

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS

**Influência de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio
supercalcinado nas propriedades do concreto autoadensável**

Daiane Cassol

Caxias do Sul, 25 de março de 2022.

DAIANE CASSOL

Influência de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades do concreto autoadensável

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Janete Eunice Zorzi

CAXIAS DO SUL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

C345i Cassol, Daiane

Influência de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades do concreto autoadensável [recurso eletrônico] / Daiane Cassol. – 2022.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2022.

Orientação: Janete Eunice Zorzi.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Concreto - Aditivos. 2. Concreto - Testes. 3. Propriedades mecânicas.
4. Análise espectral. I. Zorzi, Janete Eunice, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 691.32

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

Influência de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades do concreto autoadensável

DAIANE CASSOL

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Caxias do Sul, 25 de março de 2022.

Orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Janete Eunice Zorzi

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Fernanda Trindade Gonzalez Dias

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Inês e ao meu pai Jorge por todo o amor, pela educação, pelo incentivo e por me direcionarem ao caminho do conhecimento.

Ao Pedro, meu esposo, a primeira pessoa que me incentivou a fazer o mestrado e que sempre esteve do meu lado me dando forças. Ele foi o meu alicerce nos momentos mais difíceis e sempre acreditou na minha capacidade.

À minha irmã Daniela, minha referência de dedicação, inteligência e competência.

À professora Dr^a. Janete Eunice Zorzi, que me orientou com muita sabedoria e paciência, compartilhando todo o seu conhecimento, muito obrigada. Com toda certeza foi parte principal para eu chegar até aqui.

Ao professor Dr. Cláudio A. Perottoni, que esteve prestativo, auxiliando em todas as dúvidas e sempre com as perguntas certas.

Ao Giovani L. Rech e ao Eduardo Thomazi por toda ajuda com os ensaios, medidas de espectroscopia de impedância e pelo auxílio nas impressões, além da solícita disposição em todos os momentos.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria pelo empréstimo dos equipamentos para as medidas de retração. Também ao Eng. José Pedro Marquezan e ao técnico Diego Saccol por me auxiliarem nos ensaios.

À empresa Indústria Florense de Artefatos de Cimento que disponibilizou grande parte das matérias-primas, bem como o laboratório para a moldagem dos corpos-de-prova.

À Universidade de Caxias do Sul pela disponibilização dos laboratórios LBTEC, LCMIC, Lab. de Física (V-202).

À CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais PPGMAT-UCS pela bolsa e pela oportunidade.

A todos os colegas que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A demanda do consumo de concreto, principalmente o concreto autoadensável, tem crescido rapidamente devido aos investimentos em novas infraestruturas e atualizações, ou substituições de infraestruturas antigas no mundo. Com isso, o monitoramento da qualidade e do desempenho de estruturas de concreto é essencial para acompanhar esse crescimento. Neste trabalho o efeito da adição de um composto comercial à base de óxido de cálcio supercalcinado é explorado, como aditivo compensador de retração (CR), nas propriedades do concreto fresco e endurecido, em particular na retração e cura de corpos de prova de concreto autoadensável (CAA). Além disso, é proposto um protocolo experimental para a análise de impedância elétrica de amostras de concreto. Testes de fluidez e compressão, retração, módulo de elasticidade, espectroscopia de impedância e mapeamento por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foram realizados para duas composições e uma amostra de referência. Foi observado que o aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado modifica ligeiramente as propriedades do concreto no estado fresco, principalmente a fluidez, mas não afeta significativamente as propriedades no estado endurecido do concreto.

Palavras-chave: aditivo compensador de retração, concreto autoadensável, propriedades mecânicas, espectroscopia de impedância.

ABSTRACT

Concrete consumption demand of self-compacting concrete is continuously growing due to investments in new infrastructures and upgrades or replacements of old infrastructures in the world. Monitoring the quality and increasing the performance of concrete structures is essential to keep up with this growth. In this work, we explore the effect of adding a commercial over calcined calcium oxide-based compound to a shrinkage-compensating admixture (SCA) on the properties of fresh and hardened concrete, in particular on the shrinkage and curing of self-compacting concrete specimens (SCC). Also, an experimental protocol is proposed for the electrical impedance analysis of concrete samples. Fluidity and compression tests, shrinkage, elastic modulus, impedance spectroscopy, and energy dispersive spectroscopy mapping (EDS) were performed for two compositions and one reference sample. The over calcined calcium oxide-based shrinkage-compensating admixture slightly modifies the concrete properties in the fresh state, mainly the fluidity, but it does not significantly affect the properties in the hardened state of the concrete.

Keywords: shrinkage-compensating admixture, self-compacting concrete, mechanical properties, impedance spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação dos componentes do CCA com do CCV.....	19
Figura 2 - (a) Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland, intervalos (a) anidro; (b) 10 minutos; (c) 10 horas; (d) 18 horas; (e) entre 1 e 3 dias e (f) 14 dias.	22
Figura 3 - Dispersão das partículas de cimento carregadas eletricamente.	28
Figura 4 - Interação entre cimento e o aditivo superplastificante.	28
Figura 5 - (a) Floculação da mistura contendo cimento e água (b) dispersão do sistema após a inserção de aditivo superplastificante.	29
Figura 6 - Desenho esquemático de uma estrutura de éter de policarboxilato.....	30
Figura 7 - Parâmetros reológicos do concreto em função do tipo de aplicação.....	32
Figura 8 - Aparato para realização do ensaio de Cone de Abrams.	33
Figura 9 - Aparência do concreto durante Slump Flow.	34
Figura 10 - Desenhos da caixa L.	35
Figura 11 - Influência da relação a/c na resistência à compressão do concreto.....	37
Figura 12 - Resistência média dos tipos de cimento Portland.....	37
Figura 13 - Representação esquemática da relação tensão-deformação do concreto.....	39
Figura 14 - Curvas tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.....	40
Figura 15 - Acompanhamento do módulo de elasticidade dinâmico.	41
Figura 16 - Medição do abatimento do concreto.....	51
Figura 17 - Espalhamento do CAA.....	52
Figura 18 - Habilidade de passagem do CAA por armaduras.....	52
Figura 19 - Corpos de prova para ensaio de compressão.	54
Figura 20 - Molde em planta com medidas em milímetros.....	55
Figura 21 - Moldes e placas metálicas.	55
Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de retração.	56
Figura 23 - Corpos de prova embalados com filme plástico.....	57
Figura 24 - Molde do corpo de prova em PVC.	57
Figura 25 – Placas de aço inoxidável 304, usadas como eletrodos.....	58
Figura 26 - Peças utilizadas na montagem do molde para os CPs.	59
Figura 27 – Montagem do molde para os CPs.	59
Figura 28 - Corpos de prova moldados.	60
Figura 29 - Caixa com água com CPs armazenados.	60
Figura 30 – Montagem para o corte das amostras para análises por MEV e EDS.....	61

Figura 31 - Corpos de prova capeados e o ensaio de compressão.	62
Figura 32 – (a) Estação de medição <i>Front-end</i> 3560-B-120 e o <i>software</i> de controle; (b) montagem no suporte SB-AP.	63
Figura 33 - Comparador mecânico horizontal digital.	64
Figura 34 - Evolução temporal típica de tensão (estímulo para o sistema) e corrente (quantidade medida) em um experimento EIS. V_0 e I_0 são as amplitudes da tensão aplicada e da corrente do circuito, respectivamente, e φ é a diferença de fase entre a tensão e a corrente.	66
Figura 35 - Montagem do experimento para as medidas de impedância elétrica.	67
Figura 36 - Modelo de circuito elétrico equivalente usado para interpretar resultados de medições de EIS em concreto.	67
Figura 37 - Curva granulométrica dos agregados.	70
Figura 38 - Espalhamento para amostra de referência (Ref.), CR 2,8 % e CR 3,8 %. A linha contínua refere-se ao tempo (em segundos) para ocorrer o espalhamento.	72
Figura 39 - (a) Espalhamento amostra de referência; (b) espalhamento amostra CR 2,80 %; (c) espalhamento amostra CR 3,80 %.....	73
Figura 40 - Gráfico com os resultados de resistência à compressão.	74
Figura 41 - Resultados resistência à compressão.	75
Figura 42 - Módulo de elasticidade médio para Ref., CR 2,80 % e CR 3,80 %.....	76
Figura 43 - Resultados do teste de retração para Ref., CR 2,80 % e CR 3,80 %.....	78
Figura 44 - Ensaio de retração autógena.	79
Figura 45 - Gráficos Cole-Cole mostram os resultados do EIS para (a) Ref., (b) CR 2,8 % e (c) CR 3,8 %. Os diferentes conjuntos de curvas para cada condição (em triplicado) correspondem, da esquerda para a direita, aos resultados obtidos 1, 2, 7, 33 e 56 dias após a moldagem. Uma cor diferente identifica cada amostra.....	80
Figura 46 - Evolução no tempo de (a) resistência em massa, R_b e (b) progresso da reação (α) para amostras Ref., CR 2,8 % e CR 3,8 %.	81
Figura 47 - Mapas composicionais e imagens MEV/EDS das amostras de concreto: (a) Ref., (b) SCR 2,8 % e (c) CR 3,8 %.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases constituintes do cimento Portland sem adições.....	20
Tabela 2 - Tipos de cimento e suas composições.....	21
Tabela 3 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	24
Tabela 4 - Classificação quanto à viscosidade, fluidez e estabilidade visual.	35
Tabela 5 - Classificação quanto habilidade passante.	36
Tabela 6 - Comparativo da resistência à compressão (MPa).	38
Tabela 7 - Comparativo da retração.	43
Tabela 8 - Análise química do cimento CP V - ARI.....	48
Tabela 9 - Composição química do composto compensador de retração comercial, normalizado para 100 % em base seca.	49
Tabela 10 - Traço piloto de CAA.....	50
Tabela 11 - Traços das amostras.	50
Tabela 12 - Amostragem para cada composição.....	53
Tabela 13 – Dados dos corpos de prova.....	63
Tabela 14 - Distribuição granulométrica dos agregados.....	69
Tabela 15 - Resultados caracterização dos agregados	70
Tabela 16 - Resultados dos ensaios com concreto fresco.	71
Tabela 17 - Resultados da propriedade de do concreto.....	71
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão para todas as misturas.....	74
Tabela 19 - Resultados das medidas dos módulos de elasticidade.	76
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de retração.	77

LISTA DE SIGLAS, TERMOS E ABREVIACÇÕES

α	Progresso da reação de cura
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
a/c	Relação água cimento
APP	Acelerador de pega para concreto projetado
AP	Acelerador de pega
AR	Acelerador de resistência
CAA	Concreto autoadensável
CCV	Concreto convencional
CH	Controlador de hidratação
CPs	Corpos de prova
CR	Compensador de retração
CP V- ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPE	Elemento de fase constante (do inglês: <i>constant phase element</i>)
C_e	Comprimento efetivo
CVP	Aditivos para concreto vibroprensado
DoS	Grau de saturação de umidade
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva (do inglês: <i>energy dispersive spectroscopy</i>)
EFNARC	<i>European Federation of National Associations Representing for Concrete</i>
EIS	Espectroscopia de impedância elétrica (do inglês: <i>electric impedance spectroscopy</i>)
f	Frequência
I_0	Corrente do circuito
IA	Incorporador de ar
IA-L	Incorporador de ar para concreto leve
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEV	Estabilidade visual
LABTEC	Laboratório de Tecnologia Construtiva
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LAMIR	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MV-RT	Modificador de viscosidade retentor de água
MV-AS	Modificador de viscosidade antisegregante
pH	Potencial hidrogeniônico

PCE	Policarboxilato éster
PL	Habilidade passante
PVC	Policloreto de vinila
R_b	Resistência <i>bulk</i>
RA	Redutor de água
RAC	Redutor de absorção capilar
RC	Redutor de corrosão
RP	Redutor de permeabilidade
RR	Redutor de retração
SF	Fluidez
V_0	Tensão aplicada
VS	Viscosidade
Z^*	Impedância complexa
Z'	Parte real da impedância complexa
Z''	Parte imaginária da impedância complexa
φ	Diferença de fase entre a tensão e a corrente
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	17
2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL	18
2.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO	19
2.4. ADITIVOS	26
2.5. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	31
2.6. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	36
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1. MATERIAIS	47
3.2. DOSAGEM DO TRAÇO	49
3.3. ENSAIOS COM O CONCRETO NO ESTADO FRESCO	50
3.4. MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	53
3.5. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO À COMPRESSÃO	53
3.6. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DO MÓDULO DE YOUNG	54
3.7. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE RETRAÇÃO	55
3.8. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	57
3.9. CORPOS DE PROVA PARA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	60
4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA	61
4.1. MEDIDAS POR ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	61
4.2. MEDIDAS POR ENSAIO MÓDULO DE YOUNG DINÂMICO	62
4.3. MEDIDAS POR ENSAIO DE RETRAÇÃO	64
4.4. MEDIDAS POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	65
4.5. MEV e EDS	68
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	69
5.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	73
5.4. ENSAIO DE MÓDULO DE YOUNG	76
5.5. ENSAIOS DE RETRAÇÃO	77
	12

5.6. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	79
5.7. MEV e EDS	82
6. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	84
ANEXO 1	
ANEXO 2	

1. INTRODUÇÃO

O consumo anual de concreto é estimado em cerca de 30 bilhões de toneladas no mundo e, sua demanda deve crescer, devido aos investimentos em novas infraestruturas e atualizações ou substituições de infraestruturas antigas (MONTEIRO et al., 2017). Na conferência Global do Concreto, realizada em fevereiro de 2021, que reuniu 101 representantes do setor mundial de cimento e concreto, foi defendido que as obras precisarão ser mais sustentáveis e eficazes, através da utilização de peças estruturais que possam ser montadas e desmontadas, já que as projeções da *International Energy Agency* (IEA) indicam que a demanda global por cimento poderá chegar a 5 bilhões de toneladas (ITAMBÉ CIMENTOS, 2021).

Dentro dessa projeção, a utilização de peças pré-fabricadas de concreto vem sendo cada vez maior dentro da indústria da construção civil e representa uma industrialização do setor. A pré-fabricação é considerada o início da industrialização no campo da construção e a esses processos segue-se a mecanização, o controle automático e a produção. A tecnologia da construção pré-fabricada permite que a construção seja mais fácil e rápida, com menor custo, maior controle de qualidade e menor desperdício de material (AY; AYALP, 2021). Por ser um sistema padronizado, outro benefício do uso das peças pré-fabricadas é a customização da obra, com projetos específicos, conforme a necessidade de cada situação, evitando e/ou reduzindo os desperdícios. Há baixa geração de resíduos, sem agressão direta ao meio ambiente, além da economia de tempo na construção, que também é um fator de sustentabilidade.

Diante do grande avanço do sistema construtivo de pré-fabricados, que requerem um material com uma superfície livre de defeitos e alta resistência à compressão, o concreto autoadensável (CAA) tem emergido de um objeto de estudo teórico para se tornar muito popular nesse ramo (ZATAR; NGUYEN, 2020; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2011). O concreto autoadensável (CAA) é um dos mais importantes desenvolvimentos dos últimos tempos no setor de construção civil, principalmente na área de pré-fabricados. Ele surge da necessidade de um material que seja altamente fluido e não segregado, que possa fluir através de armaduras rígidas sem consolidação mecânica, e por ser intensamente utilizado, pois tem excelentes características, tanto no estado fresco como no estado endurecido (PETROVIĆ et al., 2020).

Com o crescimento do uso do CAA, precisa-se adotar e estudar técnicas que sejam capazes de garantir o desempenho das estruturas projetadas com esse concreto, já que

segundo Cusson e Repette (2000), estudos já mostraram que a durabilidade do concreto com baixa relação água/cimento (a/c) e elevado consumo de cimento, não terá, necessariamente, a sua integridade garantida. Procedimentos que minimizem, principalmente, problemas como a falha na cura e a retração do concreto são essenciais para manter a integridade e durabilidade das estruturas pré-fabricadas, pois controlando esses dois pontos a fissuração no material também será controlada. Nesse contexto, a utilização de aditivos contribui para melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido e está difundida mundialmente (AÏTCIN; FLATT, 2016).

Os aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado diminuem possíveis riscos de fissuração relativos aos fenômenos de retração por secagem e a retração autógena da matriz cimentícia, já que quando se hidratam tem uma expansão volumétrica de cerca de 100 % (RUBIO, 2017). Além disso, as fases formadas pela sua hidratação podem preencher os poros da matriz, diminuindo sua porosidade e promovendo ganhos de resistência (QUARCIONI, 2008).

O processo de cura, a retração e a resistência estão ligadas entre si. Na prática, o desempenho inadequado da cura gera nos estágios iniciais de hidratação a retração, incluindo as fissuras ou delaminações, devido ao encolhimento do concreto. Com isso, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o uso de um aditivo compensador de retração (CR) à base de óxido de cálcio supercalcinado, de nome comercial DRY D1, sobre as propriedades do concreto autoadensável (CAA).

No momento, até onde sabe-se, existem escassos estudos relacionados ao uso de um aditivo compensador de retração baseado em óxido de cálcio supercalcinado no CAA. A maioria dos estudos descritos na literatura, que investigam os efeitos do aditivo compensador de retração em CAA, são com aditivos à base de sulfoaluminato. A obtenção de resultados experimentais das propriedades do CAA, produzido com aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado, tanto no estado plástico quanto no estado endurecido, contribui para o entendimento das propriedades e melhoria do desempenho do CAA. Portanto, além do estudo da cura do concreto por espectroscopia de impedância elétrica, este trabalho pretende avaliar as propriedades de estado fresco do CAA (trabalhabilidade e segregação), além das medidas de retração e as propriedades de estado endurecido (compressão e módulo de elasticidade) de amostras de CAA, em que uma mistura foi utilizada como referência (sem aditivo) e em outras duas misturas foram variadas as porcentagens de aditivo compensador. Por fim, são obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e mapeamento

por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para verificar a distribuição de cálcio nas amostras no estado endurecido e a presença de fissuras.

1.1. OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades do concreto no estado fresco (espalhamento e tempo de escoamento e habilidade passante) e no estado endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração), além da cura de corpos de prova de concreto autoadensável (CAA).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as propriedades no estado fresco do concreto de espalhamento e de tempo de escoamento e de habilidade passante com e sem a presença do aditivo compensador de retração;
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e de módulo de elasticidade com e sem a presença do aditivo compensador de retração;
- Avaliar a retração do concreto com e sem o aditivo compensador de retração;
- Acompanhar o processo de cura com e sem o aditivo compensador de retração por espectroscopia de impedância elétrica;
- Desenvolver um protocolo para preparação de amostras para as medidas de impedância elétrica;
- Avaliar a presença de fissuras e a distribuição do óxido de cálcio (CaO) na matriz cimentícia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto é um dos materiais mais antigos usados na construção civil que se tem conhecimento. Os primeiros concretos que surgiram foram feitos pelos romanos com pozolana natural e cal. Essa mistura permitia a moldagem e a união de blocos de pedra para erguer edificações e monumentos (ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS, 2000). Com os avanços da civilização, especificamente por causa das mudanças climáticas globais, a deterioração das infraestruturas de concreto tornou-se progressivamente desafiadora e uma das principais considerações da engenharia civil contemporânea (MOHAMMED et al., 2014; ZEYAD et al., 2020).

O concreto é um material construtivo estrutural amplamente disseminado com aplicações em várias áreas produtivas, como obras de infraestrutura urbana, estradas, pontes, viadutos, obras de saneamento, usinas hidrelétricas e nucleares, e principalmente em edificações, inclusive nos edifícios mais altos do mundo; e é composto principalmente de matérias-primas que incluem: cimento, areia, brita e água (PEDROSO, 2009; JERRY et al., 2016). Segundo a norma NBR 12655 (2015), “concreto é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento”.

Na mistura do concreto, a água em contato com o cimento Portland forma uma pasta que envolve os agregados graúdos e miúdos. Essa mistura pode ser fluida ou não, dependendo da relação de água/cimento. Nas primeiras horas a mistura apresenta a capacidade de se moldar em fôrmas das mais variadas dimensões. Com o passar do tempo, a reação química entre cimento e água se torna irreversível e a mistura começa a endurecer, adquirindo resistência estrutural, formando um material monolítico comparado a uma rocha (HELENE; ANDRADE, 2010). Segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto não é nem tão resistente nem tão tenaz quanto o aço. Por que então ele é tão usado na construção civil? São dois os principais motivos: primeiramente porque o concreto é altamente resistente à água e segundo, pela facilidade de moldagem no seu estado fresco, em diferentes formas e tamanhos.

2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

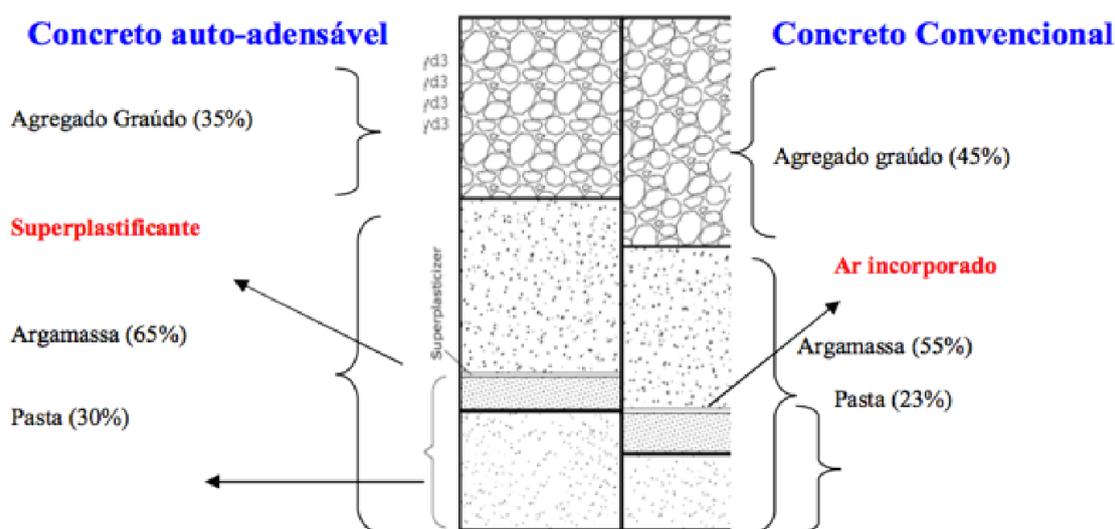
Nos últimos anos, o acréscimo de aditivos aos concretos permitiu diversos avanços, promovidos principalmente pela construção de estruturas de concreto, o que possibilitou a fabricação dos concretos especiais, entre eles, o concreto autoadensável (CAA) (NAKAMURA, 2014). O impulso para o desenvolvimento do concreto autoadensável veio do Japão na década de 80, com o objetivo de minimizar a utilização de mão de obra não especializada. Na Europa foi difundido na década de 90 e teve como finalidade a necessidade de garantir a durabilidade de elementos de concreto, devido a um alto índice de falhas de concretagem, principalmente em pilares, decorrentes da deficiência da mão de obra e má execução da etapa de adensamento (NEVILLE, 2016; REPETTE, 2011).

A norma brasileira ABNT NBR 15823-1 (2017), aplicada ao CAA, o define como “concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento”.

O CAA é um material inovador que possui fluidez melhorada e se distribui sob seu próprio peso sem o uso de compactação mecânica. Seu grau de capacidade de enchimento o torna ideal para estruturas verticais e complicadas, permitindo uma produção mais rápida com menos mão de obra e ruído no local de trabalho (RAMKUMAR et al., 2021; SUPRAKASH; KARTHIYAINI; SHANMUGASUNDARAM, 2021). O concreto autoadensável difere-se do concreto convencional (CCV) devido às exigências funcionais no estado fresco. Enquanto o CAA preenche as formas como uma suspensão fluida, o CCV necessita de adensamento externo para ocupar esses mesmos espaços. Um concreto será considerado autoadensável se apresentar, simultaneamente, três propriedades básicas: habilidade de preenchimento (fluidez), habilidade passante (coesão) e resistência à segregação (EFNARC, 2002; RILEM, 2006).

Com relação à constituição do concreto, o CAA, apresenta uma maior quantidade de argamassa, o que tende a aumentar a fluência e retração. Alguns estudos apontam que a fluência e a retração em concretos autoadensáveis sejam maiores do que em concretos convencionais, podendo ser encontrados valores de retração superiores a 50 % entre os CAA e os CCV (D'AMBRÓSIA; LANGE; BRINKS, 2005; PERSSON, 2005 apud SOUZA, 2016). A diferença entre a dosagem do concreto autoadensável e o concreto convencional é mostrada na Figura 1, onde verifica-se a diferença significativa entre os teores de pasta e argamassa.

Figura 1 - Comparação dos componentes do CCA com do CCV.



Fonte: Laumet et al. (2005 apud Ferraz e Pinto, 2009).

Os mecanismos para se obter um concreto autoadensável, segundo Neville e Brooks (2013), são: maior consumo de cimento; agregado miúdo com alto percentual de finos (diâmetros de partículas menores que $600 \mu\text{m}$); teor de argamassa Seca (α) acima de 60 %; viscosidade apropriada obtida por um agente controlador; agregados de boa forma e textura (preferencialmente cúbicos ou esféricos) e menos agregados graúdos do que o usual (50 % do volume de todos os sólidos). Com esses mecanismos, a microestrutura do CAA fica mais uniforme e a zona de transição menos porosa. Porém, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2015), o CAA com alto consumo de cimento apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação. Além disso, se o teor de aditivo superplastificantes for colocado em excesso, o concreto terá seu tempo de pega inicial retardado. E por fim, se for dosado com um baixo consumo de agregado graúdo, o módulo de elasticidade será mais baixo e haverá uma alta probabilidade de retração plástica. O CAA vem sendo empregado com frequência em peças pré-fabricadas, especialmente nas estruturas com elevada taxa de armadura, onde o concreto convencional encontra resistência em ocupar os vazios (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2012).

