

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANA CAROLINA CAPATO OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE EM CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA**

**Alegrete
2021**

ANA CAROLINA CAPATO OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE EM CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Fernanda B. P. da Costa

Coorientador: Simone D. Venquiaruto

**Alegrete
2021**

ANA CAROLINA CAPATO OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 19 de Abril de 2021.

Banca examinadora:



Prof. Dra. Fernanda B. P. da Costa
Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dra. Simone D. Venquiaruto
Coorientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Universidade Federal de Santa Maria



Me. Deividi Maurenre Gomes da Silva
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, mas principalmente a minha mãe que sempre me apoiou em tudo e ao meu avô que me ofereceu todo o apoio financeiro.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha orientadora Prof. Dra. Fernanda B. P. da Costa por todo conhecimento, orientação e por todo estímulo ao projeto. E a Prof. Dr^a. Simone D. Venquiaruto por ter me apresentado ao tema e ter sido uma das professoras que sempre nos ofereceu total suporte.

Agradeço à minha família que sempre me apoiou a ir atrás de realizar meus sonhos e mesmo com a distância se fizeram presente em toda a minha graduação. Obrigado por tudo, sem vocês eu nada conquistaria.

A todos os colegas e amigos que fizeram parte, mesmo que temporária, da minha história em Alegrete. Mas agradeço especialmente a minha amiga e colega de apartamento, Karina Comparsi, que foi praticamente uma irmã, estando ao meu lado nos melhores e piores momentos da minha graduação. E também à Diovana Patias que me ajudou muito na execução dessa monografia e com quem passava horas conversando.

Agradeço acima de tudo a Deus, por nunca me deixar desabar e por me guiar sempre nos caminhos que trilho.

“Assim como a alma, as esplêndidas conquistas do intelecto duram para sempre”.

Salústio

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento à compressão axial de um concreto de alta resistência contendo sílica ativa, quando submetido a um pré-carregamento e dois tipos de cura (submersa e térmica). Além disso, é avaliado a absorção de água por capilaridade no intuito de verificar a possibilidade de autocicatrização de microfissuras após o processo de pré-carregamento e cura. O tema foi escolhido em função da necessidade de reduzir prazos de obra, uma vez que o mercado vem aplicando ciclos de execução rápidos e com isso solicitando a estrutura precocemente, gerando um aumento nas preocupações em relação as deformações sofridas e possíveis alterações nas características do concreto. Para a pesquisa foi utilizado um único traço e aplicado um carregamento aos 7 dias. Após o carregamento os corpos de prova foram divididos, sendo metade deles submetidos a cura térmica e a outra metade a cura submersa, de forma a avaliar a influência do tipo de cura em suas características e na recuperação dos danos causados pelo pré-carregamento. Após os 28 dias de idade foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade como indicativo de durabilidade. Os resultados mostraram que a cura térmica é mais eficaz do que a cura submersa, apresentando melhores resultados tanto nos corpos de prova de referência (sem pré-carregamento) quanto nos submetidos ao carregamento precoce. Em relação as propriedades mecânicas do concreto os corpos de prova submetidos ao pré-carregamento apresentaram valores maiores para a resistência à compressão e menores taxas de absorção, evidenciando assim a possibilidade de autocicatrização das microfissuras causadas no pré-carregamento para este tipo de concreto.

Palavras-chave: carregamento precoce, concreto de alta resistência, autocicatrização.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the axial compression behavior of a high strength concrete containing active silica, when subjected to a preload and two types of curing (submerged and thermal). In addition, the absorption of water by capillarity is evaluated in order to check the possibility of self-healing of microcracks after the pre-loading and curing process. The theme was chosen due to the need to reduce construction deadlines, since the market has been applying fast execution cycles and with this requesting the structure early, generating an increase in concerns regarding the deformations suffered and possible changes in the characteristics of the concrete. . For the research, a single line was used and a load was applied at 7 days. After loading, the specimens were divided, half of which were subjected to thermal curing and the other half to submerged curing, in order to assess the influence of the type of curing on its characteristics and on the recovery of damage caused by pre-loading. After 28 days of age, they were submitted to tests of resistance to compression and absorption by capillarity as an indicator of durability. The results showed that thermal curing is more effective than submerged curing, presenting better results both in reference specimens (without pre-loading) and in those subjected to early loading. Regarding the mechanical properties of concrete, the specimens subjected to preloading showed higher values for compressive strength and lower absorption rates, thus evidencing the possibility of self-healing of the micro-cracks caused by preloading for this type of concrete.

Keywords: early loading, high strength concrete, self-healing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Influência da cura úmida na resistência do concreto com relação a/c 0,50	17
Figura 02 – Sílica ativa vista por microscópio	23
Figura 03 – Diferença na Porosidade do Concreto com e sem adição de sílica	24
Figura 04 – Representação esquemática da zona de transição nos concretos	25
Figura 05 – Aspecto visual de uma microfissura de 64 μm depois de 1, 3 e 5 meses em ambiente com 100% de U.R. (argamassa com relação a/c=0,35).	31
Figura 06 – Mecanismos de autocicatrização natural no concreto.....	32
Figura 07 – Corpo de Prova recebendo pré-carregamento.....	37
Figura 08 – Temperatura da cura térmica	37
Figura 09 – Corpos de Prova submetidos ao ensaio de absorção	38
Figura 10 – Fluxograma de metodologia.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/cimento.	27
Tabela 02 - Boletim de Ensaios do CPV ARI RS – Obras Especiais.....	33
Tabela 03 - Característica físicas dos agregados utilizados	34
Tabela 04 – Traço Concreto.....	35
Tabela 05 – Carga de ruptura e Carga de Pré-carregamento	40
Tabela 06 – Resultados do Ensaio de Tensão de Ruptura	40
Tabela 07 – Medições do Ensaio de Absorção por Capilaridade	42
Tabela 08 – Absorção por Capilaridade Média 72h	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Curva granulométrica agregado miúdo.....	34
Gráfico 02 – Curva granulométrica agregado graúdo	35
Gráfico 03 – Resistência à compressão média	41
Gráfico 04 – Taxa de Absorção Média x Tempo	44
Gráfico 05 – Máximas alturas de ascensão capilar	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – água/cimento

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CAR – Concreto de Alta Resistência

CC – Concreto Convencional

CH – Hidróxido de Cálcio

f_{ck} – Resistência Característica do Concreto

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	144
1.1 Objetivo Geral	155
1.2 Objetivos Específicos	155
2 REVISÃO DE LITERATURA	166
2.1 Estruturas de concreto: patologias devido ao carregamento precoce	166
2.2 Concreto de Alta Desempenho (CAD)	199
2.2.1 Cimento	209
2.2.2 Agregados	20
2.2.3 Aditivo Superplastificante	21
2.2.4 Adições Minerais	222
2.2.5 Zona de Transição	244
2.2.6 Propriedades do CAD	255
2.2.7 Microfissuração	277
2.2.8 Autocicatrização (<i>Self-healing</i>)	299
3 MATERIAIS E MÉTODO	333
3.1 Materiais	33
3.2 Especificação do traço, mistura e moldagem das amostras	35
3.3 Testes Experimentais	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A construção civil vem requerendo cada vez mais agilidade nas obras, como a retirada precoce do escoramento e o início antecipado das alvenarias sendo, por vezes, a estrutura solicitada antes mesmo de atingir a resistência necessária. Essa solicitação prematura pode causar deformações excessivas que futuramente levam à diversas manifestações patológicas na edificação como fissuras, corrosão de armaduras e carbonatação.

Mesmo com a utilização de concretos de alta desempenho (CAD) o estudo aprofundado do comportamento das estruturas de concreto, principalmente as esbeltas e aquelas que são submetidas à deformações excessivas, é de fundamental importância para se reduzir o potencial de deformação. Um estudo adequado dos materiais utilizados, do tipo de cura e as propriedades do concreto é necessário para que se consiga tal redução (VENQUIARUTO, 2017).

Bernardino (2016) ainda afirma que quando combinado os efeitos da retirada antecipada do escoramento com as deformações dos processos inerentes ao concreto (retração por secagem, dilatação térmica) nas primeiras idades são intensificadas as alterações microestruturais. Tal combinação pode gerar microfissuras no concreto, as quais podem prejudicar seu desempenho mecânico e principalmente sua durabilidade.

Contudo nas duas últimas décadas alguns pesquisadores (HOSODA ET AL., 2012; GAGNÉ E ARGOUGES, 2012; TANG ET AL., 2015) investigaram que o concreto possui potencial de auto – recuperação, o qual ficou conhecido como fenômeno de autocicatrização (*self-healing*). O processo no qual o concreto se recupera com os materiais já inerentes no sistema é caracterizado como autógeno e ocorre devido a hidratação tardia de alguns grãos anidros após a entrada de água pelas microfissuras.

Alguns pesquisadores (SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008; BERNARDINO, 2016 e VENQUIARUTO, 2017) investigaram o processo autógeno de autocicatrização em concretos convencionais e obtiveram resultados positivos a nível de laboratório em certas propriedades, como por exemplo um aumento na resistência à compressão após o processo de auto-recuperação. Além disso, Venquiaruto (2017) observou que, quanto maior o tempo de cura, menores eram os efeitos negativos em relação a durabilidade (entrada de agentes agressivos). A autora concluiu ainda que em

ambientes controlados a continuidade da cura influencia positivamente na recuperação das fissuras causadas devido ao carregamento precoce.

Diante dos resultados obtidos pelos pesquisadores citados, observa-se que o carregamento precoce não é tão danoso para as estruturas de concreto, quando essas possuem dosagens adequadas e cura contínua. Nesse contexto, embora resultados tenham sido satisfatórios para o concreto convencional, é importante a análise em concretos de alta resistência (CAR), visto que este possui maior quantidade de cimento o que pode auxiliar na autocicatrização devido à disponibilidade de grãos anidros. Por outro lado, concretos como o CAR podem apresentar problemas maiores de fissuração por conta de fenômenos como retração e carregamento precoce em situações de cura inadequada. Assim, esse trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos do carregamento precoce e do tipo de cura em concreto de alto desempenho, em relação à resistência mecânica e capacidade de absorção de água como indicativo de durabilidade.

