



**ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM
UTILIZAÇÃO DO CIMENTO LC³**

MYRELLE YASMINE DE FREITAS CÂMARA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM
UTILIZAÇÃO DO CIMENTO LC³

MYRELLE YASMINE DE FREITAS CÂMARA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

COORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE SILVA RÊGO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: DM - 09A/20

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM
UTILIZAÇÃO DO CIMENTO LC³**

MYRELLE YASMINE DE FREITAS CÂMARA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof.^a Valdirene Maria Silva Capuzzo, D.Sc (PECC/ENC/UnB)
(Orientadora)

Prof. João Henrique Silva Rêgo, D.Sc (PECC/ENC/UnB)
(Coorientador)

Prof. Elton Bauer, D.Sc (PECC/ENC/UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida, D.Sc (UFMG)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 10 DE DEZEMBRO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

CÂMARA, MYRELLE YASMINE DE FREITAS

Estudo da Durabilidade de Concretos com Utilização Do Cimento LC³ [Distrito Federal] 2020.

xxiv, 149p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2020).
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|----------------------------|
| 1. Durabilidade | 2. Cimento LC ³ |
| 3. Carbonatação | 4. Migração de Cloretos |
| 5. Efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos | |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CÂMARA, M. Y. F (2020). Estudo da durabilidade de concretos com utilização do cimento LC³. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação DM-09A/20, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Myrelle Yasmine de Freitas Câmara

TÍTULO: Estudo da durabilidade de concretos com utilização do cimento LC³.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Myrelle Yasmine de Freitas Câmara
SGAS 910, Ed. Summer Park, Bloco I, 141
Distrito Federal, Brasília, Asa Sul
CEP: 70390-100 Brasília/DF – Brasil
e-mail: myrelleyasmine@hotmail.com

DEDICATÓRIA

*Com todo amor e gratidão à minha família, pelo tempo que deixamos de estar juntos,
pelo amor, pela dedicação e pela compreensão durante todo o período.*

Sem vocês esse sonho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, autor da minha vida, que me concedeu a graça da realização deste trabalho, me deu força e perseverança nos momentos difíceis e constituiu-se a minha fonte de alegria.

Aos meus professores Valdirene Maria Silva Capuzzo e João Henrique Silva Rêgo, pela cordialidade, disponibilidade, aprendizado e por me transmitirem tranquilidade em meio às dificuldades.

Em especial à minha família, Cristóvão Câmara, Marilsa Paulina e Luis Antônio, que sempre me incentivaram, apoiaram, aconselharam e me ajudaram em todos os sentidos. Aos demais familiares e amigos agradeço por estarem torcendo por mim.

Ao meu namorado, Anderson Millano, pela motivação e palavras de ânimo durante esse período. Obrigada também por toda a ajuda nas concretagens. Sem seu suporte não seria possível chegar até aqui!

Aos amigos que adquiri durante toda a vida acadêmica, em especial a Laynara Santiago, Fernanda Beatriz, Aline Ribeiro, Mara Monaliza, Mônica Monalisa, Isnara Victória, Layane Pinto, Carla Mabel, Ana Luiza, Vanessa Borges, Jordana Ferreira, Iana Damasceno, Brenda Fontes, Guilherme Gurgel e Érica Nóbrega. É uma felicidade saber que tenho pessoas como vocês, que sempre poderei confiar e contar.

Aos colegas da Strata Engenharia e Engefoto Aerolevantamentos, com os quais muito aprendi e pude dividir experiências e opiniões.

Aos professores Elton Bauer e Fernando Almeida, por aceitarem compor a banca e contribuírem para esse trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC-UnB) que enriqueceram minha caminhada acadêmica.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção (LEM-UnB), Laboratório de difratometria de raios-X (LDR-UnB) e Laboratório de Construção civil (LCC-IFB), por toda a ajuda com os equipamentos, concretagens e ensaios. A Prefeitura da UnB (PRC) pela ajuda com as peças de madeira utilizadas no ensaio de tração. Ao professor Rodrigo Lameiras, pela ajuda no ensaio de granulometria à laser das amostras. A Otimix Consultoria em Materiais de Construção, Grupotecno Sistemas Construtivos, Metacaulim do Brasil e REC transportes, pela doação de alguns materiais desta pesquisa.

Ao apoio da Universidade de Brasília (UnB), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF - Processo nº Processo: 0193.001700/2017).

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Essa conquista é de todos vocês!

*“A verdadeira felicidade e sucesso consiste em
gastar nossas energias com um propósito”*
(William Cowper)

RESUMO

ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM UTILIZAÇÃO DO CIMENTO LC³

Autora: Myrelle Yasmine de Freitas Câmara

Orientadora: Dr^a. Valdirene Maria Silva Capuzzo

Coorientador: Dr. João Henrique Silva Rêgo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, dezembro de 2020.

Com o crescente desenvolvimento mundial e o grande impacto causado pela indústria cimenteira, os materiais cimentícios suplementares (MCS) vêm ganhando destaque por possibilitar o alcance de baixos fatores de clínquer. A mistura ternária entre argila calcinada e filer calcário, denominada cimento LC³, possui diversas propriedades singulares quando comparadas ao cimento Portland. Normalmente, as pesquisas envolvendo esses materiais visam o estudo das propriedades mecânicas, decorrendo uma carência de estudos quanto a durabilidade deste concreto na literatura. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo investigar parâmetros de durabilidade em pastas cimentícias e concretos convencionais produzidos com cimento Portland (REF) e cimentos LC³ (LC3-ARG1 e LC3-ARG2). Nos concretos e pastas com materiais cimentícios suplementares, foram feitas substituições volumétricas de 45% cimento Portland por argila calcinada e filer calcário, na proporção 2:1, respectivamente. Foram investigadas as propriedades em pastas cimentícias como tempo de pega, resistência à compressão simples, índice de desempenho e difração de raios-X. Para avaliar o comportamento do concreto no estado fresco realizou ensaios de consistência e massa específica. Já para o estado endurecido, investigou as propriedades de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo estático de elasticidade, absorção de água por imersão, resistividade elétrica volumétrica e superficial, carbonatação acelerada, migração por cloretos no estado não estacionário e efeito combinado na carbonatação e migração de cloretos. Os traços com cimento LC³ necessitaram de uma maior quantidade de aditivo para uma mesma consistência previamente estabelecida e apresentaram maiores valores de resistência à compressão, a partir dos 28 dias, em comparação com a referência. Para os ensaios de durabilidade, o concreto com cimento LC³ exibiu melhores resultados quanto a absorção de água por imersão, índice de vazios, resistividade elétrica volumétrica e superficial e coeficiente de migração de cloretos. No entanto, com relação as propriedades de carbonatação acelerada e efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos do concreto, os traços com cimento LC³ apresentaram uma maior vulnerabilidade em comparação com o concreto de referência. De modo geral, a substituição de 45% de cimento Portland por cimento LC³ não acarreta na diminuição de valores das propriedades mecânicas e alguns parâmetros de durabilidade. Pelo contrário, promove até um incremento nessas propriedades, sendo justificado pelo refinamento dos poros com a utilização de materiais cimentícios suplementares. Porém, quando expostos a carbonatação, apresentam efeito mais severo, indicando uma maior susceptibilidade a corrosão.

Palavras-chave: Durabilidade. Cimento LC³. Carbonatação. Migração de cloretos. Efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos.

ABSTRACT

STUDY ON THE DURABILITY OF CONCRETE WITH THE USE OF CEMENT LC³

Author: Myrelle Yasmine de Freitas Câmara

Supervisor: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Co-supervisor: João Henrique Silva Rêgo

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, december of 2020.

With the growing worldwide development and the great impact caused by the cement industry, supplementary cementitious materials (MCS) have been gaining prominence for enabling the reach of low clinker factors. The ternary mixture between the calcined clay and limestone filler, called LC³ cement, has several unique properties when compared to Portland cement. Usually, research involving these materials aims to study the mechanical properties, resulting in a lack of studies regarding the durability of this concrete in the literature. Therefore, this research aims to investigate durability parameters in conventional cement and concrete pastes produced with Portland cement (REF) and LC³ cement (LC3-ARG1 and LC3-ARG2). In concretes and pastes with supplementary cementitious materials, volumetric substitutions of 45% Portland cement were made by calcined clay and limestone filler, in a 2: 1 ratio, respectively. The properties in cementitious pastes such as setting time, resistance to simple compression, performance index and X-ray diffraction were investigated. To assess the behavior of concrete in the fresh state, it carried out tests of consistency and specific mass. For the hardened state, it investigated the properties of resistance to simple compression, tensile strength by diametrical compression, static modulus of elasticity, water absorption by immersion, volumetric and surface electrical resistivity, accelerated carbonation, migration by chlorides in the non-stationary state and combined effect on carbonation and chloride migration. The mixtures with LC³ cement required a greater amount of additive for the same previously established consistency and presented higher values of compressive strength, after 28 days, in comparison with the reference. For durability tests, concrete with LC³ cement showed better results in terms of water absorption by immersion, voids index, volumetric and surface electrical resistivity and chloride migration coefficient. However, with regard to the accelerated carbonation properties and the combined effect of carbonation and chloride migration of concrete, the traces with LC³ cement showed greater vulnerability compared to the reference concrete. In general, the replacement of 45% Portland cement by LC³ cement does not result in a decrease in the values of mechanical properties and some durability parameters. On the contrary, it even promotes an increase in these properties, being justified by the refinement of the pores with the use of supplementary cementitious materials. However, when exposed to carbonation, they have a more severe effect, indicating a greater susceptibility to corrosion.

Keywords: Durability. Cement LC³. Carbonation. Chloride migration. Combined effect of carbonation and chloride migration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	CIMENTO PORTLAND	5
2.2	CIMENTOS COM MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS	6
2.2.1	Cimentos com Argila Calcificada	7
2.2.2	Cimentos com Fíler Calcário	8
2.2.3	Cimentos com Argila Calcificada e Fíler Calcário (LC ³)	9
2.2.4	Proporções de Substituição do Cimento LC ³	11
2.3	INFLUÊNCIA DO CIMENTO LC ³ NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	13
2.3.1	Propriedades no Estado Fresco	13
2.3.2	Propriedades Mecânicas	15
2.3.2.1	Resistência à compressão simples	15
2.3.2.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	16
2.3.2.3	Módulo Estático de Elasticidade	17
2.3.3	Propriedades Relacionadas à Durabilidade	18
2.3.3.1	Absorção de Água por Imersão	18
2.3.3.2	Resistividade Elétrica	19
2.3.3.3	Carbonatação Acelerada	21
2.3.3.4	Resistência à Penetração dos Íons Cloro	27

2.3.3.5 Ação Combinada da Carbonatação Acelerada e Migração de Cloretos	30
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PRODUÇÃO DO CIMENTO LC ³ ...	34
3.1.1 Aglomerante	34
3.1.2 Materiais cimentícios suplementares	34
3.1.3 Gipsita	35
3.1.4 Agregados	35
3.1.4.1 Agregado miúdo	35
3.1.4.2 Agregado graúdo	36
3.1.5 Aditivo superplastificante	36
3.1.6 Água	36
3.1.7 Produção do Cimento LC ³	37
3.2 ESTUDOS DE DOSAGEM	37
3.2.1 Dosagem das pastas cimentícias	38
3.2.2 Dosagem dos concretos	39
3.3 ENSAIOS NAS PASTAS CIMENTÍCIAS E NO CONCRETO	40
3.3.1 Ensaios em pastas cimentícias	41
3.3.1.1 Tempo de pega	41
3.3.1.2 Resistência à compressão e índice de desempenho	41
3.3.1.3 Difração de raios-X (DRX)	42
3.3.2 Propriedades do concreto no estado fresco	43
3.3.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone	43
3.3.2.2 Determinação da massa específica do concreto	43
3.3.3 Propriedades do concreto no estado endurecido	43
3.3.3.1 Ensaios para determinação das propriedades mecânicas do concreto	43
3.3.3.1.1. Resistência à compressão simples	44

3.3.3.1.2. Resistência à tração por compressão diametral	44
3.3.3.1.3. Módulo estático de elasticidade à compressão	44
3.3.3.2 Ensaio para determinação das propriedades de durabilidade do concreto	44
3.3.3.2.1. Absorção de água por imersão.....	44
3.3.3.2.2. Resistividade elétrica.....	45
a. Resistividade elétrica volumétrica.....	45
b. Resistividade elétrica superficial	46
3.3.3.2.3. Carbonatação acelerada	47
3.3.3.2.4. Migração de cloretos no estado não estacionário	50
3.3.3.2.5. Efeito combinado de carbonatação acelerada e migração de cloretos no estado não estacionário	53
3.3.4 Análise estatística.....	54
4 RESULTADOS.....	55
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55
4.1.1 Aglomerante.....	55
4.1.2 Materiais cimentícios suplementares e gesso.....	58
4.1.3 Agregados	64
4.1.3.1 Agregado miúdo	64
4.1.3.2 Agregado graúdo	65
4.1.4 Aditivo superplastificante	66
4.2 ENSAIOS NAS PASTAS CIMENTÍCIAS	66
4.2.1 Tempo de pega	67
4.2.2 Resistência à compressão simples e Índice de desempenho	67
4.2.3 Difração de raios-X.....	71
4.3 ENSAIOS NO CONCRETO	74
4.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco	74

4.3.1.1	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	75
4.3.1.2	Determinação da massa específica do concreto.....	75
4.3.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	76
4.3.2.1	Resistência à compressão simples	76
4.3.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	80
4.3.2.3	Módulo estático de elasticidade à compressão	81
4.3.2.4	Absorção de água por imersão no concreto	82
4.3.2.5	Resistividade elétrica	84
4.3.2.6	Carbonatação acelerada	87
4.3.2.7	Migração de cloretos no estado não estacionário	90
4.3.2.8	Efeito combinado da carbonatação acelerada e migração de cloretos.....	92
4.3.3	Comportamento do cimento LC ³ : Resumo dos principais resultados.....	94
5	CONCLUSÕES	99
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de desidroxilação da caulinita.....	8
Figura 2.2 - Difrátogramas de misturas de argamassa aos 1, 7, 28 e 90 dias de cura. ...	11
Figura 2.3 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-H ₂ O a temperatura de 25°C	22
Figura 2.5 - Representação do avanço da frente de carbonatação no concreto e alteração do pH em função do tempo.....	24
Figura 3.1 - Procedimento experimental da pesquisa.....	33
Figura 3.2 - Moldagem das pastas cimentícias com relação a/agl =0,5	38
Figura 3.3 - Ensaio de resistividade volumétrica em andamento	46
Figura 3.4 - Ensaio de resistividade superficial em andamento	47
Figura 3.5 - Câmara de carbonatação acelerada para ensaio	48
Figura 3.6 - Corpos de prova selados, antes de serem inseridos na câmara de carbonatação	49
Figura 3.7 - Corpos de prova rompidos após exposição a CO ₂ na câmara de carbonatação e com aspersão de fenolftaleína como indicador.....	49
Figura 3.8 - Vedação das bordas do corpo de prova com o aparato para o ensaio de migração de cloretos.....	50
Figura 3.9 - Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em concretos.	51
Figura 3.10 - Corpos de prova rompidos após aspersão da solução de nitrato de prata.	52
Figura 3.11 - Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos	52
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)	56
Figura 4.2 - Difrátograma de raios-X do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). G-gipsita, F-ferroaluminato tetracálcico, A-silicato tricálcico, CC-calcita, B-silicato dicálcico.	57

Figura 4.3 - Imagem de MEV do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)	57
Figura 4.4 - Difratoograma de raios-X da argila calcinada 1 (ARG1). M-muscovita, K-caulinita, Q-quartzo.	59
Figura 4.5 - Difratoograma de raios-X da argila calcinada 2 (ARG2). M-muscovita, K-caulinita, Q-quartzo e R-rutilo.	59
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das argilas calcinadas (ARG1 e ARG2).	60
Figura 4.7 - Imagem de MEV das argilas calcinadas utilizadas na pesquisa. (a) ARG1 e (b) ARG2	61
Figura 4.8 - Composição das argilas utilizadas na pesquisa pelo EDS	61
Figura 4.9 - Difratoograma de raios-X do filer calcário (FC) utilizado na pesquisa. D-dolomita, K-caulinita, Q-quartzo e C-calcita.	62
Figura 4.10 - Distribuição granulométrica do filer calcário (FC) utilizado na pesquisa.	62
Figura 4.11 - Difratoograma de raios-X do gesso utilizado na pesquisa. B-bassanite e Q-quartzo.	63
Figura 4.12 - Imagem de MEV e análise de EDS do gesso utilizado na pesquisa	63
Figura 4.13 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa	64
Figura 4.14 - Curva granulométrica da composição do agregado graúdo utilizado na pesquisa	65
Figura 4.15 - Resistência à compressão de pastas cimentícias ($a/agl = 0,5$) em função das idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em MPa.	68
Figura 4.16 - Índice de desempenho das pastas cimentícias ($a/agl = 0,5$) em função das idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em porcentagem do traço de referência.	69
Figura 4.17 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia REF ($a/agl=0,5$) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.	72
Figura 4.18 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia LC3-ARG1 ($a/agl=0,5$) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Hc-hemicarboaluminato, Mc-	

monocarboaluminato, P-portlandita, Q-quartzo, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.	72
Figura 4.19 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia LC3-ARG2 (a/agl=0,5) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Hc-hemicarboaluminato, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, Q-quartzo, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.	73
Figura 4.20 - Resultados médios da resistência à compressão simples dos concretos nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura	77
Figura 4.21 - Resultados médios da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com e sem utilização do cimento LC ³ (a/agl=0,5) em função da idade de 28 dias de cura, em MPa.	80
Figura 4.22 - Resultados médios do ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão dos concretos com e sem cimento LC ³ (a/agl=0,5) em função das idades de 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em GPa.....	81
Figura 4.23 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios correlacionados com os resultados de resistência à compressão simples, aos 112 dias de idade.	83
Figura 4.24 - Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica volumétrica e superficial em concretos com e sem utilização do cimento LC ³ (a/agl=0,5), na idade de 112 dias de cura, em kΩ.cm.	85
Figura 4.25 - Resultados médios da profundidade de carbonatação dos concretos com e sem utilização do cimento LC ³ (a/agl=0,5), nas idades de 56, 63 e 70 dias de exposição na câmara de carbonatação.	87
Figura 4.26 - Resultados médios do coeficiente de carbonatação do concreto com e sem utilização do cimento LC ³ (a/agl=0,5) em mm/semana ^{0,5}	90
Figura 4.27 - Resultados médios do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário dos traços aos 112 dias de cura	91
Figura 4.28 - Resultados médios do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário dos traços sob ação do efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos aos 112 dias de cura	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de resistividade elétrica referentes a probabilidade de corrosão do concreto, segundo o normativo FIB CEB-192 e o boletim europeu COST 509.	20
Tabela 2.2 - Classificação quanto à penetração de íons cloreto	20
Tabela 2.3 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC ³ no ensaio de carbonatação acelerada por diversos autores.....	26
Tabela 2.4 - Teores máximos de íons cloreto no concreto	28
Tabela 3.1 - Ensaio para caracterização do aglomerante (CPV - ARI)	34
Tabela 3.2 – Método de ensaio para caracterização das adições minerais	35
Tabela 3.3 - Método de ensaio para caracterização física do agregado miúdo	36
Tabela 3.4 – Método de ensaio para caracterização do agregado graúdo	36
Tabela 3.5 - Nomenclatura e característica dos traços	37
Tabela 3.6 - Traços unitários das pastas cimentícias.....	39
Tabela 3.7 - Traços unitários em massa dos concretos.....	40
Tabela 3.8 - Quantidade de corpos de prova de concreto por ensaios.....	41
Tabela 3.9 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos .	51
Tabela 4.1 - Resultados de caracterização do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)	55
Tabela 4.2 - Resultados de caracterização dos materiais cimentícios suplementares e do gesso	58
Tabela 4.3 - Resultados de caracterização física do agregado miúdo utilizado na pesquisa	64
Tabela 4.4 - Resultados de caracterização física da composição do agregado graúdo utilizado na pesquisa.....	65
Tabela 4.5 - Resultados da caracterização do superplastificante utilizado na pesquisa .	66
Tabela 4.6 - Teor de aditivo superplastificante nas pastas cimentícias	66
Tabela 4.7 – Resultados médios dos ensaios de tempo de início e fim de pega.....	67

Tabela 4.8 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples das pastas.....	70
Tabela 4.9 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples.....	70
Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos com e sem cimento LC ³ e teor de aditivo superplastificante (a/agl = 0,5).	75
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de determinação da massa específica dos concretos com e sem cimento LC ³ (a/agl = 0,5).	76
Tabela 4.12 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples.....	79
Tabela 4.13 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples.....	79
Tabela 4.14 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos com e sem utilização do cimento LC ³ (a/agl=0,5) na idade de 112 dias de cura.	82
Tabela 4.15 - Classificação quanto ao risco de corrosão para os valores de resistividade elétrica volumétrica e superficial dos traços aos 112 dias de cura úmida.	86
Tabela 4.16 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a carbonatação acelerada nos concretos.....	89
Tabela 4.17 - Classificação dos concretos quanto a resistência à penetração de cloretos, conforme a literatura de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) <i>apud</i> Gjorv (2014).....	92
Tabela 4.18 - Classificação dos concretos quanto a resistência à penetração de cloretos, conforme a literatura de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) <i>apud</i> Gjorv (2014).....	94
Tabela 4.19 - Resumo dos resultados obtidos para as pastas cimentícias com e sem cimento LC ³ (a/agl=0,5).	97

Tabela 4.20 - Resumo dos resultados obtidos para os concretos com e sem cimento LC ³ (a/agl=0,5).	98
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC ³ nas propriedades do estado fresco do concreto	14
Quadro 2.2 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC ³ no ensaio de resistividade elétrica, por diversos autores	21
Quadro 2.3 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC ³ no ensaio de migração de cloretos, por diversos autores.....	29
Quadro 2.4 - Resultados de estudos sobre o efeito combinado da carbonatação e ataque de cloretos.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Escala Celsius
A	Unidade Amperagem
a/agl	Água/aglomerante
a/c	Água/cimento
d	Dias
D ₁₀	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas
D ₅₀	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 50% das partículas
D ₉₀	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas
D _{nssm}	Coefficiente de migração de cloretos no estado não estacionário
h	Horas
H ₀	Hipótese nula
H ₁	Hipótese alternativa
I ₀	Corrente inicial
K	Coefficiente de carbonatação
K _α	Comprimento de onda alfa
K _β	Comprimento de onda beta
L	Espessura do corpo de prova
min	Minuto
t	Tempo
T	Média entre as temperaturas finais e iniciais
U	Valor da tensão
V	Unidade Voltagem
Valor-P	Probabilidade de significância
x	Profundidade de carbonatação
X _d	Média da frente de penetração de cloretos

LISTA DE ABREVIACOES

A	Silicato tricálcico
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Associação Brasileira De Cimento Portland
Afm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
Aft	Etringita secundária
ANOVA	Análise de variância
ARG1	Argila calcinada 1
ARG2	Argila calcinada 2
B	Silicato dicálcico
C	Clínquer
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca	Cálcio
CAESB	Companhia de abastecimento público de água de Brasília
C-A-S-H	Silicato aluminato de cálcio hidratado
CaSO ₄ .2H ₂ O	Gipsita
CC	Calcita
Cl	Cloro
CO ₂	Dióxido de carbono
COD	Software Cristalografia Open

CP I	Cimento Portland comum
CP V - ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
D	Dolomita
DRX	Difração de raios-X
ELD	Estado de Limite de Durabilidade
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
F	Ferroaluminato tetracálcico
FC	Filer calcário
FRX	Fluorescência de raios-X
FT	Faculdade de tecnologia
G	Gesso
GEE	Gases de efeito estufa
Hc	Hemicarboaluminato
IFB	Instituto Federal de Brasília
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	Organização Internacional de Normalização
K	Caulinita
LABEST	Laboratório de Estruturas
LC ³	<i>Limestone Calcined Clay Cement</i>
LC3-ARG1	Traço com 50% de clínquer, 5% de gesso, 30% de argila calcinada 1 e 15% de filer calcário.
LC3-ARG2	Traço com 50% de clínquer, 5% de gesso, 30% de argila calcinada 2 e 15% de filer calcário.
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais

M	Muscovita
Mc	Monocarboaluminato
MCS	Materiais cimentícios suplementares
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Ms	Monossulfoaluminato
NBR	Norma Brasileira
O	Oxigênio
P	Portlandita ou hidróxido de cálcio
PDXL	Software de análise de difração em pó
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
pH	Potencial hidrogeniônico
Q	Quartzo
R	Rutilo
REF	Traço de referência, sem adições. Composto por uma mistura de 95% de clínquer e 5% de gesso.
Strat	Stratilingita
TEMAC	Teoria do enfoque meta analítico consolidado
UnB	Universidade de Brasília
V	Vaterita

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um material amplamente utilizado pelo homem, sendo reconhecido por empregar materiais calcários e argilosos, calcinados a temperaturas elevadas em fornos rotativos. Durante a sua produção, grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) são emitidos ao meio ambiente, afetando principalmente o aquecimento global e as mudanças climáticas. Estudos estimam que a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 5 a 8% das emissões globais de CO₂ provocadas pelo homem, dos quais 60% ocorre na etapa de calcinação e 40% são distribuídos na utilização de combustíveis e eletricidade (SCRIVENER, 2014). Além disso, para a produção de 1,0 tonelada de cimento Portland, aproximadamente 0,9 toneladas de CO₂ é emitido ao meio ambiente (ZHANG *et al.*, 2020).

Pesquisas relacionadas ao uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) para substituir parcialmente o cimento Portland em concreto, tem sido uma abordagem racional nas últimas décadas, reduzindo o impacto da produção de cimento Portland nos recursos naturais e na emissão de CO₂ (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; JUENGER *et al.*, 2011). Dentre esses materiais, podem ser destacados o uso da escória de alto forno, cinza volante, filer calcário e argila calcinada. No entanto, deve-se levar em conta a disponibilidade e os benefícios finais das substituições.

A substituição do clínquer por filer calcário, escória de alto forno e cinza volante, materiais normatizados pelo Brasil, resultam em grande diminuição de emissão de dióxido de carbono ao meio ambiente. Contudo, a disponibilidade de escórias de alto forno e cinza volante não supre a demanda da produção de cimento Portland (AVET e SCRIVENER, 2017). Neste cenário, o *Limestone Calcinced Clay Cement* (LC³) surgiu recentemente como um cimento de baixo custo e baixa emissão do teor de carbono nas indústrias cimenteiras de todo o mundo (MARANGU, 2020).

O cimento LC³ corresponde a mais uma opção de cimento inovador que é produzido através da mistura de filer calcário, argila calcinada, clínquer e gesso em proporções estabelecidas, sendo avaliado em termos de benefícios sobre o cimento Portland (ANTONI *et al.*, 2012; GARG; SKIBSTED, 2014; AVET *et al.*, 2016; BERRIEL *et al.*, 2016; SCRIVENER *et al.*, 2018). A produção piloto do cimento LC³ foi realizada em Índia e Cuba, mostrando resultados promissores com o teor de substituição de 45% ao cimento Portland, em uma proporção de 2:1 para a argila calcinada e filer calcário, respectivamente (ANTONI, 2013; SCRIVENER *et al.*, 2018).

A argila calcinada é um material que tem grande disponibilidade na natureza, quando aquecida a 500-900°C origina uma fase altamente reativa, denominada como metacaulim (ANTONI, 2013; KANCHANASON; PLANK, 2019). A combinação de argila calcinada e filer calcário é capaz de reduzir o fator de clínquer pela metade, formando uma interação química sinérgica entre as adições. Conforme Scrivener (2014) a sinergia ocorre quando a alumina da argila calcinada reage com o carbonato de cálcio, proveniente do filer calcário, e o hidróxido de cálcio, formando o composto carboaluminato hidratado. Essas conversões químicas densificam a microestrutura e estabilização das fases de etringita, impedindo a transformação em monossulfato (KRISHNAN; BISHNOI, 2018).