2.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

2.3.1. Cimento Portland

A norma NBR 16697 (2018) define o cimento Portland como sendo um aglomerante hidráulico que é obtido pela moagem de clínquer. Durante a produção, é adicionada uma certa quantidade de sulfato de cálcio, sendo permitido ainda adicionar a esta mistura materiais

pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos em teores especificados. As principais matérias-primas utilizadas na produção do cimento Portland são calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Essas matérias-primas são oriundas da mineração e britagem, e após, seguem para a preparação da mistura crua, denominada “farinha”, sendo posteriormente queimada em temperatura de aproximadamente 1450 °C (CARTER; NORTON, 2013).

Segundo Cincotto (2011), os principais elementos do cimento Portland sem adições estão descritos na Tabela 1. As fases formadas durante o processo de clinquerização das matérias-primas não são puras e contêm alguns elementos substitutos em sua estrutura, como a alita e a belita (silicatos tricálcico e bicálcico com óxidos substituintes, respectivamente).

Tabela 1 - Fases constituintes do cimento Portland sem adições.

Fase	Composição em óxidos	Óxido substituintes
Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	MgO, Al_2O_3 , Fe_2O_3
Belita	$2\text{Ca} \cdot \text{SiO}_3$	Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , K_2O , MgO
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , SiO_2
Ferroaluminato tetracálcico	Série ($x = 0-1$) $\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$	MgO, SiO_2 , TiO_2
Periclásio	MgO	-
Cal livre	CaO	-
Arcanita	K_2SO_4	-
Tenardita	Na_2SO_4	-
Langbeinita cálcica	$\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 3\text{SO}_3$	-
Aftitalita	$3\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SO}_3$	-

Fonte: Cincotto (2011).

A norma NBR 16697 (2018) é a unificação de todas as antigas normas relativas aos tipos de cimento, e nela foram relacionados os limites para adições nos cimentos. De acordo com essa norma, os cimentos compostos podem apresentar a composição apresentada na Tabela 2 com porcentagens definidas. O clínquer é o principal componente do cimento Portland, estando presente em todos os tipos de cimentos existentes e as adições variam de um tipo para o outro. As adições melhoram a durabilidade, a resistência e a permeabilidade de concretos e ajudam a diminuir o consumo geral de energia e as emissões de CO_2 pela fabricação de cimento (GARTNER; HIRAO, 2015; SCHNEIDER, 2015).

Tabela 2 - Tipos de cimento e suas composições.

Designação normalizada portland	Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)	
Cimento Portland Comum	CP I	95 - 100	0 - 5			
	CP I - S	90 - 94	0	0	6 - 10	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II - E	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II - Z	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II - F	75 - 89	0	0	11 - 25	
Cimento Portland de alto forno	CP III	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10	
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	90 - 100	0	0	0 - 10	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	75 - 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural		50 - 74	-	-	26 - 50

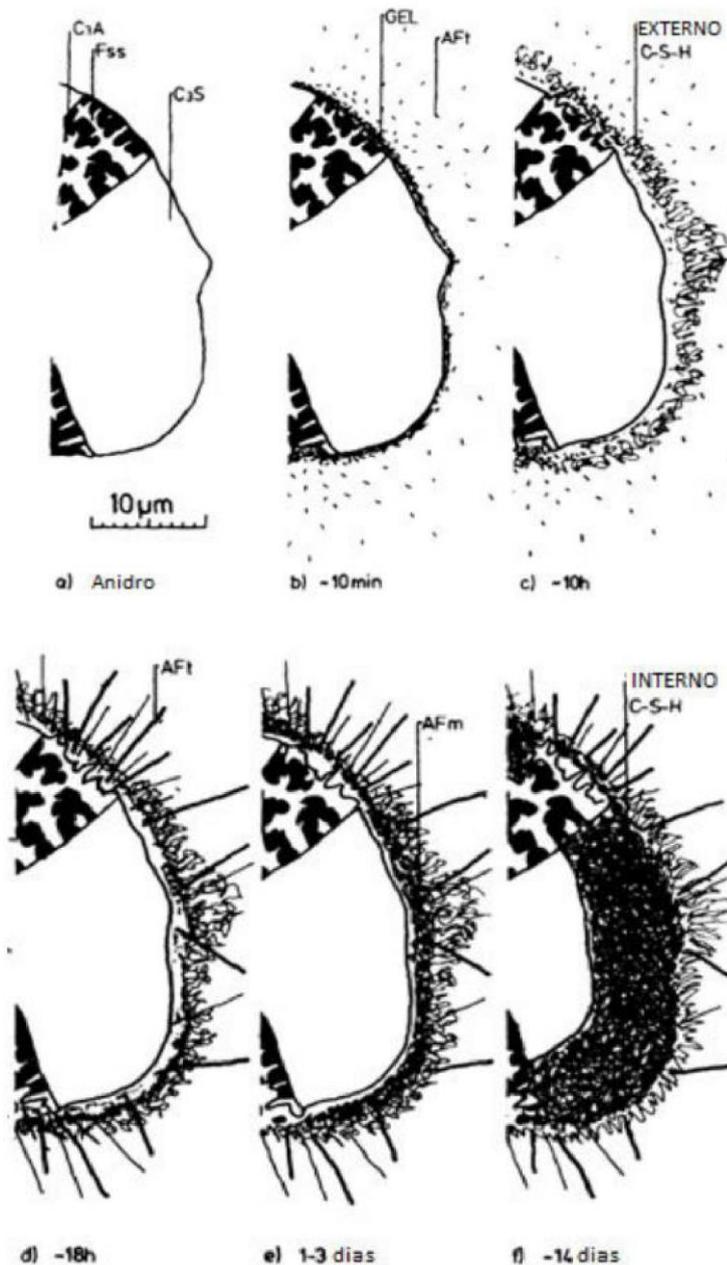
No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

Quando o cimento Portland é misturado com água, o processo de hidratação começa e vários fenômenos ocorrem durante todo o processo. O clínquer, o sulfato de cálcio e a água sofrem uma sequência de reações químicas que incorporam à sua estrutura íons OH⁻, resultando na formação de produtos com características de pega e endurecimento. A hidratação é inicialmente uma reação química rápida do tipo exotérmica, que vai diminuindo com a idade (TAYLOR, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014; RIBEIRO, 2020).

Entre os principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland, destacam-se o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH) e os sulfoaluminatos de cálcio, além de partículas de clínquer não hidratadas. Taylor (1997 apud PILAR, 2017) mostra esquematicamente a sequência das mudanças sofridas por um típico grão de cimento durante o processo de hidratação, na Figura 2, descrita a seguir.

Figura 2 - (a) Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland, intervalos (a) anidro; (b) 10 minutos; (c) 10 horas; (d) 18 horas; (e) entre 1 e 3 dias e (f) 14 dias.



Fonte: Taylor (1997 apud Pilar, 2017).

Battagin e Battagin (2010) mostraram que a velocidade das reações diminui com o tempo, já que a hidratação do grão do cimento Portland ocorre de fora para dentro. Outros fatores que influenciam a hidratação são a disponibilidade de água, condições de cura e condições ambientais.

O cimento Portland de alta resistência inicial, que será utilizado neste trabalho, é um dos primeiros novos tipos foi o cimento Portland, atualmente especificado no Brasil como CP

V. Esse tipo de cimento, além de ter alta reatividade em baixas idades, em função do grau de moagem a que é submetido, deve atingir uma alta resistência mecânica nas primeiras idades, obtida a partir de uma maior proporção de C₃S (silicato de cálcio, alita), proporcionando um endurecimento mais rápido e uma evolução do calor ainda mais rápida (MEHTA; BURROWS, 2001). O cimento ARI V, entre os cimentos comercializados atualmente, é o que apresenta as menores quantidades de adições minerais na sua composição, fabricado a partir de clínquer, gesso e material carbonático (CIMENTO ITAMBÉ, 2020; PILAR; FERRON; REPETTE, 2018).

2.3.2. Agregados

Agregado é um material granular — tal como areia, pedregulho e pedra britada — sem forma e volume definidos, geralmente inertes e com propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia, principalmente na fabricação de concretos e argamassas (PETRUCCI, 1993), mesma definição estabelecida pela norma NBR 9935 (2011).

Os agregados possuem um papel importante no desenvolvimento de argamassas e concretos, tanto na questão econômica, como do ponto de vista técnico. A utilização deste material granular no concreto traz influência benéfica sobre algumas características, como a retração, o aumento da resistência mecânica e a resistência ao desgaste, entre outras. Os agregados ocupam em média 75 % do volume da massa de concreto, logo sua qualidade é de extrema importância. Algumas propriedades como a durabilidade e comportamento estrutural são afetadas negativamente no caso de os agregados terem alguma propriedade indesejada, como por exemplo, material orgânico (PETRUCCI; PAULON, 1998; NEVILLE, 2016).

De acordo com a *European Federation of National Associations Representing for Concrete* - EFNARC (2005) os agregados empregados na produção do concreto autoadensável precisam ser controlados de forma metódica e contínua. Necessita-se saber sua umidade, sua absorção de água, sua curva granulométrica e sua variação de quantidade de finos para produzir um CAA de qualidade constante. A forma e a distribuição do tamanho dos agregados (coeficiente de forma) são muito importantes e afetam a compactação e o índice de vazios do CAA.

Os agregados são classificados quanto à sua origem, quanto à sua granulometria e quanto à sua massa específica. Quanto à origem, os agregados podem ser classificados em naturais e artificiais. Denomina-se natural todo agregado que é encontrado na natureza já preparado para o uso sem nenhum outro beneficiamento que não seja a lavagem (FARIAS;

PALMEIRA; BEJA, 2010). Já o agregado artificial é derivado de processos de industrialização (PETRUCCI; PAULON, 1998).

A norma NBR 7211 (2009) classifica quanto às dimensões dos grãos, em agregados graúdos e agregados miúdos. Ambos são definidos com ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003) e com peneiras definidas pela norma NBR NM ISO 3310-1 (2010) (Tabela 3).

Tabela 3 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-
75 μm	-

Fonte: ABNT NBR NM ISO 3310-1 (2010).

2.3.3. Agregados graúdos

O agregado graúdo é aquele em que os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. A distribuição granulométrica do agregado influencia o empacotamento dos grãos, o que pode modificar a fração volumétrica do agregado graúdo que é incorporado no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As propriedades do concreto autoadensável, principalmente no seu estado fresco, são afetadas pelo volume ocupado pelo agregado graúdo na mistura. A granulometria e a forma

dos agregados graúdos influenciam diretamente a fluidez, a capacidade de passagem do CAA e a demanda de pasta. Quanto mais esféricos forem os agregados graúdos, maior a fluidez. O tamanho máximo do agregado graúdo normalmente não ultrapassa os 25 mm no CAA, sendo usuais tamanhos máximos compreendidos entre 12 e 16 mm (EFNARC, 2002; EFNARC, 2005).

2.3.4. Agregados miúdos

Agregado miúdo é aquele que os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. Segundo Neville (2016), a forma e a textura das partículas do agregado miúdo influenciam as propriedades da mistura, pois as partículas angulosas exigem maior demanda de água para uma determinada trabalhabilidade.

A escolha do agregado miúdo nos CAA está condicionada à demanda de água, já que a quantidade de água é um fator essencial e traz influência na coesão e fluidez do concreto. Agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas, e com menor módulo de finura, são preferíveis para produção de CAA porque aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). É essencial saber o teor de umidade e absorção de água do agregado miúdo de forma precisa, para poder ajustar a quantia de água do CAA (EFNARC, 2005).

2.3.5. Água

A água é um elemento essencial na fabricação do concreto porque, em conjunto com o cimento, gera a pasta que aglutina os agregados e proporciona a resistência e a durabilidade necessárias para as estruturas de concreto. A proporção entre a água e o cimento utilizados na mistura é chamada de fator água/cimento (HELENE; ANDRADE, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), nenhum tipo de água, em princípio, deve ser rejeitado para o amassamento do concreto. Para não prejudicar a resistência final e também a durabilidade da estrutura, além de evitar manchas na superfície, Neville (2016) aponta que a água de amassamento não deve conter substâncias orgânicas indesejáveis ou substâncias inorgânicas em excesso, ficando com um pH entre 6,0 e 8,0. Além disso, outros limites restritivos são especificados na norma NBR 15900-1 (2009), como a quantidade de cloretos e de sulfatos. A água empregada ao concreto autoadensável, deve seguir os mesmos parâmetros do concreto convencional, determinados pela ABNT NBR 15900-1 (2009).

2.4. ADITIVOS

Segundo a norma NBR 11768-1 (2019) da ABNT, os aditivos são produtos adicionados durante o processo de mistura dos materiais componentes do concreto, em uma quantidade não superior a 5 % da massa de ligante total (cimento mais adições) contida no concreto. O propósito da sua utilização é alterar as propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido. A quantidade de 5 % pode ser superior para algumas aplicações, como nos aditivos para concreto projetado ou aditivos compensadores de retração.

Aditivos são produtos químicos, que podem ter composição orgânica ou inorgânica. São acrescentados à massa de concreto com a finalidade de melhorar ou reforçar algumas características, facilitando seu preparo e sua utilização (PETRUCCI, 1998). Neville (2016) ainda acrescenta que, o uso de aditivos químicos permite a produção de materiais cimentícios com uma ampla gama de aplicações, desde concreto com aparência seca até concretos autoadensáveis.

O desempenho, tanto no estado fresco quanto no endurecido, é afetado devido a interação química entre os aditivos e os materiais que constituem o concreto, alterando positivamente algumas propriedades como a trabalhabilidade (redução da quantidade de água), a resistência e a durabilidade. O mecanismo de ação das reações e interações, que ocorrem entre os aditivos e o cimento, devem ser estudados e conhecidos, pois pode ter influência nas propriedades físico-químicas e mecânicas do concreto (RAMACHANDRAN, 1996; COLLEPARDI, 2005; TEE; MOSTOFIZADEH, 2021).

Para Mehta e Monteiro (2014), o grande responsável pelo crescimento da indústria de aditivos nas últimas décadas é o reconhecimento que as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido podem ser modificadas com a adição de aditivos. Com demandas por concretos com características cada vez mais específicas, os aditivos para concreto são componentes importantes para permitir essa evolução.

Os aditivos podem ser classificados dependendo da sua função no concreto. A norma NBR 11768-1 (2019) classifica-os da seguinte forma:

- Redutor de água tipo 1/ RA1; RA1-R; RA1-A;
- Redutor de água tipo 2/ RA2; RA2-R; RA2-A;
- Controlador de hidratação – CH;
- Acelerador de pega – AP;
- Acelerador de resistência – AR;
- Acelerador de pega para concreto projetado – APP;

- Compensador de retração – CR;
- Redutor de retração RR;
- Incorporador de ar – IA;
- Incorporador de ar para concreto leve – IA-L;
- Redutor de corrosão – RC;
- Modificador de viscosidade retentor de água – MV-RT;
- Modificador de viscosidade antissegregante – MV-AS;
- Redutor de absorção capilar – RAC;
- Redutor de permeabilidade – RP;
- Aditivos para concreto vibroprensado – CVP.

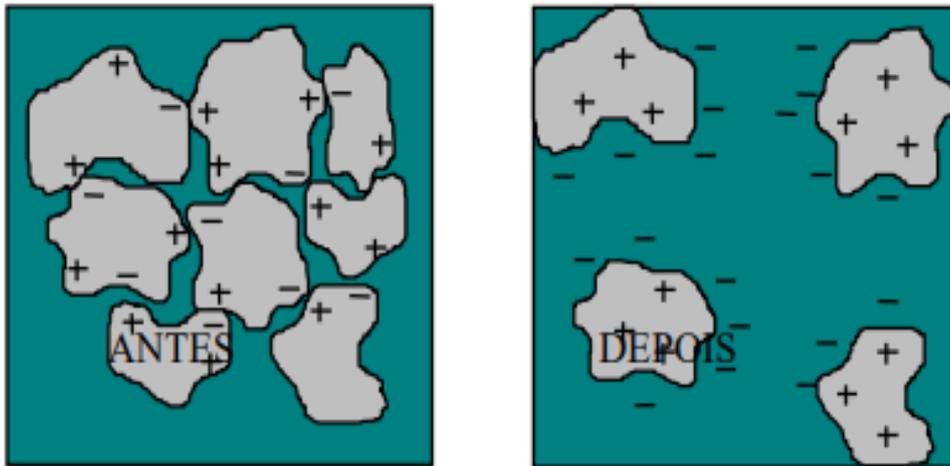
2.4.1. Aditivo redutor de água

Segundo Neville (2016), a função dos aditivos redutores de água, como o nome já diz, é reduzir a quantidade de água da mistura, geralmente em valores de 5 a 10 %, podendo chegar até em 15 % quando se trata de concretos com uma trabalhabilidade muito alta. O uso deste aditivo possibilita a redução da relação água/cimento, mantendo a trabalhabilidade necessária, ou ainda aumentar a trabalhabilidade enquanto se mantém a relação água/cimento.

A utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes é cada vez mais usual dentro das centrais dosadoras e das fábricas de peças pré-fabricadas. Esse tipo de aditivo permite a dosagem de concretos com características bem específicas quanto ao uso, e ainda tem uma elevada redução nos custos de produção, devido à baixa no consumo de aglomerante quando inserida a porcentagem correta no traço.

Para os aditivos redutores de água os principais componentes ativos são os agentes tensoativos. Essas substâncias se concentram na interface entre duas fases não miscíveis, alterando as forças de natureza físico-química que atuam nessa interface. As substâncias são adsorvidas pelas partículas de cimento que ficam carregadas negativamente (Figura 3), o que resulta em repulsão entre partículas, tornando estável a sua dispersão; as bolhas de ar também são repelidas de forma que não podem se fixar nas partículas de cimento. As partículas de cimento, igualmente carregadas, repelem-se e mais superfície fica disponível para reagir com a água (FERRAZ; PINTO, 2009 apud NEVILLE, 1982).

Figura 3 - Dispersão das partículas de cimento carregadas eletricamente.

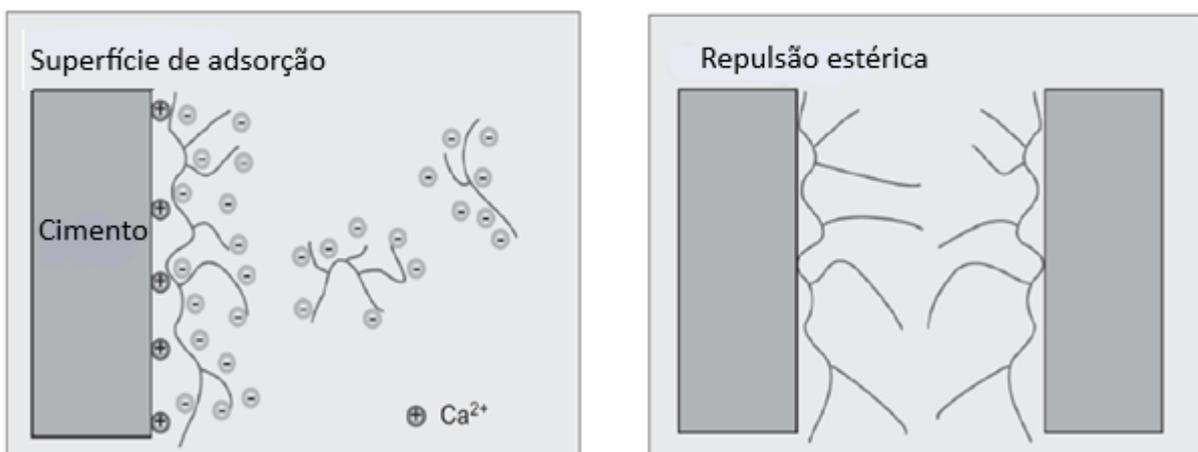


Fonte: Ferraz e Pinto (2009 apud Neville, 1982).

Dentro da classe de aditivos redutores de água existem os plastificantes e os superplastificante e a principal diferença entre eles é no efeito da trabalhabilidade. Para um mesmo valor de abatimento (ensaio de consistência) o superplastificante é capaz de reduzir a demanda por água cerca de 20 a 30 %, enquanto o plastificante reduz entre 5 a 12 % (COLLEPARDI, 1998).

A Figura 4 mostra um exemplo de partículas de cimento com repulsão estérica causada por um aditivo superplastificante.

Figura 4 - Interação entre cimento e o aditivo superplastificante.

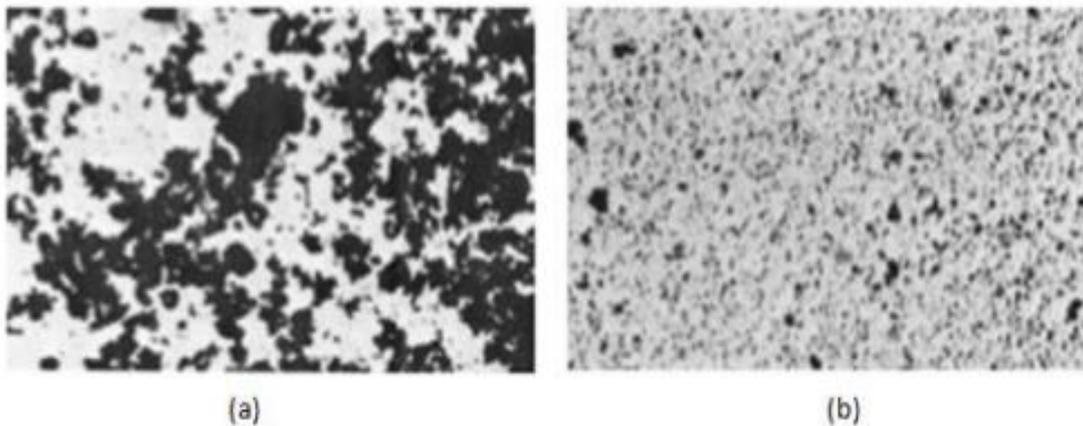


Fonte: Adaptado de Aitcin e Flatt (2016).

Os aditivos superplastificantes ou, como são chamados na norma NBR 11768-1 (2019), redutores de água tipo 2, são polímeros solúveis em água com propriedades fluidificantes e dispersantes. A Figura 5 apresenta o efeito da dispersão causada pelo

superplastificante em sistemas de cimento e água. A adsorção das moléculas de superplastificante pelas partículas de cimento impede a sua floculação devido à geração de forças repulsivas cuja origem pode ser eletrostática e/ou através de repulsão esférica. Conseqüentemente, as partículas são homogêneas distribuídas na solução aquosa, liberando a quantidade de água aprisionada no interior dos flocos e minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a uma maior fluidez/trabalhabilidade do concreto (NUNES, 2001).

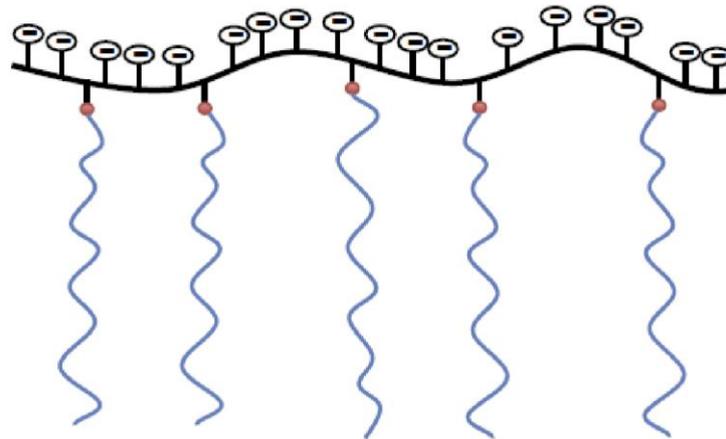
Figura 5 - (a) Floculação da mistura contendo cimento e água (b) dispersão do sistema após inserção de aditivo superplastificante.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A última geração de aditivos superplasticantes existentes no mercado são os policarboxilatos éster (PCE). Os PCE geralmente são chamados de “comb-shaped superplasticizers”, por possuírem a estrutura constituída por grupos carboxílicos na cadeia principal e por cadeias laterais não iônicas, formadas por poliésters, atreladas à cadeia principal, onde forma uma estrutura em formato de “pente”, como apresentado na Figura 6. Esses polímeros, como o policarboxilato, podem alcançar uma redução de água de até 40 % e, geralmente, têm uma baixa tolerância a minerais argilosos (AÏTCIN; FLATT, 2016).

Figura 6 - Desenho esquemático de uma estrutura de éter de policarboxilato.



Fonte: Ribeiro (2020 apud Gelardi et al., 2016).

Os superplastificantes não afetam de maneira significativa o tempo de pega do concreto, exceto quando utilizados com cimentos contendo um teor muito baixo de C_3A , situação em que pode ocorrer um retardo elevado. Eles podem ser usados com sucesso em concreto com cinzas volantes, não influenciam a retração, a fluência, o módulo de elasticidade ou a resistência ao gelo e degelo (NEVILLE, 2016; TKACZEWSKA *et al.* 2014).

2.4.2. Aditivo compensador de retração (CR)

A retração em argamassas e concretos pode ser atenuada com diversas soluções, dentre elas: ajustes no traço, uso de armaduras, realização de cura e boa relação água/cimento. Como contribuição para evitar o fenômeno de retração, existem os aditivos redutores e compensadores de retração (MELO; CINCOTTO; REPETTE, 2008). O aditivo redutor de retração SRA (abreviação da expressão original em inglês “shrinkage reducing admixture”), age reduzindo a retração. Já o aditivo compensador de retração, SCA (abreviação da expressão original em inglês “shrinkage compensating admixture”), atua gerando uma expansão de modo a compensar a retração. A norma NBR 11768-1 (2019) classifica esse tipo de aditivo em compensador de retração CR e aditivo redutor de retração, RR.