1.1 Objetivo Geral

Verificar a influência do carregamento precoce nas propriedades do concreto de alto desempenho após este ser submetido a distintos processos de cura, cura submersa em temperatura ambiente e cura submersa com temperatura controlada.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o percentual de pré-carregamento ao qual o corpo de prova de referência deverá ser submetido através do trabalho de Vieira (2008);
- Avaliar se o tipo de cura influi no processo de autocicatrização;
- Verificar os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova que foram submetidos ao carregamento precoce e aqueles que não receberam a pré-carga após 7 dias de cura;
- Avaliar o indicativo de durabilidade, feito através do ensaio de absorção de água por capilaridade, do concreto pré-carregado e daquele que não foi submetido ao carregamento prematuro após os 7 dias de cura;

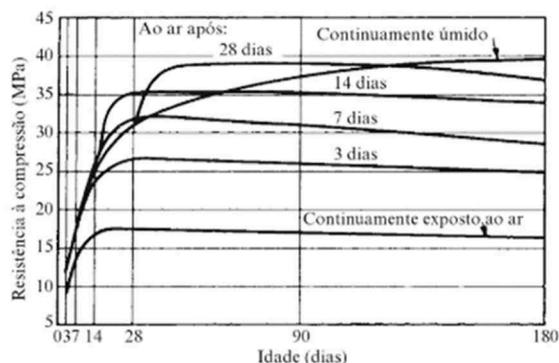
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estruturas de concreto: patologias devido ao carregamento precoce

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo na área da construção civil, posição justificada por características únicas no quesito desempenho, preço e mão-de-obra qualificada. Contudo, concretos que requerem resistências mais elevadas demandam tempo para que suas propriedades mecânicas sejam desenvolvidas e, para o ramo das edificações, o tempo é inversamente proporcional ao lucro. Segundo Venquiaruto (2017) algumas empresas, em busca de se manter competitivas no mercado, procuraram soluções capazes de dar agilidade a obra, tais como a redução do tempo de execução da estrutura, do período de escoramento e antecipação do início das alvenarias. Tais soluções, porém, podem prejudicar o desempenho futuro dos elementos de concreto, já que em suas idades iniciais ainda não adquiriram suas resistências totais, que se contempla após os 28 dias, sendo assim, mais suscetível a deformações.

Quando antecipada a retirada do escoramento ou no início da construção das paredes de alvenaria, o concreto, que ainda não atingiu sua resistência final, pode sofrer uma microfissuração em sua matriz. Com o decorrer do tempo, esse fenômeno pode interferir na sua durabilidade ou em suas propriedades mecânicas. Além disso, Neville (1997) ressalta que o concreto pode sofrer processo de microfissuração sem ser submetido a cargas externas, apenas por tensões de tração decorrentes da retração térmica e secagem, problemas que podem ser evitados com uma cura adequada. O autor ainda afirma que a cura do concreto tem total influência em sua resistência mecânica final, assim como apresentado na Figura 1.

Figura 01: Influência da cura úmida na resistência do concreto com relação a/c 0,50



Fonte: Neville (1997)

Ao ser fissurado, o concreto passa a ser vulnerável à ação de agentes agressivos e da água, interferindo na sua vida útil. Neste sentido, alguns trabalhos (SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008; BERNARDINO, 2016 e VENQUIARUTO, 2017) investigaram os danos causados por esse carregamento prematuro e concluíram que os efeitos não são tão críticos ao menos em ambientes controlados, uma vez que dependem de fatores de dosagem do material aplicado.

Salvador (2007) em seu trabalho buscou analisar experimentalmente as ações de dois tipos de carregamento, um de curta e outro de longa duração, na deformação de vigas de concreto armado. O carregamento de curta duração foi constituído em 3 níveis de carregamento aos 3 dias de idade, e o de longa duração foi composto por carregamentos em idades que corresponderiam as ações construtivas decorrentes de dois ciclos de execução rápidos. O autor avaliou dois tipos de cimento, um de alta resistência inicial (CP V-ARI) e outro de hidratação lenta (CP IV -32RS). O trabalho indica que tanto as normas quanto a literatura estão corretos em afirmar que as deformações estão diretamente ligadas à idade de aplicação do carregamento, ou seja, quanto mais cedo maiores são as deformações, de forma que as cargas decorrentes do ciclo de execução podem vir a ser mais críticas que as cargas de projeto. O autor ainda observou que os níveis de fissuração até os 28 dias apresentam uma tendência ao aumento devido ao pré-carregamento. Contudo, o carregamento precoce não afetou a resistência à compressão do concreto das vigas produzidas com o CP V -ARI. O autor trabalhou com concretos na faixa de resistência à compressão aos 28 dias de 30 a 50 MPa, e seus resultados ficaram entre 25 á 40MPa.

Já Vieira (2008) avaliou a influência de ciclos de execução rápidos em quatro tipos de cimento (CP V -ARI, CP V -ARIRS, CP IV -RS e CP II -Z), analisando, ainda, a diferença decorrente da relação água/cimento utilizada (0,35; 0,50; 0,70). A autora alterou também a idade de aplicação do carregamento (1,3 e 7 dias) e seus respectivos percentuais (0%, 25%, 50% e 75%). Os ensaios realizados aos 28 dias mostraram que à medida que se aumentava os percentuais do carregamento aplicado, houve aumento da resistência à compressão de até 10% para o CP V -ARI e CP V -ARIRS. A autora atribuiu esse aumento da resistência ao concreto submetido a um pré-carregamento, ao rearranjo das partículas (efeito da compactação, que consiste na quebra de partículas maiores e redução dos vazios), e a uma recuperação das microfissuras devido a entrada de água ter hidratado compostos antes não hidratados. Esse aumento na resistência à compressão também pôde ser notado com o aumento da idade de aplicação do carregamento. Contudo, para a relação água/cimento tal fato foi inverso, quanto menores as relações, maiores incrementos nas propriedades mecânicas.

Bernardino (2016) estudou a influência do carregamento precoce na retração por secagem em dois tipos de cimento (CP V -ARI e CP IV), com diferentes relações água/cimento (0,35; 0,50 e 0,70), em idades de cura de 7 e 28 dias. A autora ainda trabalhou com três diferentes idades de carregamento (1, 3 e 7 dias) e com diferentes percentuais de carregamento (0%, 25%, 50% e 75%). Esse percentual foi estabelecido em cima da carga média de ruptura à tração na flexão. Em seus ensaios encontrou uma redução na retração para o CP V -ARI, com exceção para relação a/c de 0,35 aos 7 dias de cura. Para o CP IV a redução na retração para a relação de 0,70 em ambas as idades de cura. Sendo a redução da retração média, após a cura de 28 dias, de 48% para o CP V -ARI e de 46% para o CP IV. A autora atribuiu a redução ao efeito da compactação associada à cura prolongada, diminuindo a porosidade devido à continuidade na hidratação, ou seja, autocatrização das microfissuras (*self-healing*) e à redução dos vazios. Bernardino (2016) não trabalhou com a caracterização da resistência à compressão axial.

Venquiaruto (2017) dividiu seu experimento em duas etapas, sendo a primeira um estudo da influência da microfissuração causada pelo pré-carregamento na penetração de íons cloreto e na absorção de água por capilaridade para concretos produzidos com diferentes tipos de cimento (CP V -ARI, CP IV -RS, CP II -Z), e para

diferentes relações água/cimento (0,35; 0,50 e 0,70). A autora ainda carregou os corpos de prova em três idades distintas (1, 3 e 7 dias), com percentuais de carregamento distintos (0%, 25%, 50% e 75%). Já na segunda etapa do programa, avaliou a influência da cura prolongada nos danos em concretos submetidos a um carregamento precoce, para os cimentos (CP V -ARI e CP IV) com relação a/c de 0,50. Venquiaruto (2017) identificou uma elevação na penetração de íons cloreto e na absorção de água conforme aumentava-se a carga e a relação água/cimento, a penetração de íons cloretos foi menor para concretos que tinham em sua composição cimentos pozolânicos. Já na segunda etapa a autora observou que quanto maior o tempo de cura melhores os resultados tanto nas propriedades mecânicas quanto na durabilidade, principalmente para o CP IV, encontrando ainda uma recuperação parcial das microfissuras devido a continuidade da cura. A autora analisou concretos na faixa de resistência de 30 a 45MPa.

Dos estudos acima pode-se concluir que a fissuração precoce em estruturas de concreto pode ser evitada ou reduzida através da utilização de materiais, dosagens e processo de cura adequados, os quais contribuem para o aumento da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. Entretanto, só é possível atingir níveis favoráveis de resultados se, além disso, o processo de carregamento precoce for compatível com a resistência nas idades iniciais do concreto. Neste contexto, a utilização de concretos de alto desempenho tem se mostrado uma alternativa e será melhor discutido e conceituada nos itens a seguir.

2.2 Concreto de Alto Desempenho (CAD)

O concreto de alto desempenho (CAD) é todo concreto que possui alta resistência característica. Alguns autores como Silva (2010) caracterizam como CAD, concretos com resistência acima de 40 MPa. Já a Tecnosil (2017) define que CAD são concretos na faixa de 50 a 100 MPa. Portanto, não existe ainda um consenso na literatura técnica.

Assim como o concreto convencional, o CAD é composto por uma fração de cimento Portland, água e agregados. Porém, para que suas propriedades mecânicas sejam melhores que a do concreto comum, sua relação água/cimento é reduzida e, ainda, é adicionado aditivo superplastificante e adição mineral (sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante).