Pesquisas apontam que concretos com a utilização do cimento LC³ apresentam resistência semelhante e estrutura de poros refinada, em comparação ao concreto com cimento Portland simples. O cimento LC³ também mostra um potencial em escala global, proporcionando benefícios técnico-econômicos para as aplicações de campo (BISHNOI *et al.*, 2014; SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). No entanto, como a maior quantidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) é responsável pela reserva alcalina, sua diminuição pode afetar a formação e manutenção da película de passivação da armadura, comprometendo a segurança e durabilidade de concretos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A mudança climática, aquecimento global, entre outros, induzem à introdução de legislações e incentivos para regular e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Como o cimento Portland tem grande contribuição para a emissão de CO₂ no meio ambiente, surge a necessidade de utilização de misturas ternárias como, por exemplo, o cimento LC³.

Os estudos do cimento LC³ apontam que o efeito sinérgico, entre a argila calcinada e o filer calcário, resulta em uma estrutura de poros refinados, mesmo em idade precoce, pois a argila reage mais rapidamente na presença de calcário. Isto tende a diminuir a permeabilidade intrínseca do material, procedendo em melhores características mecânicas e de durabilidade, devido à maior resistência contra o transporte iônico. Por outro lado, os concretos com materiais cimentícios suplementares tendem a apresentar menor concentração de Ca(OH)₂ na fase aquosa dos poros capilares, devido aos efeitos pozolânicos. Os hidróxidos são responsáveis pela alta alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto, e quando ocorre

a sua diminuição, pode significar um ataque a película de passivação da armadura, que na presença de umidade e oxigênio pode desencadear um processo corrosivo.

Esta pesquisa está inserida no Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC-UnB), juntamente com outras pesquisas que abordam a substituição do cimento Portland pelo cimento LC³ (LINS, 2017; ROCCHI; OLIVEIRA, 2017; BARBALHO, 2018; SOARES, 2018; OLIVEIRA, 2018; MOREIRA, 2020), corrosão nas armaduras provocadas pela entrada de íons cloreto (NEGREDO, 2018; SILVA, 2019) e carbonatação acelerada (PESSÔA, 2002; NEVES, 2005; MIRANDA, 2018; NEGREDO, 2018; SILVA, 2019). Além daqueles que estudaram diretamente o caso do efeito combinado da carbonatação acelerada e migração de cloretos no estado não estacionário (MONTEIRO, 1996; NEGREDO, 2018; SILVA, 2019).

Para a delimitação do tema, foi realizada uma pesquisa conforme a metodologia proposta por Mariano e Santos (2017), por meio da teoria do enfoque meta analítico consolidado (TEMAC), em que foi possível perceber o interesse pelo tema nos últimos anos, com o aumento do número de artigos publicados até o momento. O presente trabalho visa estudar a influência do cimento LC³, em comparação com uma mistura de referência, avaliando as propriedades mecânicas e de durabilidade. Apesar do crescente número de pesquisas avaliando o comportamento do concreto com cimento LC³, a literatura apresenta poucos estudos voltados a durabilidade desse material. Isso representa uma lacuna importante para a comunidade científica, mostrando a grande motivação deste estudo.

1.2 OBJETIVOS

Abaixo serão apresentados o objetivo geral e os específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o efeito da utilização do cimento LC³ em pastas cimentícias e concretos, no enfoque das propriedades físico mecânicas e ingresso da frente de carbonatação e íons cloreto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Identificar as diferenças entre os produtos de hidratação das pastas cimentícias com e sem cimento LC³;
- Estudar as alterações nas propriedades de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão de concreto com utilização do cimento LC³;
- Estudar as alterações nas propriedades relacionadas à durabilidade como absorção de água por imersão, resistividade elétrica e difusão da frente de carbonatação e de íons cloreto em concretos com utilização do cimento LC³.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos. O primeiro trata-se de uma introdução geral do problema envolvendo a problemática da emissão do CO₂ no meio ambiente. Após isso, é apresentada as justificativas que respaldam a execução desse estudo e relevância do tema. Também foram mostrados os objetivos a serem alcançados com a pesquisa.

No segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica utilizada como referência neste trabalho. São expostos temas que discorrem genericamente sobre o cimento Portland, cimentos com misturas binárias e ternárias, assim como, as proporções adequadas de substituição de clínquer pelo cimento LC³. Também foi apresentado a influência do LC³ nas propriedades do estado fresco e endurecido.

No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia do programa experimental proposto, com a descrição das normas que foram utilizadas para compor este estudo. Inicialmente foi detalhando os materiais, métodos de caracterização e produção do cimento LC³. Na sequência, o planejamento dos experimentos, estudos de dosagem das pastas cimentícias e concretos, assim como, os ensaios realizados no estado fresco e endurecido.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados experimentais. Inicialmente mostrou a caracterização dos materiais, em seguida, os resultados médios obtidos com os ensaios experimentais referente às propriedades mecânicas e propriedades de durabilidade. Além disso, faz uma breve análise no intuito de relacionar as respostas com outros trabalhos e, ao fim, tem um resumo com todos os resultados obtidos.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. E, por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a confecção deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizado um levantamento de informações acerca do tema em que o trabalho está pautado, em literaturas nacionais e internacionais, para a obtenção de um conhecimento prévio. A revisão bibliográfica inclui principais conceitos referentes ao cimento Portland, utilização do cimento LC³, além da influência do cimento LC³ nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é considerado um dos materiais mais consumidos em todo o mundo, principalmente para a produção de concreto (AGOPYAN; JOHN, 2011). Este material endurece em função da reação com a água, formando produtos resistentes, mostrando-se cada vez mais essencial para o segmento da construção civil, o que reflete diretamente no aumento de sua produção e consumo (LINS, 2017).

Para a produção do cimento, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o calcário e a argila são as matérias-primas fundamentais que, após passarem por processos específicos, resultam em um ligante hidráulico resistente, denominado clínquer. Os clínqueres são intercalados com cerca de 5% de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em um moinho de bolas industrial, para a obtenção do cimento Portland (TAYLOR, 1997).

Quimicamente, o cimento Portland é composto principalmente pelos seguintes componentes em proporções variáveis de acordo com o tipo de cimento: Silicato tricálcico (C_3S); Silicato dicálcico (C_2S); Aluminato tricálcico (C_3A) e o Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (NEVILLE, 2015). Quando a água é adicionada, ocorre o mecanismo de hidratação, na qual a primeira fase consiste na formação de agulhas de etringita (AFt), logo após o contato com a água, e depois de algumas horas a reação dos silicatos resultam em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O silicato de cálcio hidratado constitui a principal fase hidratada no cimento Portland, com estrutura composta por uma camada de átomos de Ca e O em contato de ambos os lados com cadeias de sílica. Este composto tem uma estequiometria variável, podendo incorporar outros tipos de íons, principalmente o alumínio (C-A-S-H), quando utilizado MCS de aluminossilicato como escórias, cinza volante e argilas calcinadas (AVET; BOEHM-COURJAULT; SCRIVENER, 2019).

A grande problemática na utilização do cimento Portland é a influência nos esgotamentos dos recursos naturais, resultando na emissão significativa do dióxido de carbono (CO₂), que rege o aquecimento global e mudanças climáticas (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Estima-se que a indústria do cimento Portland contribui em 5-8% do total de emissões globais de CO₂ (ANTONI *et al.*, 2012). Em que, cerca de 30-40% corresponde a queima de combustíveis, 60-70% na conversão do calcário em óxido de cálcio (calcinação) e outros 5% ocorrem de maneira indireta, resultando do consumo elétrico industrial (ROADMAP, 2019). Dessa maneira, a utilização de concreto mais eficiente feito com matéria-prima local disponível, baixa energia incorporada e emissões de CO₂, teria benefícios significativos.

De acordo com Avet, Li e Scrivener (2018), a opção mais viável para a obtenção dos cimentos mais sustentáveis, seria a mistura do clínquer do cimento Portland com níveis crescentes de materiais cimentícios suplementares. No entanto, algumas dessas adições como escória de alto forno e cinza volante, não serão capazes de suprir o crescimento da produção de cimento Portland nos próximos anos, e por consequência, tem-se estudado a substituição da argila calcinada e filer calcário neste material.

Entre os diversos MCS disponíveis no meio ambiente para a substituição parcial do clínquer, a argila calcinada e filer calcário são avaliados em termos de benefícios em comparação com o cimento Portland (ANTONI *et al.*, 2012; AVET *et al.*, 2016; BERRIEL *et al.*, 2016; SCRIVENER *et al.*, 2018). Conforme Scrivener *et al.* (2018) para a produção de uma tonelada de argila calcinada, pode ser emitido apenas 0,3 toneladas de CO₂, sendo muito menor que a emissão de uma tonelada de cimento Portland.

2.2 CIMENTOS COM MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS

Os materiais cimentícios suplementares vêm ganhando destaque na indústria cimenteira, por possibilitar a redução do alto custo com a produção e poluição ambiental das fábricas de cimento Portland. Estes materiais provêm de subprodutos com propriedades pozolânicas, podendo ser utilizado como substituinte parcial do cimento Portland (SAKIR *et al.*, 2020). Geralmente, a adição de MCS aceleram a hidratação precoce do cimento Portland, devido aos efeitos de enchimento e diluição, que serão apresentados adiante.

Conforme às limitações globais da disponibilidade de MCS tradicionais, como cinza volante e escórias, o uso da combinação de argila calcinada e filer calcário (LC³) é mais uma alternativa para reduzir a emissão de CO₂ no meio ambiente. O cimento LC³ oferece

benefícios ecológicos devido a redução do fator de clínquer pela metade, ou acima disso, e menor energia incorporada das misturas, em comparação ao cimento Portland comum (NAIR *et al.*, 2020). Para um melhor entendimento, serão apresentados separadamente os conceitos relacionados a cimentos com misturas binárias, com adição da argila calcinada e fíler calcário, e após isso, as reações sinérgicas que ocorre na mistura ternária do LC³.

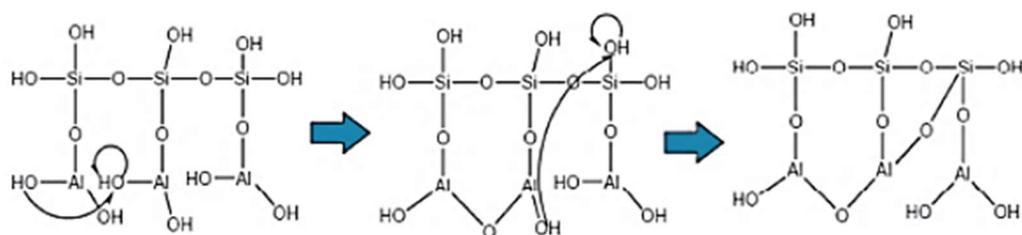
2.2.1 Cimentos com Argila Calcinada

As argilas calcinadas são materiais provenientes da calcinação de certos tipos de argilas, entre a faixa de temperatura de 500 a 900°C, que apresentam reatividade com o hidróxido de cálcio. Lin *et al.* (2019) explica que as argilas calcinadas podem ser produzidas em equipamentos semelhantes aos do cimento Portland comum, com menor temperatura de calcinação. Isto implica dizer que a faixa de temperatura utilizada para a calcinação, resulta em uma diminuição no consumo de energia e redução das emissões de CO₂, pois a ativação térmica emite apenas vapor de água para a atmosfera (TIRONI *et al.*, 2013).

As argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, denominados de argilominerais (SANTOS, 1992). Estes materiais são heterogêneos, na qual suas propriedades dependem da estrutura geológica e localização da extração. Dentre os vários tipos de minerais argilosos, os encontrados em maior abundância na natureza são: caulinitas ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), ilitas ($Si_4(Al,Mg,Fe)_{2,3}O_{10}(OH)_2.(K,H_2O)$), e esmectitas ($Na_{0,33}(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2.n(H_2O)$) (MARTHO, 2016).

Estudos comprovam que a argila caulinita é mais indicada para o cimento LC³, por possuir maior pozolanicidade, quando ativadas termicamente (KANCHANASON; PLANK, 2019). A partir desse aquecimento, ocorre o fenômeno conhecido por desidroxilação (Figura 2.1), em que são removidas as hidroxilas da estrutura molecular da argila, causando um desarranjo estrutural, obtendo assim, uma fase de silicato de alumínio amorfo, chamado de metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) (TIRONI *et al.*, 2014). Este componente pode reagir com hidróxido de cálcio para formar o silicato aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e hidratos de aluminato (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Figura 2.1 - Processo de desidroxilação da caulinita.



Fonte: Nicolas (2011)

A melhoria da microestrutura das misturas de clínquer com MCS, está relacionada a vários fatores, como aos efeitos de preenchimento e diluição. No efeito de nucleação a superfície desses materiais fornece locais de nucleação para a precipitação de C-S-H, o que resulta em uma hidratação mais rápida das fases do clínquer. Já no efeito de diluição a substituição parcial desses materiais aumenta a quantidade de água disponível para a fase de clínquer, aumentando a solubilidade e o espaço disponível para o crescimento de produtos de hidratação (MISHRA; EMMANUEL; BISHNOI, 2019).

Quanto as jazidas de argila calcinada no mundo, a maioria possui baixa pureza (teor de caulinita), contendo outros componentes como quartzo, óxidos de ferro (Fe_2O_3), óxidos de titânio (TiO_2), e calcita (CaCO_3) (ANTONI *et al.*, 2012). Conforme Scrivener *et al.* (2018) e Maraghechi *et al.* (2018) mesmo a utilização de argilas com baixa pureza, as propriedades mecânicas apresentam resultados semelhantes ao cimento Portland comum.

A região de Brasília, bem como grande parte do Planalto Central Brasileiro, situa-se em uma camada superficial de argila intemperizada, estruturada, de baixa capacidade de suporte e comportamento colapsível (SILVA, 2006). Dessa maneira, devido a maior disponibilidade das jazidas dessa matéria-prima, a argila pode ser uma opção que atenda as perspectivas crescentes da indústria cimentícia no Centro-Oeste.

2.2.2 Cimentos com Fíler Calcário

O fíler calcário é uma matéria-prima derivada da moagem de rochas calcárias obtidas de pedreiras, caracteriza-se como um pó muito fino, composto principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3). Este material é capaz de aprimorar o comportamento reológico, propriedades mecânicas e durabilidade de misturas cimentícias (POLISSENI, 2018). O teor de fíler nos cimentos Portland é variável de acordo com a normalização de cada país ou região. A norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018) limita a adição de fíler de 0-15% para

cimento Portland composto com material pozolânico, 0-10% para cimento Portland pozolânico e 11-25% para cimento Portland com material carbonático. Já a norma europeia EN 197-1 (CEN, 2011) permitem um teor máximo de filer de até 35%, conforme as características do material adicionado. Além disso, a grande vantagem desse material é quanto a disponibilidade no meio ambiente, por se tratar de rejeito de britagens, pode ser encontrado em diferentes granulometrias e em abundância (ABESC, 2007).

Apesar da atuação do filer calcário não ser na produção de C-S-H, como nos materiais pozolânicos, a adição deste material faz com que ocorra a precipitação do C_3A e a interação entre o C_3S e o $CaCO_3$, acelerando a hidratação do cimento (PÉRA; HUSSON; GUILHOT, 1999; MORAES, 2010; LI *et al.*, 2019). Além disso, pode fornecer nucleação heterogênea, aumentar o grau de hidratação, melhorar a distribuição granulométrica das partículas e propiciar um empacotamento mais satisfatório (BONAVETTI *et al.*, 2003).

O efeito químico do filer calcário na mistura de cimento Portland é influenciado principalmente pelo tamanho da partícula, conteúdo de C_3A e C_4AF do cimento, bem como dos MCS (WANG *et al.*, 2018). Estudos demonstram que na presença de material carbonático finamente moído ocorre a formação de compostos carboaluminatos, denominado monocarboaluminato hidratado ($3CaO.Al_2O_3.CaCO_3.11H_2O$) (KAKALI *et al.*, 2000; MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003; BONAVETTI *et al.*, 2003; WEERDT *et al.*, 2011). Os carbonatos podem interagir com os hidratos de aluminato, levando a estabilização da etringita e um aumento no volume total de produtos de hidratação (DÍAZ *et al.*, 2017a; SCHOLER *et al.*, 2015).

2.2.3 Cimentos com Argila Calcificada e Filer Calcário (LC³)

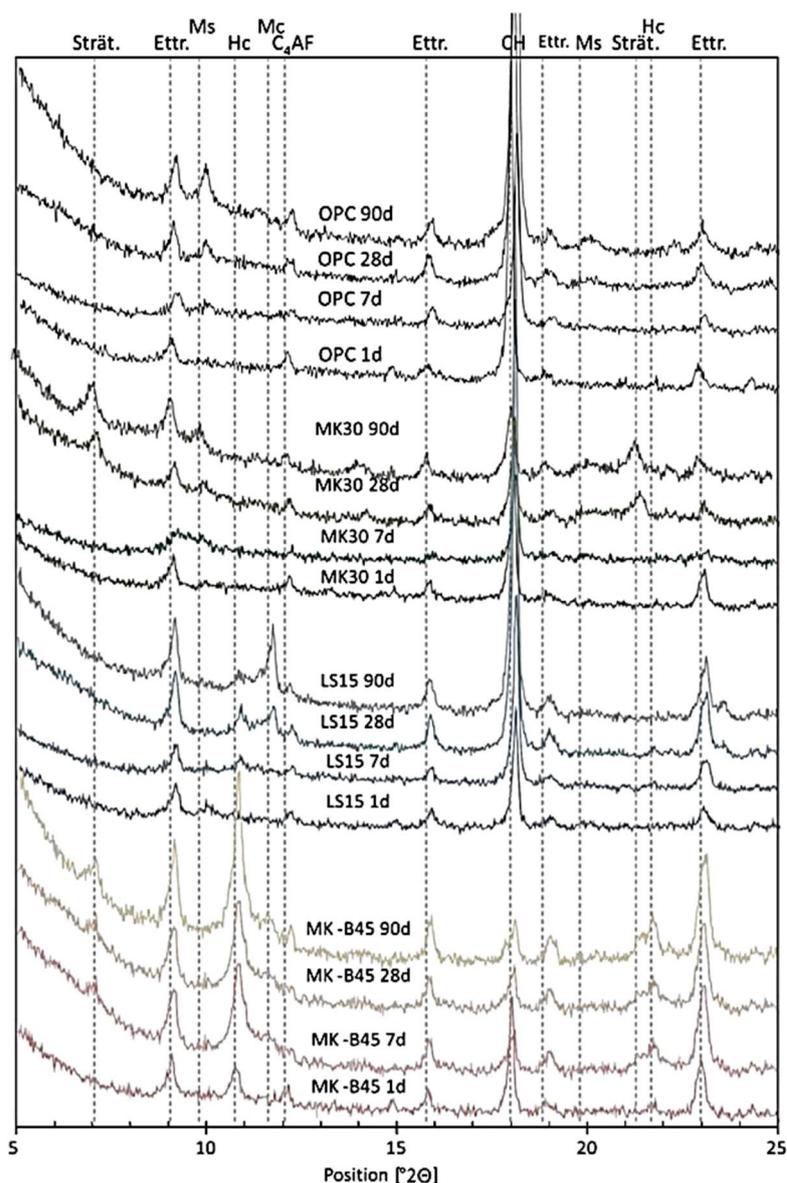
As misturas contendo argila calcificada e filer calcário, denominado cimento LC³, são avaliadas com relação aos seus benefícios em comparação com a utilização do cimento Portland comum (BONAVETTI; RAHHAL; IRASSAR, 2001; VANCE *et al.*, 2013; ANTONI *et al.*, 2012; BISHNOI *et al.*, 2014; EMMANUEL *et al.*, 2016). Essa mistura ternária pode reduzir o fator de clínquer pela metade, além de trazer resultados positivos de resistência mecânica, devido principalmente, a reação sinérgica entre os MCS (ANTONI *et al.*, 2012; LINS, 2017).

A argila calcificada contribui para a formação das fases C-A-S-H, etringita e AFm, e o calcário para as fases de carboaluminatos. Na mistura ternária, ocorre a reação sinérgica, em que o

aluminato da argila também reage com a calcário, aumentando as fases de carboaluminato, hemicarboaluminato e monocarboaluminato (Hc e Mc) (DAMIDOT *et al.*, 2011; WEERDT *et al.*, 2011; ANTONI, 2013). Foi demonstrado experimentalmente e com cálculos termodinâmicos que as fases de carboaluminatos estabilizam a etringita, formada durante os estágios iniciais de hidratação, evitando a conversão em monossulfato (DHANDAPANI; SANTHANAM, 2017).

Antoni *et al.* (2012) estudou as fases de carboaluminato por meio das análises de difração de raios-X, em quatro pastas de diferentes composições de cimento. Na Figura 2.2 é possível visualizar os difratogramas das pastas cimentícias, nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias, sendo OPC a mistura de referência, MK30 com utilização de 70% de cimento Portland e 30% de metacaulim, LS15 com 85% de cimento Portland e 15% de fíler calcário, e a mistura MK-B45 contendo cimento LC³ na proporção 2:1 (metacaulim:fíler calcário) e substituição de 45% do cimento Portland. É possível perceber que a mistura de referência apresenta picos característicos de etringita, monossulfoaluminato e crescente quantidade de portlandita. Já a amostra MK30 tem os mesmos picos, juntamente com stratlingita. A mistura com calcário (LS15) mostra a formação do hemicarboaluminato a partir dos 7 dias e monocarboaluminato a partir dos 28 dias, em vez de monossulfoaluminato. Na mistura MK-B45 a formação de etringita é potencializada, e verifica-se uma maior quantidade de hemicarboaluminato logo no primeiro dia de hidratação.

Figura 2.2 - Difratogramas de misturas de argamassa aos 1, 7, 28 e 90 dias de cura.



Strat = stratilingita; Ettr. = etringita; Ms = monossulfoaluminato; C4AF = ferro aluminato tetracálcico; CH = hidróxido de cálcio ou portlandita; HC = hemicarboaluminato; MC = monocarboaluminato.

Fonte: Antoni *et al.* (2012)

2.2.4 Proporções de Substituição do Cimento LC³

A proporção de substituição e composição química dos MCS são de grande importância para as propriedades da mistura final. A sinergia entre a mistura ternária do cimento LC³ foi comprovada em proporção de 2:1 de argila calcinada:filer calcário (ANTONI, 2013), composta por 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gesso, devido à melhor densificação da microestrutura no período de hidratação (MAITY;

BISHNOI; KUMAR, 2015; BERRIEL *et al.*, 2016; AVET; SCRIVENER, 2017; MEDEPALLI; SHAH; BISHNOI, 2017; KRISHNAN *et al.*, 2019).

Os resultados de Antoni *et al.* (2012) revelaram que a argila calcinada reagiu de forma mais eficiente juntamente com calcário em uma mistura ternária, do que em uma mistura binária. Foram feitas argamassas com níveis totais de substituições de 15%, 30%, 45% e 60% pelo cimento LC³, na proporção 2:1. Os pesquisadores optaram por esta proporção baseados em um modelo termodinâmico de Damidot *et al.* (2011), apontado como ideal.

Lins (2017) mostrou um ganho de resistência em idades avançadas de argamassas contendo cimento LC³, na proporção 2:1, com substituição de até 60%. A substituição de 45% de cimento Portland por cimento LC³ teve um aumento nos índices de desempenho, aos 28 dias, em todos os traços produzidos a partir do uso de metacaulim.

Rocchi e Oliveira (2017) trabalharam com argamassas, com substituição do clínquer por argila calcinada e filler calcário em diferentes proporções (0:0, 1:2, 2:1, 3:1 e 1:1). Os resultados de resistência à compressão foram satisfatórios para as proporções de 2:1 e 3:1, visto que não houve perda de desempenho significativa e os traços atingiram valores próximos à argamassa de referência. Os autores ainda afirmaram que do ponto de vista econômico, a melhor mistura com o cimento LC³ corresponde a uma proporção de duas partes de argila calcinada para uma de filler (2:1).

Tironi *et al.* (2017) utilizou argamassas com uma proporção 3:1 e substituição em massa de 20% e 40% do cimento de referência, por argila calcinada e filler calcário. Para ambas as misturas ternárias, os resultados mostraram resistência à compressão superior a 40MPa, em 28 dias, indicando um bom desempenho mecânico.

Barbalho (2018) avaliou teores de substituição de 35%, 40% e 45% nas proporções 2:1, 3:1, e 4:1, sendo argila calcinada e filler calcário, respectivamente. Seus resultados indicaram que as misturas com 40 e 45% de substituição do cimento Portland apresentaram-se semelhantes, enquanto que as proporções 3:1 e 4:1 apresentaram maiores valores de resistência à compressão, em comparação com a mistura de referência.

A maioria de trabalhos envolvendo parte da substituição do clínquer pelo cimento LC³ trabalha com a proporção de 45%, sendo desses 30% de argila calcinada e 15% de filler calcário, na proporção de 2:1, respectivamente. Autores como Scrivener *et al.* (2019) garantem que esta seria o teor de substituição mais adequado, melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade.

2.3 INFLUÊNCIA DO CIMENTO LC³ NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A partir da inserção de materiais cimentícios suplementares ao concreto ou pastas, podem ser observados fatores positivos e negativos tanto no estado fresco, como no estado endurecido. Conforme Soares (2015) esses benefícios podem ser listados como diminuição da exsudação, redução do calor de hidratação, redução da porosidade em função do efeito filler e, conseqüentemente, refinamento dos poros, aprimorando propriedades mecânicas e algumas de durabilidade. A seguir são discutidas algumas características do concreto com utilização do cimento LC³, em relação às propriedades no estado fresco, mecânicas e relacionadas à durabilidade.

2.3.1 Propriedades no Estado Fresco

As questões problemáticas com o uso de argilas calcinadas é o aumento da demanda de água devido à alta finura, causada pela estrutura em formato de folha e menor distribuição do tamanho de partículas (CASSAGNABÈRE *et al.*, 2013). Dessa maneira, para manter a trabalhabilidade da mistura, é necessária uma maior quantidade na dosagem do aditivo superplastificante (BATIS *et al.*, 2005; PAIVA *et al.*, 2012; PERLOT; ROUGEAU; DEHAUDT, 2013).

A trabalhabilidade é uma propriedade relacionada ao estado fresco do concreto, considerada como um parâmetro essencial de desempenho, que reflete a aplicabilidade no sistema. Existem vários métodos para melhorar a trabalhabilidade do concreto, como por exemplo: adição de água, afetando negativamente a resistência à compressão do concreto; uso de superplastificante e otimização do esqueleto granular do concreto (LARRARD; SEDRAN, 2002; BROUWERS, 2006; ROUSSEL, 2012). No Quadro 2.1 é apresentado resumos de alguns trabalhos que avaliaram o efeito da substituição de cimento Portland pelo cimento com argila calcinada e filler calcário na trabalhabilidade dos concretos.

Quadro 2.1 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC³ nas propriedades do estado fresco do concreto

Autor	Composição	a/agl	Trabalhabilidade
Sfikas, Badogiannis e Trezos (2014)	Variou entre 4,57% a 13,33% de metacaulim e de 28,76% a 20% de filer calcário	Variou de 0,50 a 0,60 (CAA)	Devido à alta superfície específica dos MCS, a trabalhabilidade da mistura foi afetada, necessitando de uma maior quantidade de água na mistura binária de cimento e metacaulim.
Lins, Rêgo e Silva (2017)	Variou em 15, 30, 45 e 60% de substituição do cimento Portland na proporção 2:1 de argila calcinada e filer calcário, respectivamente.	0,48	Verificou-se que a utilização de argila calcinada nas misturas de argamassa demandou uma alta dosagem do superplastificante, em função da finura do material.
Dadsetan e Bai (2017)	Traços com substituições de 10% e 20% de metacaulim, e 10%, 20% e 30% de filer calcário	Variou em 0,40 e 0,45 (CAA)	Os traços que continham o metacaulim necessitaram de um incremento na dosagem do superplastificante para a obtenção de propriedades no estado fresco semelhantes às demais misturas.
Favier <i>et al.</i> (2017)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gesso	0,50	Demonstraram que a trabalhabilidade é influenciada pelo tipo de argila calcinada, que aprisiona a água, reduzindo a proporção efetiva de água para ligante.
Miranda (2018)	80% de cimento, 15% de metacaulim e 5% de filer calcário	0,55 (CAA)	O traço de referência apresentou a menor quantidade de aditivo superplastificante. Já os traços com misturas binárias de cimento Portland e metacaulim (substituição de 20%) e o traço com cimento LC ³ necessitaram de uma maior quantidade.
Pierkes, Schulze e Rickert (2018)	Substituição de 20% e 40% em massa do cimento Portland por diferentes argilas calcinadas preparadas em laboratório.	Variou em 0,50 e 0,60	A trabalhabilidade dos concretos foi influenciada pelo tipo e temperatura de calcinação da argila. A diminuição da trabalhabilidade com a inserção de MCS, foi compensada com o uso de aditivo superplastificante.
Avet, Sofia e Scrivener (2019)	51,1% de clínquer, 29,7% de argila calcinada, 14,9% de calcário e 4,3% de gesso	0,34 e 0,43	As misturas com sílica ativa e cimento LC ³ requereram uma maior demanda de superplastificante, para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade, em comparação com o concreto de referência.
Nair <i>et al.</i> (2020)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gesso	Variou em 0,30, 0,35 e 0,50	Necessitou de uma maior quantidade de superplastificante para uma mesma trabalhabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora

A partir do Quadro 2.1 é possível perceber a grande influência do cimento LC³ nas propriedades do estado fresco da mistura, em que ao ser adicionado, há um aumento na demanda de água ou superplastificante para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade.