A função do aditivo compensador de retração é estimular o aparecimento de tensões de compressão, mitigando as tensões de tração resultantes da hidratação química. Sabe-se que o aditivo compensador à base de sulfoaluminatos de cálcio tem sido aplicado ao sistema à base de cimento Portland para controlar a retração com efeitos positivos significativos (SOUZA et al., 2020; CHAUNSALI; MONDAL, 2016; JIA et al., 2018).

O aditivo compensador de retração em geral é um pó orgânico, sem a presença de cloretos. O uso de CR tem se mostrado uma forma eficaz de combater a retração excessiva do concreto, que pode acarretar em fissuras. A maioria dos aditivos comerciais baseia-se na formação de etringita adicional, induzindo expansão nos concretos e compensando a retração posterior (SOUZA et al., 2020). Mas existem aditivos que são à base de sulfoaluminato de cálcio e à base de cal virgem; dentre os aditivos a base de sulfoaluminatos são encontrados os cimentos aluminosos e expansivos e dentre os à base de cal virgem estão os à base de óxido de cálcio supercalcinado (MEHTA; MONTEIRO, 2014),

Os aditivos compensadores de retração que são à base de óxido de cálcio supercalcinado sofrem uma reação expansiva na passagem de CaO para Ca(OH)_2 . Como resultado deste processo expansivo, o concreto passa a ser submetido a esforços de compressão que se contrapõem aos de esforços de tração gerados pela retração do concreto. A característica expansiva induz a diminuição de porosidade e a redução de permeabilidade, um incremento de resistência à compressão, e uma maior aderência entre os elementos (RODRIGUES, 2016; RUBIO, 2017).

A redução das fissuras por contração é um fator importante do ponto de vista da durabilidade do concreto, bem como da resistência. Como os produtos de compensação de retração não são usados com frequência em estruturas de concreto, poucas informações estão disponíveis sobre seu desempenho e eventuais limitações (OLIVEIRA; RIBEIRO; BRANCO, 2014; COLLEPARDI et al., 2005).

É conhecido que o aditivo compensador à base de tipo sulfoaluminato de cálcio (CHAUNSALI; MONDAL, 2016) e o aditivo compensador à base de óxido de cálcio supercalcinado (RUBIO, 2017), são aditivos que têm sido aplicados ao sistema de cimento Portland para controlar a retração. Esses aditivos mostraram efeito positivo significativo no sistema de cimento Portland. O sistema CAA com aditivo compensador à base de tipo sulfoaluminato de cálcio também apresentou melhorias na retração (PILAR; FERRON; REPETTE, 2018). Já a situação no sistema de um concreto autoadensável com aditivo à base de óxido de cálcio supercalcinado é diferente, portanto, o efeito e o mecanismo do aditivo no CAA precisam ser esclarecidos.

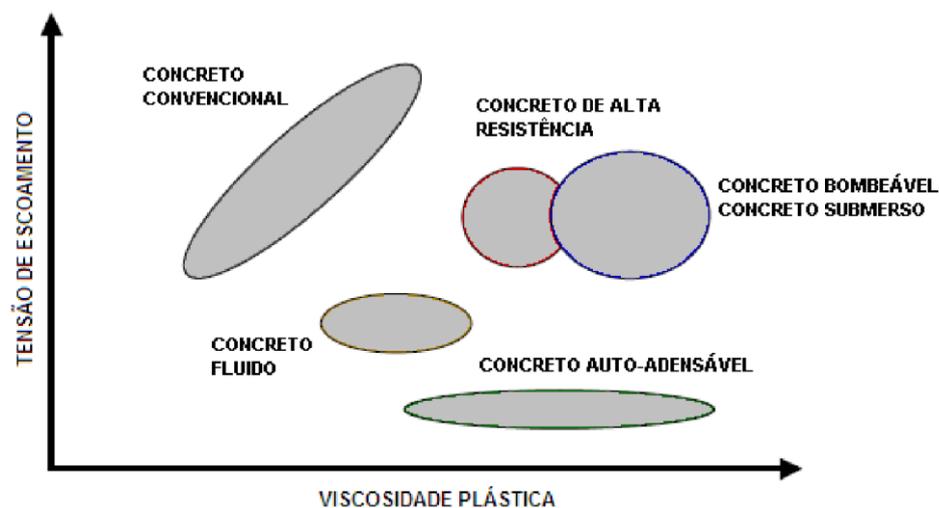
2.5. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As propriedades do concreto variam conforme seu estado físico: fresco ou endurecido, e a avaliação das características físico-químicas devem ser analisadas nessas duas condições.

O concreto fresco é assim considerado até o momento em que tem início a pega do aglomerante (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O concreto autoadensável se diferencia dos concretos convencionais pela definição das suas características no estado fresco, devendo apresentar extrema fluidez, capacidade de passagem por armaduras com espaçamento reduzido e resistência à segregação, ou seja, o CAA deve ser um material fluido e viscoso simultaneamente. Quando a viscosidade do material é muito baixa, há mais probabilidade de acontecer a segregação do material, devendo então ter um equilíbrio entre a tensão de escoamento produzida pelo concreto, com a viscosidade que se deseja, como apresentado na Figura 7 (SOUZA, 2016; NEVILLE, 2016; NUNES, 2001).

Figura 7 - Parâmetros reológicos do concreto em função do tipo de aplicação.



Fonte: Adaptado de Nunes (2001).

Segundo Neville (2016), há três requisitos para o concreto ser classificado como autoadensável: fluidez, capacidade de passagem por armaduras com espaçamento reduzido e resistência à segregação.

- Capacidade de preenchimento ou fluidez: capacidade do concreto em fluir dentro das fôrmas, preenchendo todos os espaços;
- Habilidade passante: capacidade de fluir coeso e íntegro entre obstáculos da fôrma;
- Resistência à segregação: capacidade do concreto em manter-se coeso ao longo do espalhamento do concreto dentro da fôrma, passando ou não por obstáculos.

Existem vários ensaios propostos para cada uma das três propriedades, mas nenhum método de ensaio completo foi normalizado. No Brasil, existem seis normas sobre concreto autoadensável. São as normas NBR 15823-1 a 6 (2010). A primeira trata da classificação, do controle e da aceitação do concreto no estado fresco. As demais, da NBR 15823-2 a 6,

normalizam os métodos de ensaio, respectivamente: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams; determinação da habilidade passante – Método do anel J; determinação da habilidade passante – Método da caixa L; determinação da viscosidade – Método do funil V; e determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação.

Para o controle de qualidade e para determinar as características do CAA, é necessário realizar pelo menos dois métodos de ensaio. As combinações mais comuns são o espalhamento pelo Cone de Abrams e fluxo de funil V ou passagem caixa L.

2.5.1. Método de determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Cone de Abrams

A determinação do espalhamento do concreto é normatizada pela NBR 15823-2 (2017), que através do ensaio denominado de espalhamento de tronco de cone determina a fluidez, a viscosidade plástica aparente e estabilidade visual da mistura. Segundo esta mesma norma, esse método estabelece os parâmetros para “avaliação da fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob a ação de seu próprio peso, pela determinação do espalhamento e do tempo de escoamento do concreto autoadensável”. Esse ensaio é conhecido também como *slum flow*.

A fluidez é estabelecida pela média do diâmetro de espalhamento de duas medições perpendiculares entre si, realizadas após a retirada do cone de Abrams. O cone está totalmente preenchido de CAA e todo material escoá, em fluxo livre, sob a placa metálica de base. O adensamento do concreto deve ser feito pela força da gravidade, não devendo ser realizado qualquer tipo de compactação.

Figura 8 - Aparato para realização do ensaio de Cone de Abrams.



Fonte: Souza (2016).

Valores de espalhamentos muito baixos indicam que o concreto está pouco fluido. Assim, é necessário ‘fluidificar’ o material com água ou aditivos superplastificantes. E, se a medida estiver elevada, deve-se tornar o concreto mais coeso, porque estará muito fluido e, provavelmente, segregando. O índice de estabilidade visual é classificado pela inspeção visual, constatando a possível exsudação e segregação da composição, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Aparência do concreto durante *Slump Flow*.



(a) CAA com aparência adequada



(b) CAA com segregação



(c) CAA com exsudação

A viscosidade plástica aparente do CAA, também é denominada pelo espalhamento de tronco de cone. Analisa-se o tempo em que o concreto leva para abrir 50 cm. Concretos com baixa viscosidade, classificados como VS1 apresentam espalhamento inicial elevado e tendem a atingir o diâmetro de 50 cm em menos de 2 segundos. Os de elevada viscosidade apresentam fluxo com intervalo de tempo superior a 2 segundos e de forma mais uniforme, sendo classificados como VS2.

Segundo deliberação da EFNARC (2002) o espalhamento final do CAA (SF) deve estar entre 650 e 800 mm, enquanto que o tempo de espalhamento para o diâmetro de 500

mm, deve ser entre 2 e 5 segundos. Pela norma NBR 15823-1 (2017), existem três classes de fluidez, duas classes de viscosidade e quatro de estabilidade visual, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação quanto à viscosidade, fluidez e estabilidade visual.

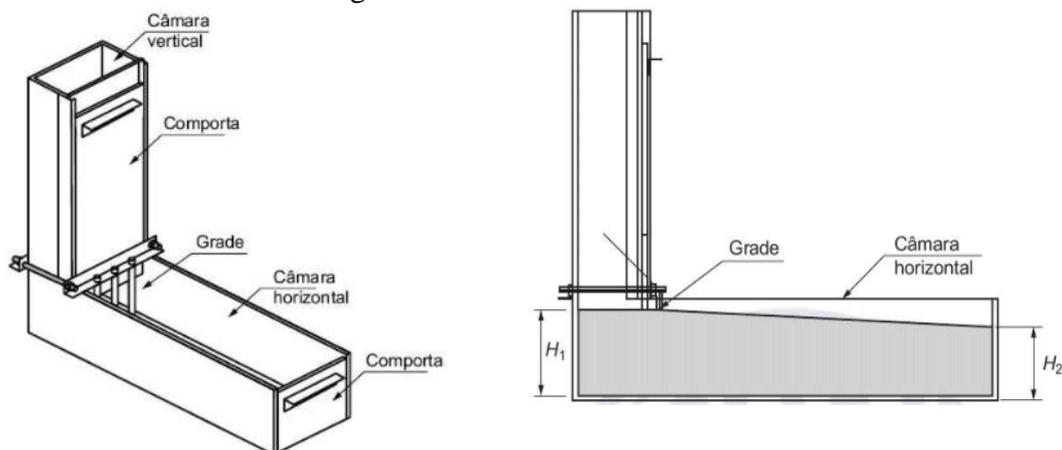
Propriedade	Classe	Parâmetro	Ensaio
Fluidez	SF 1	550 a 650 mm	ABNT NBR 15823-2
	SF 2	660 a 750 mm	
	SF 3	760 a 850 mm	
Viscosidade	VS 1	$\leq 2,0$ s	ABNT NBR 15823-2
	VS 2	$> 2,0$ s	
Estabilidade visual	IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
	IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
	IEV 2	Pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro	
	IEV 3	Segregação clara (auréola de argamassa > 10 mm) ou concentração de agregados no centro	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1 (2017).

2.5.2. Determinação da habilidade passante - Método da caixa “L”

Para determinar a habilidade de passagem do CAA por armaduras em seu estado fresco, a mistura é despejada no recipiente vertical do sistema e em seguida a tampa móvel situada na parte inferior é retirada, permitindo o escoamento do material frente às barreiras verticais. A Figura 10 ilustra o sistema.

Figura 10 - Desenhos da caixa L.



Fonte: NBR 15823-4 (2017).

Para o resultado, é calculada a razão entre a altura na porção horizontal (H2) da forma e da vertical (H1), e também anotado o tempo resultante do escoamento. A razão entre esses é proporcional a facilidade de escoamento, quanto maior H2/H1, maior a capacidade de fluxo. A classificação é feita pela norma NBR 15823-4 (2017), conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação quanto habilidade passante.

Propriedade	Classe	Parâmetro	Ensaio
Habilidade passante	PL 1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4
	PL 2	$\geq 0,80$, com três barras de aço	

Fonte: NBR 15823-4 (2017).

2.6. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O concreto endurecido é o material que se obtém pela mistura dos componentes, após o fim da pega do aglomerante (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

2.6.1. Ensaio para determinar a resistência à compressão

A primeira propriedade, quando se pensa em algum material para engenharia, é a resistência. Segundo Higgins (1982, p. 59), “a resistência é uma medida das forças externas aplicadas a um material, as quais são necessárias para vencer as forças internas de atração entre as partículas elementares do mesmo”. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a resistência de um material é dada pela capacidade de suportar os esforços de tensão aplicados sem chegar à ruptura. A ruptura se dá, muitas vezes, pelo surgimento de pequenas fissuras, porém no concreto antes mesmo de haver aplicação de tensões externas, essas pequenas fissuras já existem.

A resistência do concreto é caracterizada como a propriedade mais relevante, apesar de outras propriedades como a durabilidade e a permeabilidade também terem um papel importante em projetos e situações práticas. A qualidade do concreto está intimamente ligada à resistência, pois tem relação direta com a estrutura da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016). O concreto resiste muito bem aos esforços de compressão e mal aos esforços de tração. A resistência à tração é em média 10 vezes menos do que a resistência à compressão (PETRUCCI, 1998).

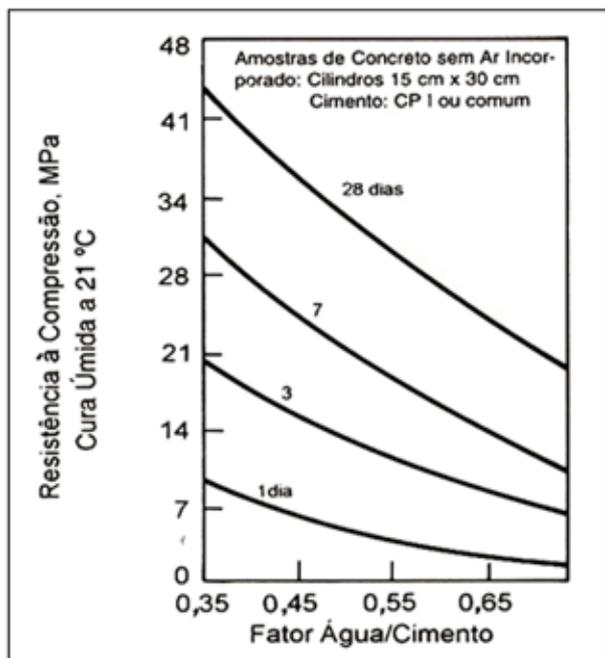
Os principais fatores que afetam a resistência mecânica do concreto são:

- a) relação água/cimento;
- b) idade;

- c) forma e graduação dos agregados;
- d) tipo de cimento.

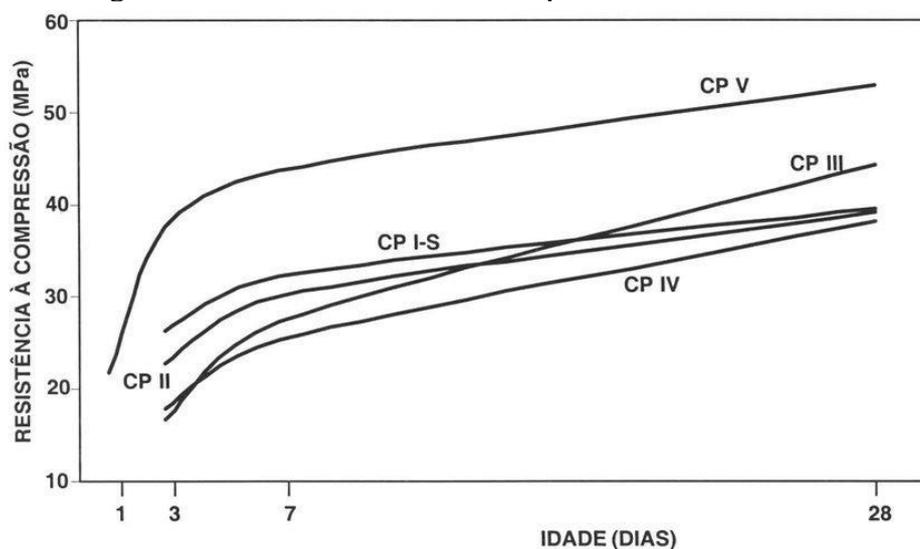
Nas Figuras 11 e 12, é possível ver um gráfico da influência da relação água/cimento resistência à compressão do concreto e um gráfico da resistência à compressão do cimento com o passar dos dias, respectivamente.

Figura 11 - Influência da relação a/c na resistência à compressão do concreto.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Figura 12 - Resistência média dos tipos de cimento Portland.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2002).

Os requisitos que a NBR 15823-1 a 6 apresenta para o concreto autoadensável são apenas no seu estado fresco. As características e propriedades no estado endurecido estão regulamentadas nos próprios elementos de concreto. Quando se trata de um CAA, a moldagem dos corpos de prova (CPs) não necessita de adensamento e o ensaio de compressão deve ser realizado de acordo com a NBR 5739 (2018). Essa mesma norma diz que os corpos de provas devem ter seu topo retificado, com o auxílio de um paquímetro são determinadas as suas dimensões e, após esse procedimento, cada CP é posicionado no centro do prato inferior da prensa e então iniciado o ensaio. O carregamento é aplicado com uma velocidade constante, até que ocorra o rompimento.

Em um ensaio realizado pelo laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2013) foi feito um comparativo entre o concreto convencional e o concreto aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado (DRY D1 – NG). Segundo o relatório, as amostras foram preparadas com dosagens apresentadas na Tabela 6, onde foi acrescentado 10 kg/m³ de concreto do aditivo DRY D1 – NG (Dosagem 02). As dosagens foram preparadas em betoneira estacionária com capacidade de 50 litros, eixo vertical e mistura forçada. A resistência à compressão, nas idades de 3, 7 e 28 dias, também é apresentada na Tabela 6 e apresenta melhora em todas as idades ensaiadas.

Tabela 6 - Comparativo da resistência à compressão (MPa).

Identificação	Traço unitário cim: a fina: a média: p0: p1: a/c	Resistência à compressão (Mpa)		
		03 dias	07 dias	28 dias
Dosagem Referência	1: 0,780: 1,157: 1,207: 1,860: 0,50	27,8	35,6	45,1
Dosagem 02	1: 0,780: 1,157: 1,207: 1,860: 0,50 com 10 kg/m ³ de DRY D1 - NG	38,5	43,4	52,3

Nas 2 dosagens foi utilizado 0,6% de aditivo Mira 04 da Grace, sobre a massa de cimento.

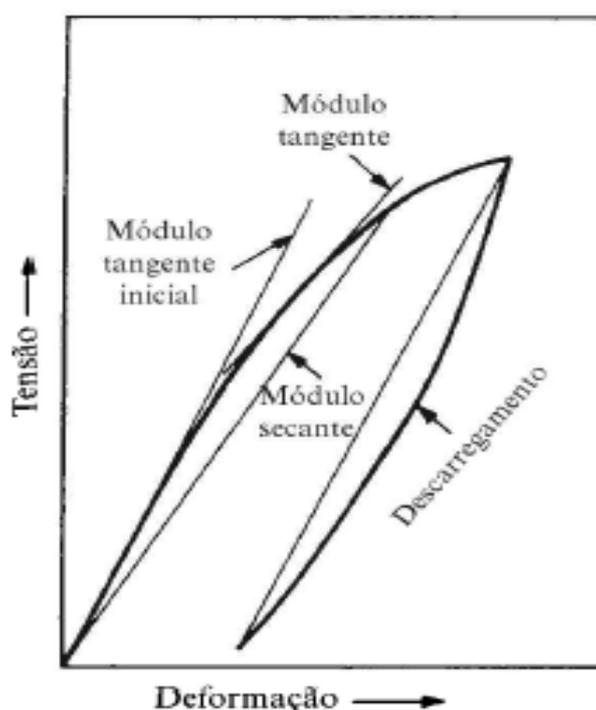
Fonte: Relatório de ensaio ABCP (2013).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o aumento da resistência do concreto autoadensável está relacionado com a maior quantidade de finos e maior compacidade. Além disso, pelos CAA apresentarem teores de argamassa e consumo de cimento superiores ao concreto convencional, o concreto autoadensável sofre uma maior influência no módulo de elasticidade e nas propriedades de retração.

2.6.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é o coeficiente de proporcionalidade entre a tensão e a deformação durante o regime elástico do material. O comportamento elástico em materiais heterogêneos e multifásicos, como o concreto, é determinado pela fração volumétrica, a densidade e o módulo dos principais componentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Conforme Araújo (2014), o concreto apresenta um comportamento não linear, quando submetido a tensões de certa magnitude, ou seja, é um material que não possui uma curva tensão-deformação linear. Na Figura 13, pode ser visto que a expressão do módulo de elasticidade (Young), a rigor, somente pode ser atribuída à parte reta da curva tensão-deformação ou, quando não houver um trecho reto, à tangente da curva na origem (NEVILLE, 2016).

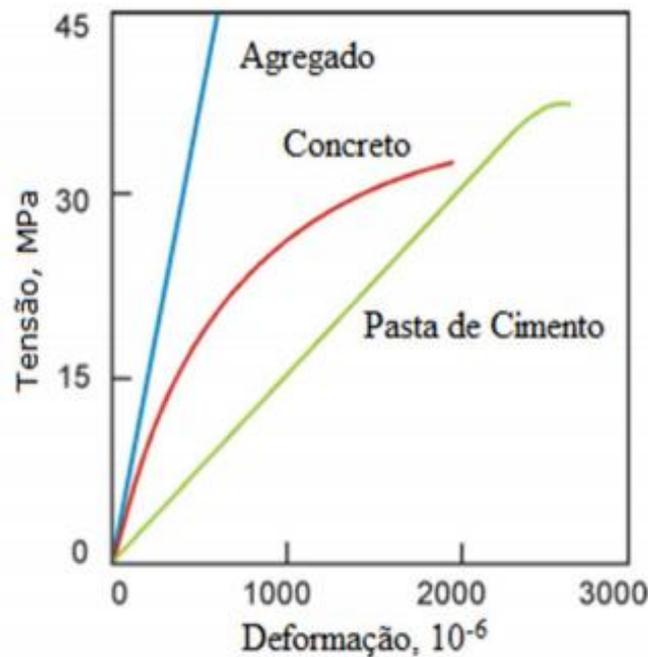
Figura 13 - Representação esquemática da relação tensão-deformação do concreto.



Fonte: Neville (2016).

Os módulos de elasticidade dos materiais que constituem o concreto são muito diferentes do módulo de elasticidade do próprio concreto. Por exemplo: os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento variando a partir 16 GPa, enquanto o módulo do concreto provavelmente será um valor intermediário entre os valores dos agregados graúdos e da pasta, como mostra a Figura 14 (MELO; HELENE, 2002).

Figura 14 - Curvas tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.



Fonte: Adaptado de Neville (2016).

Os materiais que constituem o concreto autoadensável são basicamente os mesmos do concreto convencional, acrescentando apenas o aditivo superplastificante e sendo necessárias algumas alterações como o incremento na quantidade de pasta e argamassa. Segundo Holschemacher (2004), devido à maior quantidade de materiais finos e adições, associada à menor quantidade de agregados graúdos, esperam-se valores mais baixos para o módulo de elasticidade do CAA para uma mesma relação a/c. Ao comparar o módulo de elasticidade de um concreto autoadensável com um convencional, com mesmo teor de argamassa, pode-se verificar que o CAA pode apresentar redução de até 65 % em relação ao CCV. Devido às diferenças de composição do CAA, seu uso deve ser precedido da análise do seu comportamento mecânico (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; MARQUES, 2011 apud GEYER; SENA, 2002).

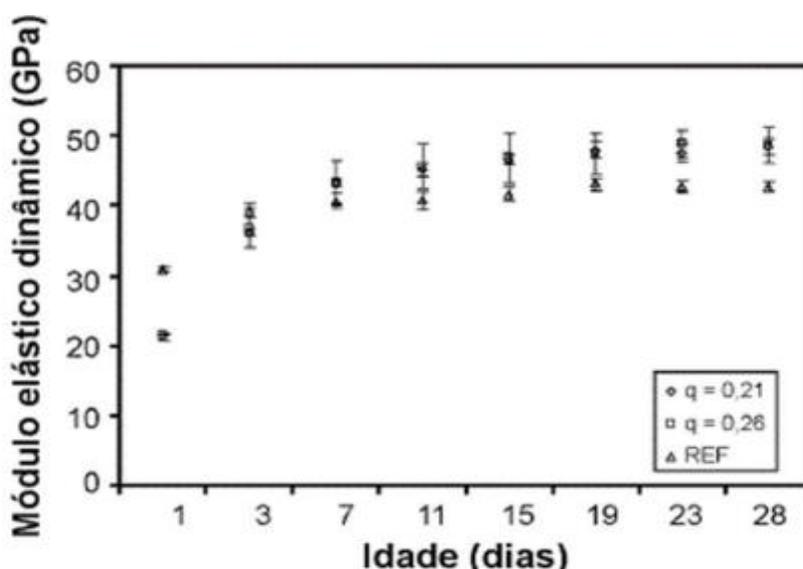
De acordo com a norma NBR 6118 (2014) o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na norma NBR 8522 (2017), sendo nesta norma o módulo de deformação tangente inicial obtido aos 28 dias de idade. Quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial utilizando expressões que são em função da resistência característica à compressão.