2.2.1 Cimento

Segundo Silva (1995) a escolha do cimento no CAD é fundamental já que este influencia tanto na resistência quanto na aderência pasta-agregado. O autor ainda afirma que além de suas propriedades mecânicas, é necessário levar em conta finura, composição química e sua compatibilidade com os aditivos. Quanto mais fino os grãos de cimento, mais rápida será sua hidratação e, conseqüentemente, maior será sua resistência nas primeiras idades. A finura ainda influencia diretamente na porosidade o que também interfere na resistência, fator altamente importante para o CAD. Aïtcin (2000) afirma que para o CAD as partículas não devem ser muito finas porque demandam maior quantidade de água e nem partículas com maiores dimensões pois essas demoram para reagir e formam compostos resistentes em menor número. Mehta e Monteiro (1994) ainda reforçam que partículas de cimento maiores que 45 µm oferecem uma maior dificuldade de hidratação e partículas superiores á 75 µm nunca se hidratam completamente.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) afirmam que, quando for possível a escolha do cimento, deve-se optar por cimentos mais puros, portanto os mais recomendados para fabricação do CAD são o CP I e CP V -ARI. Contudo os autores ressaltam que o uso de outros cimentos é permitido, desde que sejam previamente estudados. Aïtcin (2000) ainda faz considerações quanto ao formato dos grãos, afirmando que devem ser preferencialmente cúbicos ou cúbico e ortorrômbico.

2.2.2 Agregados

No CAD os agregados constituem uma parcela importante na alta resistência. Price (2003) ressalta que a escolha dos agregados é uma parte crítica para os concretos de alto desempenho, muito mais do que para os concretos comuns.

Segundo Silva (2010) a pasta de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes no CAD, que os agregados podem se tornar o elo mais fraco do concreto. O autor ainda ressalta que é fundamental para os concretos de alta resistência, que a forma e tamanho dos agregados sejam compatíveis com a matriz, evitando assim efeitos indesejáveis na zona de transição. Tutikian, Isaia e Helene (2011) afirmam que a dimensão máxima característica deve ser limitada, pois uma maior dimensão resulta

em mais falhas na microestrutura e maior retenção de água da exsudação, formando assim uma zona de transição maior. No entanto, os autores ainda salientam que dimensões reduzidas demandam mais água para o amassamento, devendo-se então evitar o uso de agregados que apresentem teor de material pulverulento maior do que 8%. Aïtcin (2000) frisa que o agregado graúdo, preferencialmente, deve possuir dimensão máxima característica de 25mm, sendo descartado grãos superiores a isso, e sua forma deve ser a mais cúbica possível.

2.2.3 Aditivo Superplastificante

Aditivos superplastificantes atuam na alteração da trabalhabilidade mantendo a relação de água na matriz de concreto. Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) os superplastificantes tem como função melhorar a consistência do concreto sem elevar a demanda de água, acrescer as propriedades mecânicas e também sua durabilidade, reduzindo ainda o consumo de cimento na mistura.

Almeida (1990) divide os mecanismos de atuação dos superplastificantes em três efeitos:

- redução da tensão superficial da água, devido à natureza tenso-ativa dos aditivos, a qual reduz a coesão das moléculas de água, fazendo com que sua capacidade de propagação e penetração sejam maiores;

- efeito lubrificante, também justificada pela natureza tenso-ativa das moléculas do aditivo, que diminui o atrito entre as partículas finas e dos sólidos em suspensão sobre a fase líquida;

- efeito de espalhamento, quando as moléculas do aditivo são absorvidas em dupla camada pelas partículas sólidas as tornam eletricamente carregadas, e, como já conhecido, partículas de cargas iguais se repelem, promovendo assim uma dispersão das partículas de cimento, tornando mais ativo.

Silva (2010) afirma que a redução de água chega a ser de 25% a 35%, e ainda podem aumentar a resistência dos concretos nas primeiras idades de 50% a 75%. Segundo Mehta e Monteiro (1994) aumentando-se o consumo de cimento e estabelecendo uma relação a/c abaixo de 0,45, é possível aumentar as taxas de desenvolvimento de resistência. Portanto, para os concretos de alta resistência, os superplastificantes são fundamentais, já que a redução no fator a/c limita a trabalhabilidade e dificulta a aplicação. Dessa forma, além de possibilitar a diminuição

da relação a/c com ganho de trabalhabilidade, esses aditivos ainda auxiliam no aumento da resistência mecânica.

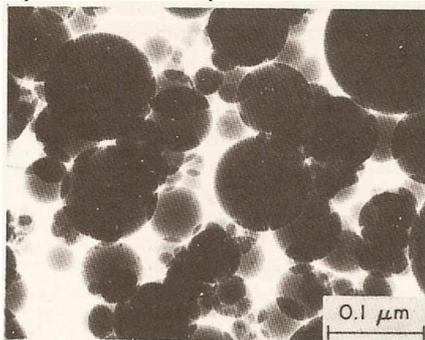
2.2.4 Adições Minerais

As adições minerais são materiais finos com atividade pozolânica que melhoram as propriedades do concreto como resistência, permeabilidade e durabilidade. Segundo a NBR 12613 (2014) são materiais silicosos ou silicoaluminosos que finamente divididos e em presença de água reagem com hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes. A inserção na mistura do concreto pode ser por adição ao cimento ou por substituição parcial do cimento. Silva (2010) expõe que a sua incorporação ao concreto minimiza o calor de hidratação, reduzindo assim as fissurações térmicas; melhora a resistência, agindo principalmente na zona de transição; aumenta a impermeabilidade, devido à um refinamento dos poros e, ainda, confere maior durabilidade a ataques químicos. Aïtcin (2000) ainda complementa que a medida que se acrescenta adições minerais, acentua-se a redução da permeabilização tornando o concreto mais resistente a ambientes agressivos.

Price (2003) destaca o papel fundamental das adições minerais para o CAD é muito mais significativo do que para os concretos comuns. Os minerais que podem ser adicionados no CAD são: sílica ativa, escória de alto forno, metacaulim, cinza volante, etc. Porém, dentre as citadas, as mais utilizadas no CAD são a sílica ativa e o metacaulim, devido a sua finura.

A Tecnosil (2017) caracteriza a sílica ativa como subproduto das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício, com dimensões menores que a dos grãos de cimento, a qual influencia na resistência, fluidez e durabilidade do concreto. Ela também recebe o nome de sílica fume ou microsílica. Mehta e Monteiro (1994) ressaltam que o uso da sílica ativa melhora a zona de transição devido à diminuição do tamanho e volume de vazios do concreto gerada pela pequena dimensão dos grãos da sílica (0,1 micrômetro), a qual pode ser observada na Figura 2.

Figura 02 – Sílica ativa vista por microscópio.



Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

Segundo Tecnosil (2017) a sílica tem dimensão cem vezes menor que a do cimento, e se adicionada ao concreto em proporções de 5,0 a 8,0% confere-lhe maior coesão, capacidade de aderência, reduz a exsudação e o consumo de cimento. Silva (2010) afirma que a sílica ativa em conjunto com um agente redutor de água, é capaz de elevar o ganho de resistência tanto nas primeiras idades, devido à aceleração da hidratação do cimento, quanto em idades avançadas em decorrência da reação pozolânica. A reação pozolânica é um fenômeno caracterizado pela reação da sílica com o hidróxido de cálcio (resultado da reação do cimento com a água), formando, assim, o silicato de cálcio hidratado, que possui propriedades aglomerantes. Segundo Mehta e Monteiro (1994) o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto das reações pozolânicas, é responsável por um aumento na resistência mecânica e a durabilidade.

A Tecnosil (2017) também afirma que, além da reação pozolânica contribuir na resistência, reduz os poros (efeito filler), como pode ser observado na Figura 3 e, com isso, auxilia na durabilidade do concreto. A segunda função da sílica ativa, o efeito filler, é caracterizado por Neville (1997) como um refinamento da microestrutura do concreto, criando assim uma estrutura porosa muito mais densa. O autor justifica esse efeito à pequena dimensão das partículas, as quais preenchem os vazios criados pela água livre na matriz.

Figura 03 – Diferença na Porosidade do Concreto com e sem adição de sílica



Fonte: Tecnosil (2017)

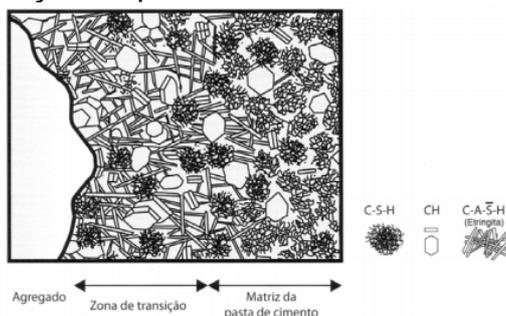
Price (2003) ainda destaca que a sílica é indispensável para concretos de alto desempenho, já que sua eficiência cimentícia é 3 vezes maior que a do Cimento Portland, facilitando assim o ganho de altas resistências com menores quantidades de cimento. O autor menciona que normalmente é adicionada à mistura em proporções de 5 a 10% da massa de cimento.

2.2.5 Zona de Transição

O concreto, no estado endurecido, possui três fases distintas a nível microscópico: pasta de cimento, agregado e zona de transição. Esta última fase, conhecida como zona de transição, é a zona mais frágil do concreto, caracterizada pela interface entre pasta e o agregado. Segundo Paulon e Kirchheim (2011) a zona de transição é uma região de aproximadamente 50 μm e, por possuir uma microestrutura diferente da matriz do cimento, como observado na Figura 4, têm a formação e a cristalização dos produtos da hidratação afetados pelo agregado. Mehta e Monteiro (1994) reiteram que a fragilidade da zona de transição é causada por sua estrutura e propriedades serem diferentes da pasta de cimento, apesar de ser composta pelos mesmos materiais que essa última. Os autores ainda afirmam ser nessa fase a ocorrência da ruptura do concreto convencional.

Silva (2010) caracteriza a zona de transição como uma área de alta porosidade. Como a porosidade do concreto tem influência direta em sua resistência, a zona de transição é extremamente importante para o CAD.

Figura 04 – Representação esquemática da zona de transição nos concretos



Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2008)

Mehta e Monteiro (2008) ainda afirmam que pode haver microfissuras na zona de transição, mesmo antes do concreto receber o carregamento, por causa dos movimentos de secagem e do esfriamento da estrutura. Os autores concluem que essas microfissuras podem, ainda, aumentarem de tamanho e número devido às cargas de impacto de curta duração. Mais uma vez identifica-se a necessidade de uma atenção especial à essa região, já que a pré-existência de microfissuras influenciarão diretamente no pré-carregamento, que certamente as aumentará em número e tamanho. É, portanto, basicamente na zona de transição do concreto em que a sílica ativa vai atuar com maior eficiência. Segundo Lima (1997) a zona de transição é rica em hidróxido de cálcio (CH) e é a região com maior concentração de poros, exatamente os dois pontos principais de atuação da sílica ativa, agindo neles com a reação pozolânica e o efeito filer respectivamente.