2.3.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas são essenciais para o cumprimento dos requisitos normativos, com controle sistemático conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015). Dentre elas, destacam-se as seguintes: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade secante.

2.3.2.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão apresenta-se como uma das mais importantes propriedades para referenciar o material. Medjigbodo *et al.* (2018) apresentaram que a resistência pode ser influenciada por meio das características do metacaulim, incluindo o processo de fabricação, área específica e o tamanho das suas partículas. Além disso, Krishnan *et al.* (2018) e Antoni (2013) afirmaram que o efeito sinérgico entre o metacaulim e filer calcário, contribui para a formação de fases de carboaluminatos, melhorando os resultados de resistência à compressão.

Perez *et al.* (2015) produziram argamassas com 50% de substituição de cimento Portland pelo cimento LC³ na proporção de 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gesso. Os traços foram moldados com relação a/c igual a 0,50 e com uma porcentagem fixa de superplastificante (1%). A resistência a compressão foi determinada aos 3, 7 e 28 dias, e foram menores em todos os testes para o cimento LC³ em comparação com a referência. Os autores mostraram que este parâmetro é altamente influenciado devido a presença de calcário, na qual a resistência à compressão foi maior quando aumentou a finura do MCS.

Dhandapani e Santhanam (2017) estudaram a resistência a compressão em pastas cimentícias e argamassas com substituição do cimento Portland por cimento LC³ na proporção 2:1 para argila calcinada e filer calcário, aos 3, 7 e 28 dias. Apesar das argamassas com cimento LC³ apresentarem características comparáveis de evolução da resistência em relação as outras misturas (referência e com cinza volante), o traço de referência obteve maiores resultados em todas as idades, em comparação com a argamassa de cimento LC³.

Dhandapani *et al.* (2018) também observou uma evolução semelhante na resistência a compressão dos traços de referência e com cimento LC³, até os 28 dias para as misturas M30 (30 MPa) e M50 (50MPa). Em idades posteriores (após os 28 dias) as misturas com cinza volante e cimento LC³ apresentaram maiores valores (cerca de 5%), em oposição à referência, devido a reação pozolânica prolongada dos MCS. Os resultados indicam que em uma proporção de mistura semelhante, o concreto com utilização do cimento LC³ produz uma maior evolução da resistência à compressão, em comparação com a referência e com cinza volante.

Tironi, Scian e Irassar (2015) avaliaram diferentes teores de substituição do cimento Portland pelo cimento LC³. Observaram que para os resultados de resistência, com substituição total de 20%, todos os traços obtiveram desempenho similar à mistura de referência desde as primeiras idades. O autor explicou que as fases hidratadas obtidas correspondem à reação pozolânica da argila calcinada, juntamente com a estabilização das fases proporcionada pelo filer calcário. Isso implica na modificação da estrutura de poros e todos os fatores contribuem para o desenvolvimento de propriedades mecânicas, apesar da grande redução no consumo de energia e emissão de CO₂.

Khan, Nguyen e Castel (2017) produziram três misturas com utilização do cimento LC³, com diferentes teores de substituição (15%, 30% e 45%) ao cimento Portland, na proporção de 2:1 (argila:filer calcário). Com 30% de substituição, o desempenho do concreto com cimento LC³ é próximo ao do concreto de referência. Após exceder esse valor de substituição (45%), houve uma redução de 30% na resistência à compressão do concreto com cimento LC³ em comparação com o concreto de referência.

2.3.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Existe uma tendência de se considerar a resistência à tração por compressão diametral como uma característica secundária do concreto, no entanto, se tratando de novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada (LEITE, 2001). Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) tem-se uma possibilidade de previsão do resultado de resistência à tração com base no valor de resistência à compressão do corpo de prova, ou vice-versa.

A resistência à tração do concreto não é só importante na estimativa da carga na qual sofrerá a fissuração, mas também na determinação da tensão de aderência e da resistência ao cisalhamento de elementos estruturais sem armadura transversal (SILVA, 1997). Em

determinadas estruturas, as solicitações predominantes são de tração na flexão, como por exemplo, pavimentos de rodovias e de aeroportos, lajes e vigas, ou tração pura por tirantes e reservatórios cilíndricos.

Narayanan e Muniasamy (2018) estudaram as propriedades endurecidas de concretos com substituições de 0 a 100% de cimento Portland por cimento LC³ aos 7 e 28 dias. Os autores encontraram um aumento no percentual de resistência à tração por compressão diametral no concreto com cimento LC³ variando entre 2 a 4% em comparação com o concreto convencional. Além disso, a mistura contendo 100% de cimento LC³ apresentou menores porcentagens, com relação a este parâmetro.

Yu, Wu e Leung (2020) avaliaram a resistência à tração de concretos, com utilização de cimento LC³ nas proporções 2:1 (argila calcinada:filler calcário) e variação na relação água/aglomerante (0,30, 0,35 e 0,40). Os autores mostraram que há uma tendência na diminuição na resistência à tração com o aumento da proporção água/aglomerante e aumento na substituição de cimento LC³.

2.3.2.3 *Módulo Estático de Elasticidade*

O módulo de elasticidade secante corresponde ao coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão/deformação específica (NBR 8522, 2008). Diversos fatores podem afetar o módulo de elasticidade do concreto, principalmente as características quanto a matéria-prima (VOGT, 2006), ou até mesmo a massa específica, fração volumétrica, módulo de deformação dos principais componentes e zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A melhora na zona de transição em misturas com a substituição de cimento Portland por MCS não corresponde a maiores resultados do módulo de elasticidade, pois este valor é mais influenciado devido as características do agregado (DAL MOLIN, 2005; SILVA, 2010). Perim (2013) afirmou que os aumentos nos níveis de resistência à compressão com a utilização de MCS, não é observado nos resultados de módulo de elasticidade. Além disso, conforme Lubeck *et al.* (2012) o crescimento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor que o da resistência à compressão.

Dhandapani *et al.* (2018) mostrou que todas as misturas contendo o cimento LC³ apresentaram resultados semelhantes de módulo de elasticidade (aproximadamente 35GPa) em todas as idades (2, 7, 28, 90 e 365 dias), em comparação com a referência. Isso indica que o concreto com utilização do cimento LC³ pode ter desempenho mecânico semelhante

aos concretos sem nenhum tipo de substituição. O autor correlacionou os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, obtendo como resultado uma tendência linear ($R^2= 0,89$), independentemente do tipo de aglomerante utilizado. Khan, Nguyen e Castel (2017) obtiveram resultados semelhantes de módulo de elasticidade para as misturas com substituição de 15%, 30% e 45% pelo cimento LC³, aos 28 dias.

2.3.3 Propriedades Relacionadas à Durabilidade

A aplicação de qualquer novo sistema cimentício, depende principalmente da sua viabilidade e desempenho. Dentre as propriedades para avaliação da durabilidade, a seguir serão apresentados: absorção de água por imersão, resistividade elétrica, carbonatação acelerada, migração de cloretos no estado não estacionário, efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos.

2.3.3.1 Absorção de Água por Imersão

Conforme Meira (2017) a porosidade do concreto pode ser reduzida utilizando baixa relação água/cimento, consumo adequado de cimento Portland e cura eficiente. Além disso, o uso de adições minerais, sílica ativa, cinza volante, metacaulim e escória de alto forno também podem reduzir o tamanho dos poros, auxiliando na redução da velocidade de transporte de agentes agressivos. A causa dessa redução está relacionada com a formação de uma matriz cimentícia densa, com menor quantidade de poros interconectados.

Conforme Oliveira (2007) a utilização do metacaulim diminui a porosidade e tamanho médio de poros do concreto ao longo do tempo, mostrando a ocorrência do refinamento de poros. Essa densificação na microestrutura corrobora com os resultados de desempenho mecânico, redução da taxa de absorção de água por imersão total, e, conseqüentemente maior durabilidade dos concretos. Ressalta-se que o trabalho apresenta informações da mistura binária de cimento Portland e metacaulim.

Santos (2016) avaliou os efeitos da incorporação de metacaulim (10%) e filer calcário (10%) nas propriedades de absorção de água total aos 28 dias de idade, massa específica e índice de vazios. A partir dos estudos realizados o autor chegou à conclusão de que os materiais cimentícios suplementares utilizados, proporcionaram melhores desempenhos que o concreto de referência.

Soares (2018) avaliou parâmetros de absorção de água por imersão em concretos com cimentos LC³, com substituições de 50% do clínquer, sendo 30% para argila calcinada e metacaulim, 15% filer calcário e 5% de gesso. Os resultados obtidos indicaram um desempenho inferior das argamassas utilizando cimento LC³ em comparação com a referência. Além disso, o autor verificou que a substituição de argila calcinada por metacaulim nos traços de cimento não geraram diferença significativa, devido a reatividade semelhante entre os materiais.

Foi demonstrado que quando o metacaulim é utilizado como substituição parcial do cimento, sua alta reatividade e propriedade pozolânica aceleram a hidratação do cimento, proporcionando baixos valores de absorção de água (GUTIÉRREZ; TORRES; GUERRERO, 2004; KHATIB; CLAY, 2004; BOROSNYÓI, 2016). Dessa forma, esse comportamento pode ser semelhante ao dos traços com cimento LC³.

2.3.3.2 Resistividade Elétrica

A resistividade do concreto é caracterizada pela sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Pode ser definida como a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção transversal constante, na qual a corrente é uniforme e continuamente distribuída, ou seja, resistência elétrica entre as faces opostas (SANTOS, 2006). Esta propriedade relaciona-se com a microestrutura do concreto, do volume, da distribuição do tamanho de poros e mobilidade dos íons presentes na solução aquosa da estrutura dos poros (WHITING; NAGI, 2003). A densificação da matriz e aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, mais tortuoso e descontínuos, dificultam a condução da corrente no concreto e aumentam a resistividade elétrica. A alta resistividade elétrica, apresenta menor pré-disposição para a corrosão das armaduras.

A principal vantagem deste teste trata-se do ensaio não destrutivo, que podem ser realizados em estruturas existentes, sem a necessidade de extração de testemunhos. Na Tabela 2.1 é apresentado critério proposto pelo normativo FIB CEB 192 e o boletim europeu COST 509 para a avaliação da relação entre a resistividade elétrica e o risco de corrosão das armaduras. Ressalta-se que esses valores não são totalmente consagrados e apresentam valores diferentes, de acordo com a pesquisa utilizada.

Tabela 2.1 - Valores de resistividade elétrica referentes a probabilidade de corrosão do concreto, segundo o normativo FIB CEB-192 e o boletim europeu COST 509.

Resistividade (kΩ.cm)		Risco de Corrosão
CEB-192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
-	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	-	Muito Alto

Fonte: RIBEIRO *et al.*, (2014)

Na Tabela 2.2 encontra-se identificada a relação entre a resistividade elétrica (volumétrica e superficial) e a penetração de íons cloreto, conforme proposto pela AASHTO TP 119 (2015) e ASTM C1556 (2011).

Tabela 2.2 - Classificação quanto à penetração de íons cloreto

Resistividade uniaxial volumétrica (kΩ.cm) (AASHTO TP 119:2015)	Resistividade Superficial (kΩ.cm) (ASTM C1556:2011)	Classificação quanto à penetração de íons cloreto
< 5,2	<12	Alta
5,2 a 10,4	12 a 21	Moderada
10,4 a 20,8	21 a 37	Baixa
20,8 a 207	37 a 254	Muito Baixa
> 207	>254	Insignificante

Fonte: TP 119 (AASHTO, 2015) e C1556 (ASTM, 2011)

A presença de materiais cimentícios suplementares também mostram influência na resistividade elétrica do concreto. Como a inserção destes materiais alteram significativamente a microestrutura da matriz do concreto, o refinamento da estrutura de poros provoca um aumento na resistividade (FARIAS, 2019). No Quadro 2.2 estão identificados os valores de resistividade elétrica obtidos para concretos produzidos com utilização do cimento LC³ como substituinte parcial do cimento Portland em concretos.

Quadro 2.2 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC³ no ensaio de resistividade elétrica, por diversos autores

Autor	Composição	a/c	Resistividade elétrica
Dhandapani <i>et al.</i> (2017)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário triturado e 5% de gesso.	Variou entre 0,3 a 0,5	O cimento LC ³ teve um impacto positivo em todas as idades de cura. Quanto ao concreto com utilização de cinzas volantes, houve uma tendência semelhante ao cimento LC ³ em 365 dias. O concreto de referência obteve os menores valores de resistividade superficial.
Alvarez <i>et al.</i> (2017)	Substituição de 15, 25, 30, 40 e 45% de cimento Portland em proporções de 2:1, 3:1 e 4:1 para metacaulim e calcário, respectivamente.	Variou entre 0,8 e 0,9	A diminuição da quantidade de cimento, e aumento de MCS na mistura, elevou os valores de resistividade. Ressalta-se que os autores mostraram que quanto maior a quantidade de fibras no concreto com cimento LC ³ , menor é a resistividade
Dhandapani <i>et al.</i> (2018)	50% de clínquer, 31% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 4% de gesso.	Variou entre 0,40 e 0,50	O concreto com utilização do cimento LC ³ atingiram a maior resistividade em todas as misturas. Com valores em torno de 200-250 kΩ.cm, 300-400 kΩ.cm e 300-450 kΩ.cm aos, 28, 56 e 90 dias, respectivamente. Enquanto que a mistura de referência, em todas as idades do ensaio, obteve valores em torno de 10-20 kΩ.cm.
Alemán, Rodriguez e Martirena (2019)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso	Variou entre 0,40 a 0,55	As misturas contendo o cimento LC ³ apresentaram maiores resultados quanto a resistividade elétrica superficial, com um aumento de 11 a 16 vezes comparada a mistura de referência.
Vargas <i>et al.</i> (2020)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 20% de calcário.	Variou entre 0,31 a 0,34	A resistividade com a mistura LC ³ chegou a aproximadamente 121,8 kΩ.cm, enquanto que a mistura de referência obteve um resultado de 18,1 kΩ.cm

Fonte: Elaborado pela autora

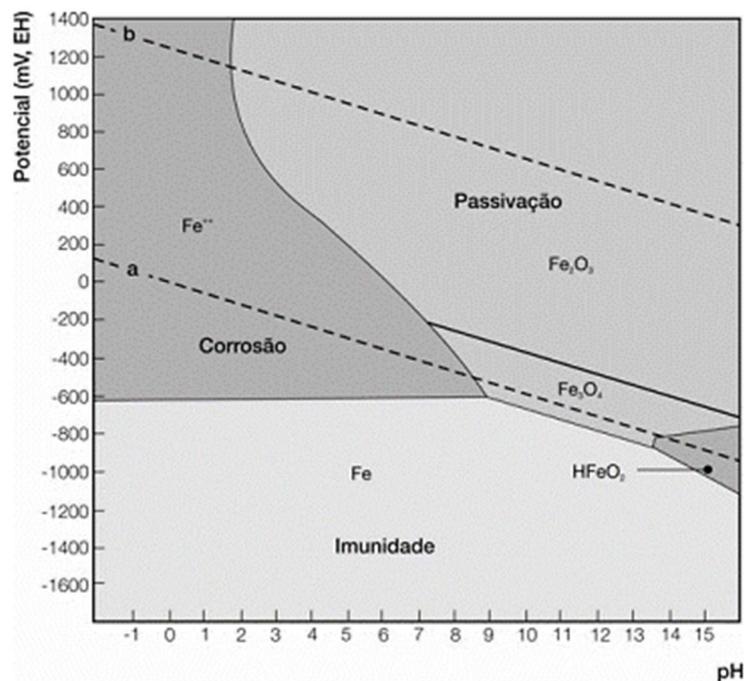
2.3.3.3 Carbonatação Acelerada

A carbonatação é um dos principais processos de deterioração de estruturas de concreto armado, mesmo ocorrendo de forma lenta, sendo necessário a presença de determinada concentração de CO₂ e certo teor de umidade. Este fenômeno é responsável pela redução da alcalinidade do concreto, alterando as condições de estabilidade química da película

passivante da armadura. A partir disso, cria condições favoráveis para o início do processo corrosivo, comprometendo a segurança e durabilidade das estruturas (POSSAN, 2010).

O concreto corresponde a um ambiente altamente alcalino, que favorece a formação de uma camada protetora de passivação na superfície do aço. Essa alcalinidade é mantida por meio da presença dos hidróxidos $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH e KOH , dissolvidos na fase aquosa ou precipitados durante a hidratação (SANTOS, 2006). A passivação das armaduras corresponde a uma película fina de um filme óxido estável e aderente, entendida como a resistência a corrosão (SILVA, 2007). Esta película pode ser quebrada na presença da carbonatação e íons cloreto. O diagrama de Pourbaix indica as condições para que o metal se encontre na zona de passivação ou despassivação, relacionando valores de potencial padrão - E° (V) e de pH, para temperatura de 25°C e pressão de 1atm (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro- H_2O a temperatura de 25°C



Fonte: POURBAIX (1974), adaptado.

De acordo com o diagrama de Pourbaix é possível identificar as possíveis fases de equilíbrio que um sistema eletroquímico. A região entre as linhas tracejadas "a" e "b" representam o domínio de estabilidade termodinâmica da água. Abaixo da linha "a" a água tende a decompor-se por redução, e acima da linha "b" a água tende a decompor-se por oxidação. Conforme Silva (2007) através da Figura 2.3 podem ser observadas três fases distintas:

1. A região de imunidade na qual é termodinamicamente desfavorável a ocorrer a corrosão. Quando o potencial é menor que -600mV o ferro não reage, independente do pH;
2. A região de passivação em que os óxidos e hidróxidos de ferro são estáveis (formação da película de passivação); e,
3. A região que a combinação de pHs e potenciais resultam em uma situação de corrosão.

Conforme Isaia (1999) a carbonatação trata-se de um processo físico-químico que progride da superfície externa para a interna no concreto, com maior intensidade quanto maior for a porosidade. O efeito físico é governado pela estrutura da rede de poros (geometria, distribuição, interconectividade e tortuosidade) que permite a penetração do dióxido de carbono (CO₂) presente no meio ambiente através da difusão. Já o químico, ocorre por meio da reação de neutralização da água do poro saturado de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e dos compostos alcalinos hidratados (formados por íons de sódio, potássio, e, principalmente, cálcio), que submetem a ciclos de molhagem e secagem, precipitam o carbonato de cálcio, sob a ação do anidro carbônico (TAYLOR, 1997). A velocidade do processo de carbonatação é função da difusão de CO₂ no concreto, umidade relativa, relação a/c, tipo de cimento, permeabilidade do concreto e cura (LAPA, 2008).

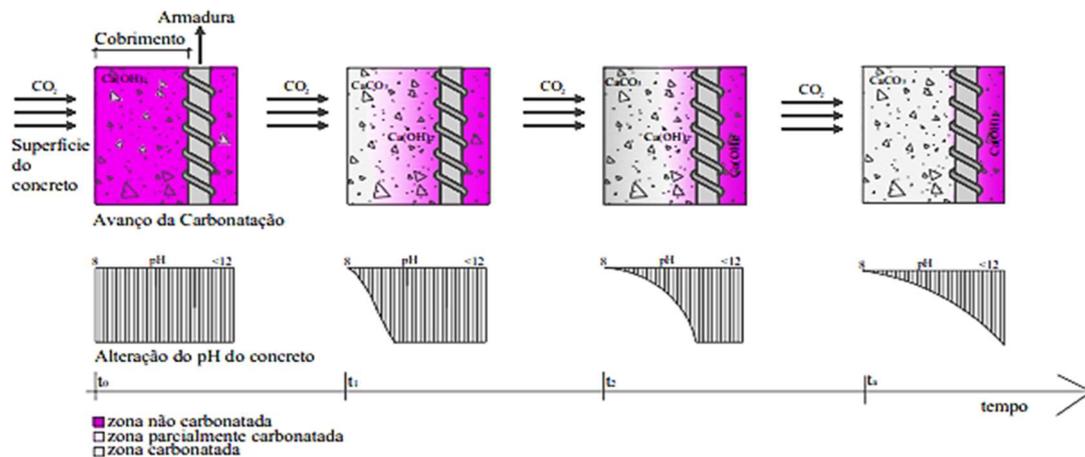
Conforme Silva (2007), inicialmente o dióxido de carbono se dissolve na solução dos poros saturados da pasta de cimento, em direção à região com menor concentração e na presença de umidade dos poros, ocorre a formação do ácido carbônico (Equação 1). A partir disso, os cristais de Ca(OH)₂ se dissolvem na fase aquosa dos poros do concreto (Equação 2), desencadeando a reação do hidróxido de cálcio com o CO₂, dando origem ao carbonato de cálcio (Equação 3). A formação do CaCO₃ altera as condições de estabilidade química, que protege as barras de aço, e o volume dos poros.



O principal efeito da carbonatação, segundo Metha e Monteiro (2014) corresponde a diminuição da alcalinidade do concreto, ou seja, diminuição do seu pH (potencial hidrogeniônico), tornando possível a corrosão da armadura. Originalmente o pH do concreto

encontra-se acima de 12,5, e após a carbonatação reduz para valores inferiores a 8,5, quando o hidróxido de cálcio se transforma em carbonato de cálcio. Possan (2010) identificou três zonas distintas no concreto quando submetido a carbonatação: uma carbonatada com pH inferior a 8,5, uma parcialmente carbonatada com pH aproximadamente 10 e uma zona não carbonatada com pH maior que 12,5. Na Figura 2.4 pode ser observada a mudança do pH no processo de carbonatação, sendo que o avanço da frente de carbonatação está intimamente ligado à capacidade que o CO₂ tem de se difundir através do cobrimento do concreto (x) e no tempo (t). Este processo é iniciado primeiramente na superfície do concreto, formando a frente de carbonatação, e vai difundindo para o interior podendo chegar à armadura.

Figura 2.4 - Representação do avanço da frente de carbonatação no concreto e alteração do pH em função do tempo.



Fonte: Possan (2010)

A Figura 2.4 evidencia o avanço da frente de carbonatação do concreto em função do tempo. No tempo t_0 , o concreto tem pH inalterado, sem zona carbonatada. Com o ingresso de CO₂ (t_1 e t_2) ocorre a formação do CaCO₃ e a consequente redução do pH do concreto. A partir do momento que chega na armadura, diz-se que ela está desprotegida/despassivada, estando susceptível a corrosão. No último estágio indicado na figura, de acordo com a ISO 13823 (2008) a estrutura atingiu o Estado de Limite de Durabilidade (ELD), que precede a ocorrência do Estado Limite de Serviço (ELS) e do Estado Limite Último (ELU).

Tuutti (1982) apresenta em seu trabalho um modelo de previsão de carbonatação, baseada na 1ª Lei de difusão de Fick, sendo x a profundidade de carbonatação em mm, K o coeficiente de carbonatação (depende do ambiente e do material) em mm/anos^{0,5} e t o tempo de exposição ao ambiente acelerado de carbonatação em anos.

$$x = K \cdot \sqrt{t}$$

(Equação 4)

Embora a formulação matemática proposta por Tuutti (1982) ser alvo de muitas críticas, serviu como base de outros modelos elaborados posteriormente, ainda sendo utilizado em ampla escala até os dias atuais nos estudos de carbonatação. Conforme Helene (1993) o modelo é interessante para estudos em ambientes internos, visto que as condições climáticas são praticamente, inalteráveis. Porém, ressalta que quando em ambientes externos, os valores de profundidade de carbonatação são inferiores aos calculados, devido às variações das condições ambientais.

Geralmente os estudos sobre carbonatação ocorrem de maneira acelerada, sendo que utilizam concentração de CO₂ variadas, em condições laboratoriais (GRUYAERT; HEEDE; BELIE, 2013; KULAKOWSKI; PEREIRA; MOLIN, 2009; LI *et al.*, 2007; SILVA, 2017; SIM; PARK, 2011; THOMAS *et al.* 2013; YOUNSI *et al.* 2013). Apesar da normatização recente da ISO 1920 (2015), a comparação de trabalhos sobre a carbonatação acelerada ainda é difícil, devido à grande variabilidade em função da padronização do ensaio. Dessa maneira, a Tabela 2.3 encontra-se um resumo de trabalhos sobre carbonatação em concretos com utilização do cimento LC³.

É notável a ausência de algumas informações sobre o ensaio de carbonatação nos trabalhos apresentados na Tabela 2.3. Por exemplo, Khan, Nguyen e Castel (2017) não especificaram as dimensões dos corpos de prova e Shah e Bishnoi (2018) o tempo de medição. Além disso, os resultados são de difícil comparação, devido a disparidade nos parâmetros utilizados, sem nenhuma padronização.

Shah e Bishnoi (2018) estudaram a influência da carbonatação em concretos com cimento Portland comum e com substituições do cimento Portland por cinzas volantes, escória e cimento LC³, em condições naturais e aceleradas. Os resultados indicaram que a taxa de carbonatação é regida principalmente pela quantidade de substituição de clínquer, umidade relativa e proporção água/cimento. A mistura de referência apresentou melhor resistência a carbonatação, enquanto que a mistura com cimento LC³ apresentou a pior resistência em condições aceleradas. Os autores não observaram nenhuma correlação entre o coeficiente de carbonatação e os parâmetros físicos do concreto (resistência à compressão e porosidade). Entretanto, observou-se entre os parâmetros químicos (conteúdo alcalino total, reserva alcalina e pH) como era de se esperar. Além disso, desenvolveu uma equação empírica que prevê a profundidade de carbonatação em cimento Portland e cimentos com MCS.

Tabela 2.3 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC³ no ensaio de carbonatação acelerada por diversos autores.

Autor	Composição	Tipo e dimensões dos CPs	Tempo de medição (dias)	Temp. (°C)	Umidade relativa (%)	Concentração de CO ₂ (%)	x (mm) ou K (mm/semana ^{0,5})
Shi <i>et al.</i> (2015)	68,1% de cimento branco, 25,5% de metacaulim e 6,4% de fíler	Prismáticos 40 x 40 x 160 mm	7	20	57	1	REF (x= 1,5) LC ³ (x = 4,2)
Khan, Nguyen e Castel (2017)	Substituição de 15%, 30% e 45% na proporção 2:1	Cilíndrico	32	23	55	1	REF (x = 6,5) LC ³ ₁₅ (x =4,5) LC ³ ₃₀ (x =7,5) LC ³ ₄₅ (x =11,0)
Shah e Bishnoi (2018)	50% de clínquer, 31% de argila calcinada, 15% de fíler e 4% de gesso	Prismático (500 x 100 x 100 mm)	-	27	60	3 (condição acelerada)	REF (k = 0,90) LC ³ (k = 38,42)
Miranda (2018)	80% de cimento, 15% de metacaulim e 5% de fíler calcário	Prismático (400 x 100 x 100 mm)	56, 63 e 70	27 ± 2	65 ± 5	3 ± 0,5	70 dias REF (x = 3,22) LC ³ (x = 3,55) e REF (k = 1,5) LC ³ (k = 1,10)

Fonte: Elaborado pela autora

Khan, Nguyen e Castel (2017) avaliaram a resistência a carbonatação de concreto com cimento LC³ em diferentes taxas de substituições. Os autores indicaram que quanto maior a taxa de substituição de cimento Portland comum por cimento LC³, menor a resistência do concreto a carbonatação. Outro fator importante, é que os concretos com substituição do cimento Portland acima de 30%, não são adequados para condições de exposição em que a carbonatação seja um problema.

