020).

3.2 Materiais

Para a produção do concreto foi realizado a mistura de cimento, areia, água e vidro moído (nos traços com substituição). Para a produção deste concreto foi utilizado os materiais fornecidos pelo LATEC, com exceção apenas ao vidro moído que foi coletado em uma casa de festas na cidade de Lajeado/RS.

3.2.1 Cimento

O Cimento utilizado foi o Cimento Portland (CP) do tipo CP V - ARI RS, da marca Cauê, que têm como principais características a alta resistência inicial e a alta resistência a sulfatos. Conforme o fabricante especifica o cimento atende aos requisitos da norma NBR 5733 (ABNT, 1991) - Cimento Portland de alta resistência inicial, e NBR 5737 (ABNT, 1992) - Cimento Portland resistente a sulfatos. Este material é comumente utilizado quando se necessita uma alta resistência inicial, desforma rápida como na fabricação de pré - moldados e peças protendidas, podendo alcançar a resistência de 21 MPa em 24 horas. Este Cimento conta com adição de 5% de filer calcário que é o máximo permitido pela norma. A Tabela 6 apresenta a composição do cimento.

Tabela 6 - Composição do cimento

Composição	
Tipo	V
Sigla	CP V - ARI
Norma	NBR 5733
Clínquer + Gesso	95 a 100%
Filer calcário	0 a 5%

Fonte : ABCP (2002).

3.2.2 Areia

Foi utilizado uma areia natural de origem quartzosa classificada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) obtida no LATEC, proveniente da região do Vale do Taquari. E para a caracterização deste agregado foram realizados ensaios determinando a massa específica, massa unitária e granulometria, regidos pela norma NBR NM 45 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária (ABNT, 2006), NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003) e NBR NM 248 - Agregado - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003) respectivamente.

3.2.2.1 Determinação da massa específica e massa unitária da areia

A realização do ensaio de massa específica ocorreu de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), a qual define que o agregado miúdo é aquele que passa pela peneira de 9,5 mm, que passa quase que totalmente pela peneira de 4,75 mm e que sua maior parte fica retida na peneira de 75 μ m. A norma ainda define como massa específica a relação do seu volume com a massa do agregado seco, excluindo os poros permeáveis

Para a realização deste ensaio foi utilizado 1 Kg de areia, a qual passou por um processo de secagem a uma temperatura aproximada de 105 °C. Neste ensaio foram necessários a utilização de um molde de tronco-cônico, balança, fraco aferido, bandeja metálica, estufa, espátula e uma haste de compactação.

Conforme a norma, para o desenvolvimento do ensaio a amostra permaneceu em repouso submersa por água em um recipiente por um período de 24 horas. Em seguida a amostra foi posicionada em um local com incidência de uma suave corrente de ar para que obtivesse uma secagem uniforme de seus grãos a fim de que eles não ficassem fortemente aderidos uns aos outros.

Feita a secagem o agregado foi inserido no molde de tronco-cônico com o cuidado para não comprimi-lo, em seguida foram aplicados 25 golpes leves com a haste metálica na superfície e posteriormente o molde foi retirado em um

movimento vertical. Este procedimento foi realizado por inúmeras vezes pois enquanto que o molde de tronco-cônico é retirado e o agregado permanece no formato do cone é sinal que a amostra ainda não alcançou a condição de saturada com superfície seca, sendo que esta condição somente é alcançada no momento em que o molde é retirado e o agregado desmorone, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Areia em estado saturado com superfície seca.



Fonte: Do autor (2020).

Tendo o agregado na condição desejada de saturado com superfície seca foi realizado a medição de massa (500 ± 1) g da amostra (ms), que foi introduzida no frasco aferido, em seguida medido a massa do conjunto frasco + amostra (m1) e posteriormente acrescentado água ao frasco até aproximadamente a marca de 500 ml (FIGURA 12), para a extinção total das bolhas de ar contidas foi realizado movimentos circulares no frasco e posteriormente levado a um banho em temperatura constante de (21 ± 2) °C por aproximadamente 1 hora.

Figura 12 - Conjunto frasco aferido + amostra + água.



Fonte: Do autor (2020).

Passado este período foi acrescentado água até o volume de 500 cm³ e medido a massa resultante do frasco + amostra + água (m₂). Em seguida a amostra foi retirada do frasco e levada para a estufa a (105 ± 5) °C até a obtenção de massa constante. Resfriada foi medida a massa da amostra seca (m), conforme Figura 13. Tendo todas as etapas do ensaio realizadas, os dados obtidos foram aplicados a equação 1 para a obtenção da massa específica

Figura 13 - Medição da amostra de areia seca em estufa.



Fonte: Do autor (2020).

$$V = \frac{m}{\left(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) - \frac{m_2 - m}{\rho_{a1}}} \quad (1)$$

Onde:

γ = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m = massa da amostra seca (g);

m_1 = massa do conjunto frasco + amostra (g);

m_2 = massa do conjunto frasco + amostra + água (g);

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = volume do frasco (cm^3);

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

O valor de massa específica da areia encontrado através deste ensaio foi de $2,69 \text{ g/m}^3$.

Para a obtenção da massa unitária da amostra o ensaio foi realizado de acordo com NBR NM 45 (ABNT, 2006), pelo método C. Para a realização deste ensaio foram utilizadas uma amostra de areia, um cilindro com capacidade e volume conforme prescrito na norma, uma balança com resolução de 50g e uma haste de adensamento.

Para a realização do ensaio foi utilizado uma amostra de areia previamente seca em estufa a $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ até a obtenção de sua massa constante. Em seguida foi realizada a medição da massa do recipiente cilíndrico vazio, na sequência foi despejado o agregado no recipiente respeitando uma altura máxima de 50 mm de sua borda (FIGURA 14). Tendo o recipiente completamente preenchido, foi realizado o nivelamento da sua camada superficial e feita a medição da massa do conjunto recipiente + agregado. Tendo todas as etapas do ensaio realizadas, os dados obtidos foram aplicados a equação 2 para a obtenção da massa unitária.

Figura 14 - Introdução da areia no recipiente cilíndrico.



Fonte: Do autor (2020).

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = Volume do recipiente (m³).

O valor de massa unitária da areia encontrado através deste ensaio foi de 1,4 g/m³.

3.2.2.2 Determinação granulométrica da areia

O ensaio da granulometria da areia foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), onde foram utilizadas as peneiras de abertura da série normal. Para o mesmo ser realizado foi utilizado 2 amostras de areia seca em estufa a

(105 ± 5) °C, balanças, escova, bandejas, agitador mecânico, peneiras com aberturas de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μ m, 300 μ m e 150 μ m e um fundo avulso de peneiras.

Para a realização do ensaio foi retirado da estufa as duas amostras e resfriadas à temperatura ambiente, em seguida foram medidas as suas massas (m_1 e m_2). Dando sequência ao procedimento as peneiras foram limpas e encaixadas uma sobre a outra em ordem crescente e na sua base foi posicionado o fundo das peneiras.

Com a finalidade de auxiliar na movimentação das bandejas, cada amostra foi levada a um agitador mecânico (FIGURA 15), pelo período de 5 minutos. Em seguida, para cada peneira foi medida a massa do material que ficou retido.

Figura 15 - Agitador mecânico de peneiras.



Fonte: Do autor (2020).

Tendo as massas de areia retidas em cada peneira foi possível realizar a distribuição granulometria das duas amostras conforme a Tabela 7.

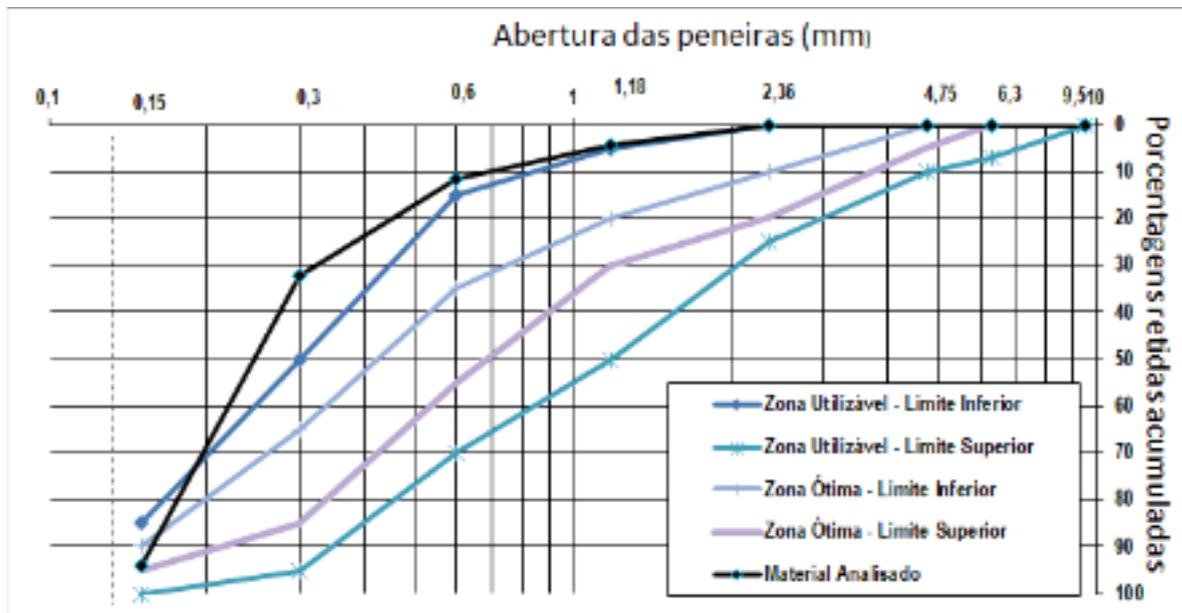
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) = 542,5				(Vr) Massa retida Variações (%)	(Mrm) Massa retida média (%)	(Mra) Massa retida acumulada (%)
	b) massa inicial seca (gr) = 555,9						
	Massa retida (gr)		Massa retida (%)				
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
9,5	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2,36	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,18	23,4	26,7	4,3%	4,8%	0,5%	4,6%	4,6%
0,6	38,7	39,2	7,1%	7,1%	0,1%	7,1%	11,7%
0,3	111,5	114,0	20,6%	20,5%	0,0%	20,5%	32,2%
0,15	338,9	338,6	62,5%	60,9%	1,6%	61,7%	93,9%
Fundo	30	37,4	5,5%	6,7%	1,2%	6,1%	100,0%
Total	542,5	555,9	Módulo de Finura=		1,42	D MC=	1,18

Fonte: Do autor (2020).