Além dessas possibilidades, o módulo de elasticidade do concreto também pode ser obtido através de ensaios não-destrutivos, usualmente baseados nas frequências naturais de

vibração ou na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. As normas ASTM C215 e ASTM E1876 descrevem as principais metodologias para a caracterização dos módulos elásticos dinâmicos de corpos de prova de concreto. Estas normas apresentam os métodos para a caracterização da frequência natural de vibração do corpo e que, juntamente com a massa e as dimensões, pode-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico.

As vantagens do emprego desta técnica não-destrutiva é a redução do número de corpos de prova para ensaios que proporciona resultados mais precisos e acurados devido à menor quantidade de variáveis e menor susceptibilidade a erros experimentais (CANESSO et al., 2008; HAACH et al., 2013). Além disso, tem-se maior agilidade na obtenção dos resultados, já que a caracterização leva poucos minutos para ser realizada e pode-se repetir quantas vezes for necessário. Outro ponto positivo é que se torna possível acompanhar o módulo de elasticidade de um corpo de prova em função do tempo (por exemplo, para o acompanhamento do processo de cura, Figura 15) e da variação de temperatura.

Figura 15 - Acompanhamento do módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Castro, Liborio e Pandolfelli (2009).

2.6.3. Retração do concreto

Os elementos de concreto podem tanto expandir quanto contrair após sua moldagem, porém é dado mais ênfase aos fenômenos que fazem o material encolher seu volume. Essa maior atenção na contração é dada pela anisotropia do concreto, onde a sua resistência à compressão é maior do que sua resistência à tração, além de ter uma baixa capacidade de se deformar (NEVILLE, 2016).

Após a moldagem do concreto, ocorre uma redução do seu volume. Essa variação do volume dá origem a deformações que são definidas como retração e podem ser classificadas como sendo devido à variação de temperatura, à carbonatação, à secagem (estado plástico e endurecido) e autógena. Essas deformações, que, frequentemente, levam o concreto a um estado de fissuração, são desenvolvidas pela reação mecânica do material quando submetido a esforços externos e à interação com o ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 2014; PILAR; FERRON; REPETTE, 2018).

A retração total é a ação conjunta das deformações citadas no parágrafo anterior: retrações plásticas, autógena, hidráulica ou secagem e por carbonatação. A retração plástica é a perda de água na superfície do concreto quando ele se encontra em seu estado plástico. A deformação autógena ou química ocorre em função da reação química do cimento em contato com a água e tende a aumentar com teores maiores do aglomerante. A retração hidráulica ou por secagem está associada a perda de umidade para o ambiente e é influenciada pelas características dos agregados utilizados no traço. E por fim, a retração por carbonatação que é o produto de uma reação química entre o CO_2 da atmosfera e os compostos hidratados do cimento, principalmente Ca(OH)_2 (DINIZ; FERNANDES; KUPERMAN, 2011; NEVILLE, 2016).

Quando a água sai de um corpo poroso que não é totalmente rígido, ocorre a retração. Nos elementos de concreto, essa movimentação de água geralmente ocorre desde seu estado fresco até idades mais avançadas e o efeito físico desse fenômeno está ligado a uma deformação na estrutura da pasta cimentícia hidratada. Uma parcela da retração ocorre nas primeiras idades de fabricação do concreto e está ligada às reações químicas internas da pasta de cimento. Essa retração é irreversível e não acontece em idades avançadas. Outra parte da retração é reversível e está associada, principalmente, à variação higroscópica do ambiente. A perda de água da pasta de cimento é a principal causa da retração (BARBOSA et al., 2005; NEVILLE, 2016).

Os concretos autoadensáveis, em seu estado endurecido, têm maior tendência aos fenômenos de retração em comparação com os concretos convencionais. Essa diferença se dá em função da grande quantidade de finos, além de um elevado percentual de pasta de cimento. É esse ponto que leva para a produção do CAA um acréscimo de cuidado e técnica, e por consequência, um aumento dos custos do material e da sua formulação (PERIUS; CHERIAF; ROCHA, 2010). De acordo com o estudo de Ferraz e Pinto (2009), o uso, em pré-moldados, de concreto autoadensável com cimento CP apresentou resultados de retração superiores para o CAA em relação ao concreto convencional para essa mesma aplicação.

Alguns métodos são aplicados para reduzir o efeito da retração, como o uso de cimento expansivo, aditivos expansores e compensadores e execução da cura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O ensaio normalmente utilizado para determinar a retração do concreto é realizado através da norma NBR 16834 (2020) - Concreto - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Neste ensaio, são moldados CPs cilíndricos com pinos acoplados em suas extremidades e a partir de uma medida inicial, são realizadas leituras com um comparador de precisão 0,001 mm, ao longo de 56 dias para verificar a variação dimensional, que permite a avaliação do potencial de expansão ou retração do material.

No relatório de ensaio emitido pelo laboratório da ABCP (2013), foi realizado um comparativo entre a retração total no concreto convencional e no concreto com adição do aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado (DRY D1 – NG). Os resultados obtidos nos ensaios de retração com os corpos de prova moldados das dosagens propostas na Tabela 5 podem ser vistos na Tabela 7. As amostras de referência (concreto convencional) em relação às amostras com o aditivo compensador de retração tiveram uma retração de volume maior em todos os tempos verificados.

Tabela 7 - Comparativo da retração.

Condição de cura	Idade	Variação dimensional média (%)		
		Dosagens		
		Referência	Dosagem 02	
Câmara úmida (*)	1 dias	Leitura inicial		
	4 dias	-0,013	0,028	
	7 dias	-0,022	0,018	
	Câmara seca (**)	14 dias	-0,041	0,006
		28 dias	-0,055	-0,01
		56 dias	-0,071	-0,032
		112 dias	-0,077	-0,035

Notas: O sinal negativo indica retração
 (*) Condições climáticas: Umidade > 90°C e temperatura = 23 +/- 2°C
 (**) Condições climáticas: Umidade = 50 +/- 5°C e temperatura = 23 +/- 2°C

Fonte: Relatório de ensaio ABCP (2013).

2.6.4. Cura do concreto

Para que o concreto alcance seu melhor desempenho, um dos principais passos na concretagem é a cura do concreto. Cura é a designação dada aos procedimentos realizados

para que o cimento sofra a hidratação necessária, controlando a entrada e, principalmente, a saída (evaporação) de água do concreto (NEVILLE, 2016).

Pela norma NBR 14931 (2004), até o concreto chegar na sua resistência esperada, ele deverá ser curado para:

- evitar a perda de água pela superfície exposta;
- assegurar uma superfície com resistência adequada;
- assegurar a formação de uma capa superficial durável.

Mehta e Monteiro (2014) ainda citam mais dois objetivos para o uso da técnica de cura do concreto: manter a umidade e controlar a temperatura.

Segundo Neville (2016), o objetivo da cura é garantir que o concreto fique saturado, ou o mais próximo disso, até que os espaços que inicialmente são preenchidos com água da pasta de cimento fresca, sejam preenchidos pelos produtos oriundos da reação química de hidratação do cimento. A disponibilidade de água é um ingrediente essencial para garantir hidratação contínua e a cura adequada (TAYLOR, 2013). O processo de cura é crítico para o desenvolvimento de propriedades importantes do concreto, como resistência à compressão e a rigidez.

A capacidade de monitorar o processo de cura do concreto, bem como as características de resistência e rigidez do concreto associadas, fornecerá aos engenheiros informações importantes sobre a construção (LIM et al., 2021). Existem várias técnicas não destrutivas para acompanhar o processo de cura de um concreto (AMANI; VIPULANANDAN; PLANK, 2020; SHA et al., 2021). Dentre essas medidas está a de impedância elétrica, como descrito a seguir.

2.6.5. Espectroscopia de impedância

A espectroscopia de impedância é uma técnica que caracteriza o comportamento elétrico de materiais, tanto no estado sólido, como no líquido. O modo utilizado para essa caracterização consiste em inserir a amostra do material em estudo entre dois eletrodos, com aplicação de um estímulo elétrico (CHINAGLIA et al., 2008).

A técnica de impedância possibilita a obtenção de resultados que podem ser relacionados com as propriedades dielétricas, efeitos de polarização, defeitos, microestrutura e condutividade em sólidos, por meio de termos que envolvem variáveis complexas. Esses dados são possíveis através de medidas elétricas em corrente alternada (AC) dentro de uma faixa de frequência entre 10^{-4} Hz e 10^7 Hz (FAZZAN et al., 2018).

Recentemente, a espectroscopia de impedância eletroquímica como método de detecção não destrutiva vem chamando atenção para uma gama mais ampla de aplicações. No campo da engenharia civil, a espectroscopia de impedância eletroquímica foi usada principalmente para avaliar o comportamento em relação à corrosão de armaduras (CARNOT et al., 2003; XU; JIANG; WANG, 2009), para carbonatação do concreto (DONG et al., 2014), e transformações de íons em materiais cimentícios (AKHAVAN; RAJABIPOUR, 2013; HAMAMI; LOCHE; AÏT-MOKHTAR, 2011). Alguns pesquisadores também usaram esta técnica para estudar o comportamento da secagem do cimento (TAM; TAM; NG, 2012; EID et al., 2015).

2.6.6. Espectroscopia de impedância elétrica

A espectroscopia de impedância é uma técnica experimental utilizada no estudo de materiais ou, mais geralmente, no comportamento elétrico de um sistema em análise (RECH; PEROTTONI, 2018; BARSOUKOV; MACDONALD, 2005; CHRISTENSEN, 1994). Nesta técnica, o sistema em estudo é submetido a um potencial elétrico variável no tempo e são medidas a magnitude e a fase da corrente resultante, permitindo o cálculo da impedância do sistema. Este processo é então repetido varrendo a frequência de oscilação do potencial elétrico, permitindo assim determinar a fase e a magnitude da impedância do sistema em função da frequência. Atualmente, essa técnica utiliza analisadores de impedância capazes de varrer frequências em várias ordens de magnitude em segundos. Assim, ambas as respostas, lenta e a rápida, do sistema podem ser observadas nas extremidades de baixa e alta frequência do espectro de impedância, respectivamente. Embora a espectroscopia de impedância seja uma técnica relativamente simples e rápida, a interpretação dos resultados não é direta. A interpretação do espectro de impedância de um material dielétrico baseia-se na proposta de um circuito equivalente, no número e na natureza de seus elementos, variando de acordo com as condições experimentais particulares e a composição e microestrutura das amostras (RECH; PEROTTONI, 2018).

Em um trabalho de Cabeza et al. (2002), uma análise de impedância diferencial foi aplicada ao estudo das propriedades dielétricas de pastas de cimento Portland endurecido. Duas constantes de tempo foram encontradas nos espectros de impedância obtidos, na região de frequência de 100 kHz a 15 MHz. Uma constante de tempo foi atribuída à matriz sólida e a outra à fase líquida preenchendo os poros. O efeito da interface pasta-eletrodos de cimento foi quantificado usando duas configurações experimentais diferentes e a influência da secagem nos parâmetros dielétricos também foi estudada. Este procedimento permitiu obter a

capacitância dielétrica da pasta de cimento, livre de contribuições da fase líquida e, assim, abrir caminho para a determinação elétrica da porosidade.

No artigo de Díaz et al. (2008), amostras de argamassas saturadas com diferentes soluções (água deionizada, NaCl 0,5 M e NaCl 1 M) foram estudadas para quantificar as alterações microestruturais induzidas pelo intemperismo no concreto, em soluções quase neutras contendo cloretos. O estudo é baseado em técnicas físicas e eletroquímicas. A lixiviação de Portlandita tende a aumentar a porosidade. No entanto, o processo de lixiviação para soluções quase neutras faz com que a resistividade aumente. A presença de cloretos induz a formação de sal de Friedel, um processo lento associado ao desenvolvimento de poros de pequeno tamanho (em torno de 10 nm). A espectroscopia de impedância na faixa de frequência de 10^{-2} a 10^2 MHz foi empregada com sucesso para acompanhar a formação de sal de Friedel e o desenvolvimento da rede de poros em argamassas.

No trabalho de Dey, Ganguli e Bhattacharjee (2019), é mencionado que a relação entre as propriedades elétricas e o grau de saturação de umidade (DoS), em materiais à base de cimento é um tópico de interesse, no que diz respeito à durabilidade do material. Neste artigo, uma abordagem baseada em impedância é apresentada para caracterizar as propriedades elétricas como uma função de DoS, usando uma instrumentação simplificada e uma nova técnica de medição. A variação das partes real e imaginária da impedância é investigada para condições saturadas e parcialmente saturadas em radiofrequências eletromagnéticas entre 100–500 kHz. Foram usadas amostras na forma de prisma, de argamassa com relações água/cimento (a/c) de 0,60 e 0,70. Um modelo de circuito foi proposto para explicar o comportamento e calcular a condutividade e permissividade em massa para vários graus de saturação. O volume a condutividade do material seguiu um padrão sistemático para vários DoS e em diferentes frequências de excitação, o que facilitou o estabelecimento de uma relação quantitativa empírica entre a condutividade e o DoS. Os autores observaram que a variação da condutividade entre as amostras, e para várias frequências, não é muito alta e seguem algumas tendências sistemáticas. Esse comportamento permitiu formular uma correlação entre a condutividade e o DoS e, conseqüentemente, foi estabelecida uma relação empírica entre essas duas grandezas. Essa relação facilitou a determinação da condutividade do DoS e, inversamente, do DoS dos valores de condutividade conhecidos, o que tem implicações práticas.

Em outro artigo de Dey (2020), a resposta elétrica da pasta de cimento endurecida foi investigada por excitação por radiofrequência. Foram usadas amostras de pasta de cimento com relação água/cimento (a/c) de 0,40 e 0,45 e as amostras foram condicionadas a diferentes

DoS. Usando um modelo de circuito simplificado, os valores de condutividade em massa para vários DoS são estimados, os quais seguem um padrão sistemático para vários DoS e em diferentes frequências de excitação. Isso possibilitou o estabelecimento de uma relação quantitativa empírica entre a condutividade e o DoS da pasta de cimento.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo serão descritos os materiais utilizados. A preparação dos corpos de prova (CPs) e as técnicas de caracterização empregadas nas análises dos materiais e dos corpos de prova.

3.1. MATERIAIS

Nas composições dos concretos ensaiados os materiais utilizados foram: cimento, agregado graúdo (de massa específica normal – 1500 a 1800 kg/m³), agregado miúdo (areia) e água, aditivo superplastificante, além do aditivo compensador de retração (CR).

3.1.1. Cimento

O tipo de cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial - CP V-ARI da marca Itambé Cimentos, tipo mais utilizado pelas empresas de pré-fabricados e também por apresentar menor teor de adições minerais na sua composição, fabricado a partir de clínquer, gesso e material carbonático (90 a 95 % de clínquer). As propriedades físicas e químicas do cimento encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise química do cimento CP V - ARI.

Materiais e propriedades		Resultados (% em massa)
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	4,38
Dióxido de silício	SiO ₂	19,09
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,87
Óxido de cálcio	CaO	62,24
Óxido de magnésio	MgO	3,24
Anidrido sulfúrico	SO ₃	2,73
Perda ao fogo	PF	3,57
CaO livre	--	1,08
Resíduo insolúvel	RI	0,77
Massa específica (g/cm ³)	--	3,09

Fonte: Itambé Cimentos (2020).

3.1.2. Agregados

O agregado graúdo utilizado na pesquisa é proveniente de empresa de mineração da cidade de Flores da Cunha/RS e como agregado miúdo foi utilizado areia média de uma empresa de Sapucaia do Sul/RS e areia fina oriunda de uma jazida de Osório/RS. Foram utilizados como agregado miúdo areia natural e como agregado graúdo brita basáltica com classificação comercial de pedrisco ou brita 0 (dimensão máxima). Todos os classificados quanto:

- a) Composição granulométrica e módulo de finura: Obtida pela norma ABNT NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (2003);
- b) Massa específica: Obtida pela norma ABNT NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (2009) e ABNT NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica aparente e absorção de água (2009).

3.1.3. Aditivos

Foram utilizados dois tipos de aditivos: um aditivo superplastificante e um aditivo compensador de retração.

O aditivo superplastificante usado foi da marca Camargo Química, da linha CQ Flow 18 - superplastificante tipo SP-II. Essa linha é composta por aditivos superplastificantes de terceira geração, à base de policarboxilato e totalmente isentos de cloretos. O produto tem uma aparência de um líquido amarelado, com uma densidade 1,05 a 1,07 g/cm³ e um pH que

varia de 4,5 a 6,5. O uso deste aditivo tem diversas vantagens como aumentar a resistência à compressão e à flexão, além de diminuir a permeabilidade e aumentar a durabilidade dos concretos. Esses benefícios vêm, principalmente, da grande redução da quantidade de água de amassamento necessária.

Já o aditivo compensador de retração utilizado foi da marca Chimica Edile do Brasil, linha DRY D1 “NG”. Esse produto é um óxido de cálcio tratado termicamente, inorgânico, em pó e é isento de cloretos. A temperatura de queima, indicada pela empresa, está em uma ampla faixa entre 900 °C e 1400 °C. Em conjunto com os outros componentes do concreto, o compensador de retração diminui a porosidade do concreto, aumenta as ligações entre os agregados e o aglomerante, além de eliminar a fissuração. Uma amostra do pó solto foi caracterizada por fluorescência de raios X. A análise química semiquantitativa total foi realizada em espectrômetro de fluorescência de raios X (Panalytical, Axios Max) do LAMIR (Laboratório de Análises de Minerais e Rochas). Os resultados obtidos são em base seca e indicados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química do composto compensador de retração comercial, normalizado para 100 % em base seca.

Materiais		Conteúdo (% em peso)
Óxido de cálcio	CaO	97,14
Dióxido de silício	SiO ₂	1,00
Óxido de magnésio	MgO	1,00
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	0,23
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	0,12
Óxido de potássio	K ₂ O	0,12
Anídrico sulfúrico	SO ₃	0,12
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	<0,12
Óxido de estrôncio	SrO	<0,12

Fonte: A Autora (2022).

3.2. DOSAGEM DO TRAÇO

Nesta etapa foi realizado o estudo da dosagem do concreto autoadensável (CAA) empregado na pesquisa. A dosagem foi baseada no método de Gomes (apud Souza, 2016), com um traço piloto apresentado na Tabela 10. Os outros dois traços foram elaborados variando a proporção de aditivo compensador de retração: o primeiro com a porcentagem

recomendada pela empresa fabricante e o segundo conforme Souza (2016), ambas as porcentagens em relação a massa de cimento, conforme Tabela 11.

Tabela 10 - Traço piloto de CAA.

Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo superplastificante (kg/m ³)
344,1	302,1	453,2	1024,3	195,4	1,70

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 11 - Traços das amostras.

Nomenclatura	Proporção em massa						
	Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo superplastificante (kg/m ³)	Aditivo CR (kg/m ³)
Ref.	1	0,88	1,32	2,98	0,57	0,50%	-
CR 2,8%	1	0,88	1,32	2,98	0,57	0,50%	2,80%
CR 3,8%	1	0,88	1,32	2,98	0,57	0,50%	3,80%

Fonte: A Autora (2021).

3.3. ENSAIOS COM O CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os ensaios realizados para verificação das características do estado fresco do concreto, com a adição do aditivo compensador de retração.

3.3.1. *Slump test*

O ensaio do *slump test* foi realizado sem a adição do aditivo superplastificante, para verificar se a adição do CR alteraria o abatimento antes da adição do superplastificante. O ensaio seguiu a ABNT NBR 16889 (2020), conforme Figura 16. A base e o cone metálicos foram colocados em uma superfície rígida e plana. O cone foi preenchido com o concreto de cada traço, em três camadas e a cada camada o concreto foi adensado com 25 golpes com a haste, distribuídos de forma uniforme. No bocal do cone foi feito o rasamento com a colher de pedreiro e após o cone foi retirado de forma vertical levando um tempo de 4 a 6 segundos. Após, foi realizada a medida de abatimento para cada traço.

Figura 16 - Medição do abatimento do concreto.



Fonte: A Autora (2021).

Para determinar as propriedades do estado fresco do CAA com a adição de CR, foram realizados dois ensaios: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams e determinação da habilidade passante – Método da caixa L.

3.3.2. Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams

A determinação do espalhamento e do tempo de escoamento seguiu a norma NBR 15823-2 (2017). A base e o cone utilizados foram os mesmos que no *slump test*. O cone foi totalmente preenchido de concreto, agora já com a adição do aditivo superplastificante, tornando o concreto auto adensável (CAA). O adensamento do concreto foi realizado apenas pela força da gravidade, sem nenhum tipo de compactação. Após, o cone foi retirado, o concreto sofreu o espalhamento e as propriedades de fluidez, viscosidade e estabilidade visual foram analisadas (Figura 17). Para cada traço o tempo de mistura foi de 15 minutos.

Figura 17 - Espalhamento do CAA.



Fonte: A Autora (2021).

3.3.3. Determinação da habilidade passante - Método da caixa “L”

Foi utilizado o método da caixa L para determinar a habilidade de passagem do CAA por armaduras em seu estado fresco. A mistura foi despejada no recipiente vertical do sistema e em seguida foi retirada a tampa móvel situada na parte inferior, fazendo o concreto escoar (Figura 18).

As alturas na porção horizontal (H2) da forma e da vertical (H1) foram registradas, assim como o tempo resultante do escoamento.

Figura 18 - Habilidade de passagem do CAA por armaduras.



Fonte: A Autora (2021).

3.4. MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1. Moldagem e cura dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados 27 CPs cilíndricos de 100 x 200 mm. Para a análise por impedância elétrica, foram moldados 9 CPs cilíndricos de 100 x 100 mm. Além destes, foram moldados mais 9 CPs prismáticos de 75 x 75 x 285 mm para o ensaio de retração. Para a análise do módulo de Young, foram moldados 3 CPs prismáticos em tamanho de 200 x 200 x 200 mm e após, de cada CP foram recortados, com serra mármore, 3 amostras cilíndricas menores de 100 x 15 x 15 mm, totalizando 9 CPs. Todos os ensaios foram realizados em triplicata para garantir a média dos resultados. A Tabela 12 resume os corpos de prova moldados para cada concreto e para cada ensaio. Esses corpos de prova foram preparados adaptando a norma NBR 5738 (2015).

Tabela 12 - Amostragem para cada composição.

Ensaio	Ref.	CR	CR	Idade do ensaio (dias)	Tipo de corpo de prova (mm)
		2,8%	3,8%		
		Nº de CPs			
Resistência à compressão	9	9	9	3, 7 e 28	Cilíndrico – 100 x 200
Retração	3	3	3	1, 2, 3, 7, 28 e 56	Prismático – 75 x 75 x 285
Espectroscopia de impedância	3	3	3	1, 2, 7, 33 e 56	Cilíndrico – 100 x 100
Módulo de Young	3	3	3	56	Prismático – 15 x 15 x 100

Fonte: A Autora (2021).

3.5. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO À COMPRESSÃO

Os corpos de prova para ensaio de compressão foram moldados no Laboratório de Tecnologia Construtiva da UCS (LBTEC). Os moldes utilizados foram os cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. Cada lote foi composto de 9 CPs, sendo os CPs 1 ao 9 as amostras de referência; no segundo lote de amostras, numerados de 10 a 18, foi acrescentada uma porcentagem de CR de 2,80 % e para o terceiro lote, numerados de 19 a 27, uma porcentagem maior de CR de 3,80 % (Figura 19). Em todos os moldes foi utilizado óleo desmoldante para revestir.

Figura 19 - Corpos de prova para ensaio de compressão.



Fonte: A Autora (2021).

Todos os CPs foram moldados em uma camada e no final o concreto foi acomodado com seis golpes com uma haste metálica de diâmetro 16 mm e com 600 mm de comprimento, após ainda foi realizado o rasamento com uma colher de pedreiro. Os CPs já moldados, ficaram por 24 horas em temperatura ambiente no laboratório. Após este período, todos os CPs foram colocados em um tanque com água, para serem curados através do procedimento de cura úmida (imersão em água). A retirada dos corpos de prova do tanque com água foi realizada na data de cada ensaio. O ensaio de compressão foi realizado em uma prensa da marca EMIC, modelo PC200, com capacidade nominal do equipamento de 2000 kN e com acionamento hidráulico através de bomba elétrica. Os ensaios aconteceram em três etapas: 3, 7 e 28 dias após a moldagem.

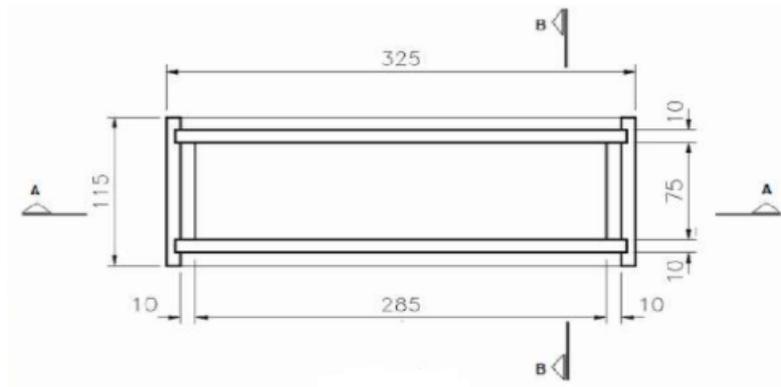
3.6. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DO MÓDULO DE YOUNG

Os corpos de prova para o ensaio do módulo de elasticidade foram moldados em três formas com dimensões de 200 x 200 x 200 mm. Entretanto, o equipamento utilizado para realizar a medida – Sonelastic Suporte SB-A – permite corpos de prova de pequeno porte no formato de discos, anéis, barras retangulares e cilíndricas. Por isso, as amostras foram cortadas com uma serra mármore, conforme dimensão recomendada, em formato de barra retangular de 15 x 15 x 100 mm (L x A x C).