Shi *et al.* (2015) estudou a durabilidade de argamassas com utilização de metacaulim e fíler calcário. Os resultados indicaram uma maior resistência a carbonatação na amostra de referência, e menor nas amostras que continham metacaulim, em misturas binárias e ternárias. Os autores ainda afirmaram que o desempenho da carbonatação das misturas com cimento LC³ não são explicados apenas devido a porosidade e conectividade dos poros (efeitos físicos) e sim, da quantidade de portlandita (efeito químico).

Díaz *et al.* (2017b), Nguyen, Khan e Castel (2018), Gettu *et al.* (2018) e Shah *et al.* (2018) afirmaram que o concreto utilizando o cimento LC³ possui uma maior suscetibilidade ao

efeito da carbonatação, para misturas com substituição de cimento Portland acima de 30%. Miranda (2018) também avaliou a carbonatação de concretos com substituição de 15% de metacaulim e 5% de filer calcário ao cimento Portland. A autora mostrou que para a proporção utilizada, o concreto com cimento LC³ teve um comportamento similar ao concreto de referência na carbonatação acelerada.

2.3.3.4 Resistência à Penetração dos Íons Cloro

A degradação das estruturas em concreto têm sido alvo de diversas pesquisas envolvendo a durabilidade e patologia das estruturas. Para que não ocorra a corrosão, as armaduras são revestidas por uma camada de passivação, ou proteção química, que constitui de um filme extremamente fino e muito aderente ao aço, composto de variações de magnetita (Fe_3O_4 ao $\gamma-Fe_2O_3$). A camada de passivação das armaduras pode ser quebrada pela diminuição da alcalinidade do concreto, que pode ser devido a carbonatação ou penetração de íons cloretos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Yang *et al.* (2020) o transporte e penetração de íons cloreto ocorre através da difusão iônica, permeação, sucção capilar ou migração iônica. Geralmente, a difusão é considerada o mecanismo dominante em concretos sujeitos a prazos longos de exposição, onde um potencial químico direciona os íons Cl^- livres para áreas de menor concentração de Cl^- . A ação dos cloretos acarreta em um processo de corrosão localizada, denominado corrosão por pites, sendo caracterizada por pontos na superfície das armaduras que se aprofundam à medida que o processo corrosivo avança (CASCUDO, 1999). Conforme Balestra *et al.* (2018) os pites são capazes de gerar pequenas variações de massa nas armaduras, que propõem danos significativos a seção transversal, reduzindo as propriedades mecânicas das barras quando submetidas a tração.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2014) os cloretos se apresentam de três maneiras no concreto: dissolvidos nas estruturas de C-S-H; quimicamente combinados aos aluminatos do cimento e/ou materiais cimentícios suplementares, formando produtos estáveis como o Sal de Friedel (cloro-aluminato de cálcio hidratado – $C_3A.CaCl_2.10H_2O$); ou sob forma de íons livres, dissolvidos na solução intersticial. Os cloretos livres são os que causam danos ao concreto e originam o processo de corrosão das armaduras.

A formação dos carboaluminatos (hemi e mono) ocorre na presença de calcário e aluminatos (BONAVETTI; RAHHAL; IRASSAR, 2001; LOTHENBACH *et al.*, 2008). Quando o

sistema é submetido a exposição de íons cloreto, as fases de carboaluminatos convertem progressivamente no sal de Friedel (MARAGHECHI *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2017a; SHI *et al.*, 2017b). Este tipo de sal é insolúvel e diminui o fluxo de penetração de cloretos, por meio da diminuição da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto (SILVA, 2006). Dessa maneira, quanto maior a quantidade de sal de Friedel, maior a resistência à corrosão.

Aguiar (2006) cita que tem muita controvérsia quando trata da quantidade de cloretos suficiente para o início da corrosão. A prescrição normativa NBR 12655 (ABNT, 2015) estabeleceu um teor máximo de íons cloreto no concreto, por meio de um percentual sobre a massa do cimento, conforme as condições de serviço da estrutura. Na Tabela 2.4, podemos verificar as limitações descritas na norma.

Tabela 2.4 - Teores máximos de íons cloreto no concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto no concreto (%)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015)

Foram pesquisados trabalhos avaliando a migração de cloretos com misturas contendo cimento LC³ como substituinte parcial do cimento Portland comum. O Quadro 2.3 resume alguns trabalhos sobre essa temática, especificando a composição, relação a/c, tipo e dimensões dos corpos de prova, tempo de medição e comportamento.

Quadro 2.3 - Efeito da substituição de cimento Portland por cimento LC³ no ensaio de migração de cloretos, por diversos autores

Autor	Composição	a/c	Tipo e dimensões dos corpos de prova	Tempo de medição	Resistência a penetração de íons cloreto
Dhandapani <i>et al.</i> (2017)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário triturado e 5% de gesso	0,3 0,4 0,5	Cilíndricos 100 x 200 mm	1 ano	O concreto com cimento LC ³ apresentou uma excelente resistência à entrada de cloretos, após 1 ano de cura, mostrou uma penetração de cloretos inferior a 5mm.
Maraghechi <i>et al.</i> (2018)	53,9% de clínquer, 29,4% de argila calcinada, 14,7% de calcário e 2% de gesso	0,5	Cilíndricos (110 x 300 mm)	1 e 2 anos de exposição	Foram avaliadas as propriedades de durabilidade do cimento LC ³ utilizando argilas calcinadas de várias purezas. Os autores verificaram que a ligação dos íons cloreto ocorreu tanto no sal de Friedel quanto no C-A-S-H. Os valores de difusividade do cimento LC ³ eram de magnitude 1-2 inferiores à referência.
Marangu (2020)	50% de clínquer, 30% de tijolos de barro moídos, 15% de calcário e 5% de gesso	0,50 0,55 0,60	Prismáticos 40 mm x 40 mm x 100 mm	28 dias	Maiores valores de difusão de cloretos foi encontrado nas proximidades da superfície da argamassa (< 20mm). Em maiores profundidades (> 20mm) esse valor teve uma diminuição, devido a capacidade de ligação do cloreto. Os autores observaram ainda que o LC ³ exibe maior resistência a cloretos em comparação com a mistura de referência.
Avet e Scrivener (2020)	50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso	0,50	Pastas fatias de 2mm	28 dias	Para tornar um teste mais realista, os autores ajustaram o pH da amostra. Os autores observaram que o aumento do pH levou a uma diminuição da quantidade de cloreto, em até 35% nas amostras com cimento LC ³ .
Nguyen, Afroz e Castel (2020)	20% e 44% de substituição ao cimento, em proporção 2:1	0,45	Cilindros de concreto com 100 x 75 mm	35 dias de exposição	Os concretos a base de cimento LC ³ apresentaram maior teor de cloreto em comparação com a referência, próximo a superfície. Ao longo da profundidade esse teor diminui e tornou-se um valor insignificante.
Yang <i>et al.</i> (2020)	54% de clínquer, 31% de argila calcinada, 15% de calcário	0,40 0,45 0,50	Cilindros de concreto com 100 x 100 mm	1 ano cura 56 dias de exposição	Os autores simularam numericamente a difusão de cloretos com misturas de LC ³ , cinzas volantes e cimento Portland. O estudo mostrou resultados benéficos dos cimentos misturados, com concentrações totais de cloreto menores.

Fonte: Elaborado pela autora

Existem relatos conflitantes sobre a contribuição de cloretos quimicamente adsorvido, adsorvido fisicamente e cloretos livres. Os autores Luping e Nilsson (1993) sugerem que a ligação de íons cloreto é devido a adsorção física no C-S-H, variando conforme a razão Ca/Si e o valor de pH da solução de exposição. Conforme Loser *et al.* (2010) a maior fração desses íons é ligado na solução porosa, e a menor fração é ligada pelos hidratos do cimento. Já alguns artigos de revisão mostram que a principal ligação origina das fases de aluminato tricálcico (C₃A) ou ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) através da formação do sal de Friedel e seu análogo que contém ferro (YUAN *et al.*, 2009; GALAN e GLASSER, 2015).

Fonseca (2016) afirma em seu trabalho que a substituição de até 60% de adições minerais, no concreto autoadensável, resultou em uma maior resistência a difusão de íons cloreto, e este efeito se relacionou ao refinamento e descontinuidade da estrutura porosa da matriz cimentícia. Destacou ainda, que o metacaulim causou a redução do ataque ao concreto, por meio dos altos teores de alumina em sua composição química, devido a formação do Sal de Friedel. Este comportamento também foi confirmado no trabalho de Anjos *et al.* (2015).

2.3.3.5 *Ação Combinada da Carbonatação Acelerada e Migração de Cloretos*

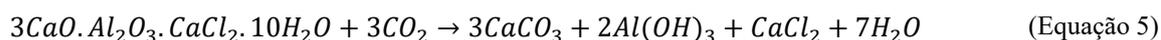
Geralmente, a degradação de estruturas de concreto armado é atribuída a efeitos combinados de uma ou mais causas atuando simultaneamente ou em sucessão. Mota *et al.* (2012) explicou que o fenômeno da corrosão é mais frequente do que qualquer outro, comprometendo tanto o ponto de vista estético, quanto da segurança estrutural.

Em condições normais, a ação de proteção que o concreto proporciona a armadura se dá por processos físicos e químicos. A proteção física é compreendida como a barreira que o concreto de cobrimento exerce à penetração de agente agressivos desencadeadores da corrosão, como íons cloreto, dióxido de carbono e oxigênio. A proteção química é fornecida pela fase aquosa contida nos poros, conferindo um elevado pH ao concreto, favorecendo a formação da camada de passivação. Essa camada trata-se uma película de óxido envolvida no aço pela pasta de cimento, que é fortemente aderida à armadura, a qual torna passivo à corrosão (HELENE, 1993; ACI, 2002; NEVILLE, 2015; MAGALHÃES, 2019).

A despassivação das armaduras pode ocorrer, na maioria dos casos, devido às ações da carbonatação do concreto concomitantemente com o ataque de cloretos. É importante ressaltar que a ordem de atuação desses mecanismos interfere no comportamento específico estudado. Ou seja, existe um comportamento para o concreto que sofre o ataque de cloretos

seguido da carbonatação e outro comportamento para o concreto que sofre carbonatação seguida do ataque de cloretos. Mehta e Monteiro (2014) cita que mesmo em condições em que o pH do concreto encontra-se elevado (sem carbonatação), a camada passivadora pode ser desestabilizada sob ataque de íons cloreto, contudo, isso ocorre de forma mais lenta em concretos com pH acima de 11,5.

Conforme Negredo (2018) a influência da carbonatação no coeficiente de difusão de cloretos depende da dosagem e tipos de materiais utilizados no concreto. Zhu *et al.* (2016) explica que geralmente o concreto contém o sal de Friedel, seja devido à pequena quantidade de cloro contida na água de amassamento ou até mesmo em aditivos, agregados contaminados ou outros materiais. À medida que este componente reage com o dióxido de carbono (carbonatação), os íons cloro são liberados para a solução contida nos poros do concreto de acordo com a Equação 5, aumentando a concentração de cloretos livres de forma mais significativa.



Além do efeito químico da ação combinada da carbonatação e ataque de cloretos, existe um efeito físico devido a formação de carbonato de cálcio resultar em um concreto menos poroso, capaz de reduzir a penetração de agentes agressivos. Backus e Mcpolin (2016) mostrou que o refinamento de poros devido a carbonatação, impulsiona ao ingresso de cloretos em maior profundidade na matriz cimentícia.

A ação combinada dos mecanismos de degradação do concreto é uma realidade que tem tido maior atenção na comunidade científica, especialmente nos últimos anos. Como não há pesquisas envolvendo o cimento LC³ sobre o ataque conjunto desses testes, no Quadro 2.4 são apresentados alguns trabalhos que estudaram esse efeito combinado.

Os estudos indicam que ocorre um aumento no teor de cloreto após carbonatada, de acordo com o aumento do tempo de exposição ao CO₂ (XIE *et al.*, 2019; YE *et al.*, 2016; LEE, JUNG e OH, 2013; LIU *et al.*, 2016b). No entanto, para Backus, Mcpolin e Holmes (2012), a combinação dos mecanismos de deterioração pode atuar reduzindo a penetração de cloretos no concreto, porém, a falta de padronização dos parâmetros envolvidos nos testes dificulta a comparação. Devido as modificações estruturais causadas por meio desses mecanismos, visto que não há estudos que investiguem a durabilidade do concreto com cimento LC³, torna-se válido avaliar o comportamento.

Quadro 2.4 - Resultados de estudos sobre o efeito combinado da carbonatação e ataque de cloretos.

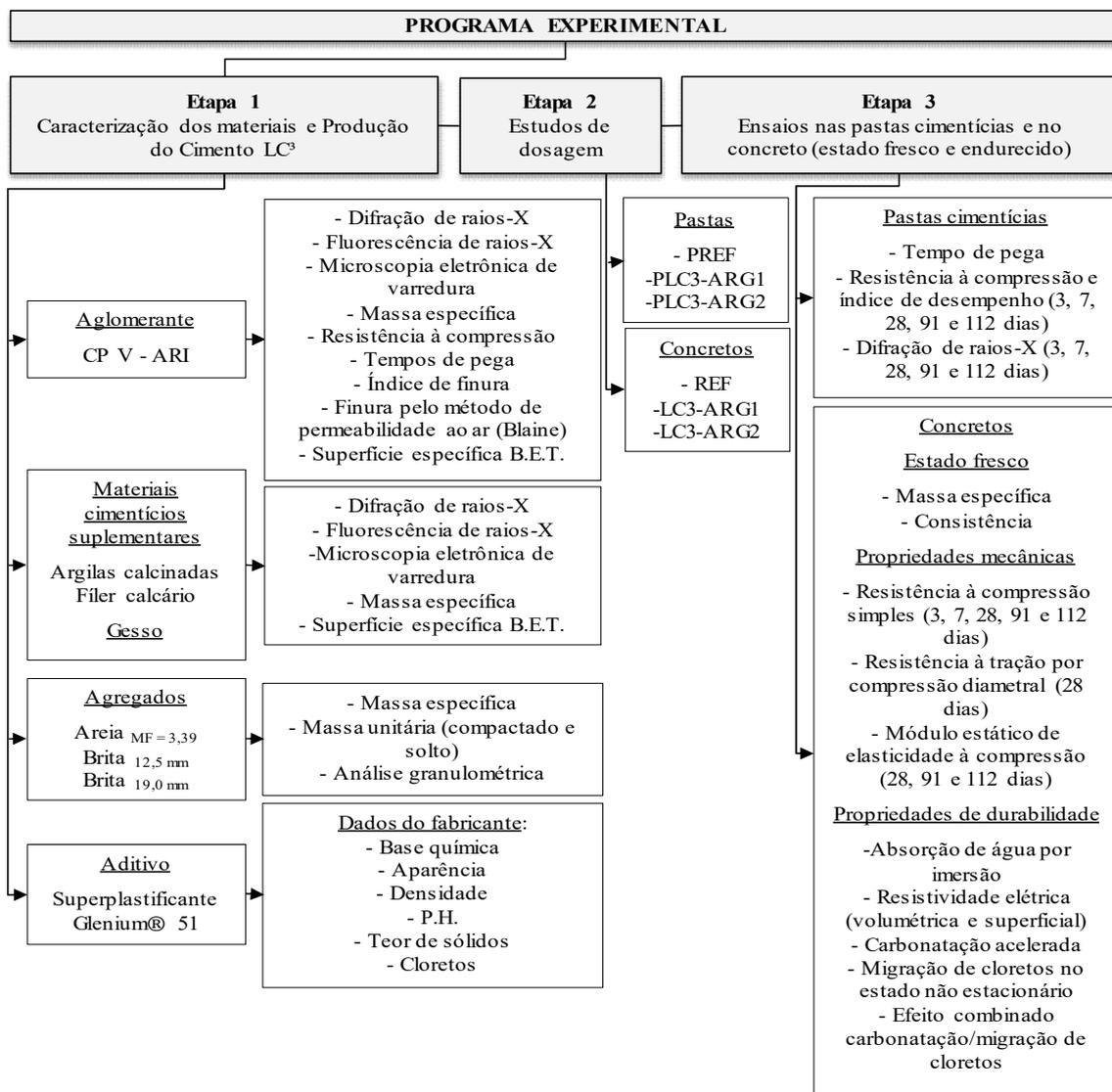
Autor	Características do corpo de prova	Principais considerações sobre o efeito combinado da carbonatação e ataque de cloretos
Jung, Choi e Lee (2007)	Concretos com substituição de 20% do cimento Portland por cinzas volantes.	Os autores afirmam que quando a carbonatação exerce ação composta com o ataque de íons cloretos, a penetração de Cl ⁻ é acelerada. Podendo ser explicada devido à cristalização do sal de Friedel na zona carbonatada.
Camacho <i>et al.</i> (2014)	Concretos com substituição de 40% do cimento Portland por cinzas volantes e relação água cimento igual a 0,55.	A ação combinada dos mecanismos apresentou um perfil de cloreto com teores superiores quando comparados à ação exclusiva destes íons.
Liu <i>et al.</i> (2016a)	Concretos com substituição de 15 e 30% do cimento Portland por cinza volante e relação água cimento igual a 0,47.	Ao realizarem os testes combinados, os autores perceberam que houve um acúmulo de cloretos livres na região interna do concreto, e um aumento na taxa de difusão de cloretos nos concretos com cinza volante.
Zhu <i>et al.</i> (2016)	Modelo probabilístico para o início da corrosão de armaduras no aço devido ao efeito combinado.	Os autores verificaram que a probabilidade de início de corrosão com a ação combinada é quase duas vezes maior do que a obtida separadamente.
Wang <i>et al.</i> (2017)	Concretos com cimento Portland, cinza combustível pulverizada e micro sílica, com relação água aglomerante de 0,55.	A influência dos testes dependeu da sequência de ocorrência. No caso de cloretos seguidos de carbonatação, o Cl ⁻ é redistribuído durante o estágio de carbonatação. No entanto, quando ocorre carbonatação seguido de cloretos, ocorreu uma maior penetração de cloretos devido à possível presença de microfissuras induzidas por carbonatação na região próximo à superfície.
Negredo (2018)	Concretos com substituição de 0, 5, 10, 15, 20 e 25% do cimento Portland por resíduo de marmoraria e relação água/cimento igual a 0,47.	O autor concluiu que os concretos com utilização de resíduo de marmoraria são mais susceptíveis ao ingresso de agentes deletérios. A frente de penetração de cloretos aumentou em função da carbonatação acelerada, devido à redução no pH dos concretos.
Xie <i>et al.</i> (2019)	Concretos com substituição de 15 e 30% do cimento Portland por cinza volante, com utilização de diferentes graus de carbonatação.	Os autores afirmaram que a carbonatação alterou a estrutura dos poros e a distribuição de cloretos no concreto. A carbonatação inicial consumiu o CH e promoveu a hidratação do cimento, reduzindo a concentração de cloretos. No entanto, no estágio tardio, ocorre o inverso.
Silva (2019)	Concretos com substituição parcial de agregado graúdo por agregados de resíduos de concreto, nos teores de 20 e 50%, submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem.	A autora mostrou que os concretos contendo agregados reciclados possuíam maiores coeficientes de migração de cloretos, em comparação com a referência. Além disso, ao utilizar tratamentos, houve uma redução nos coeficientes, para todas as idades.

Fonte: Elaborado pela autora

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por finalidade apresentar os procedimentos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, conforme os objetivos propostos. Foram moldadas pastas cimentícias e concretos com duas misturas ternárias, cada uma com um tipo de argila calcinada, além de uma mistura de referência, sem nenhum teor de substituição. O programa experimental foi dividido em três etapas: na primeira foi realizada a caracterização dos materiais e produção do cimento LC³, a segunda compreendeu os estudos de dosagem, e a terceira se referiu aos ensaios para a avaliação do estado fresco e endurecido do concreto. Na Figura 3.1 é apresentado um organograma do programa experimental.

Figura 3.1 - Procedimento experimental da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PRODUÇÃO DO CIMENTO LC³

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: aglomerante, materiais cimentícios suplementares, gesso, agregados miúdos e graúdos, aditivo superplastificante e água. A seguir serão apresentados os ensaios realizados para a caracterização destes materiais.

3.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI), por ter uma maior quantidade de clínquer, entre os cimentos disponíveis no mercado, conforme a ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018). Os ensaios realizados para a caracterização deste material estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Ensaios para caracterização do aglomerante (CPV - ARI)

Propriedade	Método de ensaio
Análise mineralógica	Difração de raios-X
Análise química	Fluorescência de raios-X
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Tempos de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Índice de finura (peneira 75 µm)	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Finura pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Superfície específica B.E.T. (g/cm ³)	ASTM C-1069 (ASTM, 2014)
Imagem aproximada da amostra	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas – D ₁₀ (µm)	
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 50% das partículas – D ₅₀ (µm)	Granulometria a laser
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas – D ₉₀ (µm)	

Fonte: Elaborado pela autora

3.1.2 Materiais cimentícios suplementares

Nesta pesquisa optou-se por utilizar três adições minerais, sendo duas argilas calcinadas e fíler calcário. Ambos os materiais passaram por caracterizações física, química e mineralógica. Os métodos de ensaio para a caracterização estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Método de ensaio para caracterização das adições minerais

Propriedade	Método de ensaio
Análise mineralógica	Difração de raios-X
Análise química	Fluorescência de raios-X
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Superfície específica B.E.T. (g/cm ³)	ASTM C-1069 (ASTM, 2014)
Imagem aproximada da amostra	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas – D ₁₀ (µm)	Granulometria a laser
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 50% das partículas – D ₅₀ (µm)	
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas – D ₉₀ (µm)	

Fonte: Elaborado pela autora

Todas as análises de caracterização dos materiais foram realizadas sem nenhum beneficiamento prévio. A argila calcinada 1 foi fornecida pela fábrica de cimentos CIPLAN, argila calcinada 2 pela empresa Metacaulim do Brasil, o fíler calcário foi produzido por meio da britagem de rochas calcárias da região.

3.1.3 Gipsita

A gipsita (CaSO₄.2H₂O) utilizado na pesquisa foi comercializado da marca Dinâmica, com 98% de pureza e peso molecular 136,17 g/mol. Foram realizados ensaios para caracterização física, química e mineralógica deste material, conforme os descritos por meio da Tabela 3.2, apresentada anteriormente.

3.1.4 Agregados

Os agregados miúdos e graúdos utilizados na pesquisa foram: areia de origem quartzosa e brita de origem calcária. Esses materiais foram escolhidos por apresentarem uma curva granulométrica mais adequada.

3.1.4.1 Agregado miúdo

Na Tabela 3.3 são apresentados os métodos de ensaios que foram realizados nos agregados miúdos para a sua caracterização, assim como, as suas respectivas recomendações normativas.

Tabela 3.3 - Método de ensaio para caracterização física do agregado miúdo

Propriedade	Método de ensaio
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2009)
Módulo de finura	

Fonte: Elaborado pela autora

3.1.4.2 Agregado graúdo

Foi utilizada a composição de dois agregados graúdos naturais no concreto, a fim de obter uma maior compacidade da mistura. A proporção ótima foi determinada por meio do método de ensaio da massa unitária no estado compactado, em agregados provenientes da britagem de rocha calcária, com dimensões máximas de 12,50 e 19,00 mm. Na Tabela 3.4 são apresentados um resumo dos ensaios de caracterização realizados para composição dos agregados graúdos, seguindo as prescrições normativas.

Tabela 3.4 – Método de ensaio para caracterização do agregado graúdo

Propriedade	Método de ensaio
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborado pela autora

3.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado na pesquisa foi o superplastificante Glenium 51® de terceira geração, à base de éter policarboxílico modificado. A caracterização físico-química deste material foi disponibilizada pelo fabricante, com propriedades de base química, dosagem recomendada, aparência, pH, densidade, sólidos e viscosidade.

3.1.6 Água

Para a realização da pesquisa, a água de amassamento utilizada para a produção dos concretos foi fornecida pela companhia de abastecimento público de água da região (CAESB), na qual segue a recomendações de acordo com a prescrição normativa da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.1.7 Produção do Cimento LC³

Para a fabricação do cimento LC³ optou-se pela proporção de duas partes de argilas calcinadas e uma parte de filer calcário, com substituição volumétrica de 45% do cimento Portland, em virtude das pesquisas realizadas por Antoni *et al.* (2012). Assim como em outras literaturas, foi necessário a correção da quantidade de gipsita para as misturas com cimento LC³, de modo a melhorar características, como por exemplo: resposta mecânica, variação dimensional e processo de hidratação (MOREIRA, 2020). Um conteúdo baixo deste material acelera o tempo de pega do cimento, e um alto, tem a possibilidade da formação da etringita tardia. Antoni *et al.* (2012) e Scrivener *et al.* (2019) citam que a mistura ideal é composta por 5% de gipsita, em relação a massa total da mistura (clínquer + MCS's), com a finalidade de compensar a depleção do sulfato causada pela reação sinérgica. Com relação ao cimento Portland de referência, devido a utilização do CP V - ARI, foi pressuposto que este apresentava uma porcentagem de 5% de gipsita.

Antes da moldagem das pastas cimentícias e concreto, foi realizada a mistura e homogeneização dos materiais cimentícios suplementares que formavam o cimento LC³, incluindo a correção na quantidade de gesso. Para um melhor entendimento, na Tabela 3.5 é apresentado o detalhamento da nomenclatura e as porcentagens dos materiais utilizados nos traços das pastas cimentícias e do concreto.

Tabela 3.5 - Nomenclatura e característica dos traços

Traço	Detalhamento
REF	Traço de referência, sem adições. Composto por uma mistura de 95% de clínquer e 5% de gesso.
LC3-ARG1	Traço com 50% de cimento, 5% de gesso, 30% de argila calcinada 1 e 15% de filer calcário.
LC3-ARG2	Traço com 50% de cimento, 5% de gesso, 30% de argila calcinada 2 e 15% de filer calcário.

Fonte: Elaborado pela autora

3.2 ESTUDOS DE DOSAGEM

As formulações investigadas buscaram avaliar o efeito da substituição volumétrica do cimento Portland pelo cimento LC³ em até 45%, na proporção 2:1 de argila calcinada e filer calcário, respectivamente. Foram feitas duas misturas utilizando o cimento LC³ e uma mistura de referência com cimento Portland utilizando uma relação água/aglomerante fixa e igual a 0,5, para pastas cimentícias e concretos. Destaca-se ainda, que a quantidade de água na mistura foi corrigida de maneira a considerar a água presente no aditivo, para que a

relação a/agl fosse constante. A seguir são detalhadas as dosagens para as pastas cimentícias e concretos.

3.2.1 Dosagem das pastas cimentícias

Para a confecção das pastas foi necessária a utilização do *mini-slump* para que todas apresentassem a mesma consistência, a fim de comparação entre as misturas. Fixou-se uma relação a/agl em 0,5 nas pastas e acrescentou teores adequados de aditivo superplastificante. O *mini-slump* consiste em um mini-cone de Kantro de acrílico com 6 cm de altura, base inferior de 4 cm de diâmetro e base superior de 2 cm de diâmetro (Figura 3.2a). O procedimento deu-se com a preparação da pasta em um misturador planetário de massas com uma capacidade de 5 litros (Figura 3.2b). As massas dos materiais, foram pesados em uma balança eletrônica digital, com precisão de 0,01g, e misturados de acordo com a prescrição normativa ABNT NBR 16606 (2017), seguindo os tempos especificados para a adição dos materiais.

Figura 3.2 - Moldagem das pastas cimentícias com relação a/agl =0,5



(a) Mini-cone de kantro

(b) Mistura das pastas cimentícias

(c) Espalhamento da pasta

Fonte: Elaborado pela autora

O *mini-slump* foi medido imediatamente após a mistura, sendo o cone totalmente preenchido pela pasta, e em seguida removido perpendicularmente a superfície. O espalhamento da pasta foi medido através desse ensaio repetido três vezes para cada traço, conforme mostra a Figura 3.2c. Foi optado por trabalhar com a consistência média fixa em 94 ± 4 mm, por ser considerada mais favorável para os processos de mistura e moldagem (KANTRO, 1980). O passo seguinte, foi a moldagem de corpos de prova de dimensões iguais a 5 x 10 cm.

Foram produzidos três traços de pastas cimentícias, os quais foram denominados de PREF, PLC3-ARG1 e PLC3-ARG2. Na Tabela 3.6 são apresentadas a composição de todos os traços produzidos nesta pesquisa para as pastas cimentícias.