Com base na tabela da distribuição granulométrica do agregado miúdo apresentada acima e conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), onde é determinado os limites de material retido em cada malha, foi possível realizar a curva granulométrica para as duas amostras do ensaio, que podem ser analisadas no Gráfico 5.

Gráfico 5- Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Do autor (2020).

3.2.3 Brita

Foi Utilizada uma brita basáltica classificada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) obtida no LATEC, proveniente da região do Vale do Taquari. E para a caracterização deste agregado foi realizado ensaios determinando a massa específica e massa unitária, regidos pela norma NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2006), NBR NM 45 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária (ABNT, 2006) e NBR NM 248 - Agregado - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003) respectivamente.

3.2.3.1 Determinação da massa específica e massa unitária do agregado graúdo.

Para a realização do ensaio de massa específica do agregado graúdo foram seguidos os padrões previstos na NBR NM (ABNT, 2009), a qual define que o agregado graúdo é aquele que têm a sua maior porcentagem retida na peneira

de 4,75 mm. De acordo com a norma ainda é possível estabelecer a norma específica do agregado seco fazendo uma relação com o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Na realização deste ensaio foi utilizado uma amostra de 3 Kg de brita. E ferramentas como um cesto de arame, balança, tanque de água e bandejas.

O procedimento consiste em primeiramente colocar a amostra em um recipiente e cobrir com água deixando em repouso por 24 horas. Em seguida é retirada a amostra do recipiente e com um pano absorvente enxugado toda a água visível (FIGURA 16).

Figura 16 - Secagem da amostra de brita



Fonte: Do autor (2020).

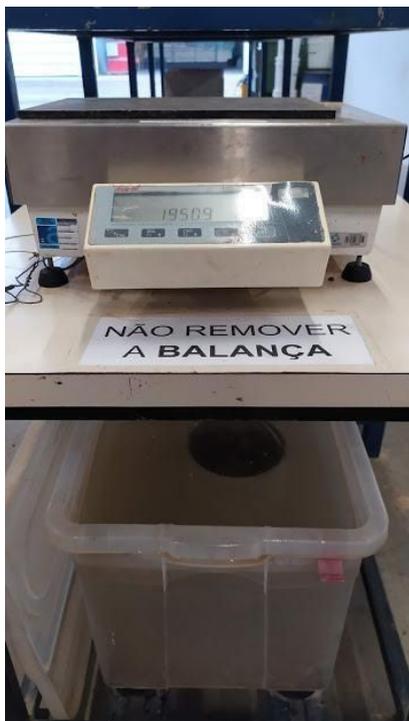
Logo em seguida sem que haja perda de umidade por evaporação na amostra, foi medida sua massa na condição de saturado com superfície seca (m_s) (FIGURA 17) e posteriormente colocada em um recipiente de cesto de arame o qual está submerso em água a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, com isso obtivemos a massa da amostra em água (m_a) (FIGURA).

Figura 17 - Massa do agregado saturado com superfície seca



Fonte: Do autor (2020).

Figura 18 - Massa do agregado graúdo saturado com superfície seca



Fonte: Do autor (2020).

Em seguida, terminadas estas etapas do ensaio a amostra foi seca em estufa até a obtenção da massa constante, medida esta massa do agregado seco (m), finalizamos todas as etapas estabelecidas para o ensaio, então foi utilizada a Equação 3 para determinar a massa específica.

$$\gamma = \frac{m}{m - m_a} \quad (3)$$

Onde:

γ = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m = Massa da amostra seca (g);

m_a = Massa do conjunto frasco + amostra (g).

O ensaio de massa unitária do agregado graúdo foi realizado conforme previsto na NBR NM 45 (ABNT, 2006), método C. No ensaio, uma amostra de agregado graúdo foi despejada em um recipiente cilíndrico de volume e massa conhecida a uma altura de no máximo 5 cm da borda superior, conforme pode ser analisado na Figura 19.

Figura 19 - Preenchimento do recipiente cilíndrico para obtenção da massa unitária do agregado graúdo.



Fonte: Do autor (2020).

Após o preenchimento completo do recipiente foi realizado o nivelamento da superfície como o auxílio de uma régua e em seguida realizada a medição da massa do conjunto recipiente + agregado. Tendo os dados necessários para a realização do ensaio de massa unitária do agregado graúdo foi utilizada a Equação 4.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (4)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = volume do recipiente (m³).

Os valores de massa específica e massa unitária encontrados nos ensaios foram respectivamente de 2,95 g/cm³ e 1,46 g /cm³.

3.2.3.2 Determinação da granulometria do agregado graúdo.

O ensaio da granulometria do agregado graúdo foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), onde foram utilizadas as peneiras de abertura da série normal. Para o mesmo ser realizado foi utilizado 2 amostras de brita seca em estufa a (105 ± 5) °C, balanças, escova, bandejas, agitador mecânico, peneiras com aberturas de 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm.

Para a realização do ensaio foi retirado da estufa as duas amostras e resfriadas à temperatura ambiente, em seguida foram medidas as suas massas (m_1 e m_2). Dando sequência ao procedimento as peneiras foram limpas e encaixadas uma sobre a outra em ordem crescente.

Com a finalidade de auxiliar na movimentação das bandejas, cada amostra foi levada a um agitador mecânico (FIGURA 20), pelo período de 5 minutos. Em seguida, para cada peneira foi medida a massa do material que ficou retido.

Figura 20 - Agitador mecânico de peneiras



Fonte: Do autor (2020).

Tendo as massas de brita retidas em cada peneira foi possível realizar a distribuição granulometria das duas amostras conforme a Tabela 8.

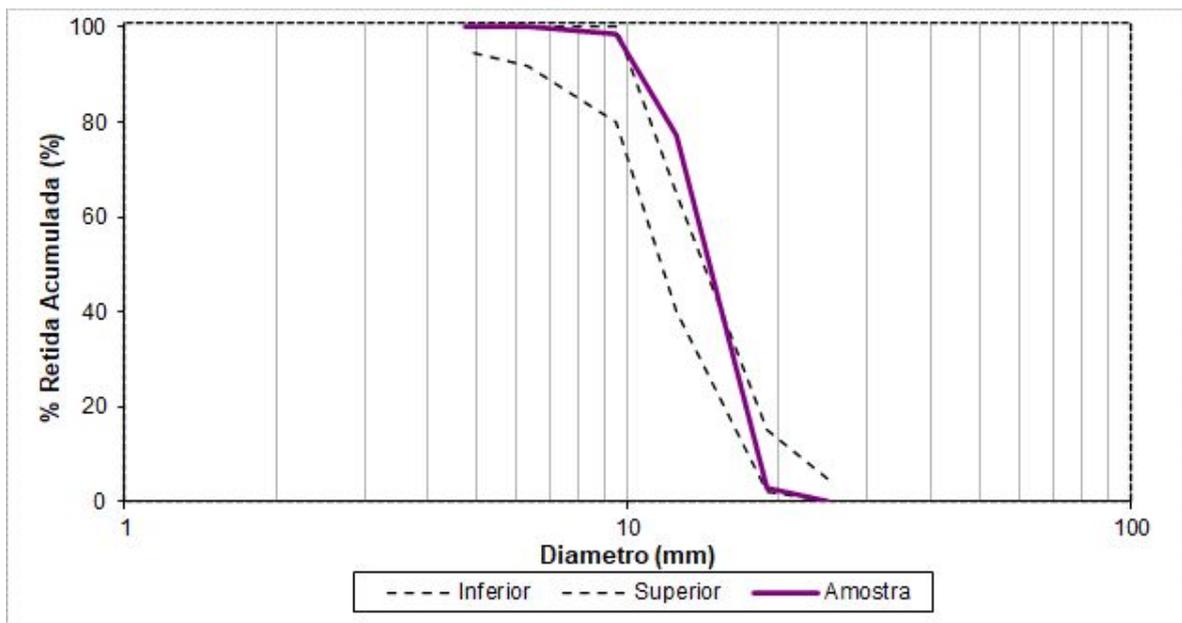
Tabela 8 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

peneira (mm)	Amostra 1				Amostra 2				MEDIAS	
	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	(%) retida	(%) retida acumulada	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	(%) retida	% retida acumulada	(%) média retida	(%) média acumulada
25	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
19	48	48,00	4,80	4,80	7	7,00	0,70	0,70	2,75	3
12.5	690,8	738,80	69,08	73,88	803	810,00	79,84	80,54	74,46	77
9.5	244,5	983,30	24,45	98,33	181,8	991,80	18,08	98,62	21,26	98
6.3	16,7	1000,00	1,67	100,00	13,9	1005,70	1,38	100,00	1,53	100
4,75	0	1000,00	0,00	100,00	0	1005,70	0,00	100,00	0,00	100
fundo	0	1000,00	0,00	100,00	0	1005,70	0,00	100,00	0,00	100
Total=	1000			Total=	1005,7	Modulo de finura=	2,01	DMC=		19

Fonte: Do autor (2020).

Com base na tabela da distribuição granulométrica do agregado graúdo apresentada acima e conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), onde é determinado os limites de material retido em cada malha, foi possível realizar a curva granulométrica para as duas amostras do ensaio, que podem ser analisadas no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Curva granulométrica com zonas utilizáveis do agregado graúdo.



Fonte: Do autor (2020).

3.2.4 Vidro

O vidro que foi utilizado para a realização dos ensaios desta pesquisa, são provenientes de garrafas de cerveja do tipo *long-neck* (FIGURA 21), da marca Heineken, oriundas de processo seletivo. A escolha deste material deu-se principalmente por conta da abundância no meio ambiente, estas garrafas não possuem um destino específico voltado a reutilização ou reciclagem. E para a caracterização deste agregado foram realizados ensaios determinando a massa específica, massa unitária e granulometria, regidos pela norma NBR NM 45 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária (ABNT, 2006), NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003) e NBR NM 248 - Agregado - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003) respectivamente.

Figura 21 - Garrafas do tipo *long-neck*



Fonte: Autor (2020).