2.2.6 Propriedades do CAD

O CAD apresenta melhorias no comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido em relação aos concretos convencionais. Esse item descreverá melhor algumas dessas propriedades, porém dando maior ênfase a resistência a compressão.

Tanto no concreto comum como no CAD o calor de hidratação é proporcional à quantidade de cimento em hidratação, o qual nem sempre corresponde a quantidade

total de cimento na mistura, principalmente no caso do CAD. O emprego de aditivos retardadores, superplastificantes e uma menor quantidade de água pode afetar o calor de hidratação, e o distribui-lo por um maior tempo. Portanto apesar de possuir maior consumo de cimento os picos de temperatura no CAD não necessariamente são maiores que as do concreto convencional (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a resistência de um concreto é a propriedade mais importante, tanto que sempre deve ser especificada em projetos estruturais. No Brasil o ensaio é realizado de acordo com a NBR 5739 (2007) e, através dele, é possível obter outras propriedades como: resistência à tração, módulo de deformação longitudinal e relação tensão x deformação. Neville (1997) afirma que a determinação da resistência à compressão é uma forma de medir a qualidade do concreto, visto que ela está relacionada com a estrutura interna do mesmo.

Mehta e Monteiro (1994) ressaltam que devido ao uso de superplastificantes, o tempo de início da hidratação no CAD é retardada e, por isso, pode demorar um pouco mais para desenvolver sua resistência inicial do que os concretos convencionais. Porém o autor afirma que após iniciado o processo de hidratação o CAD pode atingir resistências de até 30MPa em um período de 24 horas. Silva (2010), concluiu que corpos de prova submetidos a um longo período de cura imersa em água, acarretaram no aumento da resistência à compressão, possivelmente por uma hidratação adicional. Guimarães (2002) ainda complementa dizendo que quando o concreto é curado ao meio ambiente, a resistência pode apresentar um decréscimo, principalmente quando possui sílica em sua composição, devido à secagem da camada externa que gera um gradiente de tensões. Por isso mesmo o processo de cura é de fundamental importância para que se obtenha elevadas resistências para o CAD.

Mehta e Monteiro (1994) reconhecem que um dos fatores que também afetam a resistência à compressão é a relação água/cimento. A lei de Abrams relaciona a resistência à compressão a relação a/c , a qual versa que para um mesmo grau de hidratação, a resistência da pasta depende essencialmente da relação a/c . Aïtcin (2000), afirma que para o CAD, essa relação também é válida, assim como apresentado na Tabela 1.

Tabela 01 – Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/cimento.

Relação a/c	Faixa de resistência à compressão máxima MPa
0,40 – 0,35	50 – 75
0,35 – 0,30	75 - 100
0,30 – 0,25	100 - 125
0,25 – 0,20	>125

Fonte: Aitcin (2000)

Uma outra propriedade importante do concreto é o módulo de elasticidade. Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) o módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal é de extrema importância para o CAD, pois ele influencia diretamente nas deformações dos elementos estruturais. Os autores ainda afirmam que geralmente seu cálculo é feito por intermédio da resistência a compressão, desde que exista uma proporção entre essas propriedades, já que os parâmetros que influem em ambos são os mesmos.

Aitcin (2000) afirma que, dependendo do tipo de obra e volume de concreto, caberia um estudo específico do módulo de deformação, com os materiais a serem utilizados.

2.2.7 Microfissuração

Segundo Vieira (2008), o estudo da propagação de fissuras ou microfissuras, geradas devido ao material empregado ou provocado por carregamentos não previstos, são importantes frente as condições de serviço e de segurança das estruturas. Barbirato (1999), ressalta que essas fissuras agem como pontos de elevação de tensões e sua propagação acarreta em uma redução da resistência da estrutura. Por isso, Vieira (2008) afirma que a Ciência da Mecânica da Fratura é importante para estudo da resistência de estruturas fissuradas e com trincas e, principalmente, para determinar a propagação dessas quando em situação de fadiga. Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2008), ainda complementam que as microfissuras presentes na zona de transição aumentam em número, comprimento e abertura,

quando atingem 30% da carga de ruptura da peça e a fissuração passa a ser rápida ao atingir 70 a 90% da carga de ruptura, podendo ainda chegar a ruptura se essa carga for mantida. Neville (1997) explica que a maior presença de microfissuras na zona de transição se deve ao volume de vazios e ao grande número de compósitos cristalinos. Contudo, como visto anteriormente, no CAD a zona de transição possui menos compósitos cristalinos e apresenta menor porosidade, o que pode ser um fator positivo no combate as microfissuras e sua propagação.

Segundo Salvador (2007), fissurações e outras manifestações patológicas ocorrem frequentemente nas estruturas devido a retirada de escoramento ou reescoramento precoce, quando o concreto é solicitado por um certo nível de carregamento sem ter atingido resistência suficiente para tal. Vieira (2008) ainda destaca que, frequentemente, estruturas atingem o colapso por deficiências na etapa de construção devido a ações não previstas ou insuficiência na resistência do concreto. O autor afirma também que o baixo módulo de deformação pode influenciar diretamente na deformação instantânea e, conseqüentemente, na microfissuração da estrutura que, apesar de serem microscópicas, exercem grande influência no comportamento mecânico e na durabilidade.

Neste contexto, Mehta e Monteiro (1994) e Barbirato (1999), apresentaram a mecânica da fratura, a qual fornece um critério de energia, pelo qual é possível ter previsões mais precisas quanto a estabilização das fissuras. Os autores ainda afirmam ser um engano dizer que as fissuras se propagaram infinitamente não importando a dimensão da tensão aplicada.

Além da importância de se entender a estabilização das fissuras, também é necessário o estudo da resistência residual no caso de estruturas sujeitas a carregamentos precoces. Segundo Vieira (2008) a resistência residual nada mais é do que a resistência adquirida depois que a rigidez, após ciclos de carga e descarga, supera a rigidez original do material. Carpinteri et al. (1997) afirmam que quando um material é submetido a ciclos de carregamento de até 80% da sua resistência e logo em seguida descarregado, ocorre um sistema de dissipação dessa energia por toda a extensão e direção, essa dissipação provoca um equilíbrio e recuperação da resistência, podendo, ainda, ultrapassar a resistência a compressão inicial. Os autores ressaltam que esse fenômeno só pode ser observado quando o material está na condição de comportamento elástico e submetido á um ciclo de carga e descarga.

Já para Burlion et al. (2005), a resistência residual depende da direção do carregamento e da permeabilidade do concreto, pois o carregamento é responsável por uma reorganização da estrutura interna levando a um fechamento dos poros existentes, fazendo com que a estrutura se torne mais compacta. Os autores ainda afirmam que a resistência residual pode aumentar até 20%, desde que o carregamento seja feito na mesma direção do lançamento, porém ressaltam que esse fenômeno não impede a propagação de fissuras devido ao carregamento. Vieira (2008) complementa também que a resistência residual garante apenas um aumento na resistência, não implicando na preservação ou manutenção de outras propriedades, como a durabilidade.

Venquiaruto (2017) afirma que as microfissuras determinam a durabilidade dos concretos, já que elas permitem o ingresso e a circulação de fluidos na estrutura. A autora ainda resalta que uma das mais graves e comuns manifestações patológicas em estruturas de concreto é a corrosão de armaduras, que é causada pela penetração de íons agressivos do ambiente externo, na qual, ainda que microscópicas, as fissuras influenciam diretamente. Na mesma vertente de pensamento, Mehta e Monteiro (2008) destacam que estruturas de concreto se rompem com frequência por efeito da corrosão de armadura, que tem sua taxa fortemente influenciada pela permeabilidade da zona de transição, devido à sua alta porosidade em conjunto com as microfissuras existentes, por onde entram agentes agressivos.

Vieira (2008) finaliza afirmando que mesmo que a resposta global do material se mantenha no regime elástico, esses microdefeitos são danos iniciais da estrutura, os quais podem evoluir. O autor ainda reitera que num estágio avançado de solitação essa danificação levará a formação e propagação de microfissuras, as quais acarretaram em deformações permanentes da estrutura.

2.2.8 Autocicatrização (*Self-healing*)

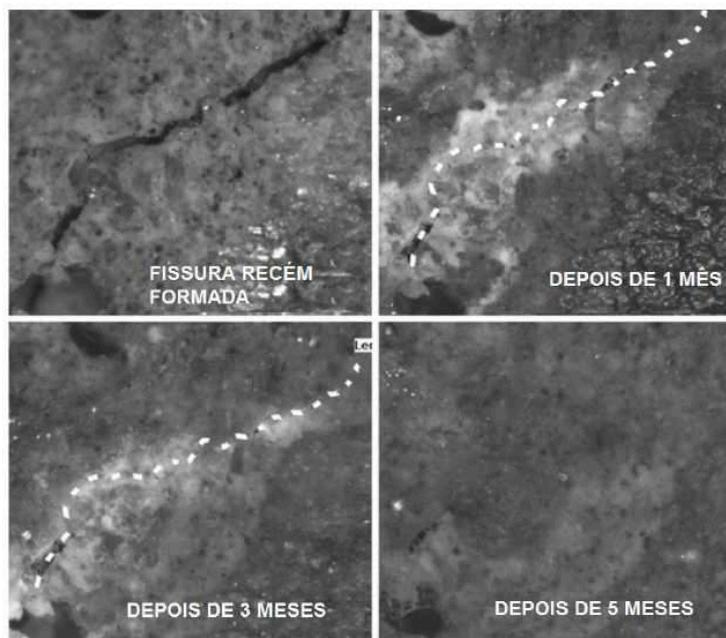
Os autores Tang *et al.* (2015) afirmam que o concreto quando submetido a danos ou a degradação possui um grande potencial de auto – recuperação, característica que auxilia na durabilidade da estrutura. O Comitê Técnico do RILEM (Rooij et al., 2013) define a autocicatrização (*self-healing*) como qualquer processo do próprio material que melhore ou recupere seu desempenho depois de ter sofrido um dano. Esse processo pode ser classificado como autonômico ou autógeno.