Tabela 3.6 - Traços unitários das pastas cimentícias

Traços	Cimento (C)	Argila calcinada 1 (ARG1)	Argila calcinada 2 (ARG2)	Filer calcário (FC)	Gesso (G)	a/agl	aditivo/cimento (%)
PREF	0,95	0,00	0,00	0,00	0,05	0,50	0,09
PLC3-ARG1	0,50	0,30	0,00	0,15	0,05	0,50	0,38
PLC3-ARG2	0,50	0,00	0,30	0,15	0,05	0,50	0,40

Fonte: Elaborado pela autora

3.2.2 Dosagem dos concretos

A dosagem dos concretos foi realizada conforme o método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Inicialmente foi realizado a execução de um traço piloto, buscando determinar o teor de argamassa ideal, evitando dosar um concreto com deficiência ou excesso de argamassa, o qual foi definido em 54%. Posteriormente, fixando esse teor ideal de argamassa e a consistência em 125 ± 5 mm, foram determinados os demais traços. Como a relação água/aglomerante foi fixada em 0,5, foi necessário o uso de aditivo superplastificante para chegar na consistência desejada. A escolha destes valores, se justificam para atender os requisitos da NBR 12655 (ABNT, 2015), para a classe de agressividade III, o que corresponde a uma agressividade forte e grande risco de deterioração, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014).

Na produção dos concretos, todos os materiais foram devidamente secos em estufa, resfriados na condição ambiente e assim, armazenados. Os materiais foram pesados, e colocados na betoneira, sempre obedecendo a mesma sequência. Na Tabela 3.7 estão apresentados a composição de todos os traços produzidos nesta pesquisa. Vale ressaltar que a substituição considerou a variação volumétrica dos materiais.

Tabela 3.7 - Traços unitários em massa dos concretos

Traços	C	ARG 1	ARG 2	FC	G	Areia	Brita 19,00 mm	Brita 12,50 mm	a/agl	aditivo/ agl (%)	Consumo de finos (kg/m ³)
REF	0,95	0,00	0,00	0,00	0,05	2,24	2,07	0,69	0,50	0,40	369,85
LC3-ARG1	0,50	0,30	0,00	0,15	0,05	2,24	2,07	0,69	0,50	1,48	366,76
LC3-ARG2	0,50	0,00	0,30	0,15	0,05	2,24	2,07	0,69	0,50	1,42	365,92

* C = Clínquer; ARG1 = Argila calcinada 1; ARG2 = Argila calcinada 2; FC = Fíler calcário; G = gesso.

Fonte: Elaborado pela autora

Após a dosagem e produção dos concretos, foram realizados ensaios no estado fresco, posteriormente foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) e prismáticos (10 x 10 x 40 cm), com utilização de um vibrador de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2016). A cura dos corpos de prova foi realizada ao ar por 24 horas após a moldagem, por fim, foram desmoldados e colocados na câmara úmida até a data de realização dos ensaios.

3.3 ENSAIOS NAS PASTAS CIMENTÍCIAS E NO CONCRETO

Na Tabela 3.8 é apresentado a quantidade de corpos de prova que serão utilizados em cada ensaio no concreto, sendo no total 126 corpos de prova cilíndricos com 10 x 20 cm e 6 corpos de prova prismáticos com dimensão de 10 x 10 x 40 cm. Os corpos de prova mencionados, serão para a realização dos ensaios no estado endurecido, tanto para propriedades mecânicas, quanto para o estudo da durabilidade. Com relação as pastas cimentícias foram moldados 60 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão simples e outros ensaios microestruturais.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM/UnB), com exceção do ensaio de módulo de elasticidade (28 dias), que foi realizado no Laboratório de Construção Civil (IFB), carbonatação acelerada realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST/UnB) e os ensaios microestruturais, cujos locais estão descritos nos itens respectivos.

Tabela 3.8 - Quantidade de corpos de prova de concreto por ensaios

Ensaio	Número de amostras	Idades	Dias de cura	Traços	Total	Dimensões dos CPs (cm)	
						Cilíndrico (10x20)	Prismático (10x10x40)
Resistência à compressão simples	3	5	3, 7, 28, 91 e 112	3	45	x	
Resistência à tração por compressão diametral	3	1	28	3	9	x	
Módulo estático de elasticidade à compressão	4	3	28, 91 e 112	3	36	x	
Absorção de água por imersão	3	1	112	3	9	x	
Resistividade elétrica	3	1	112	3	9	x	
Migração de cloretos no estado não estacionário	2	1	112	3	6	x	
Carbonatação acelerada	2	1	28	3	6		x
Efeito combinado de carbonatação/migração de cloretos	2*	1	28	3	6	x	

* Para a realização dos ensaios de migração de cloretos e carbonatação combinada com cloretos, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para extrair 12 amostras cilíndricas 10 x 5 cm, conforme recomendação da norma NT BUILD 492:2011.

Fonte: Elaborado pela autora

3.3.1 Ensaios em pastas cimentícias

3.3.1.1 Tempo de pega

Este ensaio foi realizado conforme as prescrições normativas da ABNT NBR 16606 (2017), em pastas cimentícias no estado fresco. Permite averiguar o tempo de enrijecimento da pasta, assim como as velocidades das reações de hidratação do cimento.

3.3.1.2 Resistência à compressão e índice de desempenho

Este ensaio foi realizado conforme a prescrição normativa da ABNT NBR 7215 (2019) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em corpos de prova cilíndricos de dimensões 5 x 10 cm. Antes da realização do ensaio de resistência, os corpos de prova foram retificados para que a carga fosse distribuída de maneira uniforme na área transversal ao corpo de prova.

Para a determinação do índice de desempenho, a prescrição normativa da ABNT NBR 5752 (2014) estabelece a idade de 28 dias, no entanto, foi analisada o comportamento nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida. Este parâmetro corresponde a uma relação entre a resistência mecânica de misturas com adições e a resistência mecânica da mistura de referência.

3.3.1.3 Difração de raios-X (DRX)

Para a análise de difração de raios-X nas pastas cimentícias, é necessário fazer uma paralisação na hidratação das amostras, em idades definidas para a realização do ensaio. Neste trabalho, a paralisação da hidratação foi realizada pelo método de imersão em álcool isopropílico por cerca de 4 horas, e posterior secagem em estufa por 24 horas, de acordo com o especificado por Scrivener *et al.* (2016), conforme as seguintes etapas:

- a) Fraturou-se os corpos de prova, para retirar amostras fragmentadas centrais;
- b) Em um recipiente plástico, lacrado e identificado, essas amostras foram imersas em álcool isopropílico, por um período de 4 horas;
- c) Em seguida, as amostras foram retiradas da solução e submetidas a secagem em estufa por 24 horas, em uma temperatura de 40°C;
- d) Por fim, as amostras foram retiradas da estufa e acomodadas em dessecador com sílica gel e cal soldada, para evitar qualquer tipo de umidade que poderia interferir nos resultados do ensaio, até o momento da análise.

O ensaio de difração de raios-X tem a finalidade de verificar a evolução da hidratação das pastas cimentícias, permitindo a identificação de compostos cristalinos. Este ensaio foi realizado no Instituto de Geologia da Universidade de Brasília, após a paralisação da hidratação das amostras, no período de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. As pastas foram moídas com o auxílio de um almofariz de ágata para diminuição da granulometria e foram colocadas sobre lâminas, com movimentos desordenados, para que os planos não ficassem orientados.

O equipamento utilizado foi um difratômetro RIGAKU – ULTIMA IV, com um filamento de tungstênio como cátodo e um tubo de raios-X de cobre como ânodo, com comprimento de onda $K\alpha=1,5406 \text{ \AA}$ e $K\beta=1,3922 \text{ \AA}$. Além disso, foi utilizada uma voltagem de 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 1,2°/minuto, de 5° a 60° em 2θ . Na identificação das fases cristalinas, o equipamento usa um software de análise

de difração em pó, o PDXL e o Cristalografia Open (COD) que é um banco de dados das estruturas cristalinas, publicados na União Internacional de Cristalografia, Sociedade Mineralógica da América.

3.3.2 Propriedades do concreto no estado fresco

No intuito de avaliar o comportamento das misturas de concreto, foram realizados ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone e massa específica. A seguir, são apresentados um detalhamento dessas propriedades.

3.3.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

O ensaio foi realizado conforme a prescrição normativa da ABNT NBR NM 67 (1998), sendo fixado um valor de consistência para todos os traços de 120 ± 10 mm. Para atender esse critério, foi determinado o teor de aditivo superplastificante por tentativa e erro.

3.3.2.2 Determinação da massa específica do concreto

Para a realização do ensaio de massa específica foi utilizada a recomendação do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), na qual um recipiente de volume conhecido foi preenchido com duas camadas de concreto adensadas, e posteriormente, teve sua massa registrada.

3.3.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

Para as análises das propriedades do concreto no estado endurecido, os corpos de prova de concreto foram colocados dentro de uma câmara úmida, e após suas respectivas idades de cura, foram retirados e retificados para a realização dos ensaios. A seguir são apresentados os ensaios referentes as propriedades mecânicas e de durabilidade.

3.3.3.1 Ensaios para determinação das propriedades mecânicas do concreto

Para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples, resistência a tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão.

3.3.3.1.1. Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias, em corpos de provas cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm. Cabe ressaltar que antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados para que a carga fosse distribuída de maneira uniforme. Os resultados consistem na média entre os valores obtidos para cada corpo de prova.

3.3.3.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a prescrição normativa NBR 7222 (ABNT, 2011), na idade de 28 dias de cura, em corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm. Os resultados deste ensaio correspondem a média de três valores obtidos.

3.3.3.1.3. Módulo estático de elasticidade à compressão

A determinação do módulo de elasticidade secante foi realizada de acordo com a prescrição normativa da NBR 8522 (ABNT, 2017), em corpos de prova cilíndricos, de dimensões 10 x 20 cm. Usualmente o resultado de módulo de elasticidade é recomendado na idade de 28 dias de cura, no entanto, realizou-se também este ensaio nas idades de 91 e 112 a fim de comparação com os demais resultados.

3.3.3.2 Ensaio para determinação das propriedades de durabilidade do concreto

Os ensaios para avaliação da durabilidade dos concretos foram: absorção de água por imersão; resistividade elétrica volumétrica e superficial; carbonatação acelerada; migração de cloretos no estado não estacionário; e, efeito combinado de carbonatação acelerada e migração de cloretos.

3.3.3.2.1. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme a prescrição normativa da ABNT NBR 9778 (2009), em três corpos de prova cilíndricos com dimensões 10cm de diâmetro e 20 cm de altura, aos 112 dias de cura.

3.3.3.2.2. Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica também é conhecido como resistividade específica, sendo uma propriedade que se caracteriza com a capacidade de condutividade elétrica do material. Para medir a resistividade elétrica do concreto, foram realizados dois experimentos distintos, sendo eles: resistividade elétrica volumétrica utilizando a prescrição normativa da AASHTO TP 119 (2015), e resistividade elétrica superficial segundo a ASTM G-57 (2012) pela técnica de quatro eletrodos (método Werner).

Os ensaios foram realizados utilizando um aparato desenvolvido de acordo com as recomendações das normas regulamentadoras. Além disso, foi utilizado uma fonte para aplicação da tensão 220/110 V para proporcionar uma corrente alternada e multímetros digitais para medição da corrente elétrica e diferença de potencial elétrico produzidos. As medições foram realizadas em 3 corpos de prova (10cm de diâmetro e 20 cm de altura) para cada traço, aos 112 dias de cura, para permitir comparação com as demais propriedades. As amostras permaneceram em cura úmida e nas 24 horas que antecederam o ensaio, ficaram imersos em água com cal hidratada.

Após a realização do ensaio é possível comparar os valores encontrados com o risco de corrosão e penetração de íons cloreto. Na Tabela 2.1 é apresentado critério proposto pelo normativo FIB CEB 192 e o boletim europeu COST 509 para a avaliação da relação entre a resistividade elétrica e o risco de corrosão das armaduras. Na Tabela 2.2 encontra-se identificada a relação entre a resistividade elétrica uniaxial ou direta e a penetração de íons cloreto, conforme proposto pela AASHTO TP 119-15.

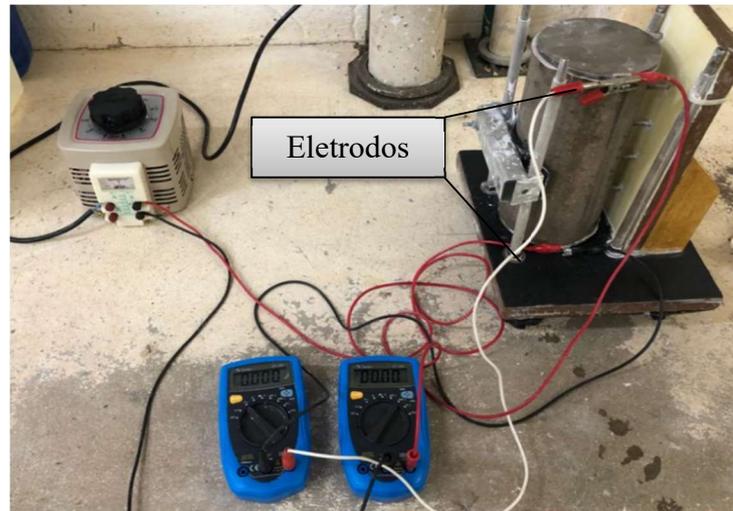
a. Resistividade elétrica volumétrica

Neste ensaio foi utilizado um conjunto de placas de aço inoxidável como eletrodos, na qual o corpo de prova foi colocado, sobre uma superfície não condutora de eletricidade (borracha). Entre os eletrodos e a amostra, foi posicionado um meio filtrante de papel, para aumentar o contato, que impediu que a resistividade dos eletrodos fosse medida de maneira indevida. Esse meio filtrante apresenta resistividade desprezível.

Após a montagem do ensaio, uma corrente elétrica foi aplicada entre às placas, ultrapassando todo o corpo de prova (da base ao topo) e a diferença de potencial foi medida. Na Figura 3.3 está apresentado o ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento. Para cada corpo de prova, foram feitas cinco leituras e a resistividade adotada será a média das cinco

calculadas. Com os dados obtidos, e através da Lei de Ohm (Equação 6), foi possível obter a respectiva resistividade elétrica ($\Omega.cm$) de cada corpo de prova.

Figura 3.3 - Ensaio de resistividade volumétrica em andamento



Fonte: Elaborado pela autora

$$p = \left(\frac{\Delta V}{i} \right) \cdot \frac{A}{L} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

p = resistividade do concreto ($\Omega.cm$);

ΔV = diferença de potencial aplicada (V);

i = corrente elétrica do circuito (mA);

A = área da seção transversal do corpo de prova (cm^2);

L = medida do comprimento do corpo de prova (cm).

b. Resistividade elétrica superficial

Neste ensaio foi utilizado o mesmo aparato do ensaio anterior, uma fonte para aplicação da tensão nos eletrodos, e multímetros para a realização da medição. O método utilizado foi dos quatro eletrodos de Wenner, funcionando com a aplicação de uma corrente alternada nos eletrodos externos, em seguida, a leitura é realizada por meio dos eletrodos internos e da queda de tensão produzida. Concomitantemente, os dois outros eletrodos internos mediram a corrente e a queda de tensão produzida. Com base nos dados obtidos, é possível calcular a resistividade do concreto (Equação 7). Para a execução do ensaio, foi utilizado um aparato

com 4 eletrodos espaçados igualmente, os quais ficaram em contato com a superfície do concreto, como apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Ensaio de resistividade superficial em andamento



Fonte: Elaborado pela autora

$$p = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{\Delta V}{i} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

p = resistividade do concreto ($\Omega \cdot \text{cm}$);

ΔV = diferença de potencial aplicada (V);

i = corrente elétrica do circuito (mA);

a = espaçamento entre os eletrodos (cm).

Ressalta-se ainda que dependendo das condições ambientais de temperatura, pode-se aplicar fatores corretores para os valores encontrados.

3.3.3.2.3. Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado conforme as prescrições normativas da ISO 1920 (2015) em dois corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 10 x 10 cm por traço, tipo indicado para realizar leituras por mais de um período de exposição. Baseando-se na norma, os parâmetros utilizados na câmara de carbonatação para este ensaio foram: temperatura de 27 ± 2 °C, umidade relativa equivalente a 65 ± 5 % e concentração de CO_2

de $3,0 \pm 0,5$ %, em volume. Na Figura 3.5 é apresentada a câmara de carbonatação utilizada, assim como, os parâmetros de controle do ensaio.

Figura 3.5 - Câmara de carbonatação acelerada para ensaio



Fonte: Elaborado pela autora

Na câmara de carbonatação acelerada existia um display que possibilitava o monitoramento dos parâmetros do ensaio no interior do dispositivo. Estes parâmetros foram controlados por meio de uma placa Arduino e sensores de temperatura, umidade e concentração de CO₂. A umidade e temperatura eram determinadas através de um sensor DHT11 e para a determinação da concentração de CO₂, era utilizado um sensor COZIR-WR da CO₂ METER Inc. No interior, era utilizado um sistema solenoide, para que os parâmetros se mantivessem estabelecidos conforme as recomendações normativas. Ou seja, quando os valores estavam abaixo do planejado, a válvula (para a concentração do CO₂) ou a lâmpada (para a temperatura) eram acionadas para o valor retornar ao desejado. Para a umidade, o procedimento era diferente, na qual foi controlada por um recipiente com sílica gel no interior da câmara. Além disso, também foram colocados ventiladores para que a circulação de ar garantisse a homogeneidade da concentração de CO₂.

Após moldagem dos corpos de prova, e cura úmida por 28 dias, estes foram pré-condicionados em um recipiente com sílica gel por 20 dias, até a constância de massa para a estabilização da umidade interna. Posteriormente, antes de serem inseridos na câmara de carbonatação, os corpos de prova foram selados com parafina, deixando apenas duas faces expostas às condições de ensaio, para um direcionamento no fluxo de difusão do CO₂, como pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Corpos de prova selados, antes de serem inseridos na câmara de carbonatação



Fonte: Elaborado pela autora

Os corpos de prova permaneceram na câmara de carbonatação por 70 dias, sendo retirados aos 56, 63 e 70 para a realização de leituras das frentes de carbonatação, conforme as recomendações da norma ISO 1920 (2015). Após o período de exposição as amostras foram retiradas, rompidas em espessuras de 5 cm e aspergidas com uma solução indicadora de pH (fenolftaleína). Essa solução era composta por 70% de álcool etílico, 29% de água destilada e 1% de fenolftaleína. Vale ressaltar que antes do corpo de prova ser reinserido na câmara de carbonatação, era selado novamente o lado fraturado com parafina, de modo que todas as leituras fossem feitas no mesmo corpo de prova.

Com a utilização de um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm), foram realizadas 7 leituras em cada lateral da face exposta, totalizando 28 leituras para cada traço, sendo o resultado final a média entre esses valores. Na Figura 3.7 é possível verificar o corpo de prova rompido, juntamente com a presença do indicador antes da realização das leituras.

Figura 3.7 - Corpos de prova rompidos após exposição a CO₂ na câmara de carbonatação e com aspersão de fenolftaleína como indicador



Fonte: Elaborado pela autora

3.3.3.2.4. Migração de cloretos no estado não estacionário

Como os ensaios de difusão de íons cloreto são longos, existe um interesse em fazer a determinação do coeficiente de difusão de cloretos, a partir do ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário, proposto por Luping e Nilsson (1993). Este ensaio seguiu a recomendação normativa da NT BUILD 492 (2011), em que permite a obtenção do coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário.

Para a realização do ensaio foram moldados dois corpos de prova com dimensões 10 x 20 cm, no entanto, estes foram cortados em quatro partes iguais de 10 x 5 cm, em que apenas as partes centrais foram utilizadas. Após 112 dias de cura úmida dos corpos de prova, foi realizada a limpeza destes e iniciou-se o processo de pré-condicionamento. Neste processo, os corpos de prova foram colocados em um recipiente e submetidos à vácuo com as duas faces centrais expostas a uma pressão interna entre 1 a 5 KPa. O vácuo foi mantido por três horas e, posteriormente, as amostras foram preenchidas com uma solução de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio dissolvido em água destilada), até que ficassem saturadas, por mais 18 ± 2 horas, a fim de garantir a saturação dos poros do concreto com a solução.

Após o pré-condicionamento posicionou a amostra na base do aparato, e foram vedadas as bordas (inferiores e superiores), com silicone, para que não ocorresse vazamento e contato entre as duas soluções (Figura 3.8). Em seguida, foram posicionadas duas placas de aço inoxidável nas extremidades do corpo de prova, para permitir a aplicação da diferença de potencial necessária à execução do ensaio. Conforme o indicado pela norma, a placa inferior continha suporte de plástico para garantir o contato da solução com a amostra, além disso, o conjunto aparato/amostra foi posicionado sobre um suporte com inclinação de 30° e levados a um recipiente de plástico (Figura 3.9a).

Figura 3.8 - Vedação das bordas do corpo de prova com o aparato para o ensaio de migração de cloretos

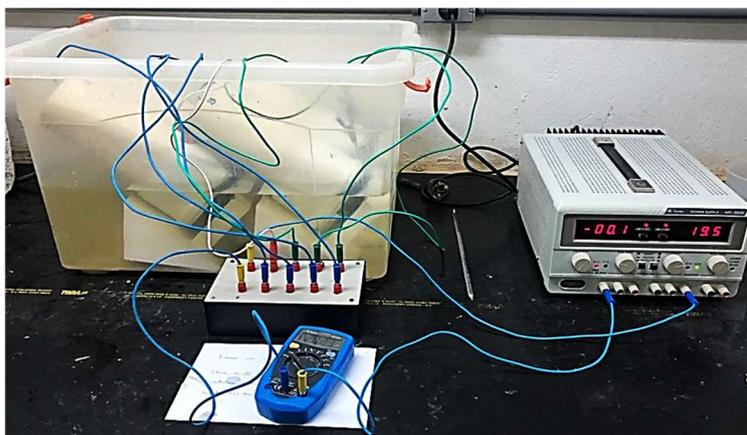


Fonte: Elaborado pela autora

Figura 3.9 - Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em concretos



(a) Aparato do ensaio



(b) Ensaio de migração de cloretos em andamento

Fonte: Elaborado pela autora

O conjunto aparato/amostra era preenchido com uma solução anódica de hidróxido de sódio em água destilada (1,2g de NaOH para cada 100g de água destilada) e o recipiente de plástico que continha todas as amostras era preenchido por uma solução catódica (10% de cloreto de sódio em massa de água). Após isso, os aparatos foram conectados em paralelo, a tensão foi ajustada para 30V e foi medido a corrente inicial por um multímetro. Em função do valor da corrente inicial de cada amostra, o valor da tensão era ajustado conforme as recomendações da prescrição normativa, de acordo com a Tabela 3.9. Ou seja, após a aplicação da tensão inicial, se a corrente obtida foi 50mA, a tensão aplicada foi alterada para 25V e o ensaio tinha duração de 24 horas.

Tabela 3.9 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos

Corrente inicial I_{30V} (com 30V) (mA)	Tensão aplicada U (depois do ajuste) (V)	Provável nova corrente inicial (mA)	Duração do ensaio (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: NT BUILD 492 (2011)

Após esse ajuste da tensão, era feita a medição da nova corrente (corrente inicial) para todas as amostras e a temperatura inicial da solução anódica. Ao final do período de ensaio, era anotado novamente a corrente elétrica (corrente final) e a temperatura final. Na Figura 3.9b é apresentado o ensaio em andamento. No fim do ensaio, as amostras eram rompidas à tração por compressão diametral e aspergida solução de 0,1 molar de nitrato de prata (AgNO_3) na superfície fraturada do corpo de prova. A reação química entre o nitrato de prata e a amostra, resulta no sal cloreto de prata (AgCl), possibilitando a medição da frente de penetração de cloretos. A partir disso, a medição ocorre na superfície da amostra que contém cloretos (coloração clara, prateada ou esbranquiçada) pelo contraste visual da superfície. A Figura 3.10 apresenta a amostra após aspersão da solução de nitrato de prata.

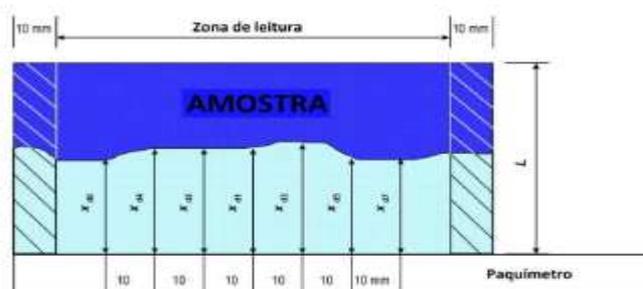
Figura 3.10 - Corpos de prova rompidos após aspersão da solução de nitrato de prata



Fonte: Elaborado pela autora

As leituras da frente de penetração de cloretos foram realizadas conforme a prescrição normativa da NT BUILD 492 (2011), do centro para as extremidades em intervalos de 10 mm, com um total de 7 medições. A Figura 3.11 mostra o procedimento indicado para a realização da leitura, buscando sempre evitar o efeito de borda devido a um grau não homogêneo de saturação, ou possível vazamento.

Figura 3.11 - Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos



Fonte: NT BUILD 492 (2011)

Com os dados obtidos no ensaio e nas medições realizadas nos corpos de prova, foi possível calcular o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, de acordo com a Equação 8.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)L \cdot Xd}{U-2}} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

D_{nssm} = Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário (10^{-12} m²/s);

U = Valor da tensão (V);

T = Média entre as temperaturas finais e iniciais (°C);

t = Duração do ensaio (h);

L = Espessura do corpo de prova (mm);

Xd = Média da frente de penetração de cloretos (mm).

A prescrição normativa NBR 12655 (ABNT, 2015) estabeleceu um teor máximo de íons cloreto no concreto, por meio de um percentual sobre a massa do cimento, conforme as condições de serviço da estrutura. Na Tabela 2.4, podemos verificar as limitações descritas pela norma.

3.3.3.2.5. Efeito combinado de carbonatação acelerada e migração de cloretos no estado não estacionário

Este ensaio foi realizado através de dois ensaios, sendo eles, o ensaio de carbonatação acelerada, citada anteriormente no item 3.3.3.2.3, seguido do ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário, citado no item 3.3.3.2.4. Como mencionado anteriormente, esses dois mecanismos de degradação podem ocorrer simultaneamente, ou em sucessão, quando o efeito físico induz ao refinamento dos poros e aumento da capilaridade dos íons, enquanto que no efeito químico existe uma diminuição no pH do concreto, aumentando a concentração de cloretos livres e, conseqüentemente, a frente de penetração de cloretos.

Foram confeccionados dois corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) para cada traço, em que passaram por 28 dias de cura úmida, após isso, foram cortados em quatro partes iguais, sendo utilizado somente as partes centrais. Após 28 dias de cura úmida, as amostras foram submetidas ao pré-condicionamento (14 dias), exposição a carbonatação acelerada (70 dias

de exposição), e por fim, o ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário. O tempo de duração do ensaio se deu propositalmente, para permitir a comparação com as demais propriedades de durabilidade.

3.3.4 Análise estatística

Os resultados do programa experimental foram analisados estatisticamente, por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Duncan (caso necessário), através do software STATISTICA v10, desenvolvido pela StatSoft®.

A análise de variância foi utilizada a fim de avaliar se existe diferença significativa entre as médias e se as propriedades exercem influência em alguma variável dependente, ou seja, se o tipo de traço e teor de substituição influenciou nos ensaios realizados. A ANOVA considera a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). Quando há a aceitação da H_0 , entende-se que a média dos grupos não diferem de maneira estatisticamente significativa. No entanto, se houver rejeição, indica que pelo menos uma média difere das demais, conferindo uma influência das variáveis independentes.

As hipóteses (H_0 e H_1) podem ser testadas através do P-valor (probabilidade de significância), que corresponde ao nível de significância α , que para esta dissertação foi estabelecida em 5%. Assim, o nível de confiança do teste é de 95%. Diante disso, para P-valor inferior a 0,05 a hipótese H_0 é rejeitada, ou seja, o tipo de traço e teor de substituição tem influência sobre a variável dependente analisada (significativo). Caso o valor seja superior, não há influência (não significativo).

Utilizou-se ainda o Teste de Duncan, nos casos que o tipo de traço e teor de substituição tem influência sobre a variável dependente analisada, com o objetivo de verificar se existe diferença significativa entre as médias obtidas, agrupando os valores semelhantes.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, ensaios realizados nas pastas cimentícias e no concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais: aglomerante, materiais cimentícios suplementares, gesso, agregado miúdo, agregado graúdo e aditivo superplastificante.