Estas garrafas passaram por um processo de limpeza onde foi removido seu rótulo e todos os resíduos (FIGURA 22). Em sequência foram previamente

quebradas (FIGURA 23) para serem moídas com a utilização do moinho mecânico de bolas do LATEC, a fim de se obter a granulometria da areia utilizada.

Figura 22 - Garrafa *long-neck* higienizada



Fonte: Do autor (2020).

Figura 23 - Garrafa previamente quebrada



Fonte: Do autor (2020).

3.2.4.1 Moagem do vidro

Para a obtenção da granulometria desejada foram utilizadas amostras de 1 kg de vidro previamente quebradas que foram moídas por diferentes intervalos de tempo em um moinho mecânico de bolas (FIGURA 24), que contém 66 esferas de 112 g cada. Cada intervalo de tempo de moagem resultou em uma granulometria diferente, por isso foram realizados vários testes até a obtenção do tempo ideal de moagem que resultou na mesma granulometria da areia utilizada neste trabalho. As amostras moídas por um intervalo de tempo de 10 minutos foram as que mais se aproximaram da granulometria da areia (FIGURA 25), o vidro moído foi submetido ao ensaio de granulometria e massa específica.

Figura 24 - Moinho mecânico de bolas



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Moinho mecânico de bolas



Fonte: Do autor (2020).

3.2.4.2 Determinação da massa específica e massa unitária do vidro moído.

A realização do ensaio de massa específica ocorreu de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), a qual define que o agregado miúdo é aquele que passa pela peneira de 9,5 mm, que passa quase que totalmente pela peneira de 4,75 mm e que sua maior parte fica retida na peneira de 75 μm . A norma ainda define como massa específica a relação do seu volume com a massa do agregado seco, excluindo os poros permeáveis

Para a realização deste ensaio foi utilizado 1 Kg de vidro moído, o qual passou por um processo de secagem a uma temperatura aproximada de 105 °C. Neste ensaio foram necessários a utilização de um molde de tronco-cônico, balança, frasco aferido, bandeja metálica, estufa, espátula e uma haste de compactação.

Conforme a norma, para o desenvolvimento do ensaio a amostra permaneceu em repouso submersa por água em um recipiente por um período de 24 horas. Em seguida a amostra foi posicionada em um local com incidência de uma suave corrente de ar para que obtivesse uma secagem uniforme de seus grãos a fim de que eles não ficassem fortemente aderidos uns aos outros.

Feita a secagem o agregado foi inserido no molde de tronco-cônico com o cuidado para não comprimi-lo, em seguida foram aplicados 25 golpes leves com a

haste metálica na superfície e posteriormente o molde foi retirado em um movimento vertical (FIGURA 26). Este procedimento foi realizado por inúmeras vezes pois enquanto que o molde de tronco-cônico é retirado e o agregado permanece no formato do cone é sinal que a amostra ainda não alcançou a condição de saturada com superfície seca, sendo que esta condição somente é alcançada no momento em que o molde é retirado e o agregado desmorone, conforme a Figura 27.

Figura 26 - Verificação da condição saturada com superfície seca do vidro moído.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 27 - vidro moído em estado saturado com superfície seca.



Fonte: Do autor (2020).

Tendo o agregado na condição desejada de saturado com superfície seca foi realizado a medição de massa (500 ± 1) g da amostra (ms), que foi introduzida no frasco aferido, em seguida medido a massa do conjunto frasco + amostra (m1) e posteriormente acrescentado água ao frasco até aproximadamente a marca de 500 ml (FIGURA 28), para a extinção total das bolhas de ar contidas foi realizado movimentos circulares no frasco e posteriormente levado a um banho em temperatura constante de (21 ± 2) °C por aproximadamente 1 hora.

Figura 28 - Conjunto frasco aferido + amostra + água.



Fonte: Do autor (2020).

Passado este período foi acrescentado água até o volume de 500 cm³ e medido a massa resultante do frasco + amostra + água (m₂). Em seguida a amostra foi retirada do frasco e levada para a estufa a (105 ± 5) °C até a obtenção de massa constante. Resfriada foi medida a massa da amostra seca (m), conforme Figura 29. Tendo todas as etapas do ensaio realizadas, os dados obtidos foram aplicados a Equação 5 para a obtenção da massa específica.

Figura 29 - Medição da amostra de areia seca em estufa.



Fonte: Do autor (2020)

$$\gamma = \frac{m}{\left(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (5)$$

Onde:

γ = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m = massa da amostra seca (g);

m_1 = massa do conjunto frasco + amostra (g);

m_2 = massa do conjunto frasco + amostra + água (g);

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = volume do frasco (cm^3);

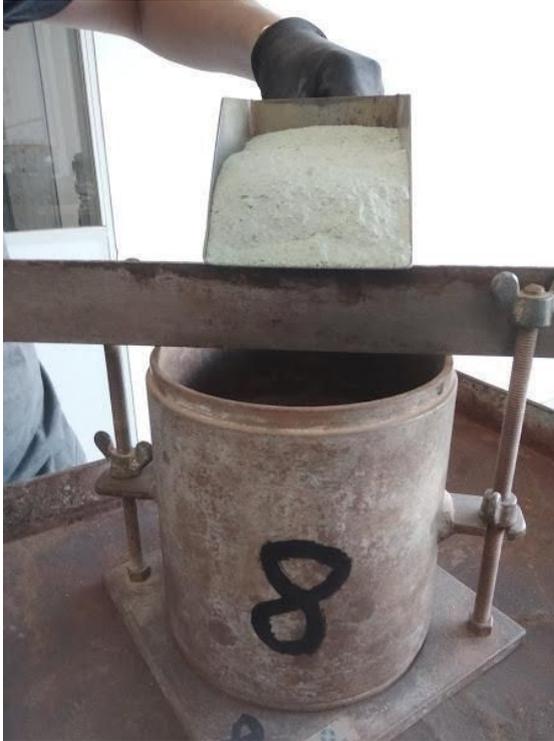
ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

O valor de massa específica do vidro moído encontrado através deste ensaio foi de $2,59 \text{ g/m}^3$.

Para a obtenção da massa unitária da amostra o ensaio foi realizado de acordo com NBR NM 45 (ABNT, 2006), pelo método C. Para a realização deste ensaio foram utilizadas uma amostra de vidro moído, um cilindro com capacidade e volume conforme prescrito na norma, uma balança com resolução de 50g e uma haste de adensamento.

Para a realização do ensaio foi utilizado uma amostra de vidro moído previamente seca em estufa a $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ até a obtenção de sua massa constante. Em seguida foi realizada a medição da massa do recipiente cilíndrico vazio, na sequência foi despejado o agregado no recipiente respeitando uma altura máxima de 50 mm de sua borda (FIGURA 30). Tendo o recipiente completamente preenchido, foi realizado o nivelamento da sua camada superficial e feita a medição da massa do conjunto recipiente + agregado. Tendo todas as etapas do ensaio realizadas, os dados obtidos foram aplicados a Equação 6 para a obtenção da massa unitária.

Figura 30 - Introdução do vidro moído no recipiente cilíndrico.



Fonte: Do autor (2020).

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m^3);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

O valor de massa unitária do vidro moído encontrado através deste ensaio foi de $1,32 \text{ g}/\text{m}^3$.

3.2.4.3 Determinação da granulometria do vidro moído

O ensaio da granulometria do vidro foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), onde foram utilizadas as peneiras de abertura da série normal. Para o mesmo ser realizado foi utilizado 2 amostras de vidro moído seco em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, balanças, escova, bandejas, agitador mecânico, peneiras com aberturas de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm e um fundo avulso de peneiras.

Para a realização do ensaio foi retirado da estufa as duas amostras e resfriadas à temperatura ambiente, em seguida foram medidas as suas massas (m_1 e m_2). Dando sequência ao procedimento as peneiras foram limpas e encaixadas uma sobre a outra em ordem crescente e na sua base foi posicionado o fundo das peneiras.

Com a finalidade de auxiliar na movimentação das bandejas, cada amostra foi levada a um agitador mecânico, pelo período de 5 minutos. Em seguida, para cada peneira foi medida a massa do material que ficou retido.

Tendo as massas de areia retidas em cada peneira foi possível realizar a distribuição granulometria das duas amostras conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do vidro moído

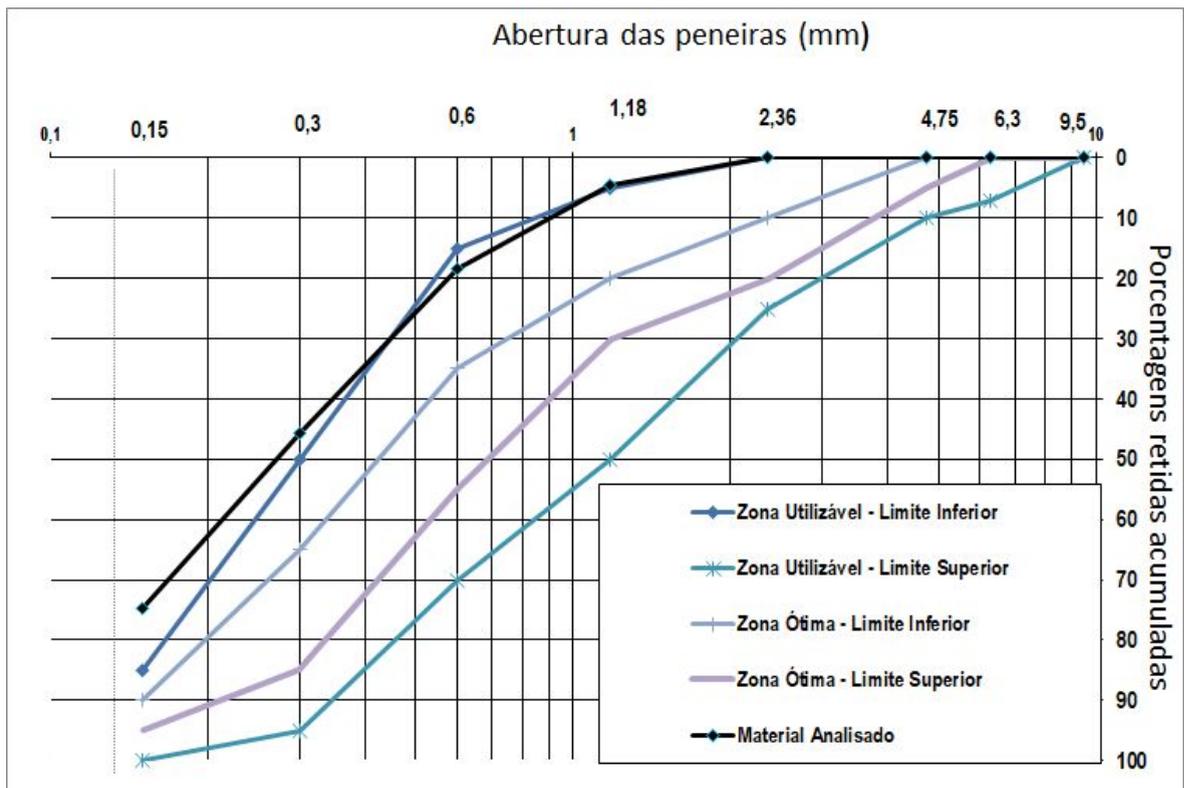
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) = 551,8				(Vr)	(Mm)	(Mrs)
	b) massa inicial seca (gr) = 552,0				Massa retida	Massa retida	Massa retida
	Massa retida (gr)		Massa retida (%)		Variações (%)	média (%)	acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
9,5	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2,36	0	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,18	23,8	25,2	4,3%	4,6%	0,2%	4,4%	4,4%
0,6	75,6	79	13,7%	14,3%	0,6%	14,0%	18,5%
0,3	150,7	150,5	27,3%	27,3%	0,0%	27,3%	45,7%
0,15	158,8	160,3	28,8%	29,0%	0,3%	28,9%	74,7%
Fundo	142,8	137	25,9%	24,8%	1,1%	25,3%	100,0%
Total	551,8	552,0	Módulo de Finura		1,43	D _{MC} -	1,18