3.7. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE RETRAÇÃO

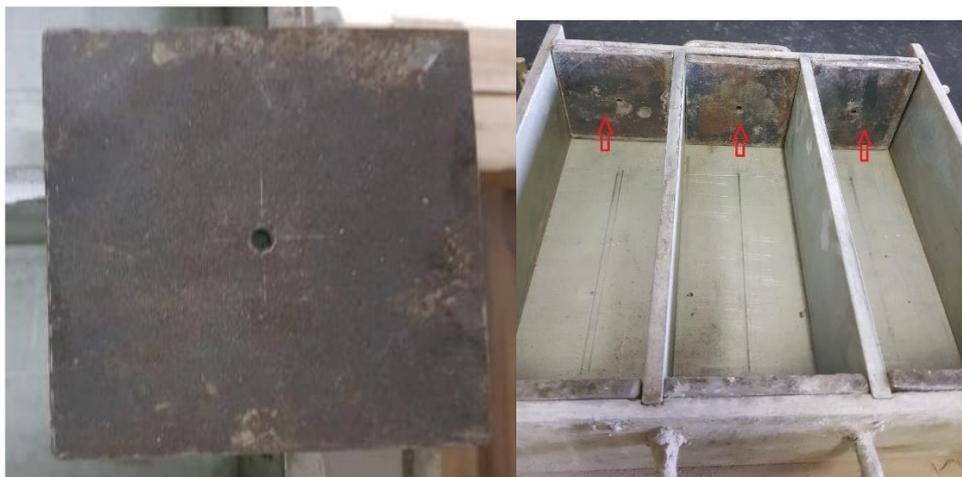
Foram utilizadas formas metálicas emprestadas pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM. Antes da moldagem, os moldes foram preparados. A primeira etapa foi rosquear o pino de medida simetricamente na placa metálica que fica alocada dentro do molde de forma alinhada e coincidente com o eixo do CP (Figura 20 e Figura 21). Em seguida, foi passado óleo desmoldante em toda forma metálica, tomando o cuidado de não revestir a parte livre do pino de medida, pois é essa parte que fica em contato com o concreto. Se o pino for besuntado com o óleo desmoldante, pode não aderir ao CP de concreto e o ensaio ser invalidado. Após isso, foi feita a leitura do comprimento efetivo (C_e) com um paquímetro de cada CP.

Figura 20 - Molde em planta com medidas em milímetros.



Fonte: ABNT NBR 16834 (2020).

Figura 21 - Moldes e placas metálicas.



Fonte: A Autora (2021).

Em cada forma, 3 CPs foram moldados seguindo a ordem da execução dos CPs no seguinte formato: 3 CPs, numerados de 1 a 3, amostras de referência; no segundo lote de amostras, numerados de 4 a 6, foi acrescentada uma porcentagem de CR de 2,80 % e para o terceiro lote, numerados de 7 a 9, uma porcentagem maior de CR de 3,80 %. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de retração foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM e podem ser vistos na Figura 22. Todos os CPs, por possuírem o aditivo superplastificante na sua composição, não necessitaram de adensamento, conforme NBR 16834. Após a última camada, foi realizado o rasamento com uma colher de pedreiro.

Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de retração.



Fonte: A Autora (2021).

Os CPs foram mantidos no laboratório da UFSM a temperatura de 23 °C e umidade relativa de 55 %. Para não ocorrer perdas de umidade, os moldes foram embalados em plástico filme nas primeiras 24 horas (Figura 23).

Figura 23 - Corpos de prova embalados com filme plástico.



Fonte: A Autora (2021).

3.8. CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

Os moldes dos CPs foram confeccionados com tubos de PVC de 100 mm de diâmetro com 100 mm de altura (Figura 24). Para fechar a parte inferior do CP foi utilizado um *cap* também de 100 mm de diâmetro. O tubo foi cortado na lateral para facilitar a desmoldagem do CP.

Figura 24 - Molde do corpo de prova em PVC.

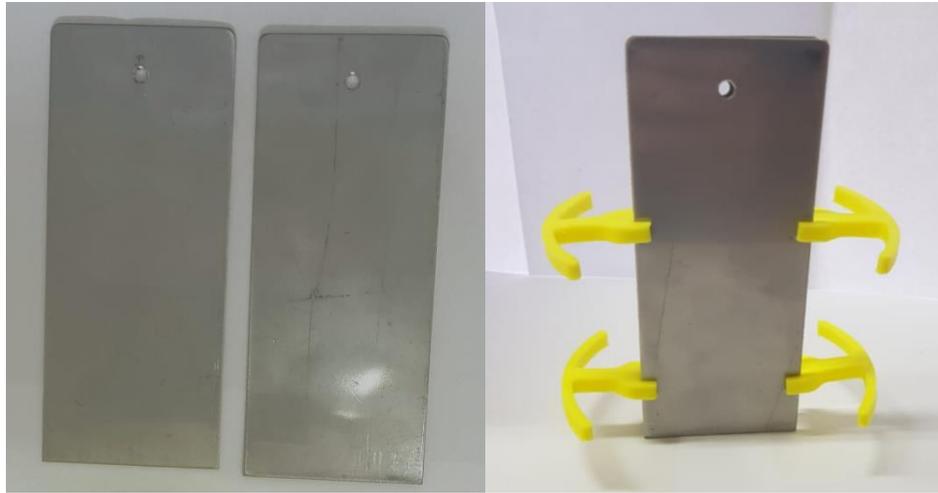


Fonte: A Autora (2021).

Duas placas de aço inoxidável AISI 304, 12 cm (altura) x 5 cm (largura) x 1,5 mm (espessura), foram inseridas verticalmente no tubo de PVC. Um orifício de 5 mm de diâmetro foi perfurado próximo ao topo de cada placa de aço para aparafusar os fios de

cobre para conectar eletricamente os eletrodos de aço ao analisador de impedância (Figura 25).

Figura 25 – Placas de aço inoxidável 304, usadas como eletrodos.



Fonte: A Autora (2021).

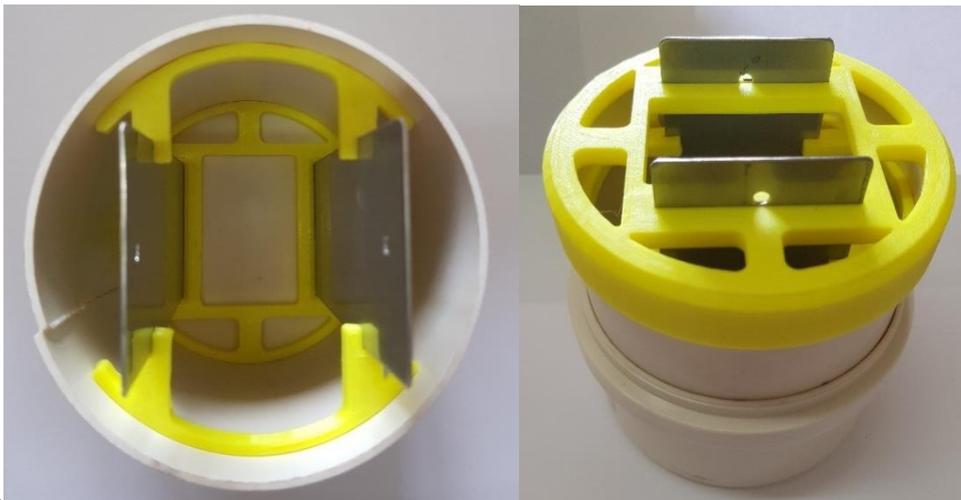
O paralelismo das placas e o espaçamento de 5 cm entre elas foi mantido com peças guia fabricadas com um filamento comercial de PLA (ácido polilático) em uma impressora 3D modelo RepRap Graber i3 (3D *desktop* e impressora *open-source*), controlada por Arduino. Uma peça de base foi inserida no fundo do tubo de PVC e duas peças intermediárias foram utilizadas para melhorar o posicionamento das placas metálicas. Para garantir o total paralelismo da montagem dos eletrodos, foi adicionada uma tampa superior com duas fendas para os eletrodos, conforme mostrado nas Figuras 26 e 27. Os arquivos STL usados para imprimir essas peças 3D podem ser baixados da referência Thingiverse (2022).

Figura 26 - Peças utilizadas na montagem do molde para os CPs.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 27 – Montagem do molde para os CPs.



Fonte: A Autora (2021).

A moldagem dos CPs para as medidas de impedância foi realizada no laboratório da empresa Concretos Florense (Figura 28). O tubo de PVC, a base e a tampa superior foram revestidas com óleo desmoldante. Os CPs não necessitaram de vibração ou golpes com haste, pois com o aditivo superplastificante houve acomodação imediata do concreto.

Figura 28 - Corpos de prova moldados.



Fonte: A Autora (2021).

Os CPs ficaram em processo de cura em temperatura ambiente no laboratório durante 24 horas. Em seguida todos foram desmoldados e transportados até o Laboratório de Física da UCS, onde as medições de impedância elétrica foram realizadas. Após, os CPs foram fechados em uma caixa plástica com tampa e com água no fundo para manter a umidade relativa aproximadamente em 100 % (Figura 29). A cada medida realizada, os CPs eram retirados do recipiente, realizada a medição e devolvidos à caixa com água. Foram realizadas medidas após 1, 2, 7, 33 e 56 dias após a data de moldagem.

Figura 29 - Caixa com água com CPs armazenados.



Fonte: A Autora (2021).

3.9. CORPOS DE PROVA PARA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As amostras para a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foram retiradas dos CPs do ensaio não-

destrutivo do módulo de Young, através do corte com uma serra diamantada, da marca Buehler, em uma cortadeira modelo Isomet 1000 precision saw (Figura 30). Foram cortadas duas amostras para cada traço com dimensões de 15 x 15 mm, com espessura variando de 2,5 a 4 mm. Após, as superfícies das amostras foram lixadas com uma lixa 1000 e, em seguida foi dado o acabamento final com lixa 2000.

Figura 30 – Montagem para o corte das amostras para análises por MEV e EDS.



Fonte: A Autora (2021).

4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA

4.1. MEDIDAS POR ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi realizado em uma prensa da marca EMIC, modelo P.C. 200, com capacidade nominal do equipamento de 2000 kN e com acionamento é hidráulico através de bomba elétrica, no LBTEC da UCS. As faces dos corpos de prova foram retificadas com o objetivo de regularização da superfície. O carregamento do ensaio ocorreu a uma velocidade constante de 0,50 MPa/s, conforme a norma NBR 5739 (2018) (Figura 31). Os ensaios aconteceram em três etapas: 3, 7 e 28 dias e em cada data foram ensaiados nove CPs, sendo três para cada traço na com os dias determinados.

Figura 31 - Corpos de prova capeados e o ensaio de compressão.



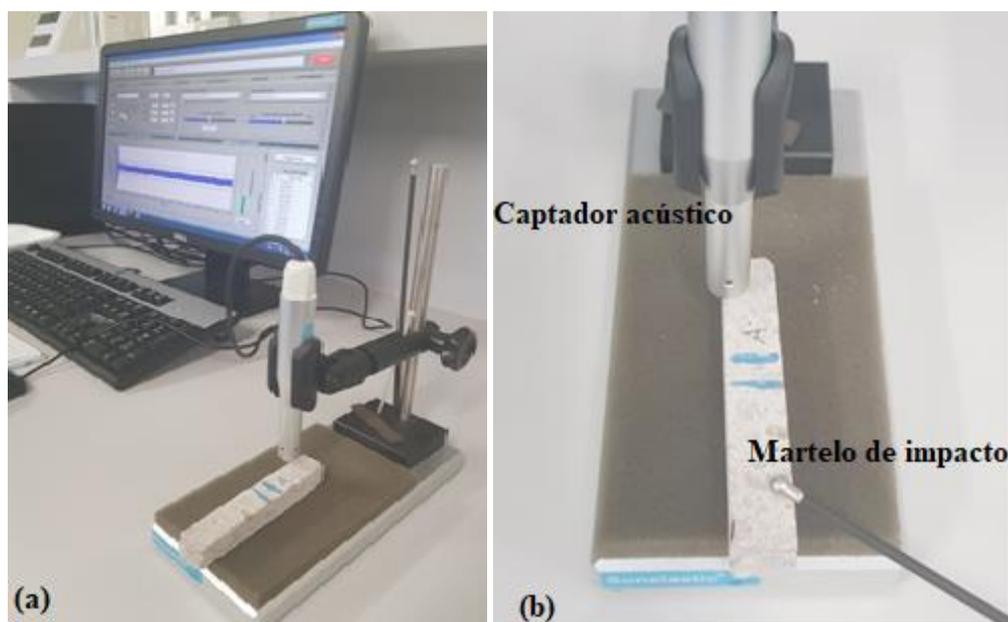
Fonte: A Autora (2021).

4.2. MEDIDAS POR ENSAIO MÓDULO DE YOUNG DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado pela técnica de excitação por impulso (ASTM E1876), em um equipamento de ensaio não destrutivo (SONELASTIC, 2017). O suporte SB-AP é um sistema mecânico empregado no apoio e posicionamento de corpos de prova para a medição de forma não-destrutiva dos módulos elásticos de materiais pela técnica de excitação por impulso. Este método é baseado na medição da frequência de ressonância. O arranjo de teste pode ser feito para vibração flexural, longitudinal ou torcional. Com em relação às dimensões dos corpos de prova, os testes foram feitos apenas na direção longitudinal.

O apoio utilizado para os CPs no equipamento é uma espuma de baixa densidade e cada CP foi apoiado no meio do seu vão (Figura 32). O captador acústico direcional CA-DP foi colocado na borda de uma das faces finais do corpo de prova (Figura 32 - face extrema direita). A face final da amostra, oposta à face onde o transdutor estava localizado, (Figura 32 - face da extremidade esquerda), foi atingida pelo martelo de impacto. Essa configuração permite a caracterização do módulo de Young (E).

Figura 32 – (a) Estação de medição *Front-end 3560-B-120* e o *software* de controle; (b) montagem no suporte SB-AP.



Fonte: A Autora (2021).

As amostras (Ref., CR 2,80% e CR 3,80%) foram deixadas em temperatura ambiente, até a análise ser realizada, após 56 dias de hidratação. No dia do ensaio, foi verificada a massa (g) de cada amostra, além das dimensões de comprimento, largura e altura. Os dados foram repassados para o *software* do Sonelastic. Três amostras de cada composição foram testadas. O teste foi repetido três vezes para cada amostra e foi realizada uma média das três leituras, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Dados dos corpos de prova.

	CP	Massa (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
Ref.	I A	56,6907	99,54	17,22	15,94
	I B	59,2838	99,43	17,13	16,03
	I C	56,9418	99,41	17,20	16,92
CR 2,80%	II A	62,3480	99,96	16,51	16,28
	II B	60,4188	99,87	17,15	16,80
	II C	59,6195	99,96	16,94	16,33
CR 3,80%	III A	60,8264	100,16	17,51	17,12
	III B	58,0616	100,29	17,52	16,74
	III C	62,4092	100,09	17,21	17,09

Fonte: A Autora (2021).

4.3. MEDIDAS POR ENSAIO DE RETRAÇÃO

O ensaio de retração foi realizado na UFSM, em um equipamento comparador mecânico horizontal digital, fabricado por Mitutoyo Instrumentos de medição, com precisão 0,001 mm (Figura 33). O ensaio seguiu a norma NBR 16834 (2020). Antes da moldagem dos CPs, foi feita a leitura do comprimento efetivo (C_e) entre as extremidades internas dos pinos do molde.

Figura 33 - Comparador mecânico horizontal digital.



Fonte: A Autora (2021).

Logo após a desforma, os CPs foram identificados com a seguinte numeração: 1A, 1B, 1C para os CPs referência; 2A, 2B, 2C para os CPs com 2,8 % de aditivo compensador de retração e 3A, 3B, 3C para os CPs com 3,8 % de aditivo compensador de retração. Além dessa identificação, também foi marcado um lado de cada CP para colocá-los sempre na mesma posição no aparelho comparador. Antes de cada série de leitura, a barra-padrão foi colocada no aparelho e sua leitura zerada. Após 24 horas foi realizada a leitura inicial (e registrado os valores obtidos. As demais leituras foram feitas em 2, 3, 7, 28 e 56 dias.

A variação dimensional de cada CP foi calculada através da equação:

$$\Delta L_i = \frac{L_i - L_0}{C_e} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

ΔL_i é a variação dimensional na idade “i”, expressa em porcentagem (%);

L_i é a leitura efetuada na idade “i”, expressa em milímetros (mm);

L_0 é a leitura inicial, expressa em milímetros (mm);

C_e é o comprimento efetivo, expresso em milímetros (mm).

4.4. MEDIDAS POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

O acompanhamento do processo de cura foi realizado utilizando espectroscopia de impedância elétrica. A impedância elétrica é uma propriedade análoga à resistência, estendida a valores complexos, oriundos de correntes e potenciais oscilatórios (RECH, 2016).

Em um experimento de espectroscopia de impedância, uma diferença de potencial é aplicada entre os eletrodos da amostra. Nesta expressão, ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência em Hz) e A é a amplitude do sinal. Sob a ação desta diferença de potencial, uma corrente circula pelo sistema, com uma diferença de fase φ em relação a $V(t)$, conforme representado na Figura 34.

A impedância complexa Z^* da amostra é dada por

$$Z^* = |Z|e^{-i\varphi} \quad (2)$$

$$= |Z| \cos \varphi - i|Z| \sin \varphi \quad (3)$$

$$= Z' - i Z'' \quad (4)$$

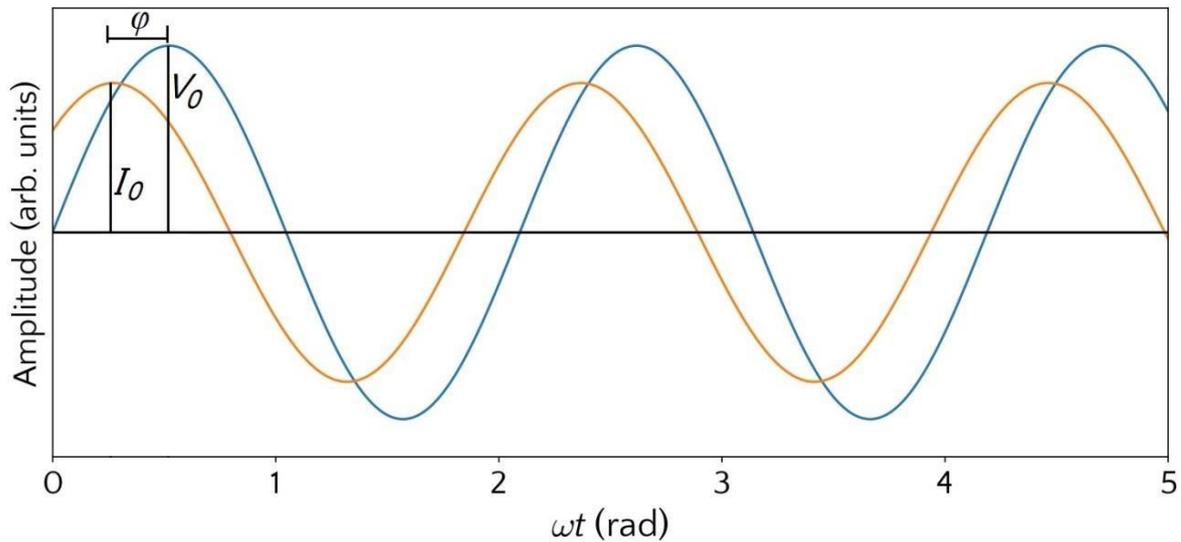
onde Z' e Z'' são as partes real e imaginária da impedância complexa, respectivamente. Por sua vez, o módulo da impedância da amostra é dado por

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (5)$$

e

$$\tan \varphi = \frac{Z''}{Z'} \quad (6)$$

Figura 34 - Evolução temporal típica de tensão (estímulo para o sistema) e corrente (quantidade medida) em um experimento EIS. V_0 e I_0 são as amplitudes da tensão aplicada e da corrente do circuito, respectivamente, e φ é a diferença de fase entre a tensão e a corrente.

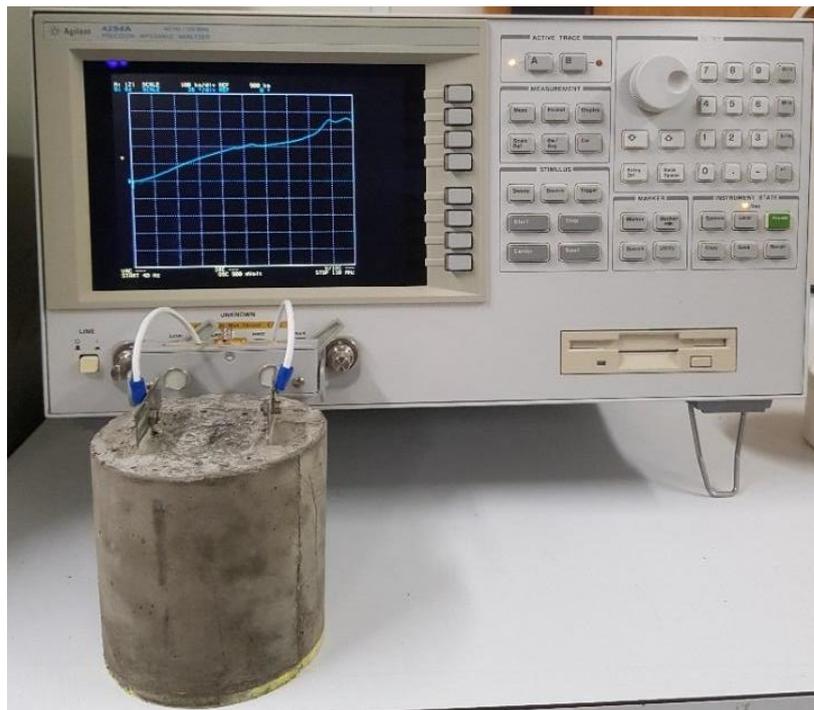


Fonte: A Autora (2021).

Os resultados dos experimentos EIS são geralmente expressos pela plotagem de $-Z''(\omega)$ versus $Z'(\omega)$, também conhecido como gráfico Cole-Cole (CHINAGLIA et al., 2008). Uma medição anterior de uma "amostra em branco" consistindo em tubo de PVC com os eletrodos, mas sem concreto/argamassa (ou seja, o conjunto de medição sem amostra), permite compensar contribuições espúrias para a impedância elétrica. A configuração experimental para análise EIS é representada na Figura 35. A montagem do experimento foi realizada da seguinte forma: os eletrodos de aço inoxidável foram fixados nas laterais do corpo de prova (distância fixa de 5 cm) em temperatura ambiente.

O equipamento utilizado para as medidas de impedância foi um Precision Impedance Analyzer, de 40 Hz a 110 MHz, marca Agilent, modelo 4294 A, com acessório 16047E (DC de 40 Hz a 110 MHz). Este acessório faz a conexão entre o analisador de impedância e os cabos ligados aos eletrodos na amostra.

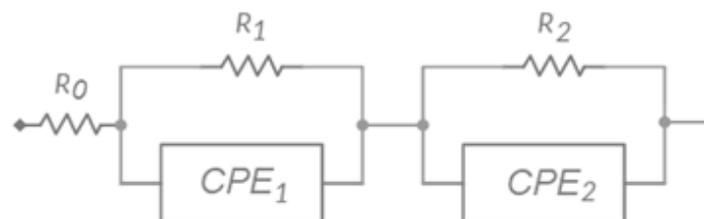
Figura 35 - Montagem do experimento para as medidas de impedância elétrica.



Fonte: A Autora (2021).

Após a compensação da influência da geometria e do equipamento, um modelo de circuito equivalente foi ajustado aos valores da impedância imaginária *versus* impedância real. Foi utilizado um circuito equivalente, representado na Figura 36, que é composto pelos resistores R_0 , R_1 e R_2 e “elementos de fase constante” (CPE), com componente de capacitância e fator de depressão do arco. Este circuito equivalente para amostras de argamassa/concreto pode ser interpretado em termos de uma “resistência de deslocamento aparente” (R_0) em série com um componente volumétrico (*bulk*) $R_1//CPE_1$ e uma rede de eletrodos $R_2//CPE_2$. A resistência *bulk*, $R_b = R_0 + R_1$, é o parâmetro mais confiável para acompanhar a reação de cura (CHRISTENSEN, 1994 e Anexo 1).

Figura 36 - Modelo de circuito elétrico equivalente usado para interpretar resultados de medições de EIS em concreto.



Fonte: Adaptado de Christensen (1994).

Assumindo que o processo de cura é uma reação de primeira ordem (POPOVICS, 1967), a taxa de reação $d\alpha/dt$ é proporcional à fração não reagida ($1 - \alpha$),

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha), \quad (7)$$

onde α é uma medida do progresso da reação ($0 \leq \alpha \leq 1$), e k é a constante de reação, dada pela equação de Arrhenius,

$$k = A e^{\frac{-E}{RT}}, \quad (8)$$

onde A é o fator pré-exponencial, E é a energia de ativação da reação, R é a constante do gás ideal e T é a temperatura absoluta.

Resolvendo a equação diferencial por separação de variáveis obtemos

$$\alpha(t) = 1 - e^{-kT} \quad (9)$$

O progresso da reação de cura é obtido a partir da resistência a granel medida como,

$$\alpha(t) = \frac{R_b(t) - R_b(0)}{R_b(\infty) - R_b(0)} \quad (10)$$

onde $R_b(t)$ é a resistência do corpo da amostra no tempo t após a moldagem, e $R_b(0)$, $R_b(\infty)$ são os valores correspondentes logo após a moldagem e no limite $t \rightarrow \infty$, respectivamente. Assim, a variação da resistência do volume com o tempo, $R_b(t)$, é dada por

$$R_b(t) = R_b(0) + [R_b(\infty) - R_b(0)](1 - e^{-kT}) \quad (11)$$

A Equação (11) foi ajustada aos dados de $R_b(t)$, obtidos por espectroscopia de impedância, e o progresso da reação de cura foi então obtido a partir da Equação (10).