O Comitê Técnico do RILEM (Rooij et al., 2013) classifica a autocicatrização autonômica como processo de recuperação por meio de materiais incorporados, ou seja, por meio de materiais que não estão presentes no sistema. Um exemplo de processo autonômico é o uso de bactérias. Wang et al. (2014) investigaram um processo de autocura bacteriano, onde utilizaram esporos bacterianos encapsulados em bio-hidrogel e após uma microtomografia computadorizada de raios-X de alta resolução observaram uma recuperação de 70 a 100% para microfissuras menores que 0,3 mm.

Já o processo autógeno é definido pelo Comitê Técnico do RILEM (Rooij et al., 2013) como uma recuperação que utiliza materiais que já estão presentes no sistema, ou seja, que não foram concebidos especificamente para a autocicatrização e incorporados ao sistema. Hosoda et al. (2012) analisaram o processo de autocicatrização em postes de concreto na cidade de Shiga (Japão) e por meio da microscopia verificaram que as fissuras foram preenchidas naturalmente com CaCO_3 (carbonato de cálcio) e etringita. Os autores ainda verificaram que fissuras de aproximadamente 200 μm de largura não foram totalmente recuperadas.

Gagné e Argouges (2012) afirmam que microfissuras com até 50 μm , a taxa de autocura é mais lenta (5-10 $\mu\text{m}/\text{mês}$), enquanto fissuras com aproximadamente 200 μm possuem uma taxa de recuperação mais rápida (15-30 $\mu\text{m}/\text{mês}$). Os autores justificam esse resultado ao espaço disponível para formação de produtos de auto cura e a maior facilidade na entrada de CO_2 e água. Eles ainda ressaltam que microfissuras com mais de 300 μm possui uma taxa de autocicatrização inferior a 20% após 5 meses. Li e Yang (2007) complementam que as microfissuras devem ser inferiores a 150 μm para a auto cura adequada, mas que o melhor desempenho do processo de autocicatrização é com fissuras inferiores a 50 μm . A Figura 5 mostra o processo de cicatrização observado por Gagné e Argouges (2012), através de imagens microscópicas.

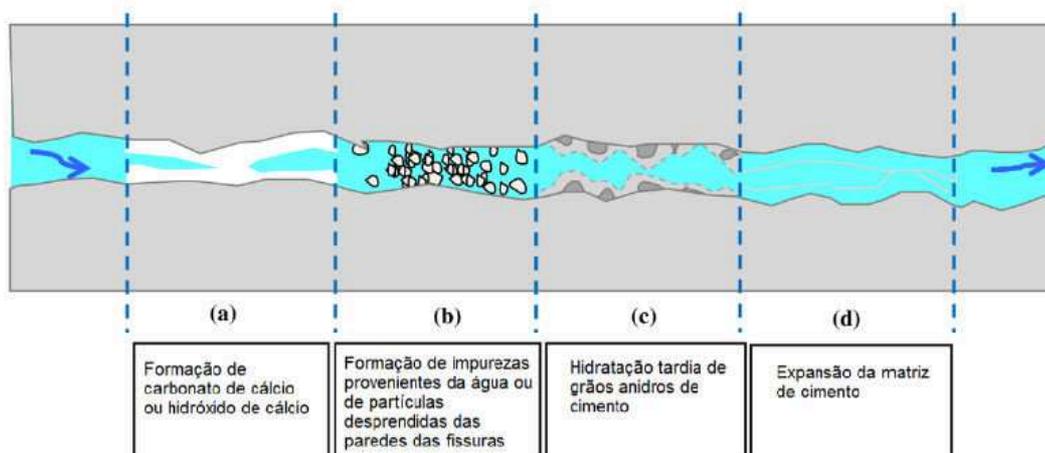
Figura 05 – Aspecto visual de uma microfissura de 64 μm depois de 1, 3 e 5 meses em ambiente com 100% de U.R. (argamassa com relação a/c=0,35).



Fonte: Gagné e Argouges (2012)

Venquiaruto (2017) afirma que o concreto tem potencial para a cura autógena mas esse poder é limitado e imprevisível. Neville (1981) já havia mencionado tal fenômeno e ainda completou afirmando que fissuras finas podem cicatrizar completamente sob condições úmidas devido à uma hidratação retardada do cimento não hidratado ou devido à carbonatação. Na Figura 6 são apresentados os principais mecanismos de autocicatrização autógena.

Figura 06 – Mecanismos de autocicatrização natural no concreto



Fonte: Ter Heide (2007)

Segundo Wu et al. (2012) e Lv e Cheh (2013), geralmente a autocicatrização em concretos jovens está relacionada a hidratação tardia de grãos anidros de cimento (item (c) da Figura 5), enquanto que nos concretos maduros, normalmente, é devido à formação de CaCO_3 ou CH (item (a) da Figura 5). Os autores ainda afirmam que em muitos casos os mecanismos podem ocorrer simultaneamente.

Li et al. (2007) ressaltam que quando alguns grãos de cimento não reagem completamente, formam-se encapsulados naturais de minerais reativos, núcleo anidro envolto por C-S-H hidratado e CH. Quando o concreto é fissurado, esses encapsulados em contato com água iniciam um processo de re-hidratação. Os autores ainda afirmam que essa hidratação tardia pode preencher as fissuras parcialmente e até totalmente. Portanto, para a autocicatrização pelo processo de hidratação tardia dos grãos anidros é fundamental que existam grãos de cimento não hidratados e a presença de água.

Abdel-Jawad e Haddad (1992) analisaram a influência do processo de cura na autocicatrização e concluíram que as amostras imersas em água obtiveram as taxas mais altas de cicatrização. Roig-Flores et al. (2016) mostraram também que o concreto possui uma capacidade de autocicatrização quase perfeita quando curado sob água a 30°C .

A hidratação contínua de grãos anidros é comum em todas as misturas contendo Cimento Portland, mas a adição de aluminossilicatos (cinza volante, sílica ativa, cinza de alto forno) no sistema podem favorecer o processo de autocicatrização devido à reação pozolânica (LI et al., 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram selecionados de acordo com a disponibilidade de materiais na região e, também, no laboratório do curso de Engenharia civil da Universidade Federal do Pampa.

O cimento utilizado, o CP V - ARI RS, por se tratar de um cimento de alta resistência inicial, o qual atende as especificações da NBR 5733 (1991). A Tabela 02 mostra os dados emitidos pela Votorantim.

Tabela 02 - Boletim de Ensaio do CPV ARI RS – Obras Especiais

			Média	Desvio Padrão
QUÍMICOS	Teores (%)	PF	4,9	0,5
		MgO	6,2	0,5
		SO ₃	2,9	0,1
		RI	11,2	0,9
FÍSICOS E MECÂNICOS	Finura (%)	#200	0	0
		#400	1,2	0,2
	Blaine	(cm ² /g)	5190	154
		Água de Consist. (%)	28,66	0,3
	Resistência a Tempo de Pega	Início Pega (min)	216	18
		Fim Pega (min)	248	18
	Resistência a Compressão (MPa)	1 dia	22,2	1,1
		3 dias	32,8	1,1
		7 dias	37,1	0,5

Fonte: - Votorantim (2018)

O mesmo boletim ainda especifica a massa específica do cimento como 3 g/cm³. A sílica ativa utilizada possui massa específica de 2,20 g/cm³, encontrado em ensaios por Trindade (2015).

Como agregado miúdo foi utilizado a areia média fina e como agregado graúdo a brita tipo 1. Os agregados, tanto os graúdos quanto os miúdos, foram submetidos ao ensaio de granulometria de acordo com NBR NM 248 (2003) e, em

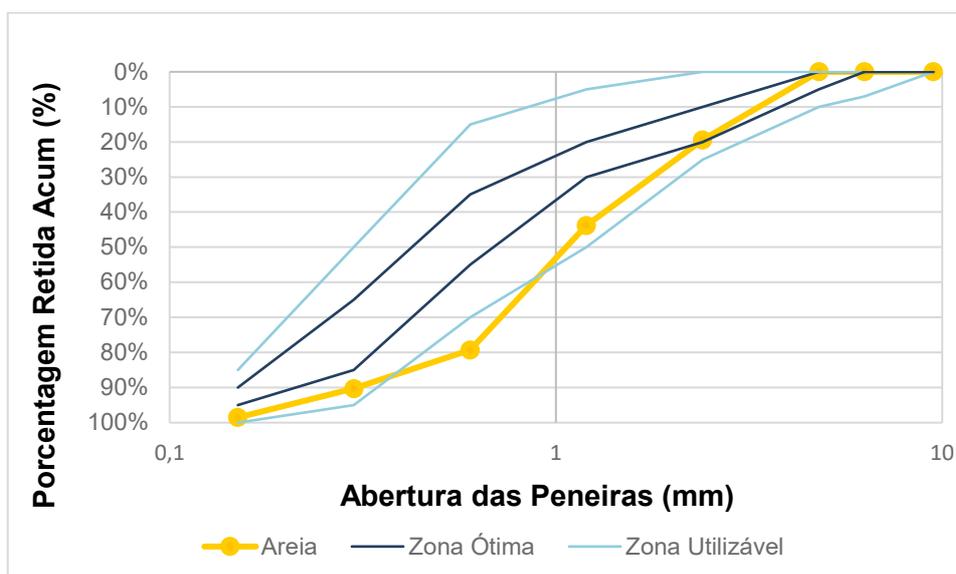
seguida, caracterizados conforme a NBR 7211 (2009). Os agregados graúdos também foram ensaiados seguindo a NBR NM 53 (2009) para sua caracterização quanto a massa específica, massa específica aparente e absorção de água. A massa específica e massa específica aparente dos agregados miúdos foram determinadas de acordo com a NBR 16916 (2021). Os resultados são apresentados na Tabela 03. A curva granulométrica do agregado miúdo e graúdo encontram-se nos Gráficos 01 e 02, respectivamente.