Fonte: Do autor (2020).

Pela Tabela 9 é possível verificar que o diâmetro máximo encontrado foi de 1,18mm e o módulo finura de 1,43, valor próximo ao encontrado no ensaio de granulometria da areia que é de 1,42.

Com base na tabela da distribuição granulométrica do vidro moído apresentada acima, foi possível realizar a curva granulométrica para as duas amostras do ensaio, que podem ser analisadas no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Curva granulométrica do vidro moído



Fonte: Do autor (2020).

De acordo com o Gráfico 7 os grãos de vidro moído com diâmetro de 150µm e 300µm estão fora da curva de limite inferior previsto pela NBR 7211 (ABNT, 2009) indicada como utilizável, mostrando que seria necessária uma maior quantidade de material com estes diâmetros para a composição da granulometria do vidro moído.

3.3 Confeção das vigas

3.3.1 Fôrmas

As fôrmas (Figura 31) utilizadas para moldagem dos corpos de prova foram confeccionadas em uma marcenaria, onde rigorosamente foram atendidas as dimensões internas de internas de 100 x 15 x 10 cm, com o propósito que não houvesse influência na distribuição de cargas no ensaio de carregamento e retrabalhos com o processo de retificação dos corpos de prova.

Figura 31 - Fôrmas das vigas



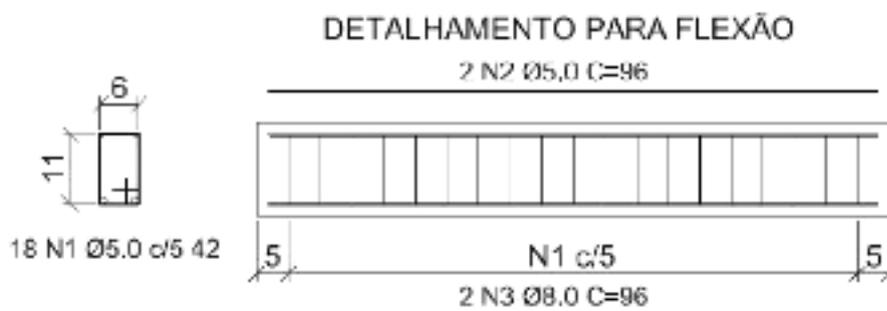
Fonte: Do autor (2020).

3.3.2 Armadura

A Armadura negativa e transversal executada com aço CA-60 possui uma resistência característica de 600 MPa, e as armaduras positivas utilizadas possuem aço CA-50, com resistência característica de 500 MPa, essas barras foram cortadas previamente conforme projeto de armadura para vigas.

As armaduras foram dimensionadas conforme determinado na NBR 6118 (ABNT, 2014), baseando-se no dimensionamento de Battisti (2017) que no seu dimensionamento optou pelo cobrimento mínimo previsto em norma para a classe de agressividade II, com cobrimento nominal da armadura de 20 mm. Foram utilizadas duas barras negativas de aço CA 60 com diâmetro de 5 mm e duas barras positivas de aço CA 50 com diâmetro de 8 mm e 18 estribos de aço CA 60 que ficaram dispostos distantes a cada 5 cm. A Figura 32 apresenta o detalhamento das armaduras para a flexão.

Figura 32 - Detalhamento das armaduras



Fonte: Battisti (2017).

Com a utilização de uma máquina de corte a forragem foi cortada nas devidas dimensões e posteriormente os estribos foram dobrados com o auxílio de uma morsa de bancada. Em seguida, a armadura transversal foi amarrada as barras longitudinais (FIGURA 33), com a utilização de arame queimado e auxílio de uma torquez.

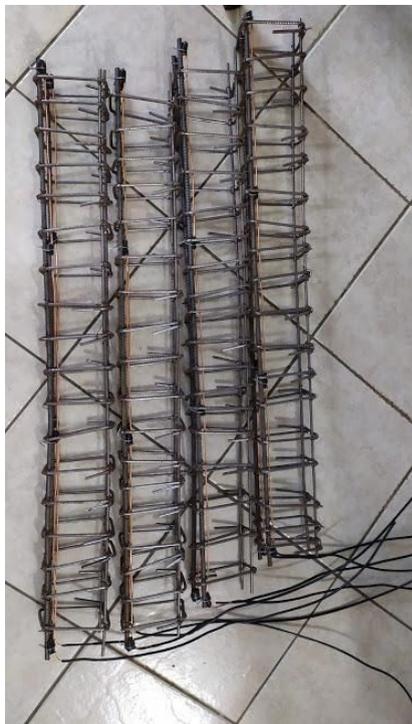
Figura 33 - Montagem da armadura



Fonte: Do autor (2020).

Realizada a montagem da armadura o passo seguinte foi colocar sobre as barras positivas o cabo de cobre de 6mm responsável por garantir a diferença de potencial durante o ensaio CAIM. Este cabo foi desencapado e isolado nos pontos em que foi amarrado na armadura e também foram posicionados espaçadores plásticos entre a armadura e o cabo de cobre diminuindo a probabilidade de perda localizada da seção das barras de aço. Na Figura 34, se encontra a armadura posicionada em um ambiente livre de ações de água e umidade, pronta para posteriormente ser posicionada na fôrma e em seguida realizar a concretagem.

Figura 34 - Armadura finalizada



Fonte: Do autor (2020).

3.3.3 Concreto

Nos concretos fabricados foram realizados procedimentos no estado fresco e no estado endurecido.

3.3.3.1 Dosagem

A dosagem foi feita com base no Método ABCP que consiste na adaptação do método desenvolvido pela ACI (American Concrete Institute) para agregados brasileiros. Neste método é determinado o consumo de cada um dos materiais e definem-se uma relação a/c através das características dos materiais utilizados e da resistência desejada.

O concreto que foi utilizado para confecção dos corpos de prova foi do tipo convencional, com uma classe de resistência F_{ck} 25 MPa.

3.3.3.2 Moldagens dos corpos de prova

A primeira concretagem realizada foi a do traço de referência seguido pelo traço de 5%, 15% e 25% de substituição do agregado miúdo pelo vidro moído.

Antes do lançamento nas respectivas fôrmas, foi realizado o ensaio de abatimento do concreto (*slump test*), determinado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Para realizar o ensaio foi utilizado um aparelho que possui uma forma cônica com diâmetro de 10 a 20 cm e altura de 30 cm. Para a obtenção do abatimento foi colocado concreto fresco em 3 camadas, em cada uma foram aplicados 25 golpes com uma haste metálica de 16 mm de diâmetro. O abatimento alcançado para cada traço foi de 60 a 80 mm.

A Figura 35 representa o ensaio de abatimento de tronco de cone de um dos traços realizados.

Figura 35 - Realização do ensaio de abatimento



Fonte: Do autor (2020).

Alcançando a consistência desejada o concreto foi lançado nas fôrmas e posteriormente com o auxílio de um vibrador de imersão o mesmo foi adensado. Feita a moldagem das 2 vigas para cada um dos traços (FIGURA 36), foi realizada a moldagem dos corpos de prova referentes a cada traço (3 corpos de prova para cada idade) (FIGURA 37), que posteriormente foram usados no ensaio de resistência a compressão no estado endurecido do concreto. Foram utilizadas fôrmas plásticas como molde para os corpos de prova com dimensões de 20 +- 1 cm de altura por 10,0 +- 1 cm de diâmetro, que foram moldados em duas camadas com 12 golpes cada, conforme especificado na NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova (ABNT, 2016).

Figura 36 - Vigas moldadas e adensadas



Fonte: Do autor (2020).

Figura 37 - Corpos de prova moldados



Fonte: Do autor (2020).

3.3.3.3 Cura

Realizada a moldagem das oito vigas e dos 36 corpos de prova, os mesmos permaneceram por 24 horas sobre uma superfície lisa e livre de intempéries e após este período foram colocados na câmara úmida com controle de umidade no LATEC. Onde os corpos de prova permaneceram até o respectivo momento da realização dos ensaio em estado endurecido, nas idades de 7, 14 e 28 dias, e as vigas permaneceram por 28 dias momento em que foi realizado o ensaio de CAIM.

3.4 Ensaio

3.4.1 Resistência mecânica à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado conforme o que é regulamentado pela NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7215 (ABNT, 2019), nas idades de 7, 14 e 28 dias, sendo que para cada idade foi registrado a resistência a compressão de 3 corpos de prova de cada traço. A Figura 38 apresenta o equipamento que executou os ensaios de resistência à compressão axial.