4.1.1 Aglomerante

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de caracterização do cimento Portland utilizado (CP V - ARI) obtidos nos ensaios de análise química, massa específica, resistência à compressão, tempo de pega, finura, área superficial, superfície específica e distribuição granulométrica à laser.

Tabela 4.1 - Resultados de caracterização do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)

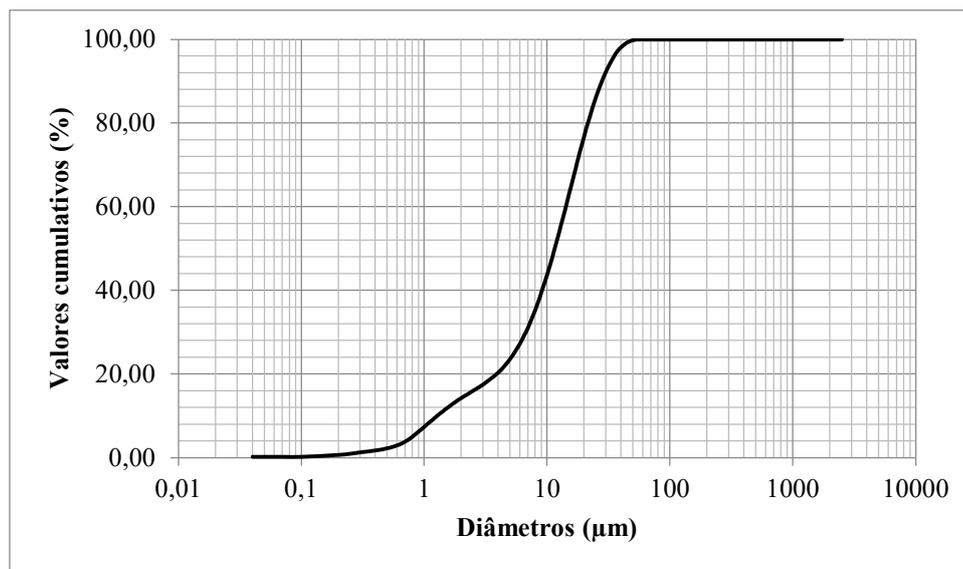
Propriedade	Resultados	Limites (ABNT NBR 16697, 2018)	
	SiO ₂	19,73	-
	Al ₂ O ₃	4,69	-
	CaO	55,62	-
	Fe ₂ O ₃	3,44	-
	TiO ₂	0,3	-
	K ₂ O	1,08	-
Composição química, em óxidos (%)	SO ₃	2,84	≤ 4,5%
	SrO	2,58	-
	ZnO	<0,01	-
	MnO	0,09	-
	CuO	<0,01	-
	MgO	4,76	≤ 6,5%
	Outros	0,02	-
	LOI	5,51	≤ 6,5%
	Massa específica (g/cm³)	3,07	-
	Resistência à compressão (MPa)	1 dia	22,87
3 dias		42,22	≥ 24 MPa
7 dias		51,93	≥ 34 MPa
Tempo de início de pega (min)	151	≥ 60 min	

Tempo de fim de pega (min)	184	≤ 600 min
Índice de finura (peneira 75 μm) (%)	4,62	≤ 6
Área específica (Blaine) (cm²/g)	5350	-
Superfície específica B.E.T. (m²/g)	4,26	-
Diâmetro (μm)	D ₁₀	1,27
	D ₅₀	10,82
	D ₉₀	27,87

Fonte: Elaborado pela autora

Através da Tabela 4.1 pode ser notado a predominância de óxido de cálcio e dióxido de silício no cimento, de acordo com a composição química. Os diâmetros obtidos por meio do ensaio de granulometria a laser, apresentaram faixa de análise de 0,04 a 25000 μm. Os resultados deste ensaio correspondem a média de 3 leituras e a distribuição pode ser visualizada na Figura 4.1. Quanto as demais propriedades, ressalta-se que todos os limites recomendados pela prescrição normativa NBR 16697 (ABNT, 2018) foram atendidos.

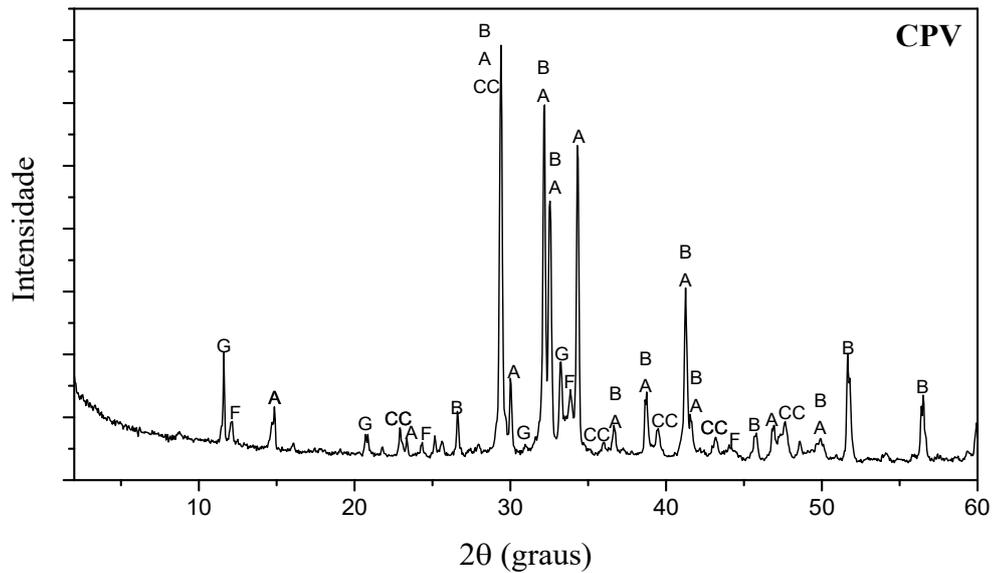
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)



Fonte: Elaborado pela autora

A composição mineralógica do cimento Portland de alta resistência inicial foi analisada através do ensaio de difração de raios-X, apresentado na Figura 4.2. Nesta figura pode ser identificado cristais característicos de silicato tricálcico (C₃S) e silicato dicálcico (C₂S), que correspondem aos silicatos responsáveis pela resistência do cimento, e também picos de ferroaluminato tetracálcico (C₄AF), calcita (CaCO₃) e gipsita (Ca(SO₄).2H₂O).

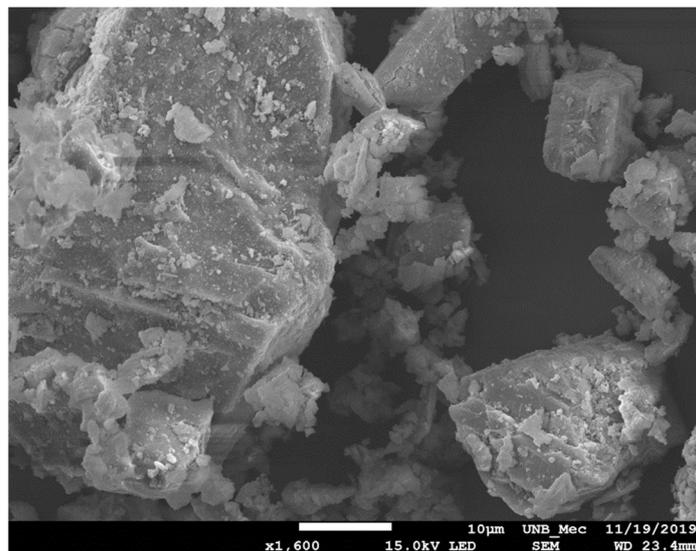
Figura 4.2 - Difratoograma de raios-X do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). G-gipsita, F-ferroaluminato tetracálcico, A-silicato tricálcico, CC-calcita, B-silicato dicálcico.



Fonte: Elaborado pela autora

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado para a obtenção de imagens ampliadas do cimento Portland CPV-ARI em pó. Na Figura 4.3 é perceptível que há diferentes tamanhos de partícula deste material, confirmando o resultado de granulometria por raio laser. Ressalta-se ainda que a imagem foi obtida em uma escala de ampliação de 1.600 e área de trabalho de 23,4mm.

Figura 4.3 - Imagem de MEV do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.2 Materiais cimentícios suplementares e gesso

Os resultados de caracterização dos materiais cimentícios suplementares e do gesso, obtidos nos ensaios de análise química, massa específica, superfície específica e diâmetros são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados de caracterização dos materiais cimentícios suplementares e do gesso

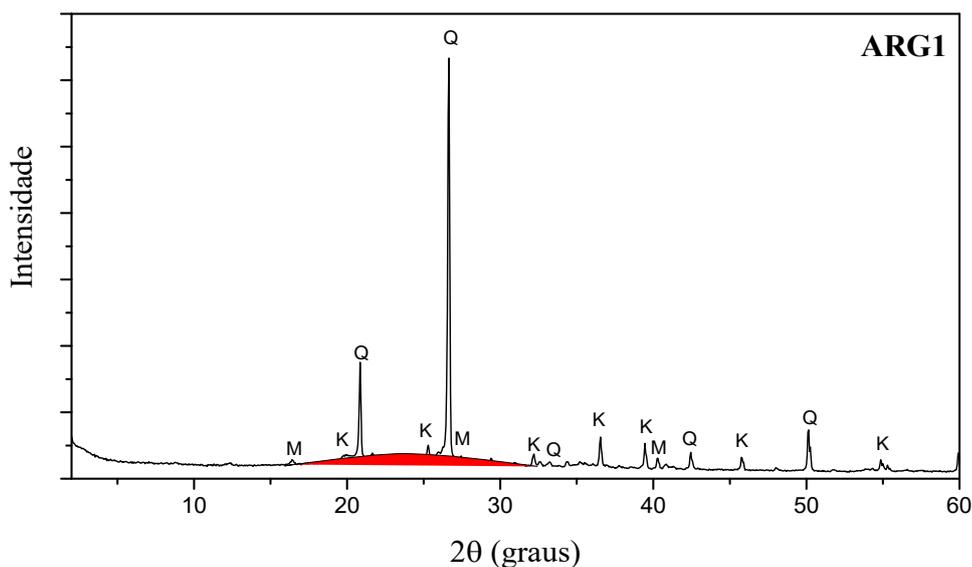
Propriedade	ARG1	ARG2	FC	G	
Composição química (%)	SiO ₂	51,27	52,79	6,56	1,10
	Al ₂ O ₃	29,70	30,96	2,18	0,39
	CaO	4,87	-	46,19	55,41
	Fe ₂ O ₃	4,58	5,77	2,19	0,64
	TiO ₂	3,12	2,34	0,27	-
	K ₂ O	1,19	3,31	0,92	0,31
	SO ₃	0,35	0,08	0,22	30,83
	SrO	0,04	0,04	0,93	0,38
	ZnO	0,01	0,03	-	-
	MnO	-	0,06	-	-
	CuO	-	-	-	-
	MgO	0,64	0,61	3,29	-
	Outros	1,26	1,01	-	1,41
	LOI	2,97	3,00	37,24	9,55
	Massa específica (g/cm ³)	2,68	2,52	2,68	2,60
Superfície específica B.E.T. (m ² /g)	17,04	17,20	4,40	5,09	
Diâmetros (µm)	D ₁₀	1,25	1,42	1,24	1,16
	D ₅₀	16,81	14,04	13,74	11,10
	D ₉₀	58,78	42,22	43,01	36,99

* ARG1 = Argila calcinada 1; ARG2 = Argila calcinada 2; FC = Fíler calcário; e G = Gesso.

Fonte: Elaborado pela autora

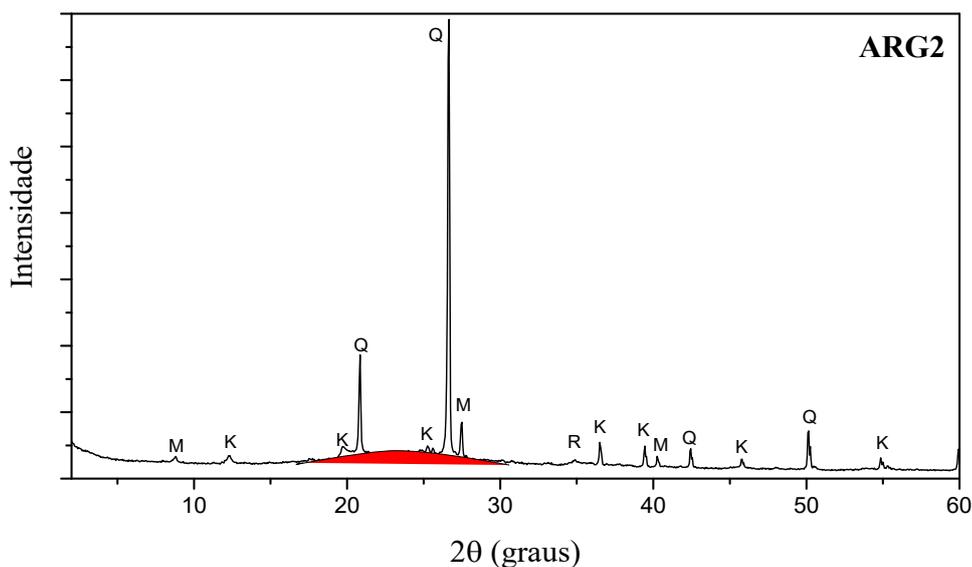
Pela análise da composição química das argilas apresentada na Tabela 4.2, podemos notar que as argilas são ricas em óxidos de silício e alumínio. O teor de sílica das argilas está em conformidade com a norma NBR 15894-1 (ABNT, 2010) que estabelece valores entre 44,0 e 55,0%. Além disso, a especificação mínima da norma NBR 12653 (2014), que indica que a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser igual ou superior a 70%, foi atendida. Os teores de SO₃ e perda ao fogo também se encontram em conformidade, com o valor menor que 4,0% e 10%, respectivamente. A perda ao fogo desses materiais está relacionada a perdas de águas coordenadas e adsorvidas, hidroxilas dos argilominerais, matéria orgânica e outros (MENEZES *et al.*, 2009). Para a confirmação da composição mineral destes materiais, os difratogramas das amostras são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5.

Figura 4.4 - Difratoograma de raios-X da argila calcinada 1 (ARG1). M-muscovita, K-caulinita, Q-quartzo.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4.5 - Difratoograma de raios-X da argila calcinada 2 (ARG2). M-muscovita, K-caulinita, Q-quartzo e R-rutilo.



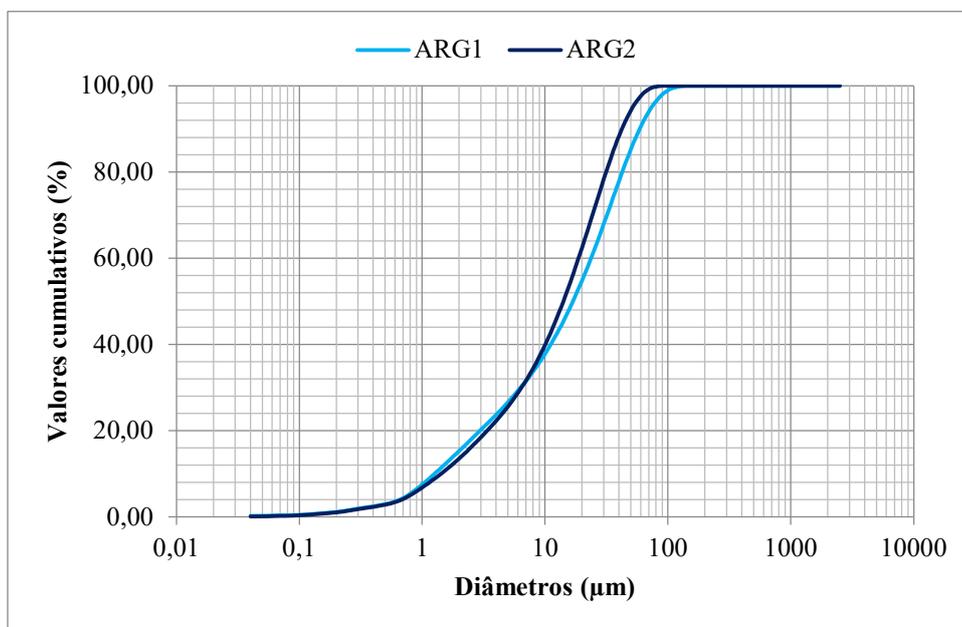
Fonte: Elaborado pela autora

Os difratogramas das argilas apresentaram compostos cristalinos semelhantes, com picos de maior intensidade relacionados ao quartzo (SiO_2). Pode-se notar também a presença de picos de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) e rutilo (TiO_2), além da presença de um halo amorfo que caracteriza a reatividade do material.

Além da composição mineralógica, a finura do material cimentício suplementar é um fator importante a ser considerado no desenvolvimento da atividade pozolânica do material. O

ensaio de superfície específica BET mede a área superficial dos materiais, considerando a sua rugosidade. Os resultados indicaram que argila calcinada 2 possui área superficial maior que a argila calcinada 1. Avaliando a distribuição granulométrica das argilas, apresentadas por meio da Figura 4.6, pode-se dizer que são semelhantes.

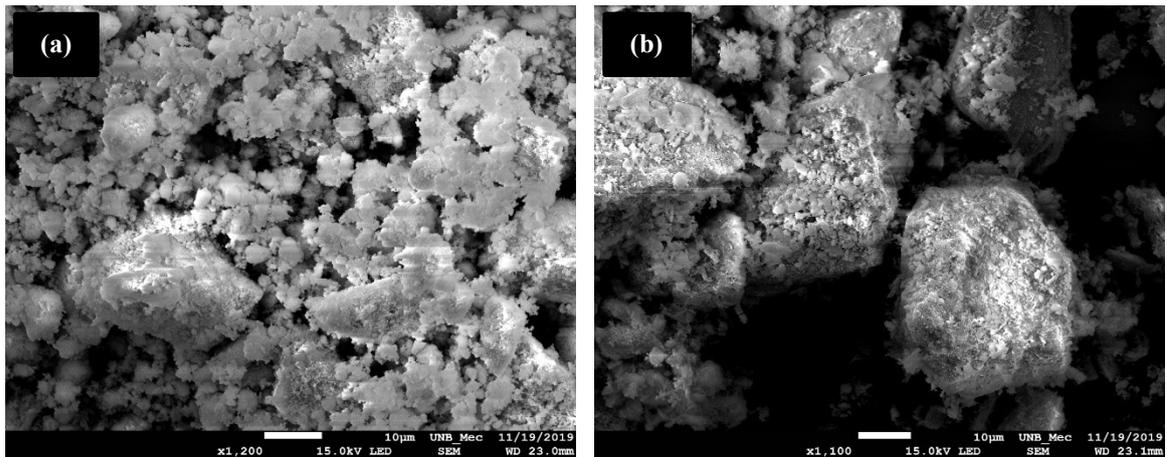
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das argilas calcinadas (ARG1 e ARG2).



Fonte: Elaborado pela autora

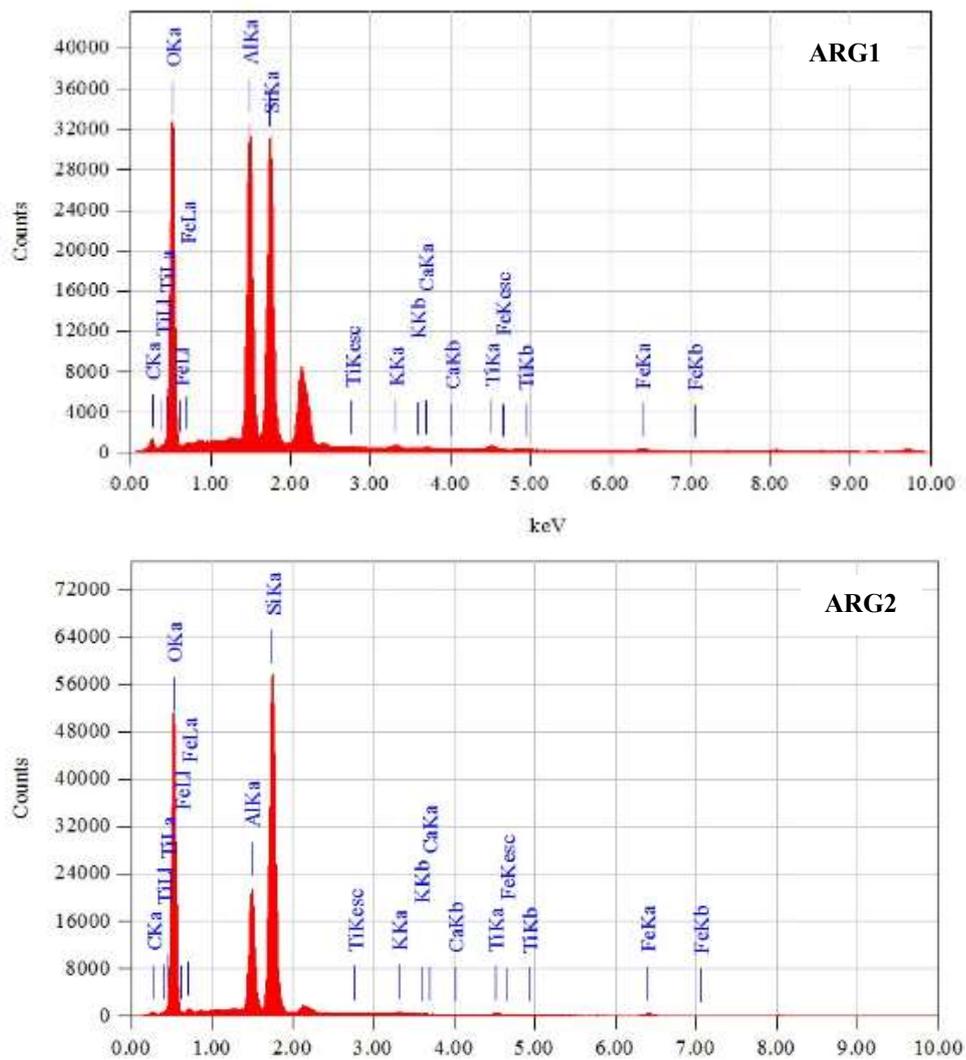
A Figura 4.7 mostra uma imagem ampliada dos grãos das argilas calcinadas obtidas utilizando o microscópio eletrônico de varredura, com aproximadamente a mesma escala de ampliação (1100~1200). Pode-se observar que o tamanho de partícula da ARG1 foi menor que o da ARG2, para a região da amostra analisada. Devido à maneira na qual as imagens foram criadas, pode-se visualizar apenas a estrutura superficial da amostra. Através das imagens obtidas através do MEV, pode ser extraído a composição química por meio do EDS, apresentadas por meio da Figura 4.8.

Figura 4.7 - Imagem de MEV das argilas calcinadas utilizadas na pesquisa. (a) ARG1 e (b) ARG2



Fonte: Elaborado pela autora

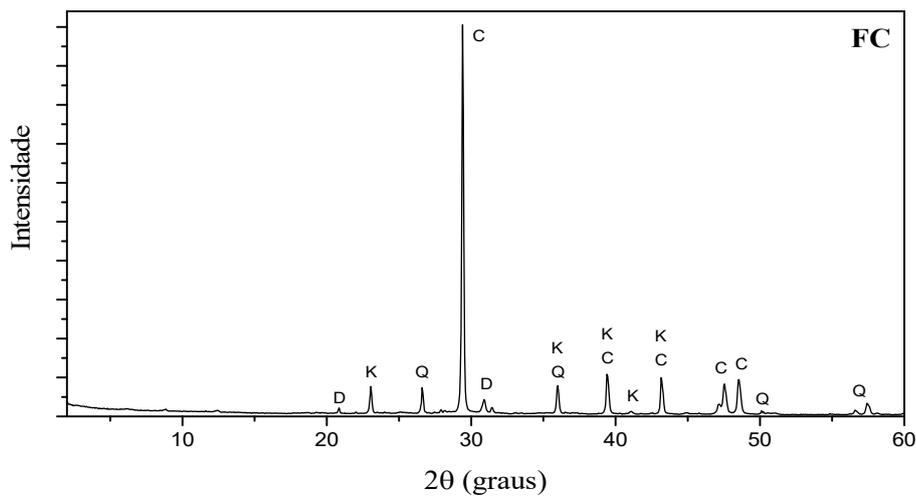
Figura 4.8 - Composição das argilas utilizadas na pesquisa pelo EDS



Fonte: Elaborado pela autora

Avaliando a composição química do filer calcário, é perceptível a presença em grandes quantidades de compostos químicos principais na sua formação mineral. Neste caso, verifica-se que o filer possui 46,19% de CaO em massa, 6,56% de SiO₂ no quartzo e na caulinita. Para a confirmação deste resultado, o difratograma de raios-X mostrado na Figura 4.9, apresenta um pico intenso de calcita (CaCO₃), presença de dolomita (CaMg(CO₃)₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e quartzo (SiO₂).

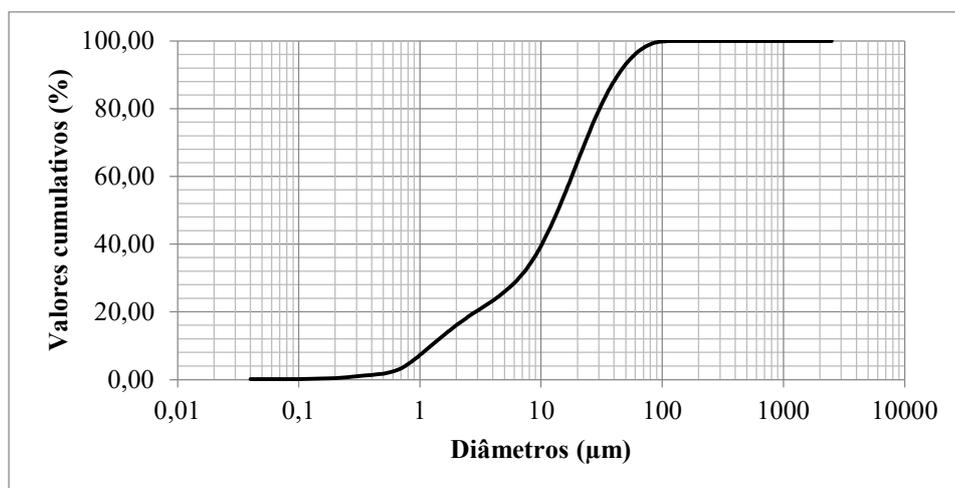
Figura 4.9 - Difratograma de raios-X do filer calcário (FC) utilizado na pesquisa. D-dolomita, K-caulinita, Q-quartzo e C-calcita.



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 4.10 é apresentado a distribuição granulométrica do filer calcário, realizado por meio do ensaio de granulometria a laser. Além disso, na Tabela 4.2 observa-se os diâmetros nos quais passam 10, 50 e 90% do material.