Tabela 03 - Característica físicas dos agregados utilizados

Agregados	Características	Resultados	Normalização
Areia	Massa específica (g/cm ³)	2,65	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)
	Massa específica aparente (g/cm ³)	1,4	
	Diâmetro máximo (mm)	4,8	NBR NM 248 (ABNT, 2003b)
	Módulo de finura (%)	3,424	
Brita 1	Massa específica (g/cm ³)	2,86	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)
	Massa específica aparente (g/cm ³)	1,5	
	Absorção	5,4	
	Diâmetro máximo (mm)	19	NBR NM 248 (ABNT, 2003b)
	Módulo de finura (%)	1,61	

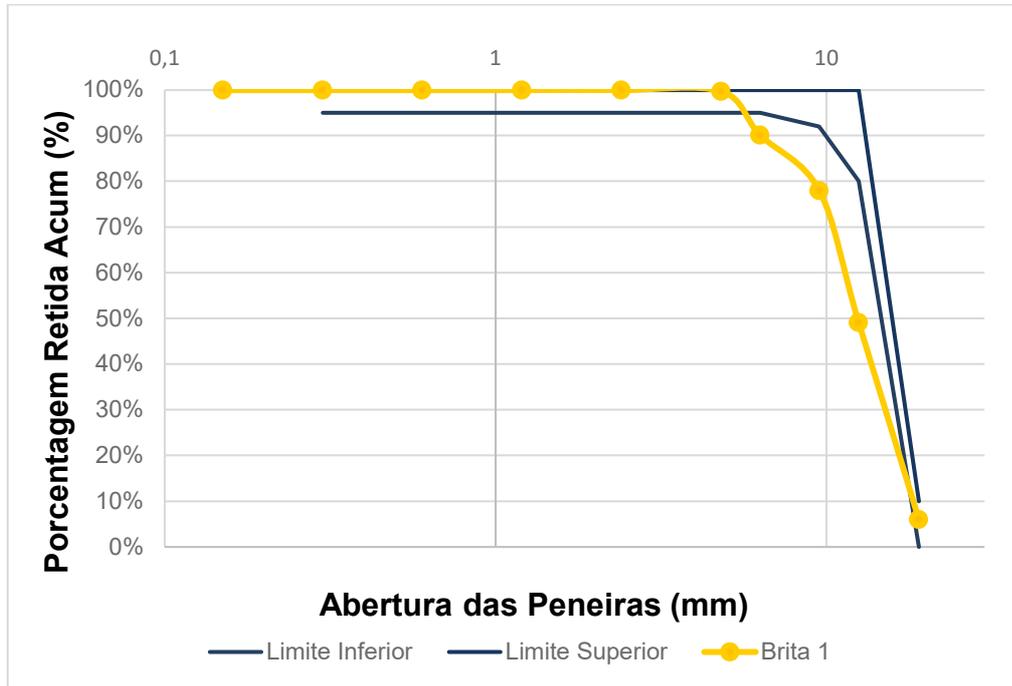
Fonte: Autoria Própria (2020)

Gráfico 01 - Curva granulométrica agregado miúdo



Fonte: Autoria Própria (2020)

Gráfico 02 - Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: Autoria Própria (2020)

3.2 Especificação do traço, mistura e moldagem das amostras

A Tabela 04 apresenta o traço utilizado no projeto, o qual foi adaptado do trabalho de Costa (2018), sendo ele para concretos de alta resistência à compressão (f_{cm} aproximado de 65 MPa aos 28 dias).

Tabela 04 – Traço Concreto

TRAÇO UNITÁRIO					
Cimento	Sílica	Areia	Brita	Aditivo	a/c
0,9	0,1	2,41	2,27	0,0010	0,40

Fonte: Autoria Própria (2020)

O processo de mistura iniciou com toda a brita e $\frac{1}{3}$ da água ligando então a betoneira e, aproximadamente, 1 minuto depois acrescido com todo o cimento e de mais $\frac{1}{3}$ da água, em seguida foi adicionada a areia, o aditivo ASTM-C 494 e o restante da água respectivamente e sem desligar o equipamento, levando todo o processo cerca de 5 minutos.

O concreto foi produzido seguindo o traço definido e, após o período de mistura, foi feito o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/1998) resultando em um *slump* de 5,4 cm. Os 35 corpos de prova foram moldados conforme a NBR 5738 (2016), em fôrmas cilíndricas de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm; adensados mecanicamente na mesa vibratória. Após moldagem os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 24 horas. Após esse período desmoldados e colocados em câmara úmida por mais 7 dias.

Os processos de cura escolhidos foram a submersa e a térmica submersa. A cura térmica foi escolhida pois segundo Neville (2016), as reações químicas são aceleradas com a elevação da temperatura o que pode contribuir e até intensificar o processo de autocicatrização. Já a submersa levou em conta o estudo de Abdel-Jawad e Haddad (1992) que concluíram que as maiores taxas de autocicatrização foram em concretos submetidos a cura submersa. Além disso Li *et al.* (2007) afirmam que é necessário a presença de água para que exista a hidratação dos grãos anidros presentes e não hidratados anteriormente.

A cura submersa foi realizada em uma caixa d'água com os corpos de prova totalmente submersos e uma temperatura controlada dentro da câmara úmida. Já a cura térmica submersa foi realizada em um tanque para banho com homogeneização térmica a uma temperatura média de 50°C. A temperatura foi definida através dos resultados obtidos por Salum (2016), o qual observou resistências superiores aos 28 dias para concretos curados entre 45 e 55°C do que para aqueles submetidos ao intervalo de 58 a 73°C. Ainda segundo ESCANDEILLAS *et al.* (1999, apud BEZERRA, 2005, p.43) os concretos de alta resistência podem perder até 10% de resistência quando curado a temperaturas próximas a 60°C e até 30% para temperaturas próximas a 80°C. Os corpos de prova foram mantidos no processo de cura durante 21 dias, após o período de cura inicial de 7 dias na câmara úmida. A explicação dos testes e procedimentos após os períodos de cura estão descritos no item 3.1.

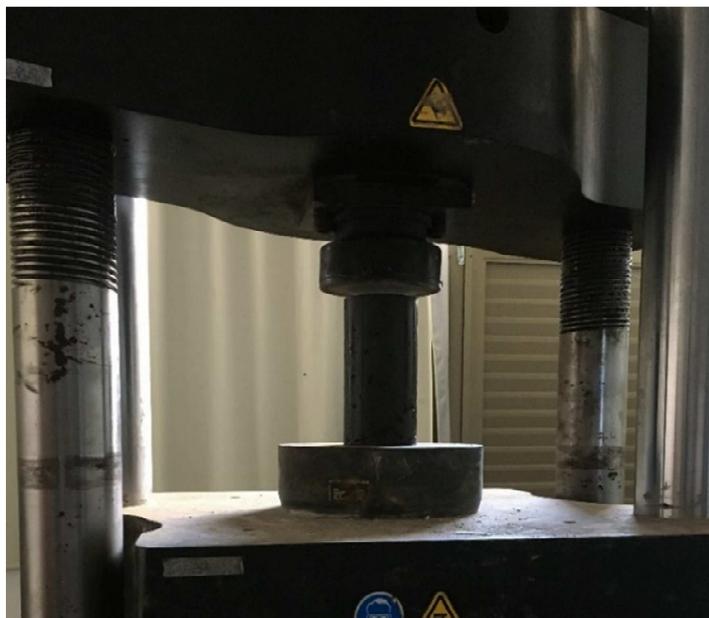
3.3 Testes Experimentais

Depois do período de 7 dias os corpos de prova foram separados entre os de referência (16 amostras no total) e os que foram pré-carregados em 75% (total de 16 amostras também). Além disso, 3 corpos de prova foram rompidos conforme a NBR

5739 (2007) para o cálculo do f_{cm} (resistência à compressão média), que foi utilizado para o estabelecimento da carga de pré carregamento. O percentual de pré-carregamento, mostrado na figura 07, foi definido na idade de 7 dias de acordo com a resistência à compressão obtida pelas amostras estudadas.

As 16 amostras de referência que não receberam a pré-carga foram encaminhadas para as curas antes definidas, isto é, 8 delas submetidas à cura térmica submersa e as outras 8 à cura submersa. Após a aplicação do pré-carregamento, os outros 16 corpos de prova foram separados para a mesma cura, ou seja, 8 deles para a cura térmica submersa e 8 para a cura submersa. Na figura 08 vemos o banho térmico de 50°C ao qual as amostras foram submetidas.

Figura 07 – Corpo de Prova recebendo pré-carregamento.



Fonte: Aatoria Própria (2018)

Figura 08 – Temperatura da cura térmica



Fonte: Autoria Própria (2018)

Todas as amostras permaneceram na cura por 21 dias e depois disso 12 delas passaram pelo ensaio de absorção de água por capilaridade e 20 pelo ensaio de ruptura, ambos de acordo com a NBR 5739 (2018) e NBR 9779 (2012), respectivamente. A figura 9 mostra os corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção.

O ensaio de absorção de água por capilaridade consistiu em determinar a massa do corpo de prova seco em estufa, resfriá-lo e colocados em contato com a água, cerca de 5 ± 1 mm de água. Após serem colocados em contato com a água, as massas das amostras foram obtidas após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Ainda, após as 72 horas, os corpos de prova foram rompidos conforme a NBR 7222 (2011) e medido a altura da ascensão capilar máxima.

Figura 09 – Corpos de Prova submetidos ao ensaio de absorção



Fonte: Autoria Própria (2018)

Na figura 10 toda a metodologia utilizada é apresentada em forma de fluxograma.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria Própria (2021)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios realizados foi feita a análise dos resultados obtidos e as considerações sobre cada um deles. A Tabela 05 apresenta o resultado de verificação da resistência à compressão aos 7 dias e, a partir dessa, a definição da carga aplicada nos corpos que receberam o pré-carregamento. O percentual de 75% de carregamento foi estabelecido com base nos resultados obtidos nos estudos de Vieira (2008), o qual mostrou que para o CPV ARI RS e relações a/c baixas, a resistência de compressão e o módulo de elasticidade aumentaram proporcionalmente ao aumento do percentual da carga aplicada. Ainda segundo Botta (1998) a partir de 80% do carregamento máximo ocorre instabilidade e rupturas locais, levando o material à ruptura total.