Figura 38 – Equipamento que realizou o ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Do autor (2020).

3.4.2 Corrosão acelerada

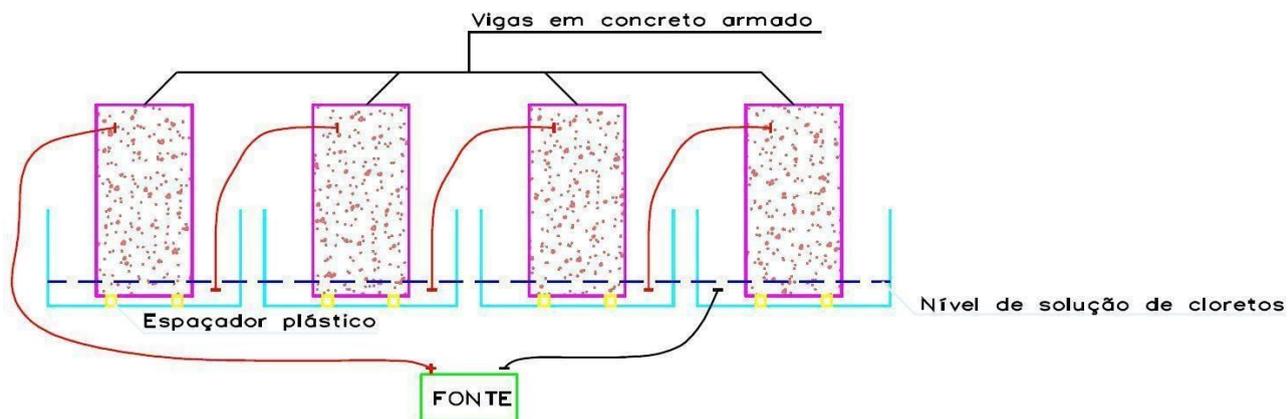
Para a aceleração da corrosão nas quatro vigas de concreto armado foi utilizado o método CAIM, o ensaio foi realizado em três vigas com substituição do agregado miúdo (areia), por vidro moído nas respectivas porcentagens 5%, 15%, 25%, e a viga de referência. Para que acontecesse a migração da solução de íons cloretos para as barras da armadura foi necessário a imersão parcial dos corpos de prova na solução, garantindo assim a indução eletroquímica por meio de estímulos elétricos iniciando o processo corrosivo.

Com base nos ensaios de Graeff (2007), foram determinados os parâmetros de calibração do método, para que se tenha um maior controle sobre o grau de corrosão. De acordo com o comprimento das barras, neste caso 96cm, e o seu diâmetro, 8 mm, foi utilizado uma corrente constante de 250 mA. E para simular uma situação similar a encontrada no oceano, a solução utilizada foi de 36 g/L de cloreto de sódio (NaCl). E de acordo com Graeff (2007), as vigas permaneceram por 30 dias no ensaio com o objetivo de alcançar os 10 % de perda de massa pré estabelecidos.

Para a realização do experimento foi montado quatro piscinas de MDF revestidas por um plástico resistente e abaixo de cada viga foram posicionados espaçadores para evitar que com o manuseio das vigas o plástico pudesse furar, garantindo assim a imersão completa da face inferior dos corpos de prova.

Tendo as quatro vigas dispostas dentro das piscinas, foi introduzido a solução com íons cloretos até uma altura aproximadamente de 5 cm, garantindo o cobrimento da barra de 8 mm, localizada dentro da viga. O fio de cobre concretado logo acima da armadura positiva foi conectado ao pólo positivo da fonte, atuando como ânodo no processo eletroquímico (FIGURA 39). E outro fio foi posto em volta da viga e imerso na solução, este foi ligado ao pólo negativo da fonte e fez o papel de cátodo. Assim as vigas foram posicionadas em protótipos independentes e ligadas em série nas quatro vigas garantindo que o processo de corrosão ocorresse da mesma forma.

Figura 39 - Esquema de ligação das vigas a fonte



Fonte: Do autor (2020).

Semanalmente o processo de corrosão das vigas foi acompanhado e analisado a possibilidade de dar sequência ao ensaio. Na Figura 40 está expresso todo o processo de corrosão das vigas desde o momento de início do ensaio até a retirada dos protótipos.

Figura 40 - Evolução da corrosão das vigas



Fonte: Do autor (2020).

Após a realização do ensaio de corrosão, adotou-se os códigos dispostos na Tabela 10 para cada uma das vigas.

Figura 10 - Nomenclatura adotada para as vigas

Denominação	Código
Referência não corroída	REFNC
5% vidro moído não corroída	5VMNC
15% vidro moído não corroída	15VMNC
25% vidro moído não corroída	25VMNC
Referência corroída	REFC
5% vidro moído corroída	5VMC
15% vidro moído corroída	15VMC
25% vidro moído corroída	25VMC

Fonte: Do autor (2020).

3.4.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado nas 4 vigas de testemunho mantidas em temperatura ambiente e nas 4 vigas submetidas a corrosão, tendo objetivo de determinar o deslocamento máximo das vigas. Conforme pode ser visualizado na Figura 41.

Figura 41 - Ensaio de tração na flexão

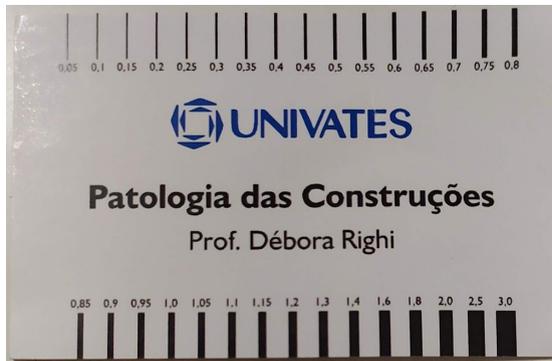


Fonte: Do autor (2020).

3.4.4 Análise de fissuração

Passado o ensaio de tração na flexão foi realizado a análise da espessura das fissuras com o auxílio de um fissurômetro (FIGURA 42) e foi realizado um mapeamento da forma com que estas fissuras se propagam nas vigas (FIGURA 43). Posteriormente com o auxílio do software *AutoCAD* as mesmas foram representadas.

Figura 42 - Fissurômetro



Fonte: Do autor (2020).

Figura 43 - Mapeamento e análise da fissuração



Fonte: Autor (2020).

3.4.5 Determinação da perda de massa

A determinação da perda de massa da armadura de cada viga submetida ao ensaio de corrosão, foi realizada após o ensaio de tração na flexão. Para que fosse possível a medição do diâmetro das barras positivas da viga, foi necessária a remoção completa do concreto de cobrimento da armadura, conforme apresentado na Figura 44.

Figura 44 - Armadura corroída



Fonte: Do autor (2020).

A perda de massa de cada uma das barras positivas das vigas foi medida com o auxílio de um paquímetro (FIGURA 45), adotando três medidas em cada barra longitudinal sendo elas uma em cada extremidade e outra no centro.

Figura 45 - Medição dos diâmetros das barras corroídas



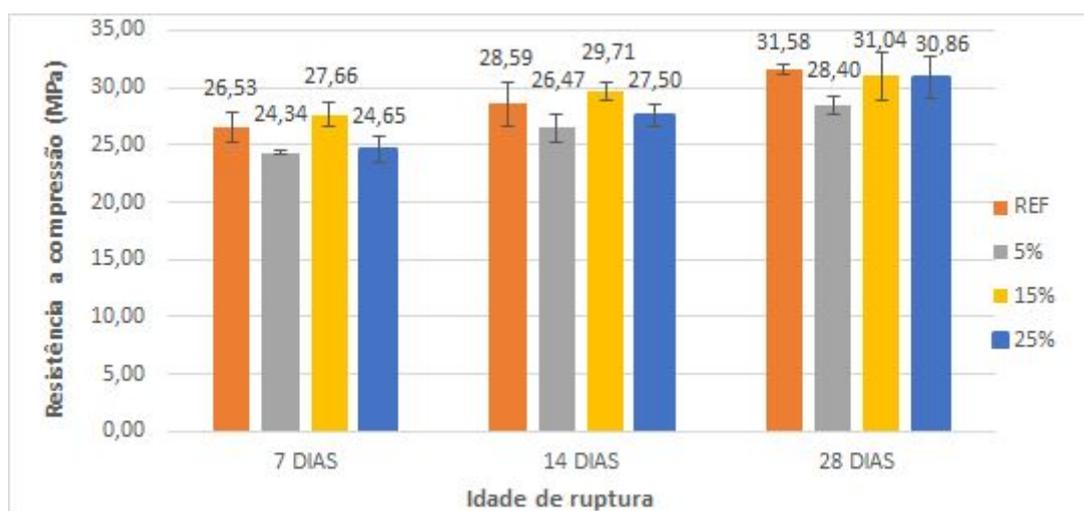
Fonte: Do autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão simples

Este ensaio foi realizado apenas como forma de controle tecnológico do concreto, os dados apresentados receberam um tratamento de espúrio. Os resultados de resistência à compressão simples estão representados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova de concreto



Fonte: Do Autor (2020).