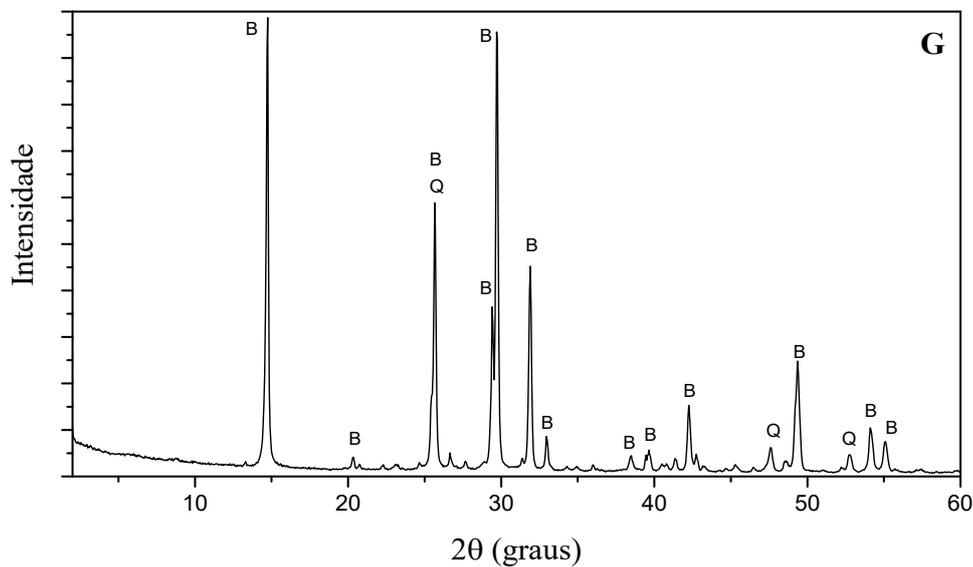
Figura 4.10 - Distribuição granulométrica do filer calcário (FC) utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora

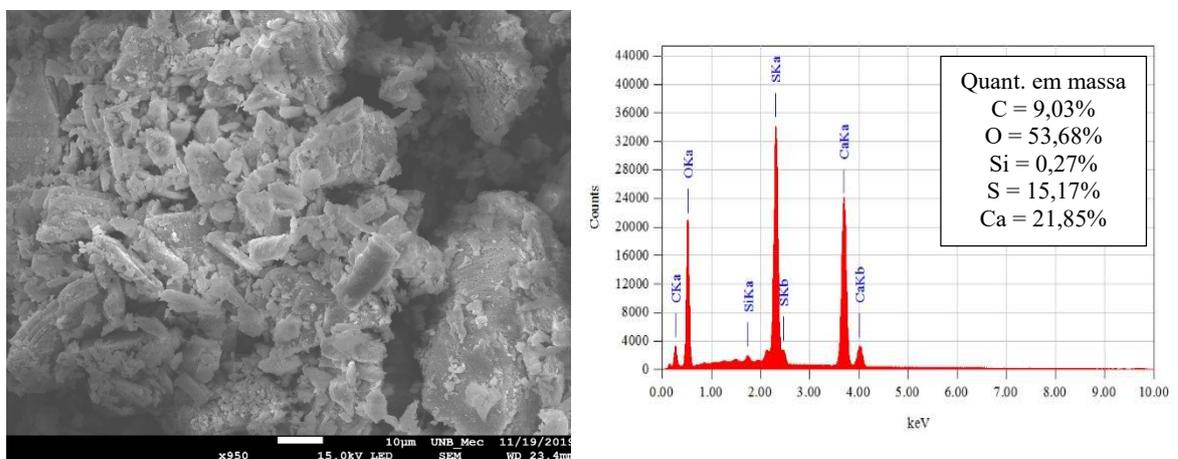
Quanto a composição química do gesso, exibida por meio da Tabela 4.2, está em conformidade com a literatura, apresentando grande quantidade de óxido de cálcio (55,41%). O difratograma deste material foi apresentada na Figura 4.11, podendo perceber os cristais evidentes de Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), típico da estrutura de sulfato de cálcio, correspondente aos picos de maior intensidade. Além disso, foi observado também picos de quartzo no material. A posição e intensidade dos picos de sulfato de cálcio estão coerentes com o material utilizado por Antoni (2013). A Figura 4.12 confirma este resultado, apresentando as porcentagens dos elementos através da análise de EDS obtida por meio da imagem do MEV.

Figura 4.11 - Difratograma de raios-X do gesso utilizado na pesquisa. B-bassanite e Q-quartzo.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4.12 - Imagem de MEV e análise de EDS do gesso utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

Tendo em vista a grande quantidade de materiais finos presente no cimento LC³, assim como a composição química distinta dos materiais, torna-se importante os ensaios de caracterização para que tenha uma melhor compreensão na análise dos resultados.

4.1.3 Agregados

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização dos agregados miúdos e dos agregados graúdos.

4.1.3.1 Agregado miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada a areia quartzosa, cujos resultados de caracterização estão apresentados na Tabela 4.3.

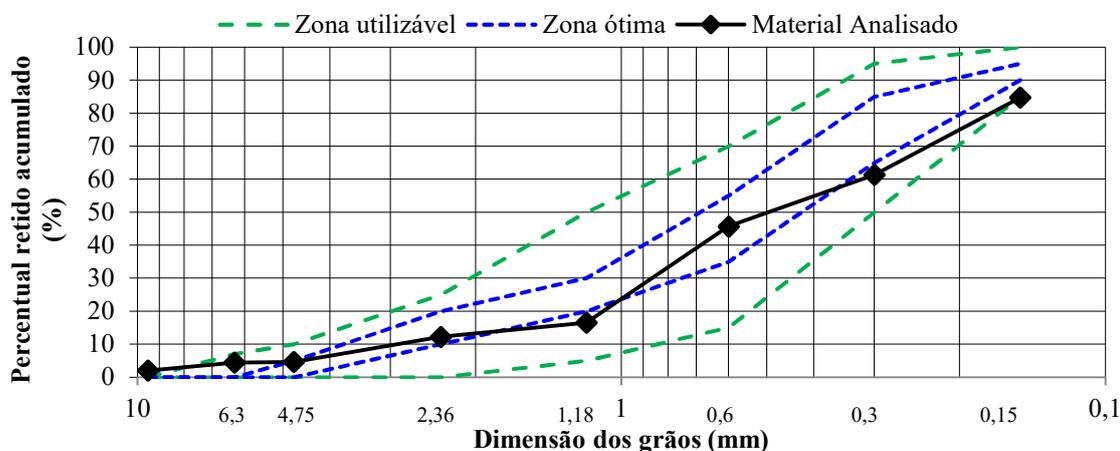
Tabela 4.3 - Resultados de caracterização física do agregado miúdo utilizado na pesquisa

Propriedade	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	2,63
Massa unitária (g/cm ³)	1,42
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Módulo de finura	2,20

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 4.13 pode ser visualizada a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo. As faixas delimitadas como zona ótima e utilizável são definidas através da prescrição normativa da NBR 7211 (2009) baseadas no valor do módulo de finura. Percebe-se que a areia quartzosa se apresenta entre o limite de zona utilizável e zona ótima.

Figura 4.13 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.3.2 Agregado graúdo

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados de caracterização física da composição das britas de origem calcária. Conforme descrito no item 3.1.4, optou-se pela composição de agregados graúdos, sendo determinada a proporção de utilização de 75% da brita 19,0 mm e 25% da brita de 12,5 mm. A composição de agregados foi realizada a fim de obter o menor índice de vazios, de acordo com a prescrição normativa NBR 7211 (2009).

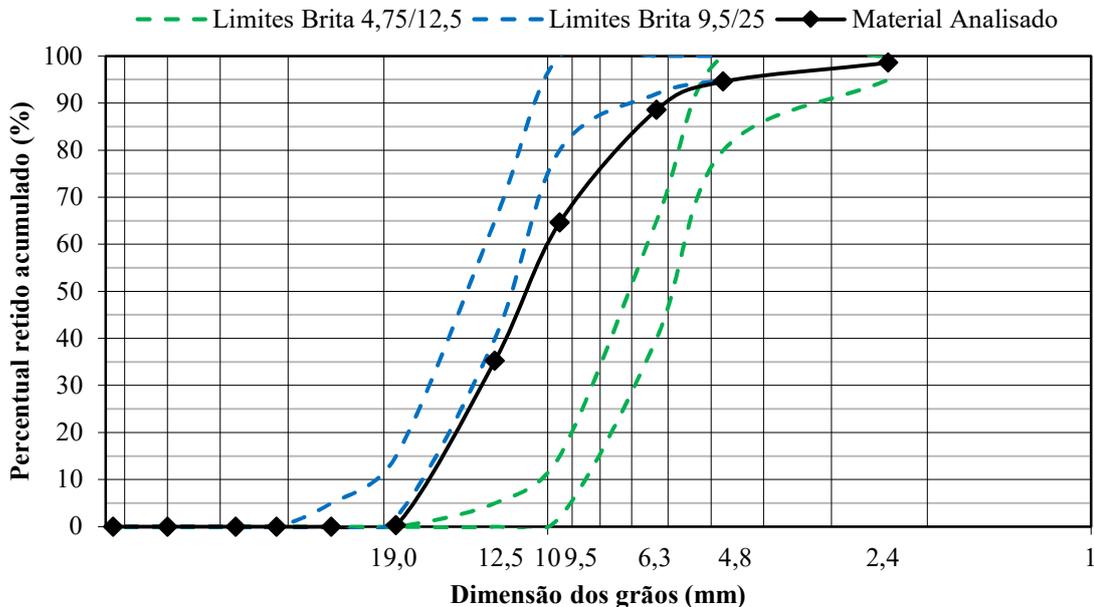
Tabela 4.4 - Resultados de caracterização física da composição do agregado graúdo utilizado na pesquisa

Propriedade	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	2,71
Massa unitária (g/cm ³)	1,62
Dimensão máxima característica (mm)	19,00
Módulo de finura	6,56
Absorção de água (%)	0,62

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 4.14 pode ser visualizada a curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo. Nota-se que o material se encontra entre as faixas que correspondem aos limites de diâmetros entre 4,75/12,5mm e 9,5/25mm, devido a composição dos agregados.

Figura 4.14 - Curva granulométrica da composição do agregado graúdo utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.4 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado na pesquisa foi o superplastificante Glenium 51® a base de uma cadeia de éter policarboxílico modificado. Este material foi inserido a fim de manter as mesmas características de consistência das pastas cimentícias e concretos. A caracterização deste material, fornecida pelo fabricante, encontra-se exposta na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados da caracterização do superplastificante utilizado na pesquisa

Propriedades	Resultados
Base química	Éter policarboxílico modificado
Dosagem recomendada (%)	0,2-1,0
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5-7
Densidade (g/cm ³)	1,067-1,107
Sólidos (%)	28,5-31,5
Viscosidade (cP.s)	< 150

Fonte: Fabricante

4.2 ENSAIOS NAS PASTAS CIMENTÍCIAS

A seguir serão apresentados os resultados referentes aos ensaios de tempo de pega, resistência à compressão simples e índice de desempenho, e difração de raios-X.

Para a realização destes ensaios, foram produzidas pastas cimentícias com valores fixados de relação água/aglomerante (0,5) e consistência (94 ± 4 mm). Para isso, houve a variação do teor de superplastificante nas amostras, sendo determinada por meio de tentativa e erro. Os resultados do teor de superplastificante nas pastas cimentícias são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Teor de aditivo superplastificante nas pastas cimentícias

Traços	Consistência (mm)	Teor de superplastificante (%)
PREF	95,00	0,09
PLC3-ARG1	92,00	0,75
PLC3-ARG2	97,00	1,05

Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.6 é possível identificar um aumento da necessidade de aditivos para a mesma consistência, com o uso de materiais cimentícios suplementares. Ressalta-se que os valores do teor de superplastificante correspondem a porcentagem da quantidade de solução de aditivo superplastificante em relação a quantidade

de cimento presente na mistura. A mistura de referência apresentou um teor de superplastificante de 0,09%, enquanto que as misturas com cimento LC³ apresentaram 0,75% e 1,05%, para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado devido à alta superfície específica destes materiais, que são superiores a superfície específica do cimento Portland.

4.2.1 Tempo de pega

O ensaio de tempo de pega foi realizado para determinar o início e fim de pega, utilizando o aparelho de vicat. O início de pega corresponde ao tempo decorrido do momento em que é adicionada a água, até o momento que a agulha penetra em uma profundidade de 6 mm ± 1 mm. Já o fim de pega é o momento no qual a agulha penetra 0,5 mm na pasta cimentícia. As médias dos resultados deste ensaio estão dispostas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados médios dos ensaios de tempo de início e fim de pega

Traço	Tempo início de pega (min)	Tempo fim de pega (min)
PREF	180	235
PLC3-ARG1	252	356
PLC3-ARG2	250	360

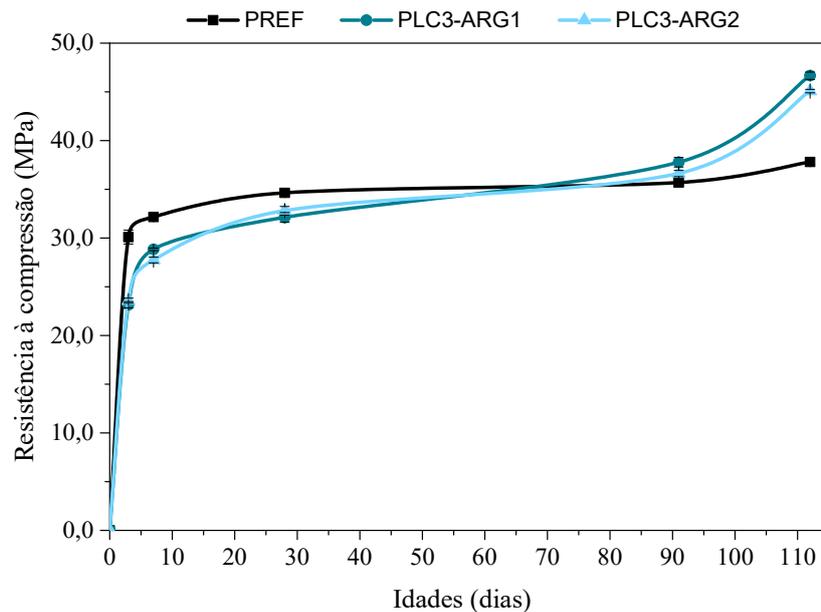
Fonte: Elaborado pela autora

O tempo de pega é correspondente a hidratação dos aluminatos presentes no cimento (C₃A e C₄AF), após a formação de cristais de etringita. Através da Tabela 4.7 é possível perceber que os tempos de início e fim de pega de todas as misturas com cimento LC³ foram maiores que a referência. Dessa maneira, percebe-se que a correção da quantidade de gesso a mistura, controlou o início e fim de pega, mesmo sendo utilizado uma maior quantidade de finos. Um efeito semelhante foi observado por Juenger e Siddique (2015) em que as pastas de cimento LC³ indicaram um efeito retardador em comparação com a pasta de referência. Ressalta-se ainda a semelhança entre os resultados dos traços com cimento LC³, na qual foi utilizado 5% de gesso.

4.2.2 Resistência à compressão simples e Índice de desempenho

As pastas cimentícias foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples, nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura, conforme a prescrição normativa ABNT NBR 7215 (2019). As médias dos resultados de resistência à compressão das pastas são apresentados na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Resistência à compressão de pastas cimentícias ($a/agl = 0,5$) em função das idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em MPa.



Fonte: Elaborado pela autora

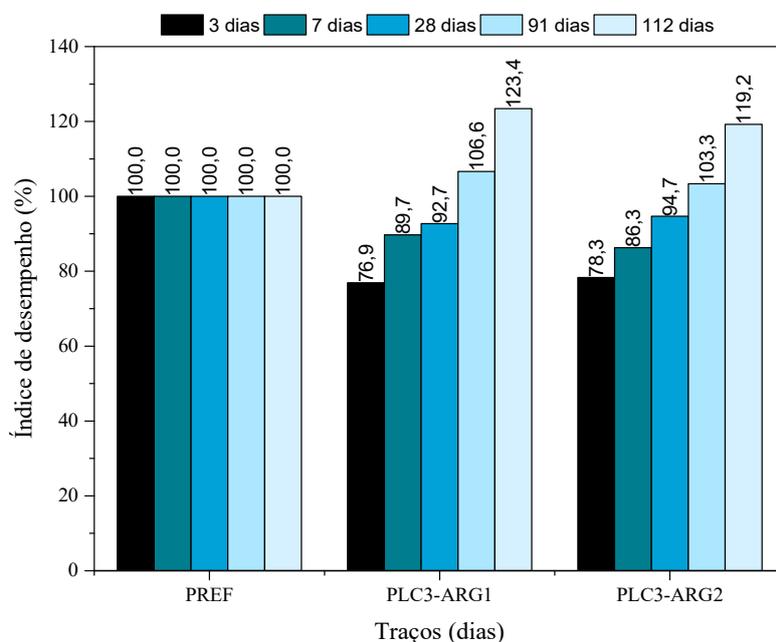
Através da Figura 4.15 pode-se observar que aos 3 e 7 dias de cura, as pastas cimentícias de referência, obtiveram um ganho de resistência maior que as pastas com cimento LC³. Aos 28 dias de cura, houve uma aproximação nos resultados obtidos com cimento Portland e cimento LC³, mas o traço de referência ainda apresentava uma maior resistência à compressão. Essa mudança no comportamento pode ter ocorrido devido a reação sinérgica do cimento LC³, proporcionadas pela argila calcinada e filer calcário, devido a formação dos compostos carboaluminatos, associado à elevada finura dos MCS. Estes resultados corroboram com Lins (2017), que para os 28 dias de cura, os traços com cimento LC³ apresentaram cerca de 90% de resistência à compressão do traço de referência.

Aos 91 dias de cura úmida das pastas cimentícias, os traços com cimento LC³ obtiveram maiores médias de resultados de resistência à compressão, alcançando aumento de 5,9 e 2,6% em comparação com a referência, para PLC3-ARG1 e PLC3-ARG2, respectivamente. Aos 112 dias de cura, os traços com cimento LC³ também apresentaram um aumento de 23,4 e 19,2% em comparação com a referência. Antoni (2013) também obteve resultados semelhantes, que confirma a tendência de aumento na resistência à compressão do cimento LC³ em idades mais tardias.

Na Figura 4.16 são apresentados os resultados de índice de desempenho das pastas cimentícias com cimento LC³, em relação ao cimento de referência, em percentual. No que

diz respeito a este parâmetro, pode ser observado tendência semelhante na evolução do índice de desempenho das amostras com cimento LC³, confirmando o efeito da mistura ternária em comparação com a mistura de referência.

Figura 4.16 - Índice de desempenho das pastas cimentícias (a/agl = 0,5) em função das idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em porcentagem do traço de referência.



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da Figura 4.16 percebe-se que até os 28 dias de cura das pastas cimentícias, a mistura contendo cimento LC³ tem um índice de desempenho menor que a mistura de referência. Nas idades mais avançadas ocorre um comportamento inverso, sendo que as misturas ternárias apresentam desempenhos maiores (cerca de 20% a mais) que a mistura de referência com cimento Portland. Este comportamento pode ser explicado devido ao aumento da taxa de crescimento da resistência à compressão dos cimentos com substituição. A melhora na resistência ratifica os benefícios provenientes das reações pozolânicas, sendo associadas a diminuição do hidróxido de cálcio, formação do C-S-H secundário e refinamento dos poros no sistema cimentício.

A diferença nos resultados entre o cimento LC³ e cimento Portland, confirmam as premissas feitas por Bishnoi *et al.* (2014), Scrivener (2014) e Vizcaíno Andrés *et al.* (2015), que a adição de argila calcinada e fíler calcário proporcionam reações sinérgicas responsáveis pelo desempenho final do LC³.

Em comparação com as duas misturas ternárias, os resultados apresentaram-se semelhantes, sendo explicado o aumento de resistência devido ao grau de pozolanicidade dos maiores

teores de Al_2O_3 (SCRIVENER, 2014), mostradas no ensaio de fluorescência de raios-X (Tabela 4.2). Além disso, apesar dos resultados de caracterização dos materiais apresentarem próximos, a partir da Tabela 4.6 é perceptível verificar o aumento da quantidade de aditivo para atingir uma mesma consistência, podendo influenciar no ganho de resistência.

A análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à compressão nas pastas sobre o efeito das idades, estão apresentados na Tabela 4.8. A interação entre tipo de traço e as idades de cura do ensaio obtiveram um Valor-p = 0,000798, valor menor que 0,05, indicando que são variáveis que apresentaram efeitos significativos na resistência à compressão. Além disso, ressalta-se a influência do tipo de argila calcinada utilizada nos traços com cimento LC³.

Tabela 4.8 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples das pastas

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Resultado
TRAÇO	51,48	2	25,74	22,90	0,000295	Significativo
TEMPO	617,34	2	308,67	64,39	0,000000	Significativo
TRAÇO*TEMPO	149,22	4	37,30	7,78	0,000798	Significativo
Erro	86,29	18	4,79			

SQ = Soma dos quadrados; C = Número de categorias; MQ = Média dos quadrados; F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Fonte: Elaborado pela autora

Para uma melhor compreensão dos dados, realizou-se o teste de Duncan, com a finalidade de agrupar valores que não diferem estatisticamente entre si. Os resultados do agrupamento desse teste são apresentados na Tabela 4.9. Os grupos foram divididos de 1 a 7, em ordem crescente com relação as médias do resultado de resistência à compressão simples.

Tabela 4.9 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples

Idades	Traços		
	PREF	PLC3-ARG1	PLC3-ARG2
3 dias	2	1	1
7 dias	3 e 4	2	2
28 dias	4 e 5	3 e 4	3 e 4
91 dias	5 e 6	6	5 e 6
112 dias	6	7	7

Fonte: Elaborado pela autora

Pode observar na Tabela 4.9 que o traço de referência se apresentou em grupos superiores ao cimento LC³ apenas até a idade de 28 dias. Aos 91 dias de idade, suas médias indicaram

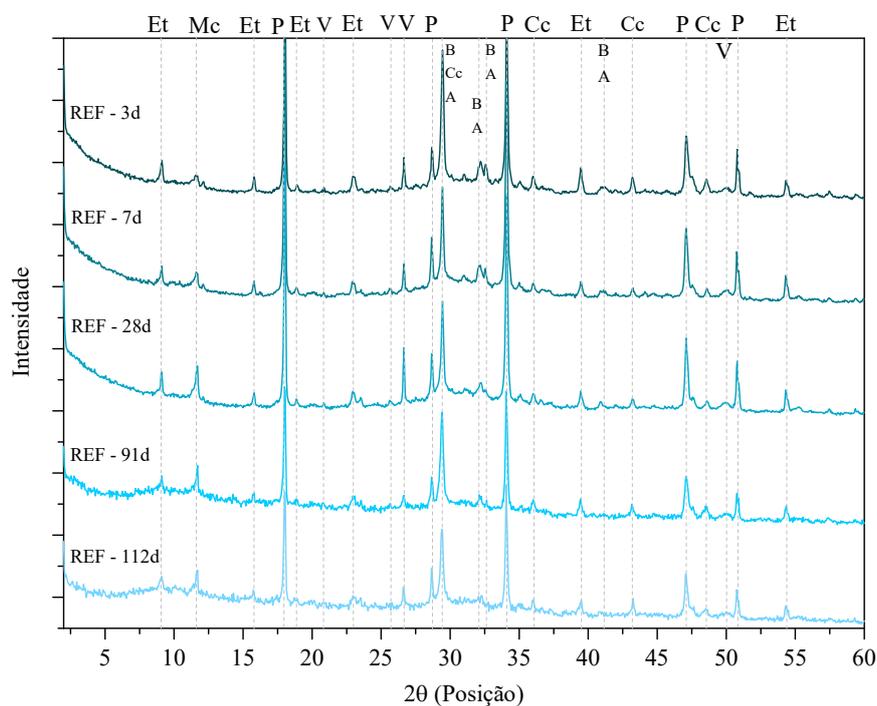
um resultado estatisticamente semelhante, e a partir desse período, apresentaram em grupos inferiores ao LC³, indicando uma menor eficiência. Esses dados reforçam que os concretos com mistura ternária, tem influência nos resultados de resistência à compressão simples das pastas cimentícias. Comparando os resultados da análise do teste de Duncan entre as pastas cimentícias que contém cimento LC³, percebe-se que apresentam médias estatisticamente semelhantes, para todas as idades.

Observando a Figura 4.15 é possível identificar que a pasta cimentícia de referência apresentou maiores valores de resistência a compressão até aproximadamente 70 dias. Após essa idade, os traços contendo cimento LC³ superam esses valores de resistência à compressão, com uma maior tendência de crescimento. Este comportamento corroborou com os resultados apresentados na Tabela 4.9, em que as pastas com cimento LC³ (PLC3-ARG1 e PLC3-ARG2) encontram-se em grupo distinto ao resultado da pasta de referência (REF) em idades tardias.

4.2.3 Difração de raios-X

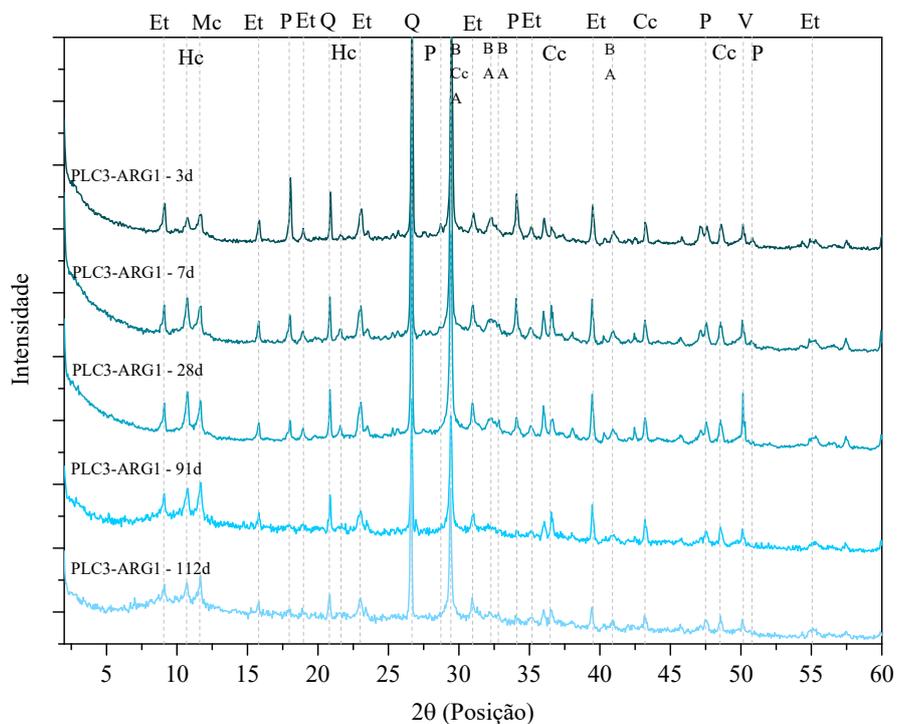
A análise de difração de raios-X foi realizada no intuito de avaliar a evolução da hidratação das pastas cimentícias com e sem a utilização do cimento LC³, nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias. Os difratogramas das pastas de cimento Portland contendo o traço de referência (PREF), e os traços com cimento LC³ (PLC3-ARG1 e PLC3-ARG2) são apresentados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, respectivamente. As principais fases cristalinas identificadas nesses difratogramas foram: etringita (Et), quartzo (Q), portlandita ou hidróxido de cálcio (P), silicato tricálcico ou alita (A), silicato dicálcico ou belita (B), calcita (Cc), vaterita (V), hemicarboaluminato (Hc) e monocarboaluminato (Mc).

Figura 4.17 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia REF ($a/agl=0,5$) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.



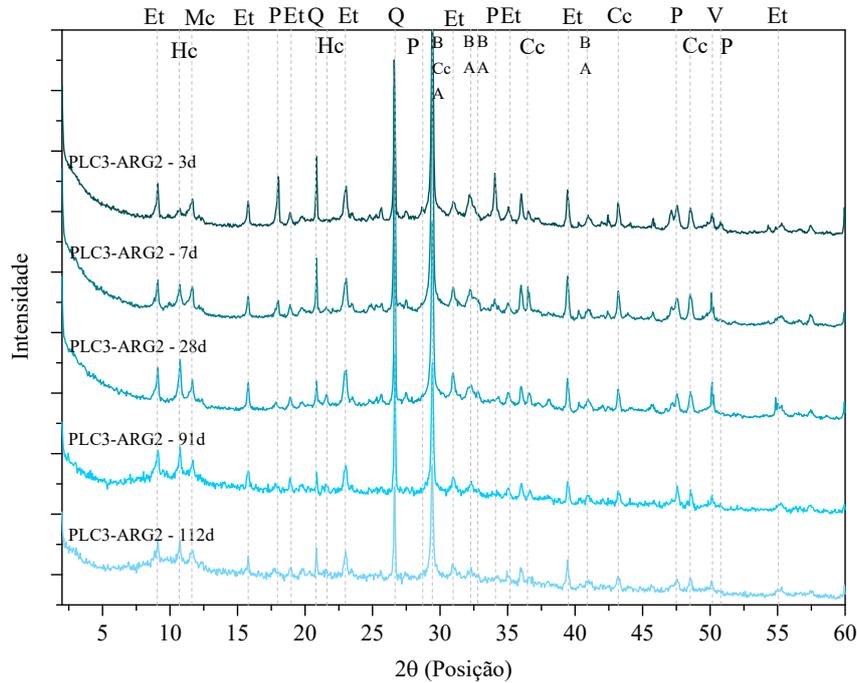
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4.18 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia LC3-ARG1 ($a/agl=0,5$) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Hc-hemicarboaluminato, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, Q-quartzo, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4.19 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia LC3-ARG2 ($a/agl=0,5$) nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura. Et-etringita, Hc-hemicarboaluminato, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, Q-quartzo, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.