Tabela 05 – Carga de ruptura e Carga de Pré-carregamento

	Carga (kN)	$Carga_{MÉDIA}$ (kN)	$Carga_{75\%}$ (kN)
CP 1	466,77	461,32	350,00
CP 2	384,56		
CP 3	532,63		

Fonte: autoria própria (2021)

A tabela 06 mostra os resultados do ensaio de ruptura após 28 dias de cura dos 20 corpos de prova, sendo 10 de referência e 10 75% pré-carregados.

Tabela 06 – Resultados do Ensaio de Tensão de Ruptura

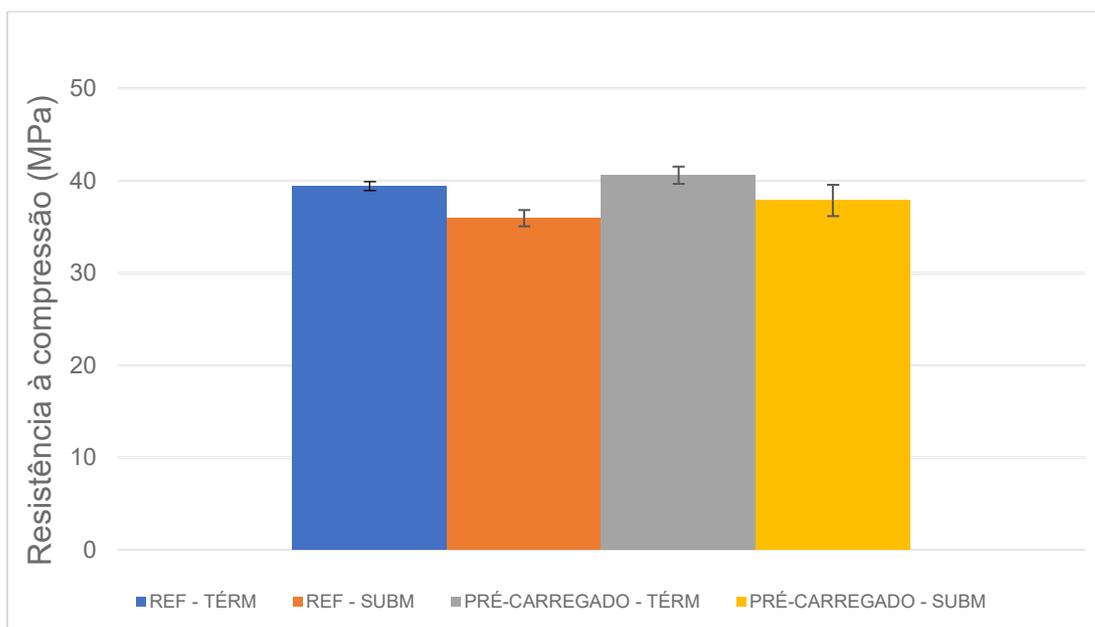
Corpo de Prova	Cura	σ (MPa)	Desvio Padrão	$\sigma_{média}$ (MPa)
PRÉ-CARREGADO	TÉRMICA	40,55	0,95	40,6
		42,23		
		39,8		
		40,11		
		40,32		
	SUBMERSA	39,30	1,7	37,86

		35,10		
		38,29		
		37,52		
		39,10		
REF	TÉRMICA	39,29	0,48	39,41
		39,15		
		39,44		
		40,2		
		38,95		
	SUBMERSA	35,08	0,87	35,94
		36,22		
		34,98		
		36,53		
		36,9		

Fonte: Autoria Própria (2021)

O Gráfico 03 apresenta as médias da resistência à compressão em MPa para os corpos de prova de referência e 75% pré-carregados de acordo com o tipo de cura ao qual foram submetidos.

Gráfico 03 – Resistência à compressão média



Fonte: Autoria Própria (2021)

Analisando os dados da Tabela 06 e do Gráfico 03 é notável que existe uma variação entre os processos de cura para a resistência à compressão, sendo de aproximadamente 10% essa margem. E através dos resultados é possível afirmar que a cura térmica submersa contribui no ganho de resistência, independente da aplicação da carga nas primeiras idades, já que os resultados para os corpos de prova de referência também foram melhores para essa cura.

Já a diferença entre a resistência dos corpos de prova que foram submetidos a 75% de pré-carregamento e os de referência é menor que 5% entre aqueles submetidos ao mesmo processo de cura, sendo os corpos de prova pré-carregados os de maior resistência à compressão em ambos os processos de cura. Vieira (2008) também verificou uma maior resistência à compressão para os corpos de prova que foram submetidos a uma pré-carga, uma das possíveis explicações é um possível rearranjo das partículas e a quebra das partículas maiores e mais frágeis quando submetido à um carregamento nas primeiras idades. A pesquisadora ainda concluiu que para cimentos de alta resistência inicial, como o CPV ARI RS, devido a sua morfologia e composição química a magnitude de ganho de resistência era maior do que em outros cimentos por um processo de colmatação mais eficiente. Além disso, segundo Vieira (2008), uma possível causa desse ganho de resistência foi a formação do gel de silicato de cálcio com a reação pozolânica da sílica ativa presente não hidratada anteriormente através da entrada de água pelas fissuras presentes.

A Tabela 07 abaixo traz as taxas de absorção obtidas no ensaio de absorção por capilaridade.

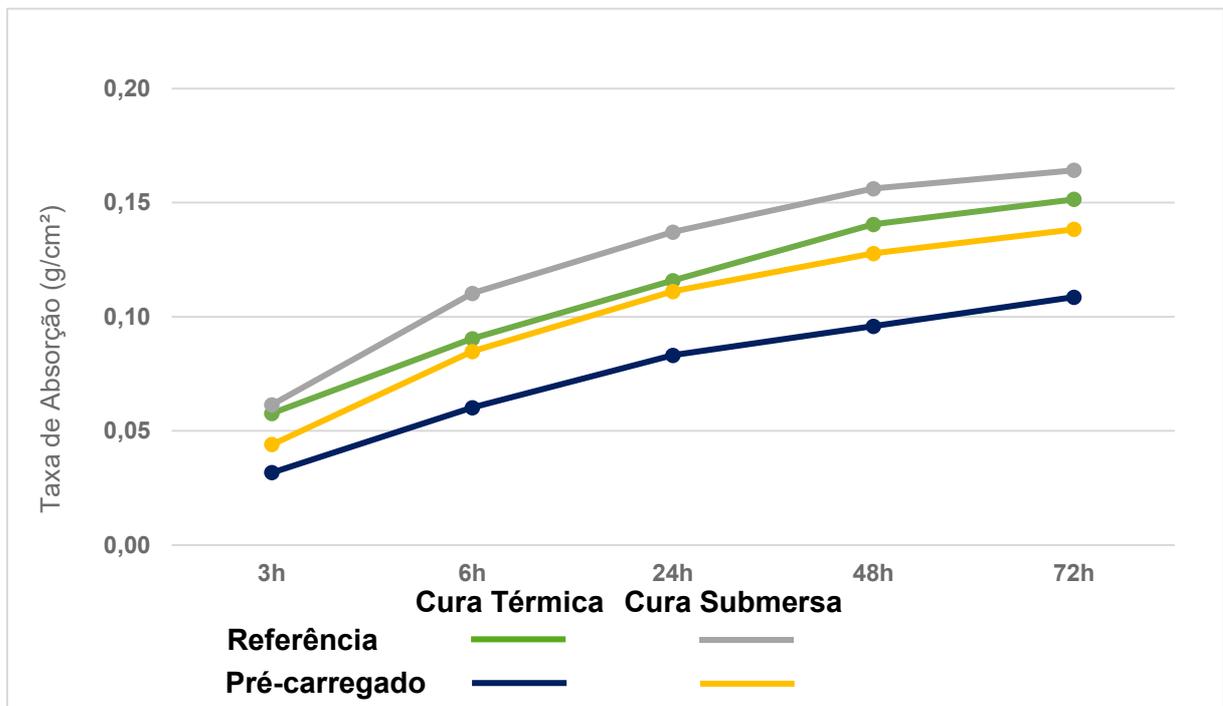
Tabela 07 – Medições do Ensaio de Absorção por Capilaridade

CORPO DE PROVA	CURA	C (g/cm ²) 3h	C (g/cm ²) 6h	C (g/cm ²) 24h	C (g/cm ²) 48h	C (g/cm ²) 72h	h(cm)
REFERÊNCIA	TÉRMICA	0,052	0,092	0,111	0,132	0,136	8
		0,069	0,098	0,132	0,166	0,187	8,7
		0,052	0,081	0,104	0,124	0,131	8,3
	SUBMERSA	0,075	0,117	0,136	0,159	0,171	8,9
		0,051	0,094	0,122	0,139	0,144	8,5
		0,059	0,120	0,153	0,171	0,178	8,7
PRÉ-CARREGADO	TÉRMICA	0,033	0,064	0,090	0,103	0,118	9,2
		0,029	0,056	0,070	0,081	0,092	8,8
		0,033	0,061	0,089	0,103	0,116	9,1
	SUBMERSA	0,043	0,088	0,116	0,130	0,141	9,2
		0,045	0,087	0,113	0,134	0,144	9,4

Fonte: Autoria Própria (2021)

Já o Gráfico 04 apresenta o resultado médio da Taxa de absorção de acordo com o tempo e o tipo de cura executado.