É possível observar que os traços com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro moído obtiveram resistência aos 28 dias inferiores à obtida pelo traço de referência. Analisando os traços com substituição de

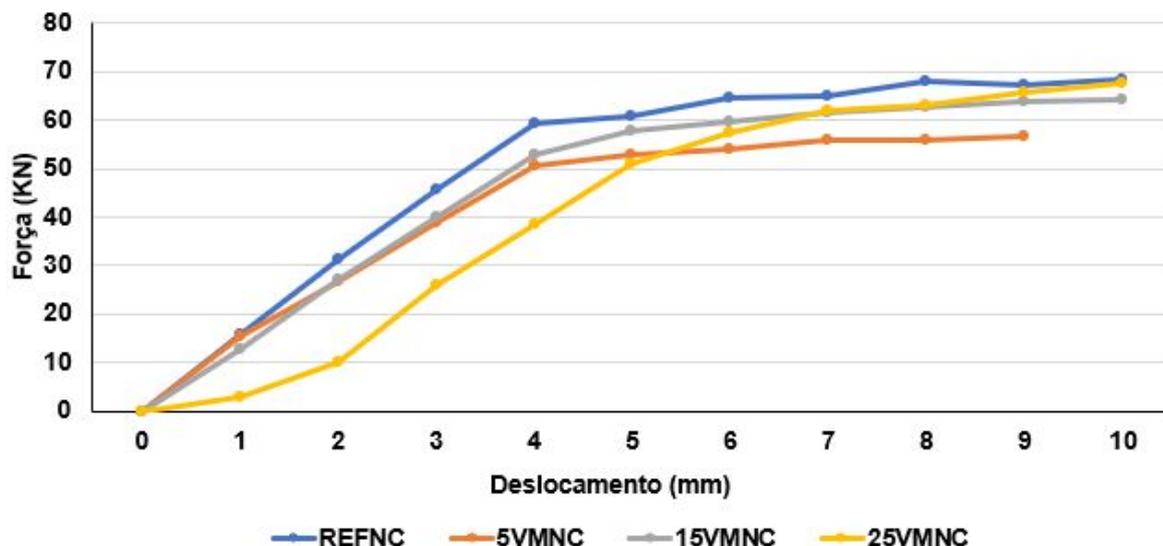
agregado miúdo por vidro moído em particular é possível constatar que o traço com maior valor de resistência é o de 15% de substituição, que em 28 dias de cura chegou aos 31,04 MPa sendo apenas 1,74% ou 0,54 MPa inferior ao traço de referência. Também com valores de resistência próximos aos anteriores está o traço com 25% de substituição que atingiu aos 28 dias a resistência de 30,86 MPa sendo 2,33% ou 0,72 MPa inferior a referência e com a menor resistência se encontra o traço com 5% de substituição sendo 10% ou 3,18 MPa menor em relação a referência.

De acordo com Righi et al. (2012), que utilizaram garrafas brancas em seu estudo, os resultados deste estudo se assemelham aos encontrados no seu trabalho, onde obtiveram uma diminuição da resistência à compressão até os 15% de substituição de agregado miúdo por vidro moído, e um aumento dos valores até superiores ao traço de referência no traço com 100% de substituição. Conforme Ozkan e Yusel apud Simões (2013, p. 53) a realização do ensaio com diferentes cores e tipos de vidro mostram uma grande variabilidade nos resultados por conta das características dos materiais utilizados.

4.2 Resistência à tração na flexão

A resistência obtida no ensaio de tração na flexão em cada uma das 8 vigas, pode ser analisada nos gráficos a seguir. No Gráfico 9 estão representadas as vigas que não passaram pelo processo de corrosão e em seguida no Gráfico 10 estão dispostas as vigas submetidas à corrosão.

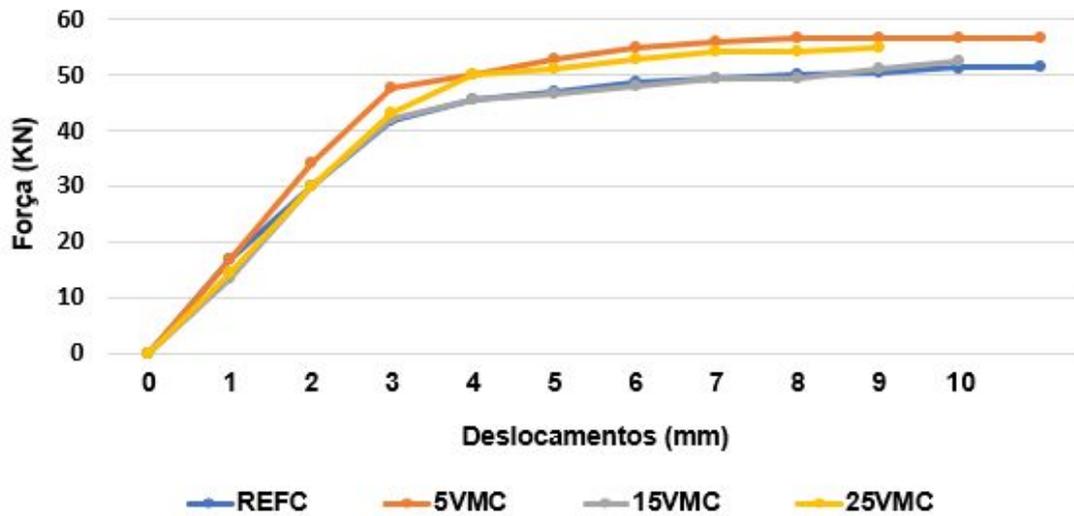
Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão - vigas não expostas à corrosão



Fonte: Do Autor (2020).

Analisando a curva força x deslocamento do Gráfico 9 é possível constatar que as vigas não expostas ao ensaio de corrosão obtiveram resultados muito semelhantes, chegando próximo a 10 mm de deslocamento em seu carregamento máximo. Tendo uma pequena variação de resultado apenas na viga do traço com 5% de substituição de vidro (5VMNC) que obteve a menor carga suportada entre as vigas ensaiadas, alcançando uma carga máxima de 56,8 KN e deslocando 9mm. Também é possível visualizar que o traço de referência alcançou a maior carga suportada entre as vigas ensaiadas, chegando a 68,3 KN com um deslocamento de 9,7mm. Seguido pelos traços (25VMNC) que alcançou a resistência de 67,5 KN com um deslocamento de 10mm e o traço (15VMNC) com uma carga de ruptura de 64,3 KN e flecha máxima de 9,2mm.

Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão - vigas expostas à corrosão



Fonte: Do Autor (2020).

Analisando o Gráfico 10, novamente é nítida a semelhança dos resultados obtidos entre os diferentes traços estudados. No entanto, as vigas com substituição de areia por vidro moído em diferentes porcentagens mostram valores superiores de resistência à tração na flexão em comparação a viga de referência (REFC). A viga com vidro moído (5VMC) apresentou o melhor resultado após o processo de corrosão, chegando a um deslocamento de 10,8 mm na sua carga máxima. O traço (25VMC), obteve o segundo melhor resultado chegando a um deslocamento de 9,3 mm em carga máxima. Seguido do traço (15VMC) que deslocou 10 mm e o resultado mais inferior obtido foi o de 51,4 KN suportados pelo traço (REFC) que na sua carga máxima deslocou 10,7mm.

Na Tabela 11, estão dispostos os resultados de carga máxima e deslocamento máximo (flecha máxima) de cada viga após o ensaio de tração na flexão.

Tabela 11 - Resultados de resistência de tração na flexão

Viga/traço	Carga de ruptura(Mpa)	Flecha máxima(mm)
REFNC	27,32	9,7
REFC	20,56	10,7
5VMNC	22,72	8,8
5VMC	22,72	10,8
15VMNC	25,72	9,2
15VMC	21,00	10
25VMNC	27,00	10
25VMC	22,00	9

Fonte: Do Autor (2020).

Conforme a Tabela 11 as vigas não corroídas apresentam uma carga superior de resistência à flexão na tração em comparação as vigas submetidas ao processo de corrosão. Mas também é possível observar que as vigas com substituição parcial do agregado miúdo (areia) por vidro moído apresentam resultados superiores de carga de ruptura em relação ao traço de referência. Tendo como melhor desempenho a viga com 5% de substituição (5REFC) sendo nula a perda de resistência, quando comparada a viga não corroída (5VMNC). Para 15% de substituição (15VMC) a redução foi de 18,35%, enquanto que para 25% de substituição (25VMC) a redução foi de 18,52%. Sendo a pior situação a da viga de referência (REFC) que apresentou uma queda de resistência na ordem de 24,74%. Com isso é possível destacar que o vidro moído de garrafas do tipo *long neck* em substituição do agregado miúdo (areia), apresenta características favoráveis a resistência a corrosão.

4.3 Análise de fissuração

No decorrer do ensaio de tração na flexão, foi executado o mapeamento da fissuração das vigas de concreto armado. Com isso, foi possível observar que as vigas romperam no seu terço médio do vão, indicando que a ruptura aconteceu

por flexão. Por conta da mesma característica de ruptura de todas as vigas, as fissuras também se assemelham de uma viga para outra.

Realizado o mapeamento das fissuras das vigas corroídas e não corroídas (FIGURA 46 e 47), posteriormente com o auxílio do *AUTOCAD* foram realizados os mapas indicando a posição das fissuras e suas respectivas espessuras.

Figura 46 - Mapeamento de viga não submetida ao processo de corrosão.



Fonte: Do Autor (2020).

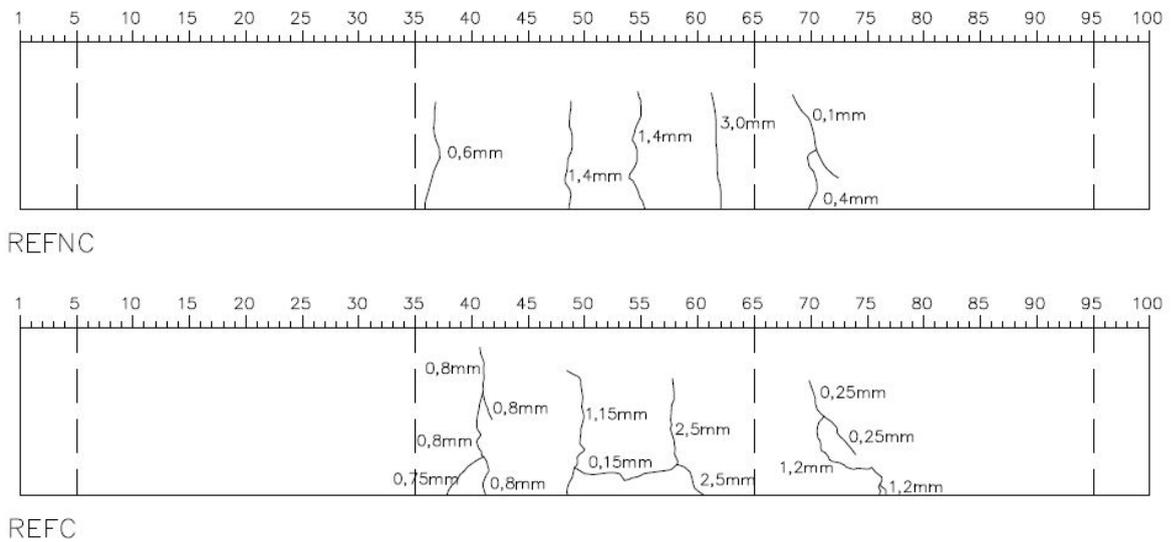
Figura 47 - Mapeamento de viga submetida ao processo de corrosão



Fonte: Do Autor (2020).