4.5. MEV e EDS

Amostras cortadas dos três tipos de corpos de prova (Ref., CR 2,8% e CR 3,8%) foram metalizadas com ouro e analisadas através de imagens obtidas por elétrons retroespalhados e secundários (BSE e SE), com 10 keV. Também foi feito mapeamento por EDS dos principais componentes da mistura, em um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo marca Tescan, modelo Vega 3, do LCMIC da UCS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo inicialmente é apresentada a caracterização dos agregados. Após são apresentados os resultados dos ensaios realizados, sendo: trabalhabilidade pelo *Slump Flow* e habilidade passante na caixa-L, para o concreto fresco, resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração, espectroscopia de impedância elétrica e mapeamento por EDS, para o concreto endurecido. São apresentados os resultados para cada ensaio e, então, subdividida a análise dos resultados em função de cada dosagem utilizada

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados da distribuição granulométrica estão registrados na Tabela 14. Os valores estão expressos em porcentagens individuais retidas e acumuladas no conjunto de peneiras da série normal especificadas na norma NM ISO 3310.

Tabela 14 - Distribuição granulométrica dos agregados.

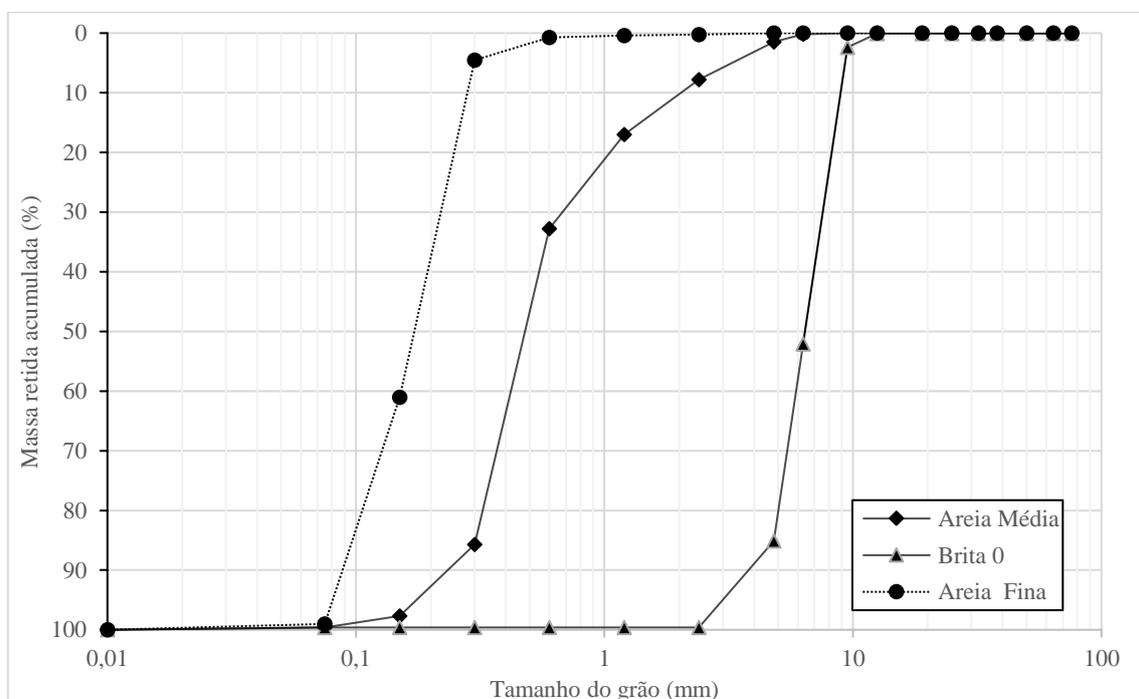
	Areia Fina			Areia Média			Brita 0		
	(g)	%Ret.	%Acum.	(g)	%Ret.	%Acum.	(g)	%Ret.	%Acum.
76	0	0,0	0,0	0	0	0	1,0	0,1	0
64	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
50	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
38	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
32	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
25	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
19	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
12,5	0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0
9,5	0	0,0	0,0	0	0	0	34,0	2,3	2
6,3	0	0,0	0,0	2	0	0	726,0	49,7	52
4,8	0	0,0	0,0	12	1	1	482,0	33,0	85
2,4	1,9	0,2	0,2	60	6	8	212,0	14,5	100
1,2	1,7	0,2	0,4	88	9	17	0,0	0,0	100
0,6	2,4	0,3	0,7	150	16	33	0,0	0,0	100
0,3	31,2	3,8	4,5	504	53	86	0,0	0,0	100
0,15	465,3	56,5	61,0	114	12	98	0,0	0,0	100
0,075	313,2	38,0	99,0	18	2	100	0,0	0,0	100
0,01	7,9	1,0	100,0	4	0	100	6,0	0,4	100
Total	823,47			952			1461		

Fonte: A Autora (2021).

Nos ensaios conforme as normas da ABNT NM 248, NM 52, NM 53 foram obtidas a distribuição granulométrica, a dimensão máxima característica e o módulo de finura, bem

como a massa específica aparente e unitária. Os resultados da distribuição granulométrica estão representados na Figura 37. A dimensão máxima, o módulo de finura, a massa específica aparente e a massa específica unitária das areias estão apresentadas na Tabela 15.

Figura 37 - Curva granulométrica dos agregados.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 15 - Resultados caracterização dos agregados

Agregado	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de finura	Massa específica aparente (g/cm ³)	Massa específica unitária (g/cm ³)
Areia Fina	0,3	0,67	2,62	1,71
Areia Média	4,8	2,42	2,60	1,67
Brita 0	9,5	5,86	2,54	1,62

Fonte: A Autora (2021).

O diâmetro da brita utilizada foi menor do que os traços usuais para concretos nessas características, pois um diâmetro elevado deste agregado poderia interferir no paralelismo das placas de aço inox utilizadas dentro dos moldes da análise de impedância.

5.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Todos os resultados dos três ensaios no estado fresco do concreto estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios com concreto fresco.

Nomenclatura	Abatimento (cm)	Espalhamento (cm)	Caixa - L		
			H1 (cm)	H2 (cm)	Tempo (s)
Ref.	5,5	61,0	9,0	6,0	23
CR 2,8%	5,5	63,0	7,7	5,5	22
CR 3,8%	5,5	64,0	8,0	6,2	23

Fonte: A Autora (2021).

O ensaio do *Slump Flow* (espalhamento), foi utilizado para verificar visualmente a existência da segregação do concreto, enquanto que a análise do tempo em que o concreto levou para abrir 50 cm (*Slump Flow T_{50 cm Test}*) verificou se a viscosidade do concreto estava baixa ou elevada. Para cada mistura foram realizados os ensaios de fluidez (espalhamento) para os tempos de 15 minutos de mistura, verificando a perda de fluidez durante esse período. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados da propriedade de do concreto.

Nomenclatura	Espalhamento (mm)	Tempo (s) <i>Slump Flow T_{50 cm Test}</i>	H2/H1
Ref.	610	1,80	0,69
CR 2,80%	630	1,70	0,71
CR 3,80%	640	1,50	0,78

Fonte: A Autora (2021).

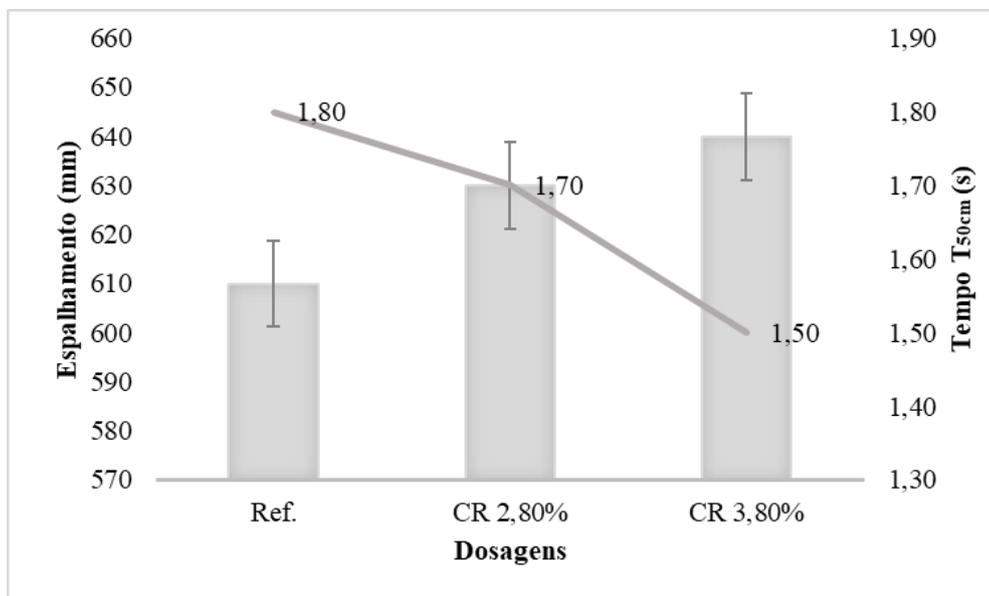
O diâmetro da abertura do espalhamento aumentou comparando a amostra de referência com as duas amostras com o aditivo compensador de retração, de forma crescente (Figura 38). O tempo de espalhamento de 50 cm do concreto diminuiu em relação à amostra de referência com as amostras com o aditivo, também de forma crescente. Já que quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento, a inserção do CR aumentou as propriedades de viscosidade e fluidez do material.

No ensaio da caixa L, todas as relações entre a altura horizontal e vertical, deram abaixo de 0,80. Além disso, em relação à aparência de segregação, não houve nenhuma evidência relatada, mas já na exsudação houve uma pequena alteração. A amostra que,

visualmente, apresenta uma maior exsudação é a amostra com teor de CR de 3,80 %, conforme a Figura 39. Esses resultados estão de acordo com a literatura (PAN et al., 2020; HAN; JIA; YAN, 2016; ZHAN; HE, 2019).

Na classificação conforme a NBR 15823-1, as dosagens foram classificadas como SF1 na fluidez e VS1 na viscosidade, além de PL1 na habilidade passante (caixa L). A amostra de referência foi classificada como IEV0 (sem evidência de segregação ou exsudação) e as amostras com compensador de retração como IEV1 (sem evidência de segregação e leve exsudação).

Figura 38 - Espalhamento para amostra de referência (Ref.), CR 2,8% e CR 3,8%. A linha contínua refere-se ao tempo (em segundos) para ocorrer o espalhamento.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 39 - (a) Espalhamento amostra de referência; (b) espalhamento amostra CR 2,80 %; (c) espalhamento amostra CR 3,80 %.



Fonte: A Autora (2021).

5.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

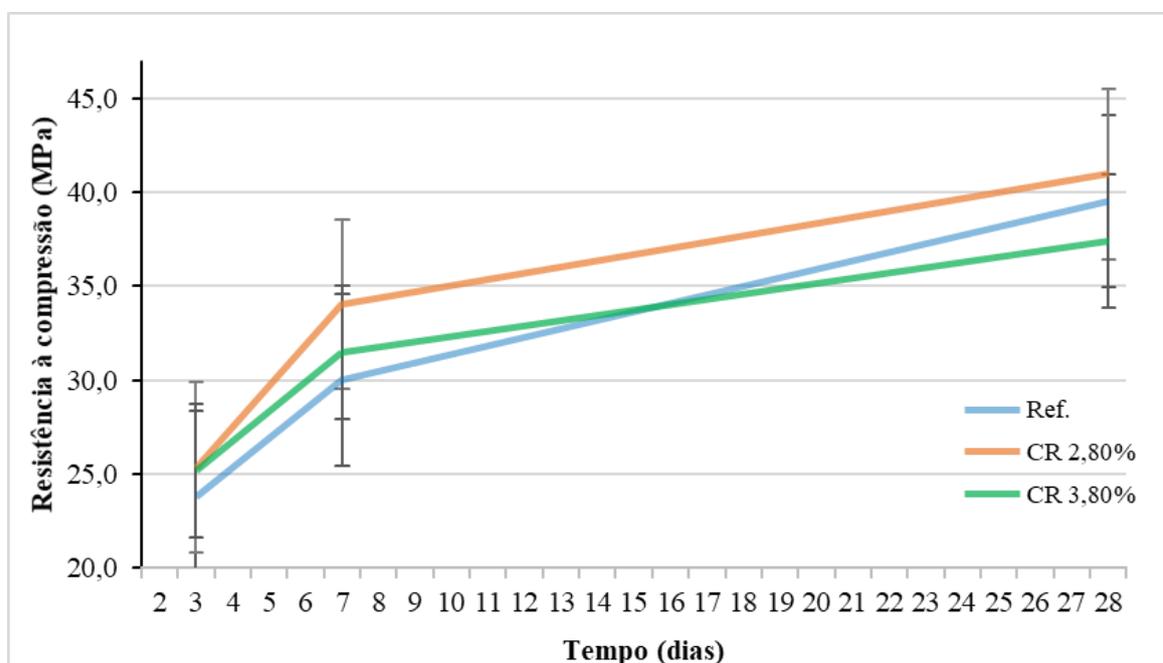
Para cada amostra foram realizados os ensaios de resistência à compressão para três corpos de prova na idade de 3, 7 e de 28 dias. Os resultados das médias avaliadas são apresentados na Tabela 19 e Figura 40. Com a incorporação do aditivo compensador de retração, o período de aceleração da hidratação ocorre após aproximadamente 18 horas, o que afeta negativamente a resistência mecânica nas primeiras 24 horas. Como a adição de CR atrasa o início do período de aceleração, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão também são influenciados, principalmente nos primeiros 3 dias de idade (SOUZA et al., 2020; KIOUMARSI et al., 2020).

Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão para todas as misturas.

Nomenclatura	Tempo (dias)										
	Ref.	3			Ref.	7			Ref.	28	
		2,80 %	3,80 %	3,80 %		2,80 %	3,80 %	2,80 %		3,80 %	
Resultados (MPa)	24,36	26,36	25,41	29,75	33,34	32,65	41,06	40,88	39,41		
	23,08	25,51	25,6	28,15	33,74	30,78	42,17	41,86	40,31		
	23,98	24,24	24,52	32,14	35,07	30,99	35,31	40,17	32,58		
Médias (MPa)	23,8	25,4	25,2	30,0	34,1	31,5	39,5	41,0	37,4		
Desvio Padrão	0,54	0,87	0,47	1,64	0,74	0,84	3,01	0,69	3,45		

Fonte: A Autora (2021).

Figura 40 - Gráfico com os resultados de resistência à compressão.



Fonte: A Autora (2021).

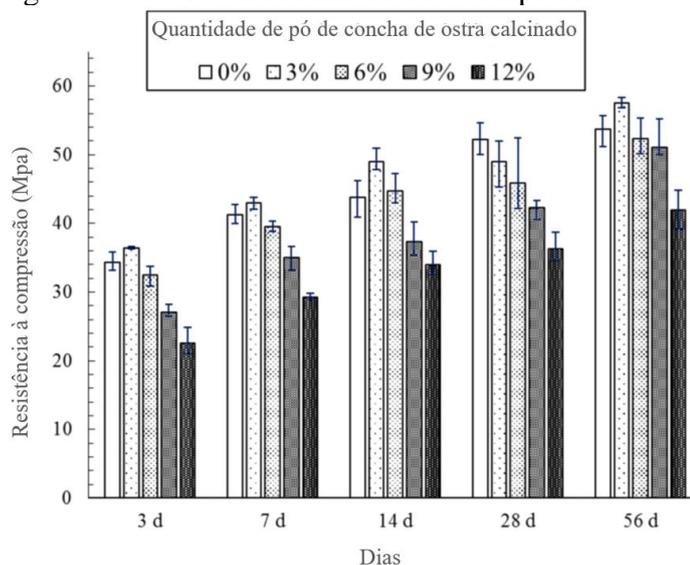
Em todas as idades, a adição de aditivo compensador de retração na porcentagem de 2,80 % contribuiu para um leve aumento na resistência à compressão das amostras. Comparada com a amostra de referência, a incorporação de 2,80 % de CR contribuiu positivamente para o desenvolvimento da força com a idade de cura. Amostras contendo 3,80 % de CR apresentaram resistências à compressão semelhantes à amostra de referência, mas aos 28 dias, a adição de 3,80 % teve um leve efeito negativo no desenvolvimento de resistência. A resistência à compressão dos corpos de prova incorporando 0 %, 2,80 % e 3,80 % CR aos 28 dias foi de 39,5 MPa, 41,0 MPa e 37,4 MPa, respectivamente. Esses resultados sugerem que a quantidade de CR incorporada deve

ser limitada a 2,80 % em relação a massa de cimento, considerando a trabalhabilidade do concreto e as propriedades mecânicas. No entanto, apenas amostras com 2,80 % de CR em sete dias tiveram uma diferença estatisticamente significativa das amostras de referência para um intervalo de confiança de 95 % (STATISTICS KINGDOM, 2022).

Os resultados obtidos concordam com o exposto por Seo et al. (2019). Nesse trabalho, o pó de conchas de ostras que foi usado como aditivo foi calcinado a 1000 °C. Como a temperatura de queima do aditivo utilizado neste trabalho está em uma ampla faixa de temperatura (900 a 1400 °C), podemos considerar que essa variação de temperatura pode ser responsável por os resultados não serem tão expressivos. A rigor, este material só pode ser considerado supercalcinado próximo ao limite superior de temperatura.

Nesse estudo a casca de ostra foi triturada e calcinada em um forno elétrico a 1000 °C por 3 horas, gerando um material com 98 % de óxido de cálcio, material esse com a composição muito parecida com o compensador utilizado nessa pesquisa. Como é possível visualizar na Figura 41, a quantidade de pó de concha de ostra incorporado, afetou o desenvolvimento da resistência à compressão da argamassa de cimento. A resistência à compressão da amostra incorporando 3% de pó de concha nas idades de 3 dias e 7 dias, exibiu um modesto aumento de resistência em comparação com a amostra de controle (amostra sem adição de pó de ostra), enquanto as amostras com uma incorporação maior do pó de ostra apresentaram uma diminuição notável na resistência em comparação com a do corpo de prova de referência. Esses resultados corroboram com os resultados da pesquisa com o óxido de cálcio supercalcinado.

Figura 41 - Resultados resistência à compressão.



Fonte: Adaptado Seo et al. (2019).

5.4. ENSAIO DE MÓDULO DE YOUNG

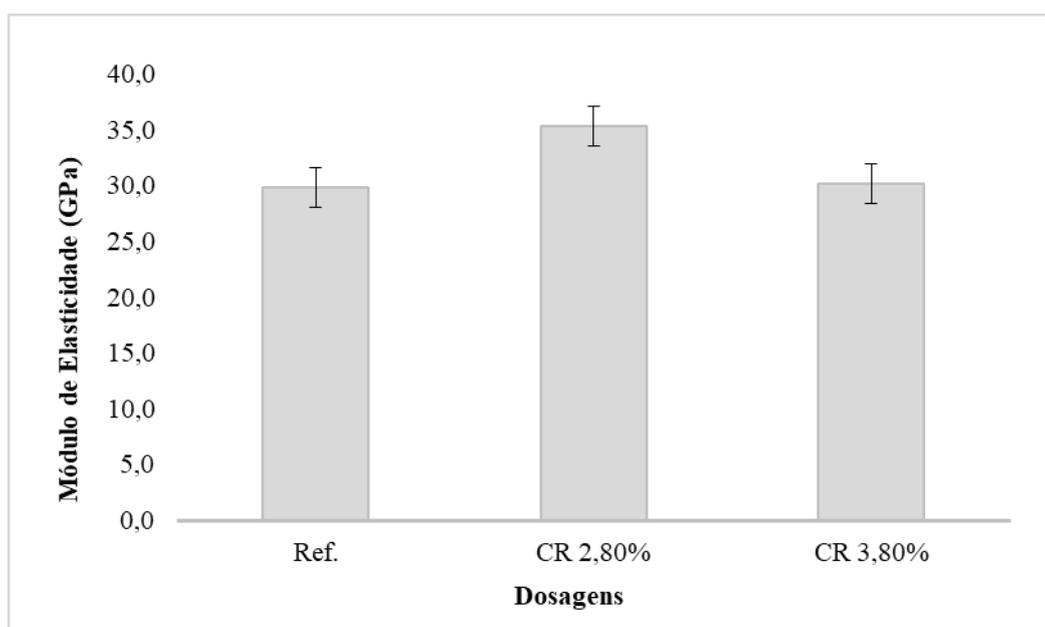
O módulo de elasticidade de concretos autoadensáveis, quando se leva em consideração a mesma quantidade de teor de argamassa na mistura, acabam sendo levemente superiores aos concretos convencionais devido a compactação e homogeneidade das misturas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015), espera-se, portanto, que o módulo de elasticidade das três dosagens esteja em torno de 25-30 GPa, considerando os valores típicos de aplicação no cálculo de estruturas. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 19 e Figura 42.

Tabela 19 - Resultados das medidas dos módulos de elasticidade.

CP	E (GPa)			Média parcial de E (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão
Ref.	1A	30,23	30,27	30,09	30,20	3,38
	1B	33,88	34,06	33,78		
	1C	25,45	25,98	25,46		
CR 2,80 %	2A	39,53	38,87	39,32	39,24	2,76
	2B	33,66	32,72	33,26		
	2C	34,52	32,44	33,81		
CR 3,80 %	3A	30,98	29,76	31,18	30,64	2,40
	3B	27,06	27,16	27,08		
	3C	33,22	32,79	32,80		

Fonte: A Autora (2021).

Figura 42 - Módulo de elasticidade médio para Ref., CR 2,80 % e CR 3,80 %.



Fonte: A Autora (2021).

O teor ideal de aplicação do CR em relação à influência no módulo de elasticidade é de 2,80 %. A amostra de referência e a amostra com 3,80 % de CR apresentaram um valor menor de módulo, em média, bem como apresentado nos ensaios de resistência à compressão. No entanto, para um intervalo de confiança estatístico de 95 %, o módulo de elasticidade para todas as amostras não apresentou diferença significativa.

Os resultados obtidos concordam com o exposto por Seo *et al.* (2019), onde a porcentagem de CaO usada como aditivo compensador de retração (de ostras) é equivalente ao CR supercalcinado utilizado neste trabalho.

5.5. ENSAIOS DE RETRAÇÃO

A Tabela 21 apresenta os resultados de retração nas primeiras 24 horas após a moldagem dos CPs e em 2, 3, 7, 33 e 56 dias após. Os valores são expressos pela medida de três corpos de prova para cada mistura, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de retração.

Data (dias)	Referência			CR 2,80 %			CR 3,80 %		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
1	-1,648	-14,358	2,515	-16,102	1,873	2,338	-10,639	2,913	-9,364
2	-1,675	-14,374	2,518	-16,105	1,867	2,334	-10,659	2,899	-9,361
3	-1,664	-14,379	2,506	-16,107	1,878	2,316	-10,673	2,907	-9,366
7	-1,673	-14,382	2,491	-16,112	1,860	2,300	-10,669	2,890	-9,374
28	-1,718	-14,419	2,462	-16,146	1,832	2,261	-10,688	2,839	-9,410
56	-1,726	-14,466	2,425	-16,191	1,814	2,243	-10,736	2,850	-9,453

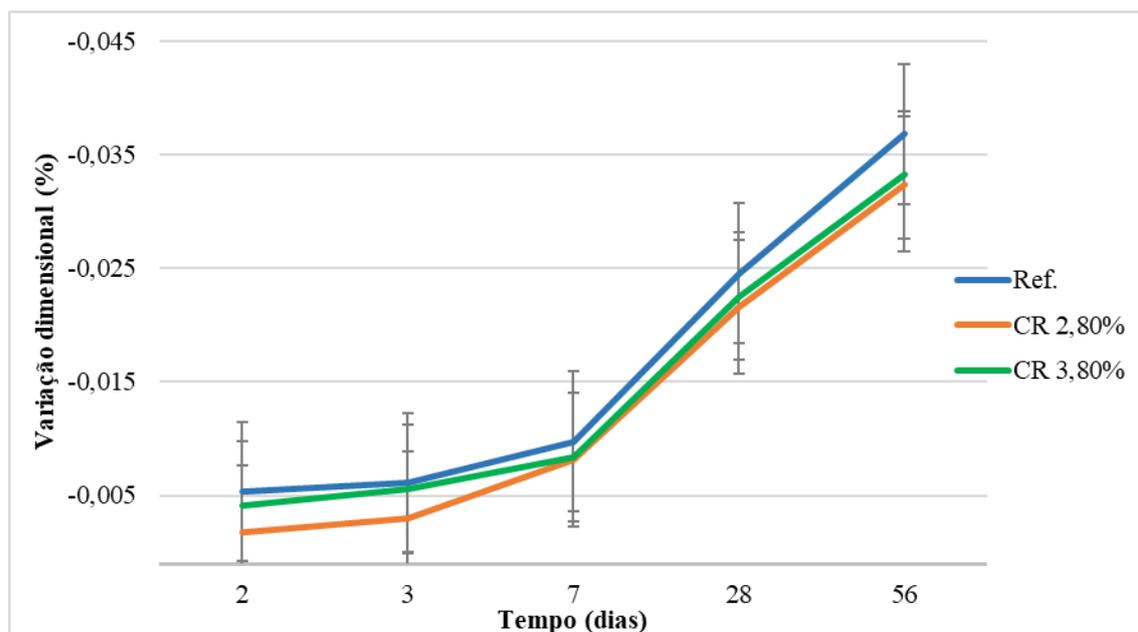
Fonte: A Autora (2021).