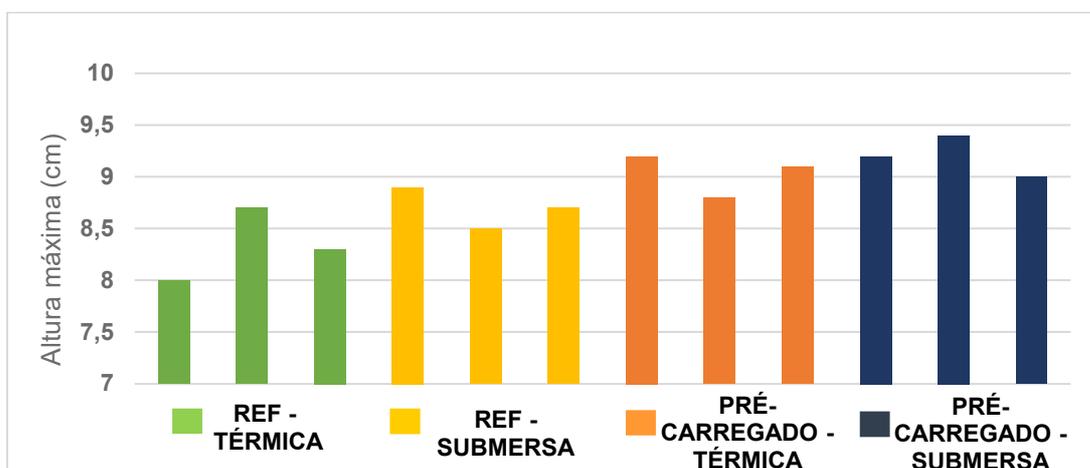
Gráfico 04 – Taxa de Absorção Média x Tempo



Fonte: Autoria Própria (2021)

O Gráfico 05 mostra a altura máxima de ascensão capilar por tipo de cura, medida após 72h do ensaio de absorção por capilaridade.

Gráfico 05 – Máximas alturas de ascensão capilar



Fonte: Autoria Própria (2021)

A Tabela 08 mostra o resultado obtido através dos dados coletados no ensaio de absorção por capilaridade conforme a equação do item 5.1 da NBR 9779.

Tabela 08 – Absorção por Capilaridade Média 72h

CORPO DE PROVA	CURA	C (g/cm^2)	Desvio Padrão	$C_{méd}$ (g/cm^2)
REFERÊNCIA	TÉRMICA	0,111	0,032	0,14
		0,187		
		0,131		
	SUBMERSA	0,171	0,015	0,16
		0,144		
		0,178		
PRÉ-CARREGADO	TÉRMICA	0,118	0,012	0,11
		0,092		
		0,116		
	SUBMERSA	0,141	0,006	0,14
		0,144		
		0,130		

Fonte: Autoria Própria (2021)

O que se pode verificar a partir dos dados da Tabela 08 é que os corpos de prova submetidos a 75% de pré-carregamento possuem menor taxa de absorção que os de referência. Bernardino (2016) concluiu que essa redução é consequência da compactação devido ao pré-carregamento associada à cura prolongada, diminuindo a porosidade devido à autocicatrização das microfissuras e à redução dos vazios.

Ainda é preciso complementar que assim como afirmado anteriormente por Vieira (2008) a autocicatrização é ainda maior em concretos produzidos com cimentos de alta resistência inicial devido ao tamanho das partículas e as adições minerais presentes neles. Ainda é possível que a adição da sílica ativa ao traço dessa pesquisa possa ter contribuído ainda mais para a redução da taxa de absorção. Neville (1997) explica que por possuir partículas ainda menores que o cimento, a sílica é responsável por reduzir a porosidade dos concretos devido ao efeito fíler e as reações pozolânicas. A relação da adição da sílica ativa com a taxa de absorção foi estudada por Arruda *et al.* (2018) que concluiu que quanto maior o percentual de adição de sílica ativa menor era a taxa de absorção, e também atribuiu esse resultado às reações pozolânicas.

Quanto a altura de ascensão capilar, os resultados para os corpos de prova pré-carregados foram superiores aos de referência, tal fato pode ser em decorrência

das microfissurações causadas pelo pré-carregamento e que facilitam a ascensão da água. Por outro lado, como a taxa de absorção é semelhante possivelmente a autocicatrização de parte dessas fissuras tornou os poros capilares mais tortuosos.

Em relação ao processo de cura, a cura térmica tem melhor eficiência resultando em taxas de absorção menores tanto nos corpos de prova de referência quanto nos pré-carregados, por acelerar as reações químicas o processo de autocicatrização é mais efetivo e conseqüentemente a redução da porosidade.

Analisando os dados obtidos nos ensaios de resistência e de absorção por capilaridade o que se pode concluir é que, em um laboratório e para os materiais estudados, o concreto de alta resistência quando submetido a uma pré-carga consegue manter e até melhorar características como durabilidade e resistência à compressão, contudo desde que seja realizado um processo de cura correto e constante. Como a taxa de absorção e altura de ascensão capilar foi considerada nesse trabalho um indicativo de durabilidade, podemos ainda concluir que essa característica do concreto foi prejudicada devido ao carregamento precoce conciliado já que apesar de a taxa de absorção ser menor a altura de ascensão foi maior.

Já em relação aos processos de cura, o que se pode concluir através dos resultados é que a cura térmica é mais eficaz do que a cura submersa, tanto para as amostras pré-carregadas quanto as de referência. Roig-Flores *et al.* (2016) já havia observado que o concreto possui uma capacidade de autocicatrização quase perfeita quando curado sob água a 30° C então vale salientar que como a cura térmica estudada neste trabalho foi do tipo submersa, a associação do aumento da temperatura com a presença constante de água possivelmente contribuiu para os resultados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a influência de um carregamento precoce no concreto de alta resistência através de características como resistência à compressão e taxa de absorção por capilaridade, sendo essa última utilizada como indicativo de durabilidade. Foram ensaiados corpos de prova que receberam uma carga, cerca de 75% da sua carga de ruptura, aos 7 dias e corpos de prova que não foram submetidos a nenhum tipo de carregamento, tendo também como variante o processo de cura entre eles.

Os resultados obtidos mostraram que quando submetemos concretos de alta resistência com adição de sílica ativa a um pré-carregamento de 75% e executamos uma cura constante algumas características são mantidas ou até melhores do que aqueles que foram usados como referência. Contudo não se conhece o efeito deste carregamento precoce em outras propriedades então são necessários mais estudos sobre o tema.

Por fim, a variação em relação ao processo de cura mostrou que a cura térmica submersa é mais eficaz quando comparada a cura submersa, tanto no concreto que recebeu a pré-carga quanto no de referência.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar esse trabalho, abaixo seguem assuntos sugeridos como temas futuros:

- Realizar os ensaios descritos combinando outros processos de cura;
- Realizar os procedimentos descritos alterando o traço do estudo;
- Realizar os procedimentos descritos e analisar outras características, através de outros ensaios;
- Realizar os procedimentos descritos e comparar um processo de cura feita em laboratório com a cura ao ar livre.

REFERÊNCIAS

ABDEL-JAWAD, Y. e HADDAD, R. Effect of early over loading of concrete on strength at later ages. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.22, p. 927-936, 1992.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000. Binders for durable and sustainable concrete. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology,16)

ALMEIDA, Ivan Ramalho de (1990), **Betões de alta resistência e durabilidade: composição e características**. Lisboa 740p. Tese (doutorado) Universidade Técnica de Lisboa.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995. 2 p.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1998. 8 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BARBIRATO, J. C. C. **Método dos elementos finitos de contorno com a reciprocidade dual para a análise transiente tridimensional da mecânica do fraturamento**. São Carlos, 1999. 270 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

BERNARDINO, L. M. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. 2016. 298 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

BEZERRA, S. A. **Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em período quente ($t > 25$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2005.

BURLION, N.; BOURGEOIS, F.; SHAO, J. F. Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete. **Cement & concrete Composites**. n.27. 2005.

CARPINTERI, A.; CHIAIA, B.; NEMATI, K. M. Complex fracture energy dissipation in concrete under different loading conditions. **Mechanical of Materials**. n.26. 1997.

COSTA, F.; A LORENZI, L HASSELBACH, LCP SILVA FILHO. Boas práticas para dosagem e testes laboratoriais em concreto permeável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. 2018.

GAGNÉ, R.; ARGOUGES, M. A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. **Materials and Structures**. p. 1625–1638, 2012.

GUIMARÃES, J. P. Z. **Estudo Experimental das propriedades do concreto de alto desempenho**. Rio de Janeiro, 2002. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

HOSODA, A. et al. Self-healing of longitudinal cracks in utility concrete pole. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Materials, Structures and Environment, v.10, p. 278-284, 2012.

LI, V. C. e YANG, E. H. Introduction. In: **Self Healing Materials**. An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science S., Ed: van der Zwaag, p. 161–193, 2007.

LIMA, Flávio Barboza de (1997), **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. São Carlos 226p. Tese (doutorado) Universidade de São Paulo.

LV, Z. e CHEN, D. Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials. **Materials and Structures**. v.46, n.11, p. 1881-1892, 2013.

MEHTA, Povindar Kumar; Monteiro, Paulo J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

NEVILLE, A.M. **Properties of concrete**. 3rd ed. Longman; 1981.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, 2ª ed., Pini, 1997. 738 p.

PAULON, V. e KIRCHHEIM, A.P. **Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido**. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON, 2011.

PRICE, B. **Advanced Concrete Technology**. Cap 3. Processes. Edited by NEWMAN, J and CHOO B. S. Amsterdam: Boston: Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.

ROIG-FLORES, M. et al. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447–457, 2016.

ROOJI, M. R. et al. Self-Healing Phenomena. In: **RILEM Technical Committee 221-SHC**, [S.1] Springer, 266 p., 2013.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SALVADOR, P. F. **Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos**. 2007. 140p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

SILVA, R. N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho** 2010. 70 p. Dissertação (graduação) – Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2010.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 233–247, 2015.

TECNOSIL, Sílica Ativa: por que usá-la na sua construção? Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/conteudo/?p=75>>. Acesso em 31 de maio de 2018.

TECNOMOR, Concreto de alta resistência (CAR): o que é? Disponível em: <<https://tecnomor.com.br/blog/concreto-de-alta-resistencia-car-o-que-e/>> . Acesso em 10/04/2021

TER HEIDE, N. e SCHLANGEN, E. Self-healing of early age in concrete. THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELF-HEALING MATERIALS. 1., 2007, Noordwijka an Zee. **Proceedings...** 2007, The Netherlands, 2007.

TRINDADE, Guilherme. **Influência da incorporação de cinza da casca do arroz e sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-sílica** 2015. 178 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

TUTIKIAN, Bernardo; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. **Concreto de alto e Ultra-alto desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (self-healing)** 2017. 267 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

VIEIRA, G. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. 189 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

WANG, J. et al. Cement & Concrete Composites X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 289–304, 2014.

WU, M. et al. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Cement and Concrete Research**, v.28, p. 571– 583, 2012.