Na Figura 48, estão dispostos os mapeamentos da fissuração das vigas (REFNC) e (REFC). Analisando é possível observar um aumento de fissuras na viga corroída e uma verticalidade em todas as fissuras presentes em ambas as vigas, indicando que a ruptura aconteceu por tração. Tendo um comportamento distinto as vigas ensaiadas por Berton (2019) que na viga de referência apresentou um comportamento de ruptura por cisalhamento, por conta da possível perda de massa da armadura transversal durante o ensaio de corrosão.

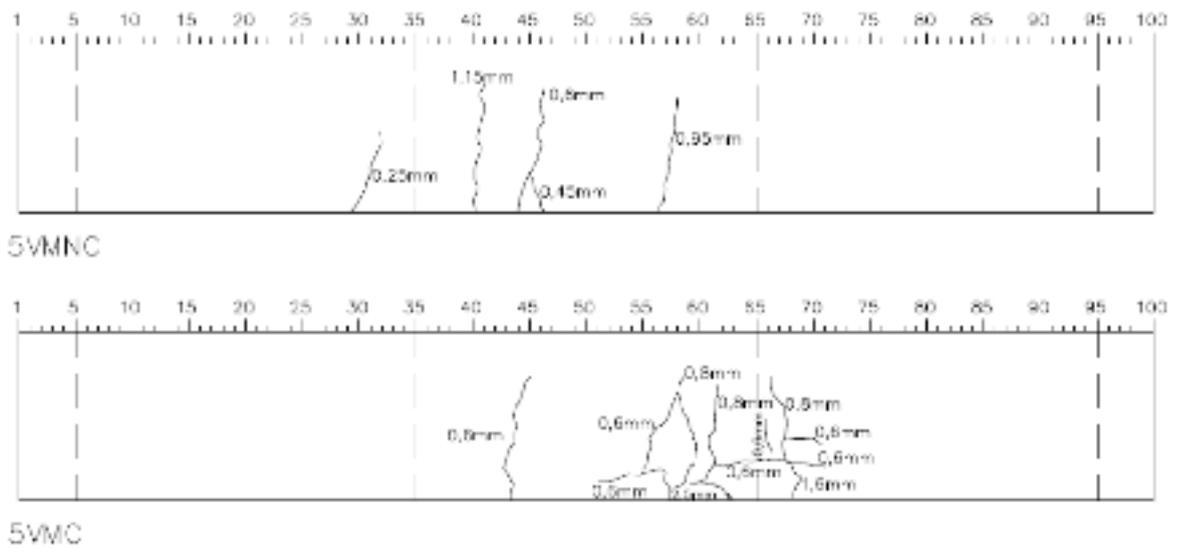
Figura 48 - Mapeamento de fissuras vigas de referência



Fonte: Do Autor (2020)

Conforme anteriormente apresentado as vigas com substituição da areia por 5% de vidro moído não submetidas à corrosão (5VMNC) e as submetidas (5VMC) obtiveram a mesma capacidade de carga, indicando o melhor traço em resistência a corrosão. Analisando os mapeamentos das fissuras na Figura 49 é possível observar um aumento de fissuração localizado no terço médio da viga corroída, indicando que o rompimento aconteceu por flexão e demonstrando que não houve uma perda de massa da armadura transversal durante o ensaio de CAIM, que possivelmente resultaria em uma ruptura por cisalhamento. Analisando ainda é possível constatar que a dimensão das fissuras se assemelham em ambas as vigas.

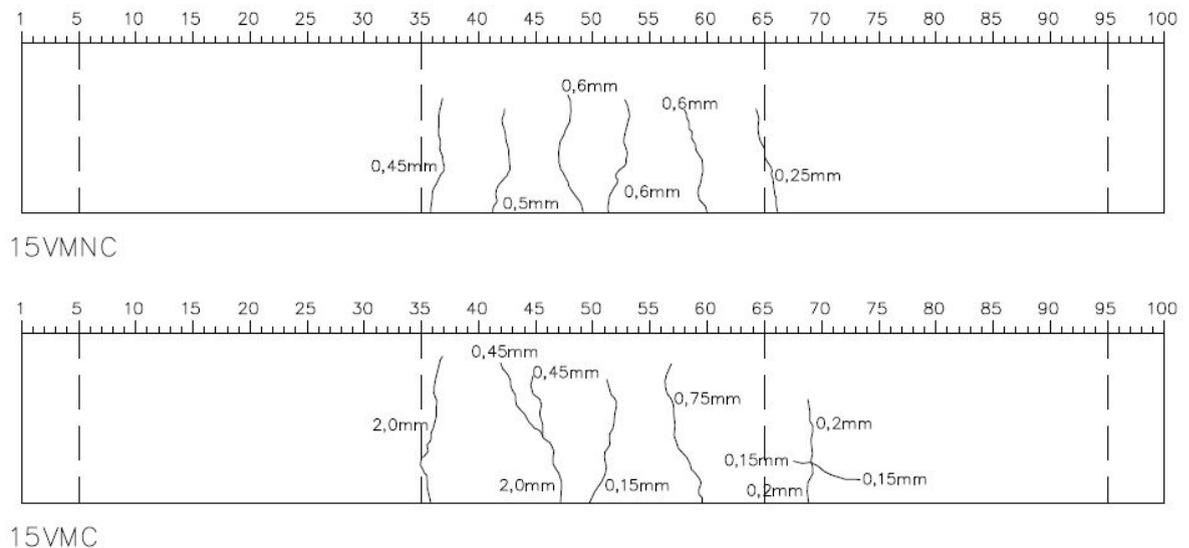
Figura 49 - Mapeamento de fissuras das vigas com 5% de substituição



Fonte: Do Autor (2020)

O mapeamento das fissuras da viga com adição de 15% de resíduo de vidro tanto para não submetidas a corrosão (15VMNC) como para a submetida (15VMC) (FIGURA 50). São as que mais se assemelham entre as vigas estudadas, pois em ambas se encontram no terço médio do vão, indicando a ruptura por flexão, sendo possível observar apenas uma pequena diferença de aumento de dimensão de algumas fissuras encontradas na viga corroída.

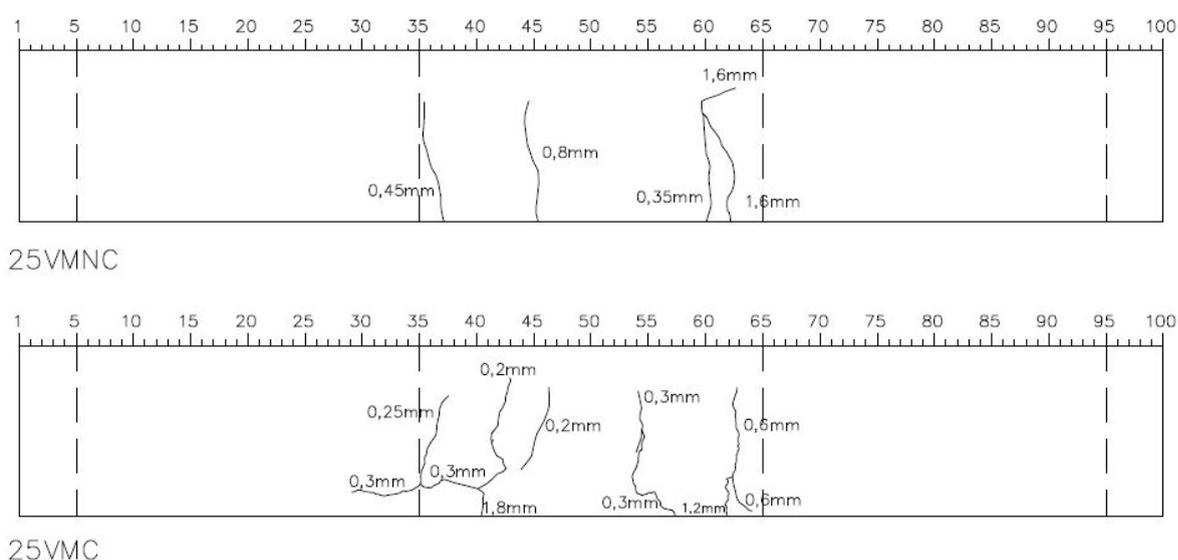
Figura 50 - Mapeamento de fissuras das vigas com 15% de substituição



Fonte: Do Autor (2020)

Sendo semelhante das demais, na Figura 51 as vigas com substituição de 25% da areia pelo vidro moído não submetida ao processo de CAIM (25VMNC) e a viga submetida (25VMC) demonstram características pertinentes às vigas anteriores, onde a ruptura também acontece por flexão, encontrando as fissuras localizadas no centro médio do vão. Na viga corroída (25VMC) é possível observar um aumento de fissuras e dimensões das mesmas próximo a sua face inferior, se comparado a viga conservada em ambiente livre de intempéries.

Figura 51 - Mapeamento de fissuras das vigas com 25% de substituição



Fonte: Do Autor (2020)

Conforme Torres (2011), o processo de corrosão no concreto é acelerado pela redução do pH através da carbonatação e a presença de cloretos, fazendo com que o aço das armaduras retorne ao estado de óxido de ferro. Os resultados desta pesquisa mostram que a incorporação do vidro moído ao concreto, diminui a penetração dos cloretos, por conta do refinamento dos poros presentes no concreto. Os resultados ainda confirmam os estudos realizados por Matos e Souza-Coutinho (2012), que substituíram o tradicional aglomerante cimento *Portland* por diferentes granulometrias de vidro moído e obtiveram uma maior resistência a penetração de cloretos no concreto com adição do resíduo vítreo.

4.4 Perda de massa

De acordo com os diâmetros medidos das barras da armadura positiva das vigas submetidas ao CAIM e posteriormente a tração na flexão. Foi possível identificar uma diminuição do diâmetro original destas barras, confirmando a ocorrência de perda de massa das barras nas mesmas. Na verificação da medida das 8 barras positivas (2 de cada viga) foi possível identificar que a viga de referência obteve a maior perda de massa dentre as vigas estudadas, apresentando uma redução de 0,77 mm. As demais vigas onde acontece a substituição do agregado miúdo por vidro moído em 5%, 15% e 25%, obtiveram respectivamente a seguinte redução de massa 0,47mm, 0,41mm e 0,38mm, o que explica a maior resistência dessas vigas em relação a referência.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o comportamento das vigas de concreto armado com substituição parcial do agregado miúdo (areia) por vidro moído submetidas a corrosão acelerada. Serão apresentadas também sugestões para trabalhos futuros.