O resultado final é dado em porcentagem como preconiza a norma NBR 16834 (2020) (Figura 43). Nota-se que as amostras CR 2,80 % tiveram uma pequena diferença na retração em relação às demais amostras (Ref. e CR 3,80 %), principalmente nas idades iniciais. De acordo com a literatura, a expansão dos aditivos à base de CaO ocorre nas primeiras 30 horas após o início da cura (onde, neste trabalho, não foram realizadas medições) e, somente após este período, inicia-se a retração (POLAT; DEMIRBOGA; KHUSHEFATI, 2015). O uso de agentes expansores à base de CaO, combinados com um concreto de resistência inicial (CP V ARI), acaba sendo mais vantajoso, pelo menor tempo de cura úmida (1-2 dias *versus* 5-7 dias) necessário para desenvolver completamente a expansão potencial (COLLEPARDI *et al.*, 2005). Esses resultados são consistentes com

estudos anteriores (SOUZA et al., 2020; SEO et al., 2019; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; OLIVEIRA; RIBEIRO; BRANCO, 2014).

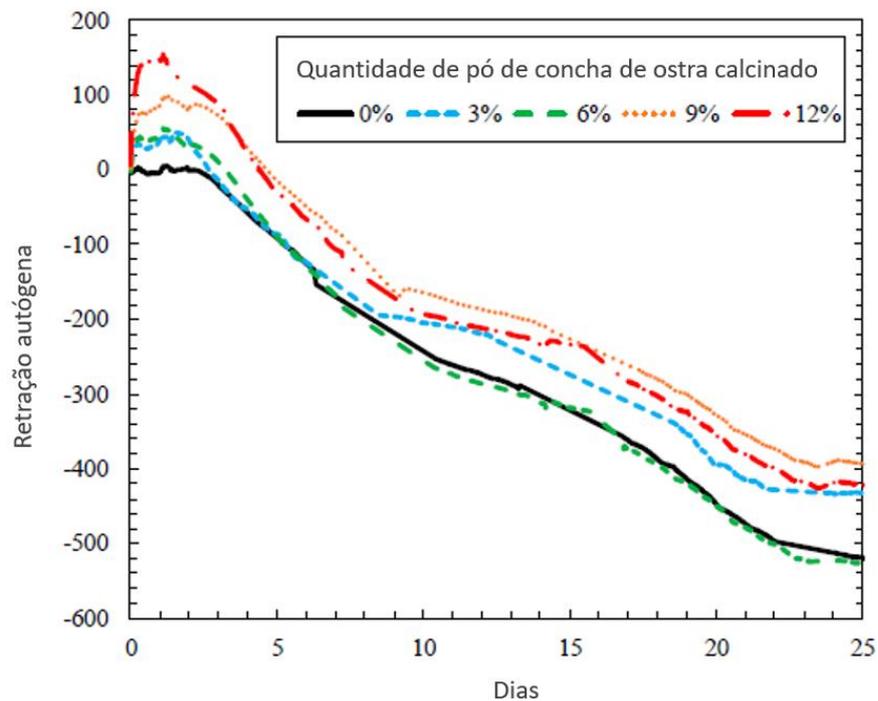
No ensaio de retração podemos notar que as amostras com 2,80 % de compensador tiveram uma pequena diferença na retração em relação às demais amostras (Ref. e CR 3,80 %), principalmente nas idades iniciais. Nas idades mais avançadas, em 33 e 56 dias, a retração da amostra de referência foi maior e as amostras com 3,8 % de compensador tiveram resultados semelhantes as amostras com 2,8 %. No artigo de Seo et al. (2019), as dosagens do aditivo chegaram a produzir uma expansão nos primeiros 3 dias de ensaio, conforme Figura 44. Na medida final os resultados das amostras com o aditivo ficaram menores do que a medida das amostras de referência, que corrobora com o resultado da nossa pesquisa.

Figura 43 - Resultados do teste de retração para Ref., CR 2,80 % e CR 3,80 %.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 44 - Ensaio de retração autógena.

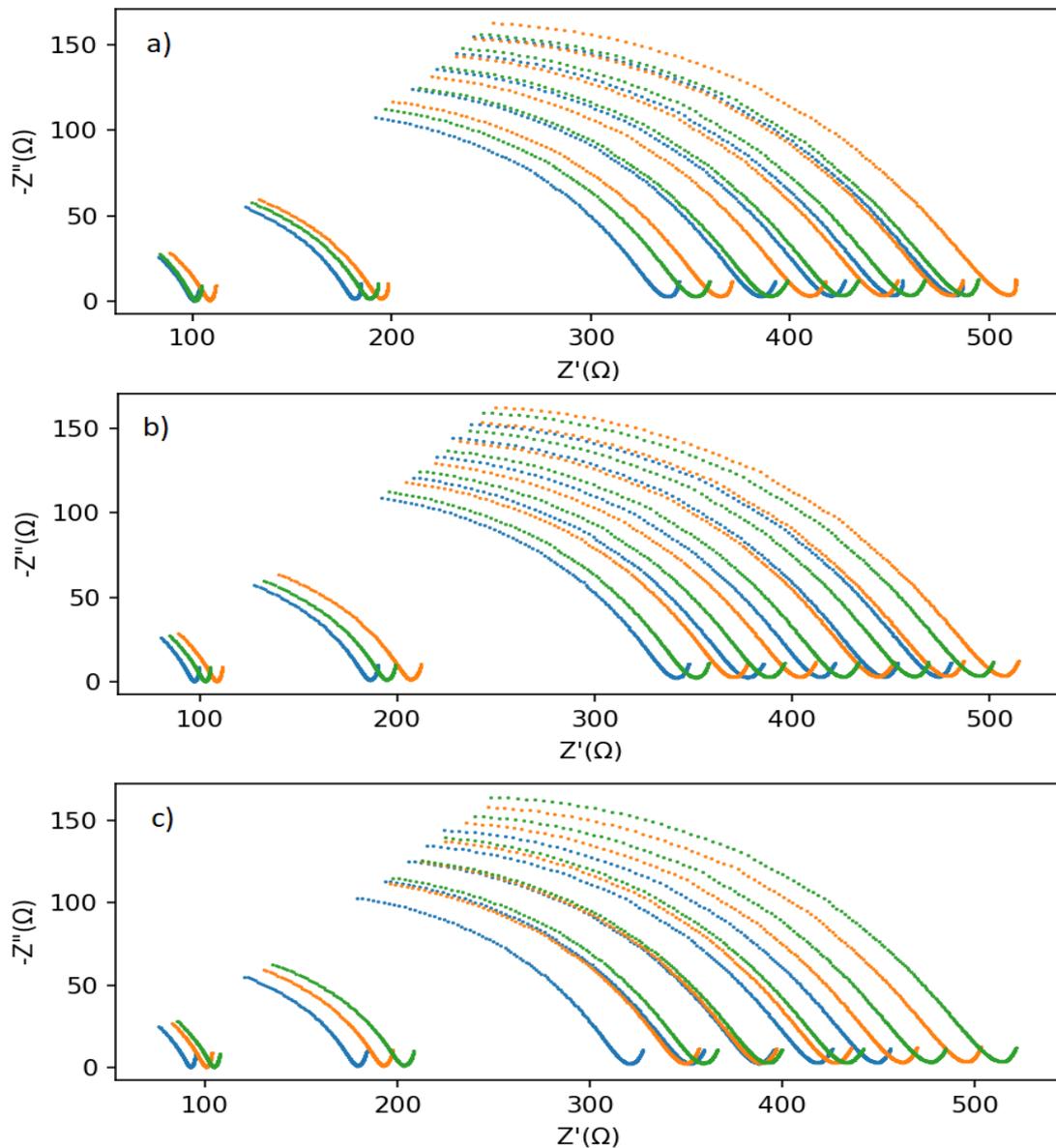


Fonte: Adaptado Seo *et al.* (2019).

5.6. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

As impedâncias elétricas após 1, 2, 7, 33 e 56 dias para amostras com CR (2,8 % e 3,8 %) e referência (Ref.) estão representadas na Figura 45. Todas as medições foram feitas em triplicata. O ponto mínimo nestes semi-arcos corresponde à resistência de volume da amostra (R_b), que aumenta durante o andamento da cura, conforme mostrado na Figura 43 (e Anexo 1).

Figura 45 - Gráficos Cole-Cole mostram os resultados do EIS para (a) Ref., (b) CR 2,8 % e (c) CR 3,8 %. Os diferentes conjuntos de curvas para cada condição (em triplicado) correspondem, da esquerda para a direita, aos resultados obtidos 1, 2, 7, 33 e 56 dias após a moldagem. Uma cor diferente identifica cada amostra.

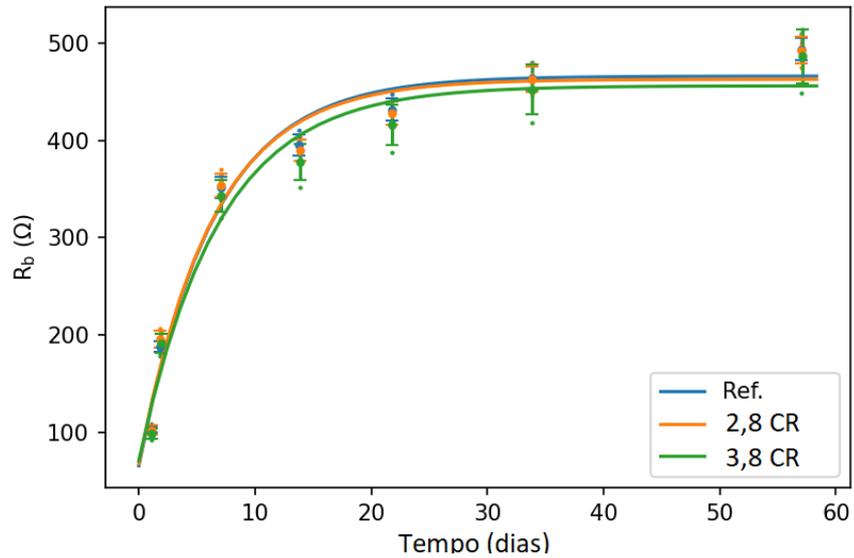


Fonte: A Autora (2021).

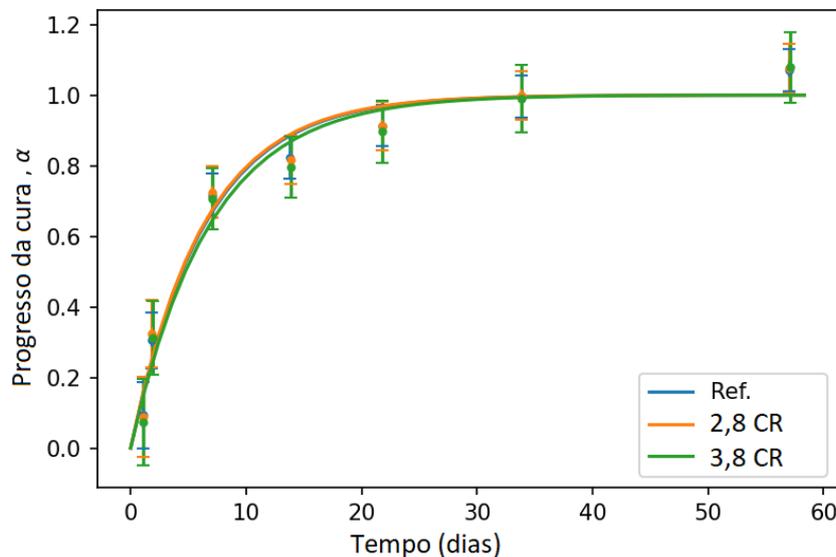
As linhas contínuas na Figura 46(a) representam o ajuste da Equação (11) para os dados de R_b , a partir dos quais os parâmetros de ajuste k , $R_b(0)$ e $R_b(\infty)$ são obtidos. O progresso da reação de cura, $\alpha(t)$, foi então calculado a partir da resistência bruta $R_b(t)$ e os parâmetros de ajuste k , $R_b(0)$ e $R_b(\infty)$ usando a Equação (10) e representados na Figura 46 (b). A boa qualidade do encaixe dá suporte à hipótese de que a reação de cura do concreto obedece a uma cinética de primeira ordem. Como pode ser visto nesta Figura, o CR não

afeta a cinética de cura do concreto (SILVA et al., 2021). O notebook Python usado para análise de dados está disponível abertamente, o que deve facilitar a replicação desse trabalho (OSF, 2022).

Figura 46 - Evolução no tempo de (a) resistência em massa, R_b e (b) progresso da reação (α) para amostras Ref., CR 2,8 % e CR 3,8 %.



(a)



(b)

Fonte: A Autora (2021).

Os gráficos de Cole-Cole foram obtidos para cada composição, dos quais extraímos a resistência do volume R_b e, a partir de sua evolução no tempo, o progresso da cura. As medidas de resistência à compressão corroboraram os resultados do EIS, com forte correlação entre a resistência elétrica aparente e os resultados dos ensaios mecânicos.

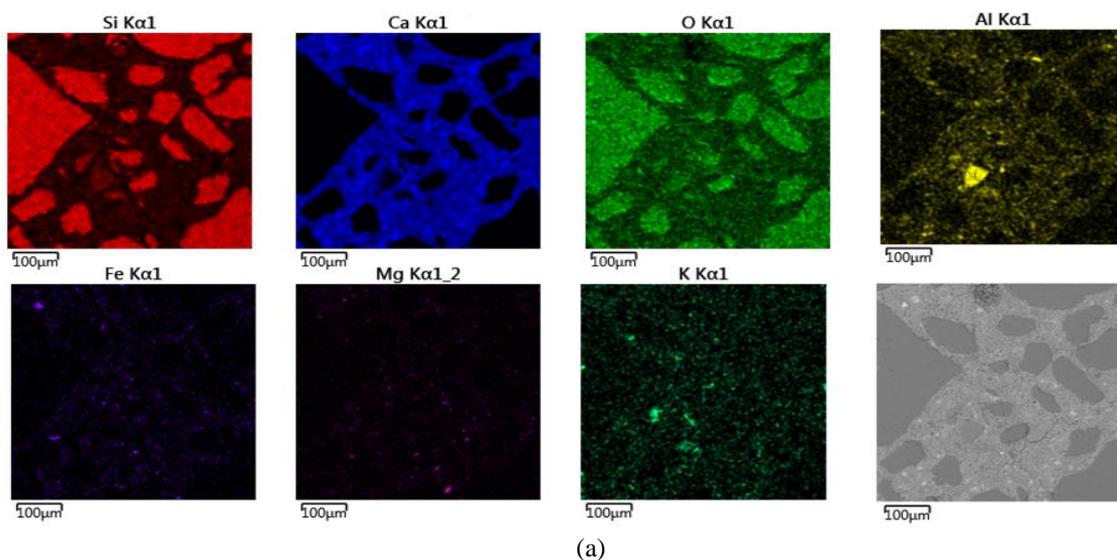
5.7. MEV e EDS

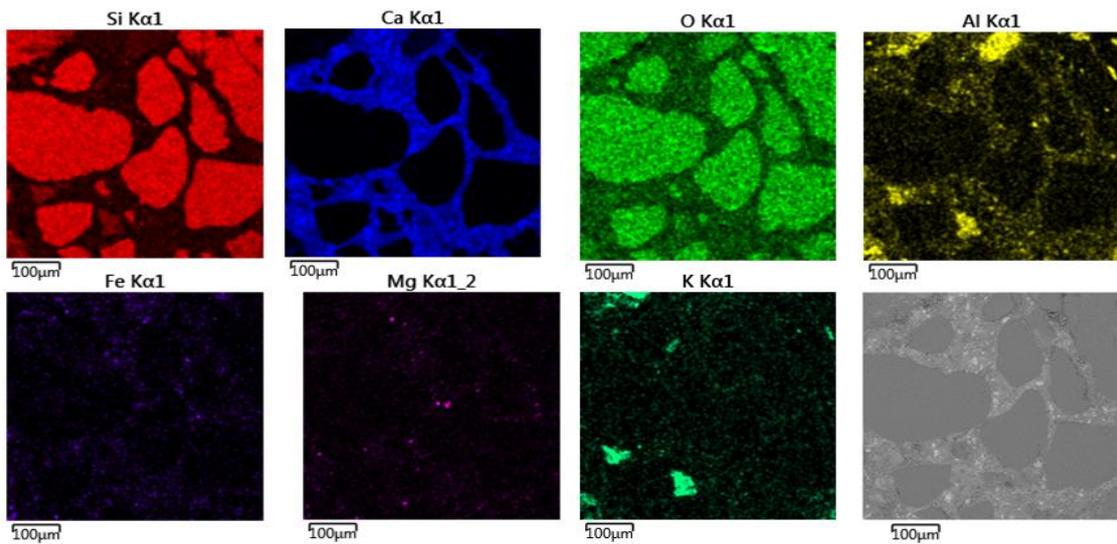
Na Figura 4 e no Anexo 2, são apresentadas imagens de MEV e as análises semiquantitativas obtidas por EDS. No anexo 2 estão as imagens ampliadas e o mapeamento individual de elementos por EDS (imagens obtidas por elétrons retroespalhados), para a Ref., CR 2,8 % e CR 3,8 %, com 63 dias.

É possível observar que o cálcio está bem distribuído por toda a matriz cimentícia, independentemente de sua origem (cimento ou CR). Fissuras foram observadas em todas as amostras, sendo maiores com o aumento da quantidade de óxido de cálcio (amostra com CR 3,80 %).

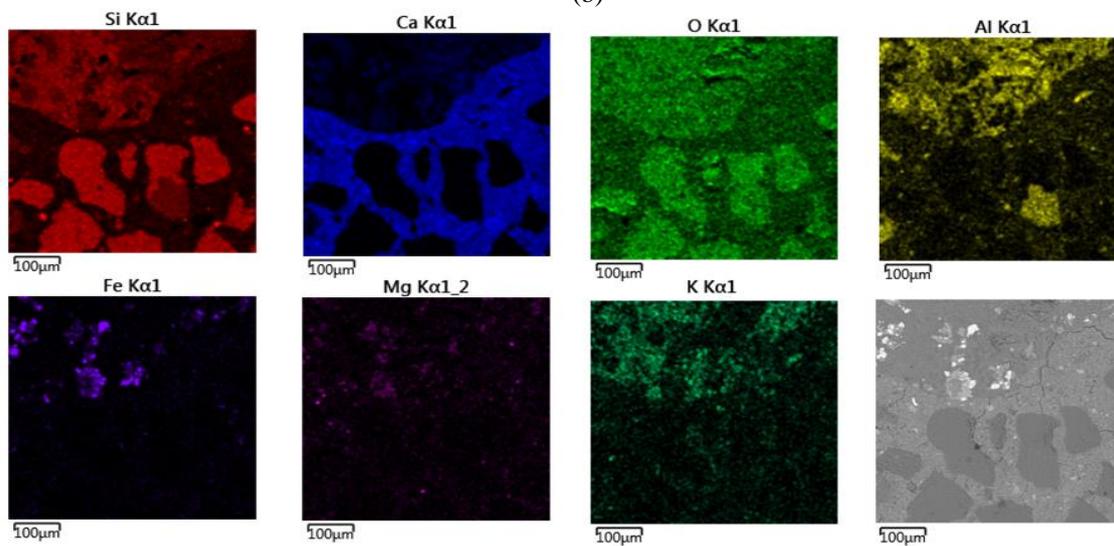
Não foi objetivo deste trabalho, acompanhar as reações de formação, como da portlandita e da etringita, por exemplo (SOUZA et al., 2020), mas apenas verificar a distribuição do cálcio nas amostras no estado endurecido; de acordo com a literatura (SEO et al., 2019), no processo de hidratação do cimento, a incorporação do pó de CaO calcinado aumenta o calor de hidratação na etapa inicial da reação, formando Ca(OH)_2 . Este aumento pode ter influenciado na quantidade de fissuras observadas.

Figura 47 - Mapas composicionais e imagens MEV/EDS das amostras de concreto: (a) Ref., (b) SCR 2,8 % e (c) CR 3,8 %.





(b)



(c)

Fonte: A Autora (2021).

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a incorporação de um aditivo compensador de retração (CR) comercial supercalcinado, à base de CaO, ao concreto autoadensável (CAA) e os efeitos que esse material causa nas propriedades do concreto fresco e endurecido, além de sua influência no processo de cura. Com base nos resultados da pesquisa, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- As propriedades de fluidez, viscosidade e habilidade passante se enquadram nas classes SF1, VS1 e PLI, respectivamente, para todos os graus de mistura de concreto.

- A amostra de referência foi classificada como IEV0 (sem evidência de segregação ou exsudação) e as amostras com compensador de retração como IEV1 (sem evidência de segregação e leve exsudação).
- Como as medidas de retração foram realizadas 48 h depois, nenhum dos corpos de prova apresentou expansão, e todos apresentaram retração.
- A amostra com 2,80 % de CaO teve uma leve redução na retração em relação à amostra de referência.
- A adição de duas porcentagens do aditivo CR ao CAA, em relação às amostras de referência, alcançou resistência mecânica e módulo de elasticidade levemente superiores, sugerindo que a dosagem é adequada.
- A incorporação de CaO como CR não influencia o processo de cura das amostras.

O aditivo compensador de retração que foi analisado no concreto autoadensável, seria 'supercalcinado' se tivesse sido calcinado a uma temperatura mínima de 1400 °C. A marca fabricante especifica a queima em uma ampla faixa de 900 a 1400 °C. Levando em consideração que os resultados, em geral, têm o mesmo comportamento do material do artigo Seo et al. (2019) que foi calcinado a 1000 °C, podemos concluir que o aditivo utilizado foi produzido no limite inferior de temperatura indicado.

Em suma, considerando a incorporação de CR ao CAA, a adição de CR melhora a trabalhabilidade do CAA e aumenta a fluidez. De fato, a mistura com maior capacidade de passagem no ensaio da caixa-L foi CR 3,8 %. No entanto, houve indicação de exsudação na amostra de CR 3,8 %. Resultados ligeiramente melhores para o teste de retração foram obtidos com as amostras de CR 2,8 %. O mesmo se aplica aos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade. O CaO está bem distribuído na matriz cimentícia em todas as amostras, mas foram observadas fissuras maiores nas amostras com mais CaO. Testes adicionais são necessários para determinar a relação da quantidade de CaO com as fissuras observadas. Para trabalhos futuros, observamos a necessidade de verificar a temperatura durante o processamento do óxido de cálcio.

REFERÊNCIAS

AİTCIN, P. C.; FLATT, J. R., **Science and technology of concrete admixtures**. Cambridge, Woodhead Publishing, 2016.

AKHAVAN, A.; RAJABIPOUR, F. Evaluating ion diffusivity of cracked cement paste using electrical impedance spectroscopy. **Materials and Structure**, v. 46, n. 5, p. 697–708, May 2013.

AMANI, N.; VIPULANANDAN, C.; PLANK, J. Monitoring the hydration and strength development in piezoresistive cement admixed with superplasticizer and retarder additives. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 195, n. 107601, p. 1-3, 2020.

AMERICAN STANDARD TEST METHODS. **ASTM E1876**: International. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. 2015.

AMERICAN STANDARD TEST METHODS. **ASTM C215**: International. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. 2014.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES E. H. V.; FREITAS E. G. A. **Materiais de construção**. EDUR, v.1, p. 203, 2000.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 4 ed. Dunas: Rio Grande, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed. São Paulo, SP: ABCP. 2002. 28p. Disponível em: <https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Relatório de Ensaio nº 84891. ABCP. São Paulo. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 3310-1**: Peneiras de ensaio - requisitos técnicos e verificação - Parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015.

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 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 8522**: Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - terminologia. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro. 2019

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto Autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto Autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto Autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16834**: Concreto - determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 2020.

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 e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

AY, I.; AYALP, G.G. Factors affecting the design, manufacturing, storage, transportation, and construction processes of prefabricated buildings. **Teknik Dergi**, v. 32, n. 3, p. 10907–10917, May 2021.

BARBOSA, K. C. *et al.* Procedure test of shrinkage in concrete blocks. *In*: CANADIAN MASONRY CONFERENCE, 10., Calgary, 2005. **Anais** [...]. Calgary, 2005.

BARSOUKOV, E.; MACDONALD, J. R, **Impedance spectroscopy**: theory, experiment, and applications. 2 ed. John Wiley & Sons, 2005. ISBN: 978-0-471-64749-2.

BATTAGIN, F. A.; BATTAGIN, L. S. I. Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C., Editor. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, p. 751-782, 2010.

CABEZA, M. *et al.* Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 881–891, 2002.

CANESSO, F. A. C. *et al.* Módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18., 2008, Porto de Galinhas. **Anais** [...]. Porto de Galinhas, p. 941-951. 2008.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials**. Springer Verlag, Berlin, 2007.

CARNOT, A.; *et al.* Corrosion mechanisms of steel concrete moulds in contact with a demoulding agent studied by EIS and XPS. **Corrosion Science**, v. 45, n. 11, p. 2513–2524, 2003.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 335, p. 233-251, 2009.

CHAUNSALI, P.; MONDAL, P. Physico-chemical interaction between mineral admixtures and OPC–calcium sulfoaluminate (CSA) cements and its influence on early-age expansion. **Cement and Concrete Research**, v.80, p. 10-20, 2016

CHINAGLIA, D. L. *et al.* Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, p. 4504.1-4504.9, 2008.

CHRISTENSEN, B. J. *et al.* Impedance spectroscopy of hydrating cement-based materials: measurement, interpretation, and application. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 11, p. 2789-2804, 1994.

CIMENTO ITAMBÉ. Cimento certo. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari/>. Acesso em: 31 ago. 2020.

CIMENTO ITAMBÉ. Área técnica. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/obras-de-edificios-sao-as-que-mais-consomem-concreto/>. Acesso em 07 abr. 2021.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. *In: Concreto: ciência e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. p. 381–413.

COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p.103-112, 1998.

COLLEPARDI, M. Admixtures-enhancing concrete performance. *In: INTERNATIONAL CONGRESS, GLOBAL CONSTRUCTION, ULTIMATE CONCRETE OPPORTUNITIES*, 6., Dundee, U.K. 2005. **Anais [...]**. Dundee, July 2005.

COLLEPARDI, M. *et al.* Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 6, p. 704-708, 2005.

CUSSON, D.; REPETTE, W. L. Early-age cracking in reconstructed concrete bridge barrier walls. **ACI Materials Journal**, v. 97, n.4, p. 438-446. 2000.

D'AMBROSIA, M. D., LANGE, D. A., BRINKS, A. J. Restrained shrinkage and creep of self-consolidating concrete. *In: ACBM - AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SCC*, 2., 2005. **Anais [...]**. p. 921-928, 2005.

DEY, G.; GANGULI, A.; BHATTACHARJEE, B. Electrical conductivity, dielectric permittivity, and degree of saturation of cement mortar at low radio frequencies. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 47, n. 4, p. 2664-2880, 2019.

DEY, G. Electrical impedance-based technique for estimation of moisture saturation conditions of hardened cement paste at low radio frequencies. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 39, n. 3, p. 1-11, 2020.

DÍAZ, B. *et al.* Impedance spectroscopy study of saturated mortar samples. **Electrochimica Acta**, v. 53, p. 7549–7555, 2008.

DINIZ, J.Z.F; FERNANDES, J.F.; KUPERMAN, S.C. Concreto Endurecido. *In: ISAIA, G. C., Editor. Concreto: Ciência e Tecnologia*. Ed. IBRACON, São Paulo, v.2, p. 673-703, 2011.

DONG, B. *et al.* Study on the carbonation behavior of cement mortar by electrochemical impedance spectroscopy. **Materials**, v. 7, n.1, p. 218–231, 2014.

EFNARC. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. United Kingdom, European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete. 2002.

EFNARC. **The European guidelines for self-compacting concrete**: Specification, production and use. United Kingdom, European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete. 2005.

EID, J. *et al.* Drying, cracks and shrinkage evolution of a natural silt intended for a new earth building material. Impact of reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 120–132, 2015.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, M. E.; BEJA, A. I. Agregados para a Construção Civil. *In*: ISAIA, G. C., Editor. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, p. 495-537, 2010.

FAZZAN, J. V. *e. al.* Avaliação do caráter pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio de medidas de resistividade elétrica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 23., Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: CBECiMAT, v. 1. p. 1-12, 2018.

FERRAZ, A. L. N.; PINTO, J. F. M. S. Avaliação da retração em concretos auto-adensáveis. *In*: WORKSHOP 3 CONCRETO: DURABILIDADE, QUALIDADE E NOVAS TECNOLOGIAS, Ilha Solteira, 2009. **Anais [...]**. Ilha Solteira, 2009.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126–142, 2015.

HAACH, V. G. *et. al.* Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT&E International**, v. 59, p. 18-24, 2013.

HAMAMI, A.E.A.; LOCHE, J.-M.; AÏT-MOKHTAR, A. Cement fraction effect on EIS response of chloride migration tests, **Advances in Cement Research**, v. 23, n. 5, p. 233–240, Oct. 2011.

HAN, J.; JIA, D.; YAN, P. Understanding the shrinkage compensating ability of type K expansive agent in concrete. **Construction and Building Materials**. v. 116, p. 36, 2016.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concretos de cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C., Editor. *In*: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, p. 905-944, 2010.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Água para concreto. *In*: ISAIA, G. C., Editor. **Concretos: Ciência e Tecnologia**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, 2011.

HIGGINS, R. A. **Propriedades e estruturas dos materiais em engenharia**. São Paulo: DIFEL – Difusão editorial, 1997.

HOLSCHEMACHER, K. Hardened material properties of self-compacting concrete. **Journal of Civil Engineering and Management**, v.10, n.4, p. 261-266, 2004.

JERRY, M.P. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.

JIA, Z. *et al.* Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 198-207, 2018.

KIOUMARSI, M. *et al.* Effect of shrinkage reducing admixture on drying shrinkage of concrete with different w/c ratios. **Materiais**, v. 13, n. 24, 25721, 2020.

LIM, Y. Y. *et al.* Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: review and path forward. **Structural Health Monitoring**, v. 20, n. 2, p. 604-636, 2021.

MARQUES, A. C. **Concreto autoadensável: Caracterização da evolução das propriedades mecânicas e estudo da sua deformabilidade por solicitação mecânica, retração e fluência**. 2011. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K.; BURROWS, R. W. Construindo estruturas duráveis no século 21. **ACI American Concrete Institute**, v. 23, p. 57-63, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 2014.

MELO, N.A.A.; CINCOTTO, M.A.; REPETTE, W. L. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 565-574, 2008.

MELO, N. A. A.; HELENE, P. R. L., Módulo de Elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, 2002. **Anais [...]**. Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

MOHAMMED, A.N. *et al.* Improving the engineering and fluid transport properties of ultra-high strength concrete utilizing ultrafine palm oil fuel ash. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, p. 127-137, 2014.

MONTEIRO, P.J.M.; MILLER, S.A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v.16, p. 698-699, 2017.

NAKAMURA, J. Uso de aditivos e adições para o concreto cresce junto com a demanda por estruturas mais resistentes, duráveis e com características especiais. **Construção**, São Paulo, v. 1, n. 155, 2014. Disponível em: <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/155/artigo313019-1.aspx>. Acesso em: 13 mar. 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5a Edição Ed. Porto Alegre: Bookman. 2016.

NUNES, S. C. B. **Concreto auto-compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001.

OLIVEIRA, M. J.; RIBEIRO, A. B.; BRANCO, F. G. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 267-275, 2014.

OSF. Influência de um aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio sobre calcinado em algumas propriedades de um concreto autoadensável. Disponível em: <https://osf.io/3tynj/>. Acesso em: 07 Ago. 2021.

PAN, Z. *et. al.*, Effect of expansive agents on the workability, crack resistance and durability of shrinkage-compensating concrete with low contents of fibers. **Construction and Building Materials**, v. 259, 119768, 2020.

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construções**. Ano XXXVII, n. 53, jan., fev., mar. São Paulo: IBRACON, 2009.

PERIUS, G. R.; CHERIAF, M. ; ROCHA, J. C. Análise do empenamento de placas de concreto auto-adensável com incorporação de agregados reciclados. *In*: CONGRESSO IBÉRICO SOBRE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC), 2., 2010, Guimarães. **Anais [...]**. Guimarães, p. 1-10, 2010.

PETROVIĆ, Ž. *et. al.* Flexural Behavior of Continuous Beams Made of Self-Compacting Concrete (SCC) - Experimental and Numerical Analysis. **Journals Applied Sciences**, v. 10, n. 23, p. 8654, 2020.

PETRUCCI, E.G. **Concreto de cimento Portland**. Ed. Globo. 1993.

PETRUCCI, E. G.; PAULON, V. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo:

Editora Globo S.A, 1998.

PILAR, R. **Avaliação nos estados fresco e endurecido de concretos autoadensáveis de alto desempenho com aditivos redutor e compensador de retração**. 2017. 215 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PILAR, R.; FERRON, R. D.; REPETTE, W. L. Fresh properties of HPSCC containing SRA and expansive admixtures. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, p. 1, 2018.

POLAT; DEMIRBOGA; KHUSHEFATI, **Construction and Building Materials**, v. 81, 268, 2015.

POPOVICS, S. A model for the kinetics. of the hardening of Portland cement. **Highway Research Record**, n. 192, p. 14-35, 1967.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta**. 2008. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S. Admixture interactions in concrete. *In: Concrete admixture handbook*. 2. ed. New Jersey, USA: NP. p. 95-136. 1996. 1184 p.

RAMKUMAR, K. B. *et al.* A review on performance of self-compacting concrete – use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application. **Construction and Building Materials**, v. 261, 120215, 2021.

RECH, G. L. **Efeito da relaxação estrutural sobre a permissividade dielétrica do tungstato de zircônio amorfo**. 2016. 96 f. TCC (Engenharia Química) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2016.

RECH, G. L.; PEROTTONI, C. A. Python GUI for impedance spectroscopy analysis **Scientia Cum Industria**, Caxias do Sul, v. 6, n. 2, p. 10 - 14, 2018.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. *In: ISAIA, G. C., Editor. Concreto: Ciência e Tecnologia*. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 2, p. 1769-1806, 2011.

RIBEIRO, A. C. **Caracterização da interação entre aditivos compostos por lignina oxidada e éter de policarboxilato com materiais cimentícios**. 2020, 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade São Judas Tadeu. São Paulo, 2020.

RILEM. Casting of self compacting concrete. Report 35, Final Report of RILEM TC 188-CSC. Skarendahl, A.; Billberg, P. (Ed). França. *In: RILEM Publications. Proceedings [...]*. 41p. 2006.

RODRIGUES, P. Aditivos expansores à base de óxido de cálcio supercalcinos.

ANAPRE, v. 10, n. 54, p.4, 2016.

RUBIO, C. F. **Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO)**. 2017. 338 f. Tesis (Doctoral Enginyeria Civil i Ambiental) - Universitat Politècnica de Catalunya. Catalunya, España, 2017.

SEO, J. H. *et al.*, Calcined oyster shell powder as an expansive additive in cement mortar. **Materials**, v. 12, 1322, 2019.

SCHNEIDER, M. Process technology for efficient and sustainable cement production. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 14–23, 2015.

SHA, F. *et al.* Mechanical sensing properties of embedded smart piezoelectric sensor for structural health monitoring of concrete. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 32, n. 2, p. 88-112, 2021.

SILVA, G. F. *et al.* AC impedance spectroscopy (AC-IS) analysis to characterize the effect of nanomaterials in cement-based mortars. **Construction and Building Materials**. v. 269, 121260, 2021.

SONELASTIC. Advanced Impulse Excitation Technique. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a técnica de excitação por impulso**. Informe ATCP Engenharia Física, Divisão Sonelastic, 2017.

SOUZA, M.T. *et al.* Novel low-cost shrinkage-compensating admixture for ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117024, 2020.

SOUZA, A. R. **Retração em concreto autoadensável: contribuição de produtos mitigadores**. 2016. 243 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, PR, 2016.

STATISTICS KINGDOM. Two sample T-test calculator (Welch's T-test). Disponível em: <https://www.statskingdom.com/150MeanT2uneq.html>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SUPRAKASH, A. P.; KARTHIYAINI, S.; SHANMUGASUNDARAM, M. Future and scope for development of calcium and silica rich supplementary blends on properties of self-compacting concrete - A comparative review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 5662-5681, 2021.

TAM, C.M.; TAM, V.W.; NG, K.M. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 79–89, 2012.

TAYLOR, P. C. **Curing concrete**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

TEE, K. F.; MOSTOFIZADEH, S. A Mini review on properties of Portland cement concrete with geopolymer materials as partial or entire replacement. **Infrastructures**, Greenwich, v. 6, n. 2, p. 26, 2021.

THINGIVERSE. Montagem 3D para ensaio de espectroscopia de impedância. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:4903062>. Acesso em: 22 fev. 2022.

TKACZEWSKA, E. Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 388–393, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Comparative assessment of self-compacting concretes (SCC) with fly ash and fine. **IBRACON Structures and Material Journal**, v.4 (2), p. 247-276, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Self-compacting concretes (SCC): comparison of methods of dosage. **IBRACON Structures and Material Journal**, v.5 (4), p.500 -529, 2012.

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

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C., Editor. **Concretos: Ciência e Tecnologia**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, 2011.

XU, J.; JIANG, L.; WANG, J. Influence of detection methods on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement, **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1902–1908, 2009.

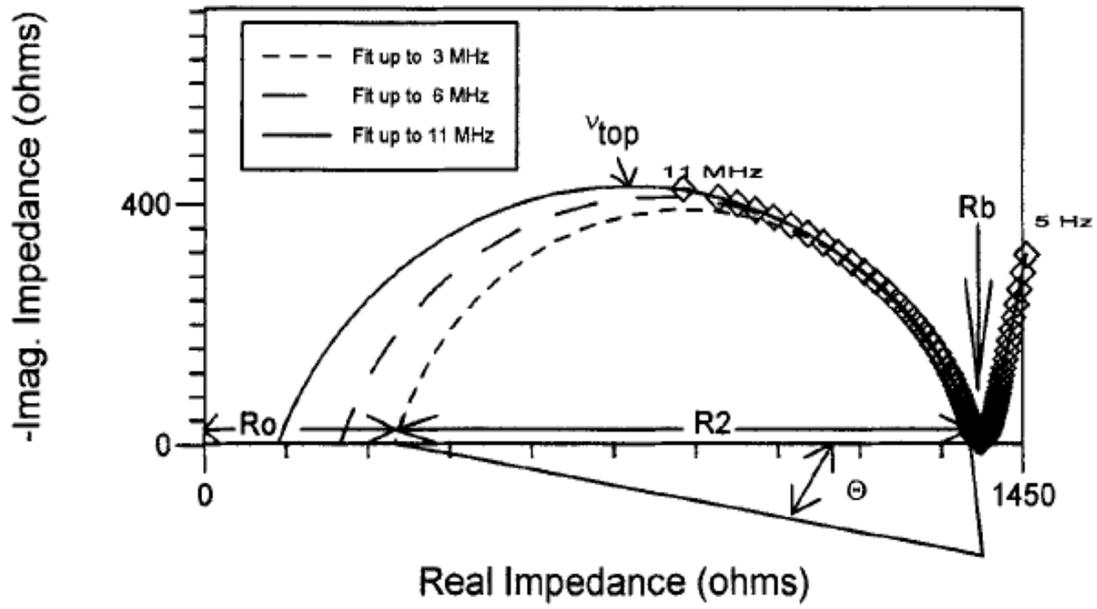
ZATAR, W.; NGUYEN, T. Mixture design study of fiber-reinforced self-compacting concrete for prefabricated street light post structures. **Journal Advances in Civil Engineering**, v. 2020, ID. 8852320, 2020.

ZEYAD, A.M.; KHAN, A.H.; TAYEH, B.A. Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, p. 806-818, 2020.

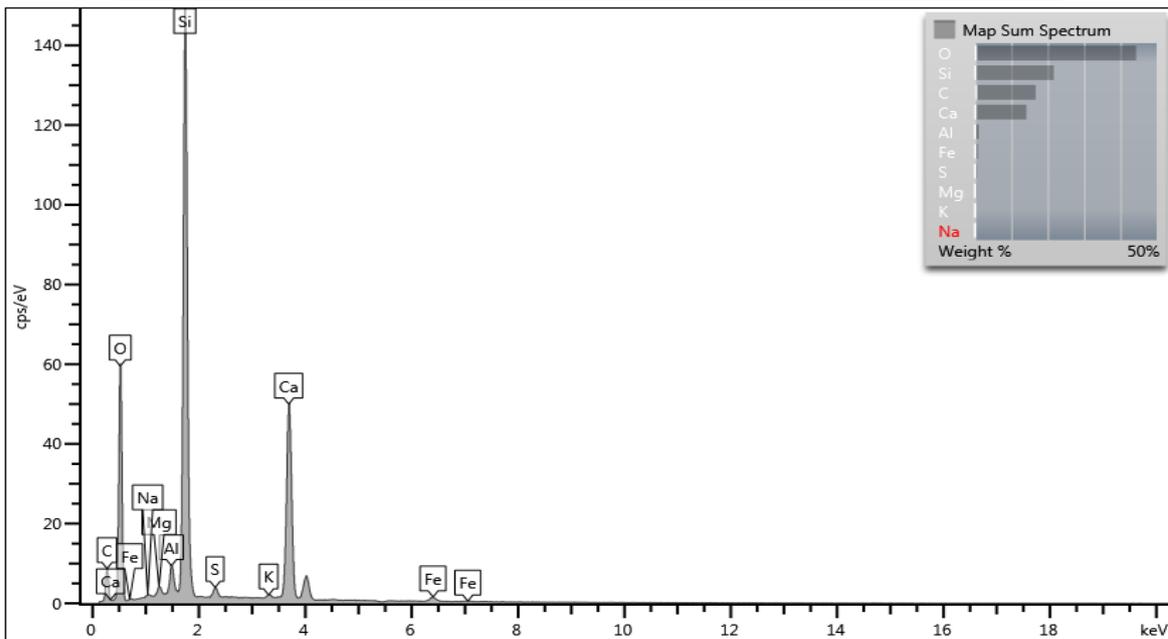
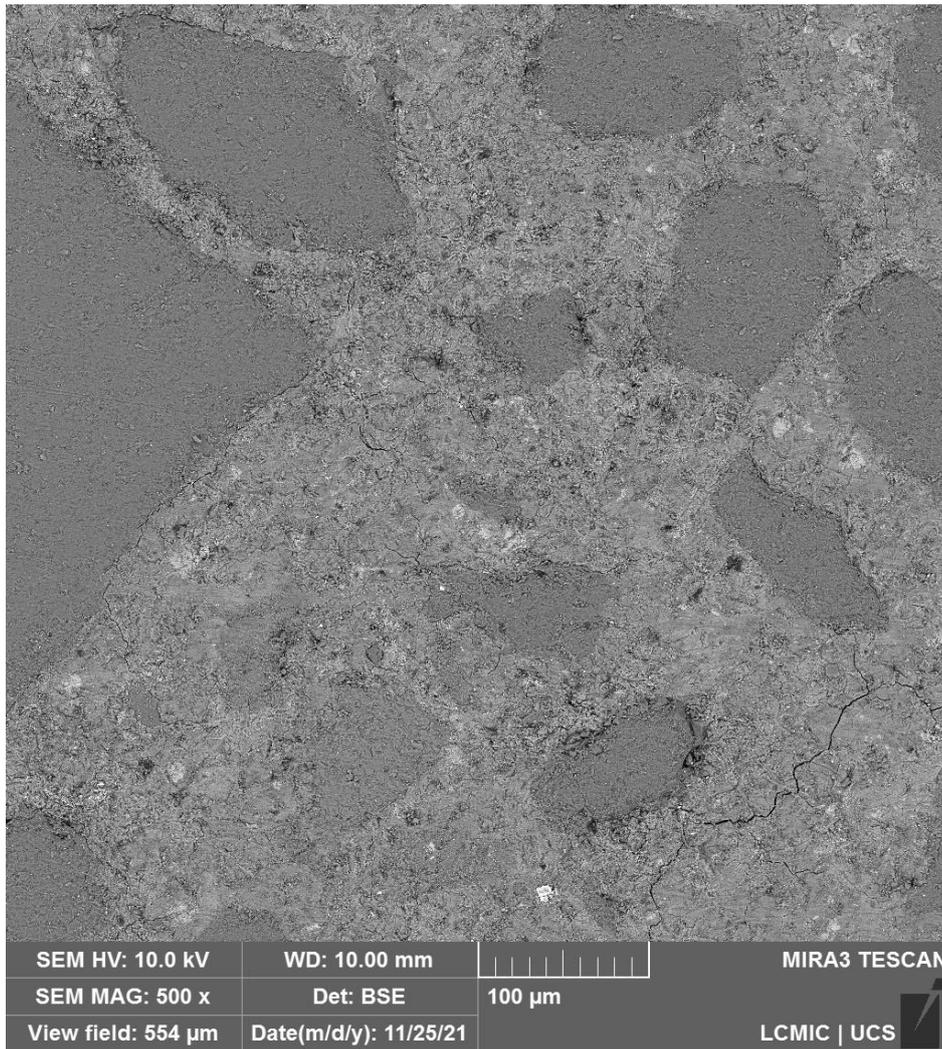
ZHAN, P.; HE, Z. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 676-690, 2019.

ANEXO 1

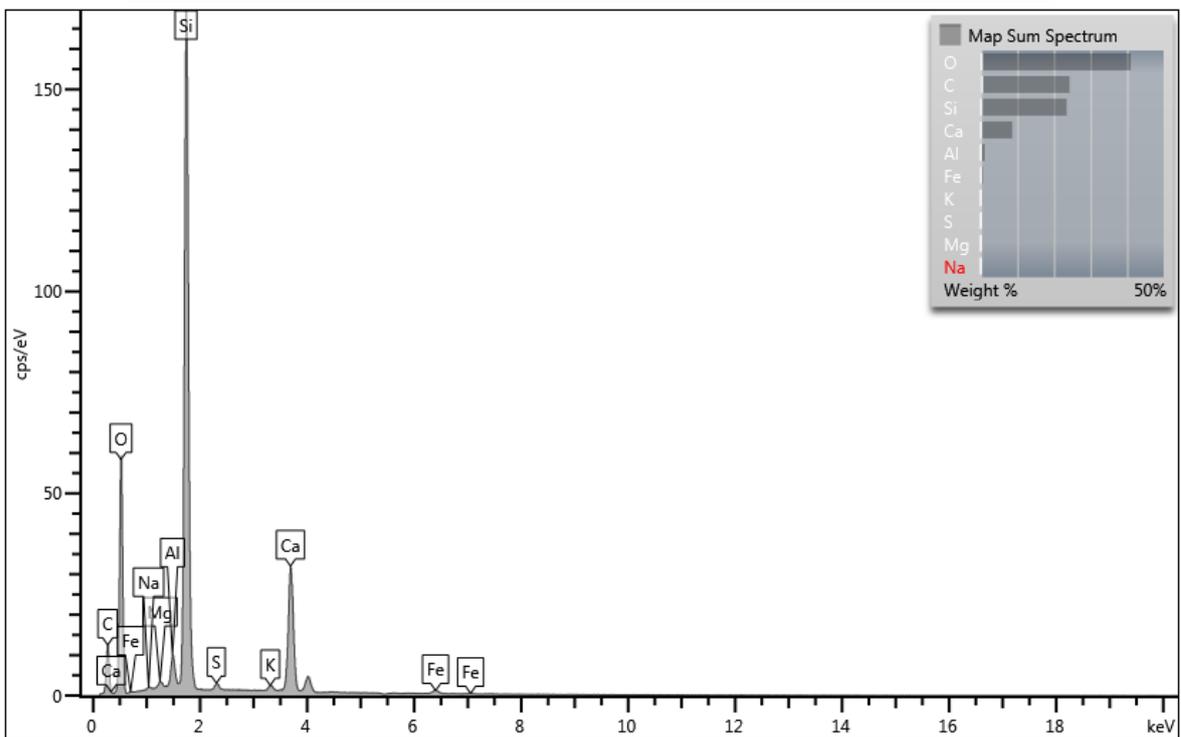
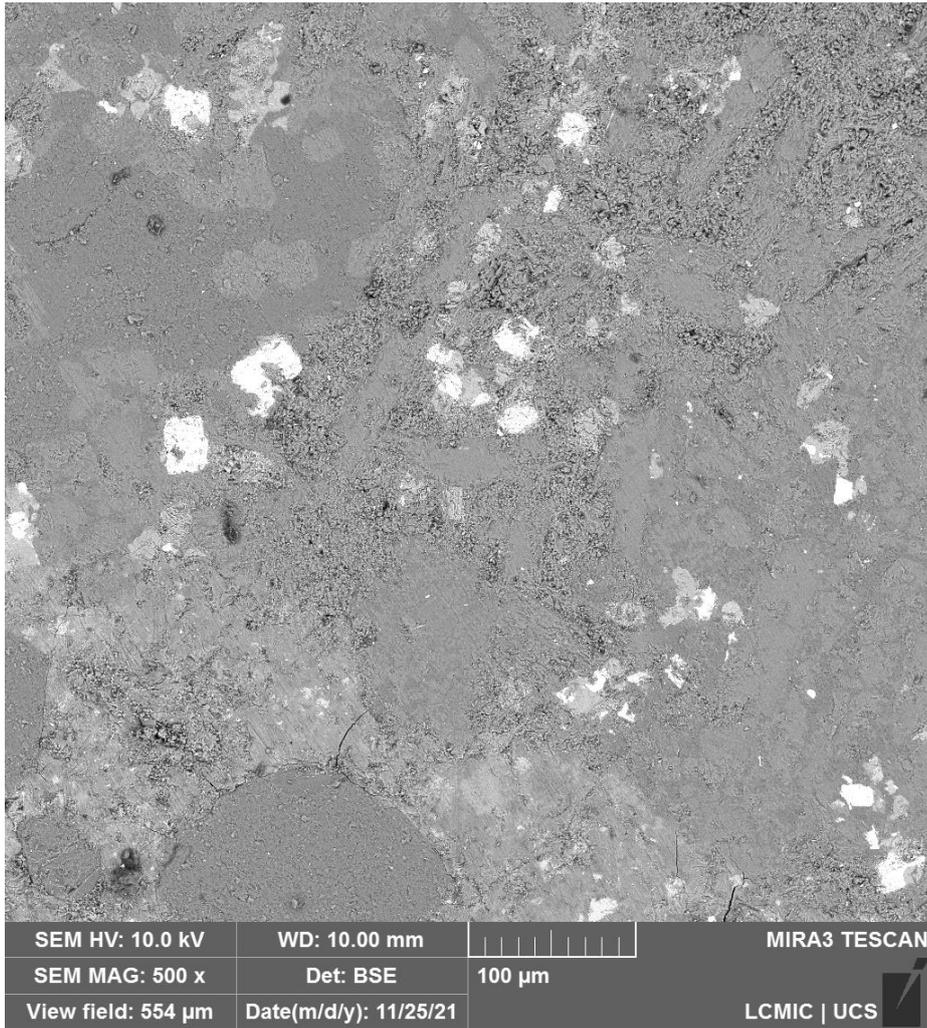
Gráfico de Nyquist de uma barra de cimento Portland com relação $a/c = 0,4$ (12 dias).
Pode-se observar resistência *bulk* R_b (CHRISTENSEN, 1994).



ANEXO 2 – MEV e EDS
Referência



CR 2,8 %



CR 3,8 %