A caracterização do resíduo de vidro proveniente das garrafas *long neck* gerou resultados bem próximos aos encontrados no agregado miúdo natural. Foi necessário realizar várias moagens com diferentes intervalos de tempo, para obter um resultado que se equipara se ao agregado natural. Os demais materiais utilizados na massa cimentícia como cimento, areia e brita, também foram caracterizados e mostraram conformidade com a norma vigente.

A incorporação de resíduo de vidro ao concreto, apresentou resultados positivos de resistência ao processo corrosivo em todos os teores de substituição estudados nas vigas de concreto armado. Tendo como melhor desempenho o traço com substituição de 5% de vidro moído, indicando uma maior durabilidade.

A utilização do método CAIM se mostrou eficaz, pois provocou a corrosão desejada nas vigas de concreto armado reduzindo a massa das armaduras que a integravam.

As substituições proporcionaram uma menor resistência à tração nas vigas de concreto armado mantidas em ambiente livre de intempéries, porém obtiveram uma maior resistência à deterioração quando expostas à corrosão. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão mostram um aumento de resistência das

vigas com adição de vidro moído quando comparado com a viga de referência que demonstrou o pior resultado de resistência ao processo corrosivo e a maior perda de massa de armadura positiva entre as vigas estudadas.

Através da análise do mapeamento das fissuras é possível destacar que as vigas com adição de vidro moído apresentam fissuras localizadas no terço médio do vão com menores dimensões em relação às encontradas na viga de referência corroída. A viga submetida ao processo de corrosão que não continha materiais vítreos em sua composição gerou fissuras na ordem de 3,0 mm, enquanto que nas demais vigas que continham vidro moído na sua composição a maior fissura encontrada foi de 2,0 mm.

Com base em todos os resultados analisados, conclui-se que as vigas com substituição do agregado miúdo (areia) por resíduo de vidro em diferentes proporções expostas a corrosão acelerada por imersão modificada apresentam uma maior resistência a flexão, menor fissuração e uma redução da perda de massa em relação a viga de referência. Sendo a substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído em 5% a que apresenta os melhores resultados de resistência à flexão entre as vigas estudadas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja realizado o ensaio de álcali-sílica, pois o vidro possui sílica em sua composição que pode vir a reagir com os álcalis do cimento e na presença de umidade pode gerar um gel que é expansivo e prejudicial ao concreto. Também pode-se comparar traços distintos das adições de vidro moído utilizado neste trabalho, com o intuito de avaliar a possibilidade de maiores ganhos de resistência. Sugere-se também que seja realizado reparos nas vigas submetidas a corrosão, analisando assim a possibilidade da realização de reparos em vigas expostas a ambientes corrosivos.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 1. ed. ,2000. Não paginado.

ALMEIDA.A,J. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. BeloHorizonte,ii2009,74pg.iiiDisponívelem:ii<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/55bitstream/handle/1843/ISMS8BVPZX/disserta__o_janaina.pdf?sequence=1>iiAcesso em: 24 de set. 2019.

ANDRADE,C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antônio Carmona e Paulo R.L. Helene, São Paulo, PINI, 1992, 104p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland- Preparo, controle e recebimento- Procedimento**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto-procedimentos.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregado - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

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

ASTM C1202 - 97. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.** American Society for Testing and Materials, USA, 1999.

BARBOZA, A.S.R *et al.* **Avaliação do uso de bambu como material alternativo para execução de habitação de interesse social.** Ambiente Construído, v.8, p. 115-129, 2008.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017.

BERTON, Julia. **Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão acelerada.** 2019. 93 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2019.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. (1999). **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto.** Cadernos de Engenharia de Estruturas. n.8. EESC.Universidade de São Paulo.São Carlos.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.** Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002. Seção 1,p.9596.Disponívelem:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=307&ano=&texto=>>. Acesso em: 07 out. 2019.

CABRERA, Leonardo Sena. **Vigas de concreto armado submetidas a corrosão acelerada: avaliação do comportamento mecânico de argamassa de reparo com diferentes materiais pozolânicos.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 2, p. 1590-1627.

CANOVAS, M.F. - **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo, Ed. Pini, 1988. 522 p.

CASCUDO, O. **O controle da Corrosão de Armaduras de Concreto. Inspeções e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: PINI; Goiânia: UFG, 1997.

CEBRACE 2017. **O Vidro**. Disponível em: <www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-historia-do-vidro>. Acesso em: 01 set. 2019.

CEMPRE. 2017. **Consórcio Empresarial para a Reciclagem**. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 01 out. 2019.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Gestão de coproduto: estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Nota Técnica. Brasília, 2008. 28 p.

Disponível em:

<http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_9_59_59_88597.pdf> Acesso em: 24 de set. 2019.

CHEN, S. et al. **A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment**. Procedia CIRP. N.9, p. 85-90, 2013.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB) - **Durable Concrete Structures CEB Design Guide**. Bulletin D'information 182. Paris, 1989. 268 p.

CORDEIRO, Rafael dos Santos; MONTEL, Adão L. Bezzerra. **Estudo da viabilidade para a produção de concretos com adição de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo na cidade de Palmas/TO**. Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, V. 2, n. Especial, p. 104-123, 2015. Disponível em:
<<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/1556>>
. Acesso em: 15 out. 2019.

CRENTSIL, K. S., BROWN, T., TAYLOR, A., **Recycled glass as sand replacement in premix concrete**. Ed. Eco-Recycled Australia and CSIRO, 2001.

FÁVERO, R. B. **Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento**. 2009. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, jul. 2009.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas: Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado**. 1994. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

FUSCO, Péricles B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo: Pini, 2008.

GARCIA, F. A. M; GARCIA, R. S. **Avaliação da viabilidade de utilização do concreto polimérico em substituição do concreto convencional**. São José do Rio Preto: Unilago, 2014. Disponível em:
<<http://www.unilago.edu.br/revista/edicaoatual/Sumario/2014/downloads/8.pdf>>
Acesso em: 06 out. 2019.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GRAEFF, Ângela G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

ISAIA, G. C., (2001). **Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

JOHN, Vanderley M; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de Resíduos da Construção.** Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000.

JUNIOR, R.J. **Utilização de escória de alto forno como adição em argamassa colante tipo AC-I.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. 99 pg. Disponível em:
< <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/162.pdf>> . Acesso em: 24 set. 2019.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; NETO, E. Barbosa. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino.** 2005. Artigo. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/ce/v51n320/29526.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2019.

MATOS, Ana Mafalda; RAMOS, Telma; NUNES, Sandra; SOUSA-COUTINHO, Joana. **Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder.** 2016. Artigo.

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

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MODRO, N.L.R.I. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET.** Revista Matéria v. 14, n. 1, pp. 725 – 736, 2009.

NASCIMENTO, Winny Fernanda; SANTOS, Davidson Araújo; SILVA, Breno Alcântara; TEMPONI, Gabriela Jordão; ANDRADE, Diego; LUZ, Brisa Souza; ALEXANDRINO, Carlos Henrique; CARLI, Alessandra de Paula. **Caracterização de compósitos de concreto utilizando agregado miúdo do vidro**. 2014. Artigo apresentado no XI Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Disponível em:

<<http://meioambientepocos.com.br/portal/anais/2014/arquivos2014/CARACTERIZACAO%20DE%20COMPOSITOS%20DE%20CONCRETO%20UTILIZANDO%20AGREGADO%20MIUDO%20DO%20VIDRO.doc>>.

Acesso em: 30 set. 2019.

OSBORNE, G. J. **Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete**. Cement and Concrete Composites 21, 1999, p. 11 – 21. Turnpike Drive, Luton, UK.

RIBEIRO, Anderson Osvaldo. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. 86 f. Dissertação. (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, set. 2015.

RIGHI, Débora; KÖHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. 2012. Artigo apresentado na XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Disponível em:

<<http://docplayer.com.br/26947425Analise-de-concretos-produzidos-com-vidro-moido-quando-submetidos-a-elevadas-temperaturas.html>> . Acesso em: 30 set. 2019.

SANTANA, A.C.; LIMA, H. F.; FILHO, N.O.N.; MENDES, S. **Estudo comparativo de concreto com sílica de cinza da casca de arroz e sílica ativa**. Universidade Educacional Araucária – UNIFACEAR. Araucaria, 2018. 16 pg. Disponível em: < <https://www.unifacear.edu.br/wp-content/uploads/artigo-1.pdf> > Acesso em 24 set. 2019.

SANTOS, E. A.; BORJA, E. V. **Investigação experimental de traços para blocos de concreto para alvenaria de adição com adição de resíduos de pneus reciclados**. Natal: CEFET/RN, 2005. Elaborada por Holos. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/57/63>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

SCHNEIDERS, L.A. **O Método Da Sala De Aula Invertida (Flipped Classroom)**. Lajeado: Univates, 2018.

SIMÕES, Lorena Jordani; **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. 2013. 142 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SOSBAI. **Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado**. Disponível em: <<http://www.sosbai.com.br/?secao=conteudo&id=26>>. Acesso em: 05 set. 2019.

SOUZA, Vicente C. M.; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

STEIN, Kássio J. **Avaliação experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

THASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASKI, J. L.; **BARBOSA M. B.. Influence of Rice Husk Ash in Mechanical Characteristics of Concrete**. In. IV international ACIANMET Conference on quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. Anais do IV HPC. Olinda, 2003.

TIECHER, Franciele. **Reação álcali-agregado: Avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 2006. 180 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, fev. 2006.

TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise.** 2011. 186 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, mar. 2011.

TULA, L. S. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável.** São Paulo, 2000. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TUTHILL, L. H. - **Lasting Concrete in a Sulfate Environment.** Concr. Int. , Dec. 1988. p. 85-86.

VIAN, Daniel. **Análise do comportamento mecânico e durabilidade de concretos produzidos com vidro moído.** 2018. 46 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09