Fonte: Elaborado pela autora

Através dos difratogramas apresentados por meio da Figura 4.17, pode-se notar que ao longo da hidratação das pastas de referência, houve uma diminuição nos picos dos silicatos (alita-A e belita-B) para a formação dos picos de hidróxido de cálcio ou portlandita (P). Também percebe a presença de etringita (Et), com picos nos primeiros momentos da hidratação, devido a combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa e das fases aluminatos (C_3A e C_4AF). A presença dos picos de calcita (Cc) e vaterita (V), são atribuídas aos produtos de carbonato de cálcio, devido a composição química do cimento. Ressalta-se ainda, a presença do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que não possui estrutura cristalina bem definida, apresentando uma estrutura amorfa, compreendendo uma saliência da linha de base na região entre 25° a 35° .

É possível notar a diferença entre os difratogramas da amostra de referência e das amostras com cimento LC³. Com o avanço na hidratação das pastas cimentícias com cimento LC³, observou-se que a partir dos 7 dias, os picos referentes ao hidróxido de cálcio ou portlandita (P) começaram a diminuir, em consequência das reações entre os materiais cimentícios suplementares. Já na amostra de referência, apresentou picos acentuados de CH, a qual está associada a maior quantidade de clínquer. Além disso, aos 91 dias não é perceptível a presença deste material nas misturas ternárias, evidenciando que houve o esgotamento na

matriz cimentícia. Também pode ser observado a maior presença de quartzo nas pastas com cimento LC³, devido à presença de argila calcinada. Conforme Berodier e Scrivener (2014), a presença de quartzo não interfere nas reações químicas.

A partir dos 7 dias de hidratação das pastas com cimento LC³, nota-se um incremento nos picos referentes aos carboaluminatos, hemicarboaluminato (Hc) e monocarboaluminato (Mc), entre os ângulos de 9 a 12°. Esses picos são referentes a reação sinérgica entre o aluminato proveniente da argila calcinada, com o carbonato de cálcio do fíler calcário, em que na presença de hidróxido de cálcio, formam os carboaluminatos de cálcio hidratado (C₃A.Cc.H₁₂). Também é perceptível a presença do halo amorfo nos difratogramas com cimento LC³, característico do C-A-S-H. Esse resultado corrobora com o estudo de Antoni (2013) que utilizou a mesma proporção de substituição, com materiais da Suíça, e obteve picos semelhantes ao deste trabalho, confirmando a reação sinérgica entre a argila calcinada e o fíler calcário. Os dados mostraram a presença de etringita, portlandita, stratlingita, hemi e monocarboaluminato.

Outro pico importante a ser discutido é os sinais de estabilização da etringita nos traços contendo cimento LC³. A estabilização deste elemento, impede a transformação em monossulfato, melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade.

O pico da calcita, por sua vez, apresentou a maior intensidade nas pastas com cimento LC³, por conta dos materiais cimentícios suplementares possuírem calcário em sua composição. Apesar da pasta de referência não ter substituições, a presença de calcita pode ser proveniente do fíler calcário que existe na composição do cimento Portland utilizado.

4.3 ENSAIOS NO CONCRETO

A seguir são apresentados os resultados referentes aos ensaios das propriedades do concreto no estado fresco e estado endurecido.

4.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Os ensaios realizados nos concretos no estado fresco foram: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone e massa específica, e estão apresentados adiante.

4.3.1.1 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Para a preparação do concreto, a consistência foi mantida em 125 ± 5 mm, atendendo a classe S100 (abatimento de 100 a 160 mm), conforme a norma NBR 8953 (ABNT, 2015), a qual classifica como "concretos que podem ser aplicados em elementos estruturais, com lançamento convencional". Para manter fixa a consistência, foi necessário o uso de diferentes teores de aditivo superplastificante. Os teores de aditivo superplastificante foram calculados em porcentagem da massa de cimento, determinados por tentativa e erro, pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, conhecido como *slump test* (ABNT NBR NM 67, 1998). As médias dos resultados de consistência e a quantidade do teor de aditivo dos concretos são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos com e sem cimento LC³ e teor de aditivo superplastificante ($a/agl = 0,5$).

Traços	Consistência (mm)	Teor de aditivo superplastificante (%)
REF	127,5	0,40
LC3-ARG1	127,5	1,48
LC3-ARG2	125,0	1,42

Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se que a consistência dos concretos foi mantida dentro do limite, conforme esperado, no entanto, o teor de aditivo superplastificante ultrapassou a dosagem máxima indicada (1,0%) pelo fabricante. O teor de aditivo superplastificante necessário para manter uma mesma consistência para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2 aumentaram cerca de 270,0 e 255,0%, respectivamente, em comparação com a amostra de referência. A exigência de uma maior quantidade de aditivo superplastificante é justificado pela alta área superficial dos MCS utilizados.

Os estudos de Vizcaíno Andrés *et al.* (2015) e Scrivener *et al.* (2018) corroboram com os resultados obtidos por meio deste ensaio, com a necessidade de maior quantidade de água, ou níveis mais altos de aditivo superplastificante nas misturas com cimento LC³.

4.3.1.2 Determinação da massa específica do concreto

O ensaio de massa específica foi realizado no concreto fresco, antes da moldagem dos corpos de prova e os resultados estão apresentados na Tabela 4.11. Ressalta-se que para a consistência desejada em todos as misturas, foi utilizado o aditivo superplastificante.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de determinação da massa específica dos concretos com e sem cimento LC³ (a/agl = 0,5).

Traços	Massa Específica (kg/m ³)
REF	2287,72
LC3-ARG1	2249,12
LC3-ARG2	2300,00

Fonte: Elaborado pela autora

Por meio da Tabela 4.11, pode-se notar que os valores de massa específica foram semelhantes, com variação quase insignificante em termos de concretos com misturas ternárias. Ou seja, o teor de substituição de cimento Portland por LC³ não exerceu influência nos resultados.

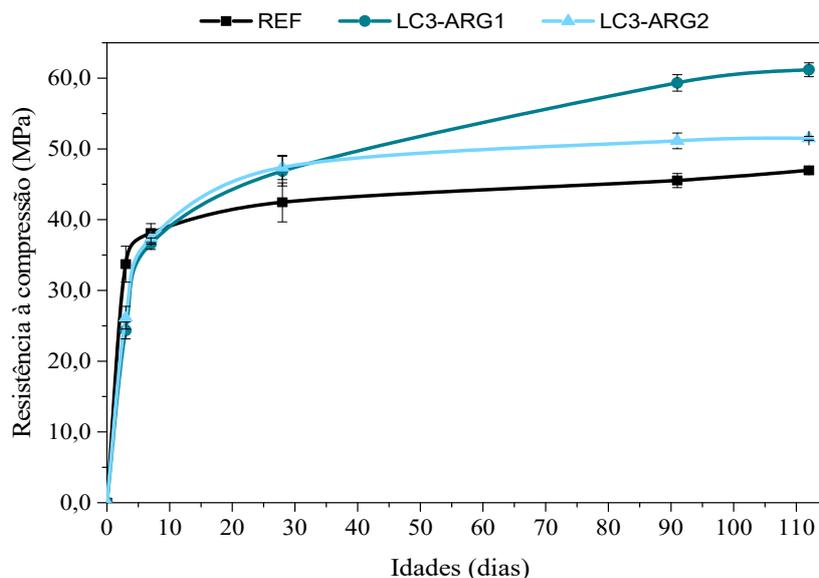
4.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados nos concretos no estado endurecido, como: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo estático de elasticidade à compressão, absorção de água, resistividade elétrica volumétrica e superficial, carbonatação acelerada, migração de cloretos no estado não estacionário e efeito combinado da carbonatação seguido da migração de cloretos.

4.3.2.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples dos concretos foi determinada seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias. As médias dos resultados dessa propriedade pode ser visualizada na Figura 4.20, o qual apresenta a evolução da resistência à compressão no decorrer dos dias, por traço.

Figura 4.20 - Resultados médios da resistência à compressão simples dos concretos nas idades de 3, 7, 28, 91 e 112 dias de cura



Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que nas idades iniciais (3 e 7 dias), os valores mais altos de resistência foram observados para o concreto de referência. No entanto, aos 28 dias, para os concretos com utilização do cimento LC³ houve um aumento de aproximadamente 10% em relação à referência. Além disso, os LC³ mantêm uma proporção de ganho de resistência ao longo das idades. Na idade de 112 dias, verifica-se que as misturas LC3-ARG1 e LC3-ARG2, tiveram um acréscimo de 30,3% e 9,7% em relação ao REF, respectivamente. Dessa forma, os resultados indicam que mesmo com alto teor de substituição do cimento, os concretos com LC³ apresentaram melhores resultados, para a proporção de substituição 2:1 (argila calcinada: fíler calcário), em comparação com a referência. Esta mudança no comportamento de resistência à compressão pode ser explicada pela formação de C-S-H secundário e formação de carboaluminatos, tendo em vista que ocorre de forma acentuada em idades avançadas. Os autores Krishnan *et al.* (2018) e Antoni (2013) obtiveram resultados semelhantes nos traços com cimento LC³, com 45% de substituição ao cimento Portland na proporção de substituição 2:1. Os autores mostraram que a formação dos carboaluminatos, melhoraram os resultados de resistência à compressão simples.

Comparando as duas misturas ternárias, percebe-se que até os 28 dias de idade apresentam resultados de resistência à compressão semelhantes. Aos 91 e 112 dias, há uma divergência entre os comportamentos dos traços com cimento LC³. Os resultados obtidos para o traço

com argila calcinada 1 aumentou em 16,0 e 18,8%, nas idades de 91 e 112 dias, em comparação com o traço com argila calcinada 2, respectivamente.

A eficácia das argilas calcinadas depende da sua reatividade pozolânica, sendo que esse conceito, engloba a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir e a velocidade que a reação ocorre. Apesar da configuração química das argilas apresentarem valores próximos, os resultados de resistência à compressão podem ser explicados por meio do processo de fabricação, área específica, distribuição granulométrica e tamanho das partículas, conforme apresentado por meio da Tabela 4.2 e Figura 4.7.

Conforme os difratogramas dos traços com cimento LC³, apresentado por meio das Figuras 4.18 e 4.19, é possível comprovar a formação dos carboaluminatos, a partir das idades iniciais de hidratação. O crescimento mais expressivo destes compostos ocorre aos 91 dias, para o traço LC3-ARG1, mostrando que os picos de hemicarboaluminato e monocarboaluminato tem grande influência na resistência à compressão simples. Os estudos de Scrivener *et al.* (2018), Bonavetti, Rahhal e Irassar (2001) e Antoni (2013) comprovaram a que a formação dos carboaluminatos contribuem para melhores resultados de resistência a compressão dos traços com cimento LC³, para um mesmo teor de substituição (45%) e proporção de argila calcinada e filer calcário (2:1).

Os resultados estão de acordo com os trabalhos de Antoni *et al.* (2012), Perez *et al.* (2015), Dhandapani e Santhanam (2017) que também estudaram a influência do cimento LC³ nas propriedades mecânicas, utilizando a mesma porcentagem de substituição. Tironi, Scian e Irassar (2015), que utilizaram a proporção 3:1 (argila calcinada: filer calcário), também obtiveram um aumento na resistência com a utilização dessa mistura ternária.

Por outro lado, os resultados apresentados nesta dissertação estão em desacordo com outros autores que obtiveram uma diminuição na resistência à compressão, quando a substituição foi igual ou maior que 45% (KHAN; NGUYEN; CASTEL, 2017, LAVANYA; RAO, 2019). Ademais, vale ressaltar que, a composição química, teor de substituição e características dos materiais são fatores importantes para a utilização no cimento LC³, que interferem nas propriedades dos concretos.

Na Tabela 4.12 é apresentado os resultados da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito das 5 idades de cura (3, 7, 28, 91 e 112 dias). A interação entre tipo de traço e as idades de cura do ensaio obteve um Valor-p = 0,000256, indicando que essas

variáveis apresentaram efeitos significativos na resistência à compressão simples do concreto.

Tabela 4.12 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Resultado
TRAÇO	100,86	2	50,43	6,66	0,029959	Significativo
TEMPO	4200,47	4	1050,12	86,86	0,000000	Significativo
TRAÇO*TEMPO	589,22	8	73,65	6,09	0,000256	Significativo
Erro	290,16	24	12,09			

SQ = Soma dos quadrados; C = Número de categorias; MQ = Média dos quadrados; F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Fonte: Elaborado pela autora

Para uma melhor compreensão dos dados, realizou-se o teste de Duncan, com a finalidade de agrupar valores que não diferem estatisticamente entre si. Os resultados do agrupamento desse teste são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples

Idades	Traços		
	REF	LC3-ARG1	LC3-ARG2
3 dias	2	1	1
7 dias	2	2	2
28 dias	2 e 3	4, 5 e 6	4 e 5
91 dias	3 e 4	6 e 7	5, 6 e 7
112 dias	4 e 5	8	7

Fonte: Elaborado pela autora

Através da Tabela 4.13 percebe-se que a resistência à compressão simples apresentou 8 variações. As variações são grupos com médias estatisticamente equivalentes, em que quanto maior o número do grupo, maior a média do resultado de resistência. Percebe-se que há uma tendência do aumento de resistência dos concretos com cimento LC³ a partir do aumento da idade de cura. Além disso, os valores de resistência do concreto de referência aos 112 dias de idade, são equivalentes aos resultados de 28 dias dos concretos com cimento LC³.

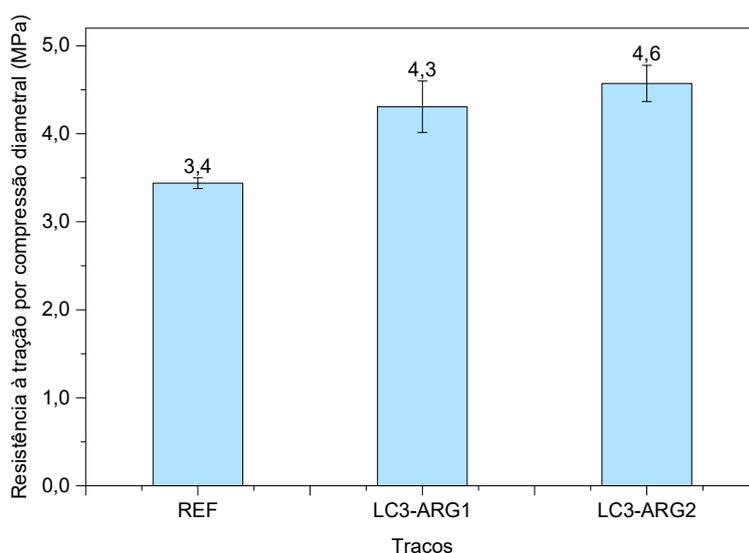
Nota-se que para os concretos com cimento LC³, aos 91 dias de cura, estes apresentam resultados semelhantes. Já aos 112 dias de cura, o LC3-ARG2 continua no mesmo grupo dos valores anteriormente citados, enquanto o LC3-ARG1 demonstra um que está em um patamar estatisticamente maior que os demais.

Correlacionando com os resultados obtidos através das pastas (Tabela 4.9), é perceptível que o crescimento da resistência à compressão nos traços com LC³ é mais expressivo no concreto, em função da interação entre os materiais, devido sua heterogeneidade. Esse aumento ocorre devido ao efeito da reação pozolânica na zona de transição interfacial, que existe entre o agregado e a matriz de cimento, melhorando as propriedades mecânicas. Dessa maneira, fica evidente a importância da realização de estudos em concretos.

4.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral dos concretos foi determinada seguindo as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011), na idade de 28 dias de idade. Na Figura 4.21 estão apresentadas as médias dos resultados obtidos dessa propriedade.

Figura 4.21 - Resultados médios da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com e sem utilização do cimento LC³ ($a/agl=0,5$) em função da idade de 28 dias de cura, em MPa.



Fonte: Elaborado pela autora

Através da Figura 4.21 é possível observar que o uso de cimento LC³ desencadeou um aumento de 25,20% e 32,91%, em relação ao concreto de referência, para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2, respectivamente. O aumento da resistência à tração por compressão diametral pode ser explicado devido ao efeito pozolânico, que reduz a porosidade da matriz e melhora a zona de transição de concretos com cimento LC³. Nota-se uma similaridade entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade. Em ambos, apesar de próximos os valores entre os traços com cimento LC³, o traço LC3-ARG2, apresentou uma maior média.

Os resultados corroboraram com os de Narayanan e Muniasamy (2018), na qual apresentaram uma maior resistência à tração por compressão com a utilização do cimento LC³ em diferentes proporções. Além disso, Carmo (2006) também obteve aumento nos resultados desta propriedade em relação ao concreto de referência, quando substituiu o cimento Portland por 8% metacaulim.

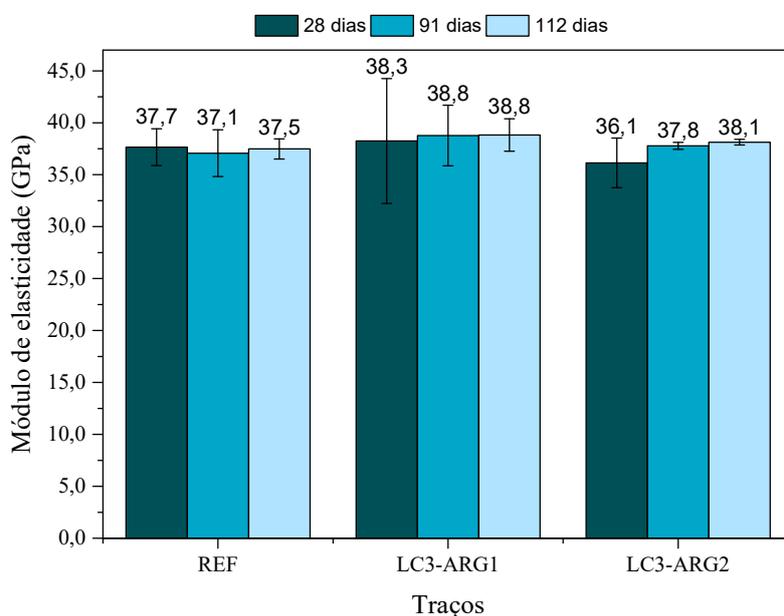
A partir do ensaio experimental, foi feita a análise estatística dos resultados para um melhor entendimento do comportamento do concreto. Dessa maneira, a análise de variância (ANOVA) obteve um Valor-p = 0,443969, indicando que o tipo de traço não afetou significativamente os resultados da resistência a tração por compressão diametral.

4.3.2.3 Módulo estático de elasticidade à compressão

O ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão no concreto foi realizado conforme a prescrição normativa NBR 8522 (ABNT, 2017), nas idades de 28, 91 e 112 dias.

Os resultados médios deste ensaio estão apresentados na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Resultados médios do ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão dos concretos com e sem cimento LC³ ($a/agl=0,5$) em função das idades de 28, 91 e 112 dias de cura úmida, em GPa.



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a Figura 4.22, percebe-se que houve um leve aumento nos valores médios do módulo de elasticidade com concretos com utilização do cimento LC³, em comparação com a referência, nas idades de 91 e 112 dias. Para todas as idades de cura, o maior valor de

módulo de elasticidade foi obtido para o traço LC3-ARG1, no entanto, análise de variância (ANOVA) dos resultados sobre o efeito das 3 idades de cura, foi obtido o valor-P de 0,072018, demonstrando que o tipo de traço e idade do ensaio não exerceu influência significativa.

4.3.2.4 Absorção de água por imersão no concreto

O teste de absorção de água por imersão é governado, principalmente, pelos poros capilares presentes no concreto e a sua conectividade. Esse teste corresponde a uma medida indireta da resistência a penetração de agentes agressivos no concreto, quando este for submetido a situações submersas ou permanentemente saturadas e úmidas. Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, realizado na idade de 112 dias de cura úmida, estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos com e sem utilização do cimento LC³ (a/agl=0,5) na idade de 112 dias de cura.

Propriedade	Traços		
	REF	LC3-ARG1	LC3-ARG2
Massa da amostra na condição seca (m _s)(g)	3599,17	3604,80	3584,73
Massa da amostra imersa em água (m _i)(g)	2197,51	2158,84	2163,13
Massa da amostra na condição saturada (m _{sat})(g)	3743,73	3724,70	3706,63
Massa específica real (g/cm ³)	2,33	2,30	2,32
Absorção por imersão (%)	4,02	3,33	3,40
Índice de vazios (%)	9,35	7,66	7,90

Fonte: Elaborado pela autora

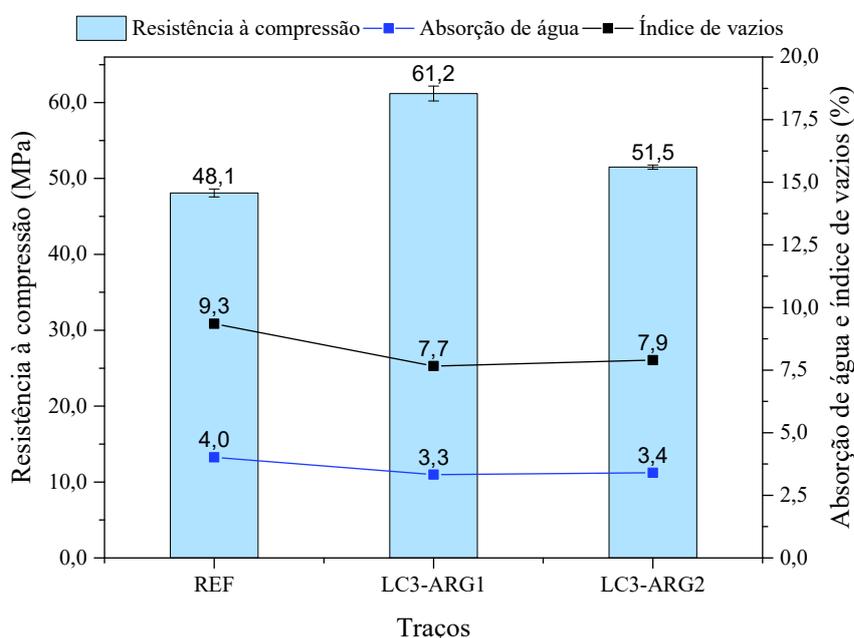
Observa-se os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2 apresentaram uma redução de 17,2 e 15,4% em relação ao concreto de referência, respectivamente, para os resultados de absorção de água por imersão. Essa tendência de redução também foi notada nos resultados de índice de vazios, com 18,1 e 15,5% para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado pelos produtos de hidratação formados a partir da reação pozolânica e efeito sinérgico, formando os carboaluminatos, que ajudam a reduzir a porosidade capilar do sistema. Conforme a literatura, o refinamento dos poros aumenta a tortuosidade do sistema, restringindo o transporte de fluidos no concreto, e tem sido verificado em Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011) e Shah e Bishnoi (2018).

Comparando os resultados dos concretos com cimento LC³, nota-se que as menores médias foram obtidas para o traço LC3-ARG1, corroborando com os resultados apresentados nos

itens anteriores. Este resultado pode ser explicado devido a composição química e distribuição granulométrica da ARG1 utilizada. Com relação ao resultado de massa específica real dos concretos, estes podem ser ditos como equivalentes, visto que a diferença percentual entre o valor de cada traço e média não ultrapassou 2%.

Na Figura 4.23 pode ser visualizado um gráfico, com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios correlacionados com os valores de resistência à compressão simples, aos 112 dias de idade.

Figura 4.23 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios correlacionados com os resultados de resistência à compressão simples, aos 112 dias de idade.



Fonte: Elaborado pela autora

Percebe-se que os concretos que apresentam maiores valores de resistência à compressão, tendem a ter menores valores médios de absorção de água por imersão e índice de vazios. A diminuição na absorção de água por imersão e índice de vazios dos traços com cimento LC³ deve-se, provavelmente, a reação sinérgica entre a argila calcinada e filer calcário, e conectividade dos poros. Além disso, estudos confirmam a redução na absorção de água no concreto, com o aumento da substituição de argila calcinada ao cimento Portland (KHATIB; CLAY, 2004).

Helene (1993) classifica os concretos segundo a absorção de água e índice de vazios em duráveis, normal e deficientes. Quanto a absorção de água, os valores abaixo de 4,2% são duráveis, entre 4,2 e 6,3% classifica-se em normais e maior que 6,3% em deficientes. Já para

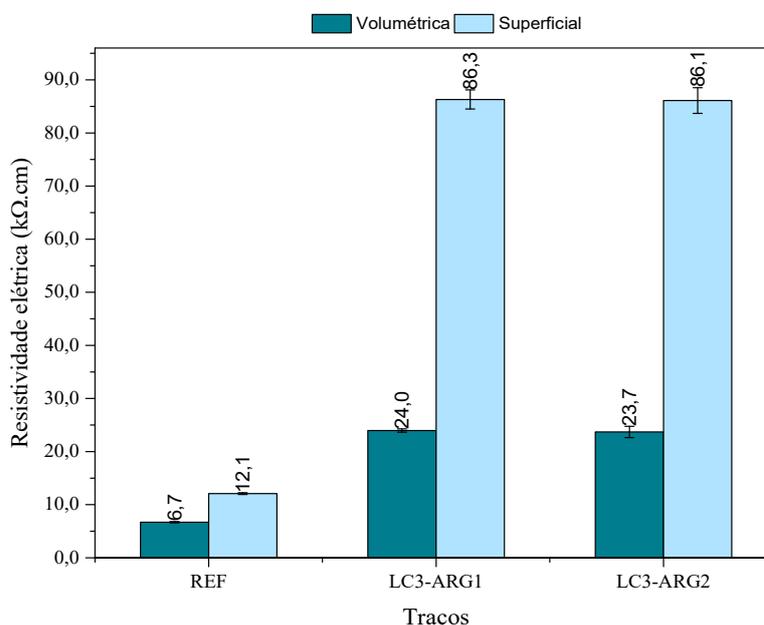
o índice de vazios, pode ser classificado em menor que 10%, entre 10 e 15% e acima de 15% em duráveis, normais e deficientes, respectivamente. Com base nessa classificação, todos os traços enquadram-se em concretos duráveis, tanto conforme a absorção de água, quanto índice de vazios.

Através dos resultados obtidos por meio do ensaio experimental, a análise de variância simples (ANOVA) foi realizada, obtendo Valores-p de 0,124585, 0,008040 e 0,005272 para massa específica real, absorção de água e índice de vazios, respectivamente. Conforme os valores apresentados, percebe-se que para a massa específica o traço não teve influência (não significativo), enquanto que para a absorção de água e índice de vazios, o traço teve influência (significativo). Para os resultados significativos, foi realizado o teste de Duncan, a fim de mostrar se existe diferença entre grupos. Os resultados do teste de Duncan com relação absorção de água e índice de vazios, indicou o grupo 1 composto pelos traços com cimento LC³, e o grupo 2 composto pelo traço de referência.

4.3.2.5 Resistividade elétrica

Os ensaios de resistividade foram realizados no intuito de avaliar a possibilidade de desencadear um processo de corrosão eletroquímica das armaduras inseridas no concreto, relacionadas a permeabilidade de fluidos e a difusão de íons nos poros do material, na qual a corrente elétrica é conduzida quando estes espaços estão preenchidos com água. Quanto maior o valor da resistividade elétrica, mais durável tende ser o concreto. Na Figura 4.24 estão apresentados os resultados médios de resistividade elétrica volumétrica e superficial realizados na idade de 112 dias de cura úmida.

Figura 4.24 - Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica volumétrica e superficial em concretos com e sem utilização do cimento LC³ (a/agl=0,5), na idade de 112 dias de cura, em kΩ.cm.



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com a Figura 4.24 percebe-se que o concreto de referência possui o menor valor de resistividade elétrica volumétrica e superficial. Observa-se também que os concretos com cimento LC³ apresentaram resultados semelhantes de resistividade volumétrica e superficial, com aumento de aproximadamente 28,0 e 14,0% em comparação com a referência, respectivamente. Isso pode ser explicado devido as características da microestrutura dos poros, como o tamanho e conectividade dos poros.

Um comportamento semelhante aos resultados deste trabalho foi observado por Vargas *et al.* (2019), em que os autores mostraram que a incorporação do cimento LC³ nas diferentes proporções, melhoraram os resultados de resistividade superficial em cerca de 30% e o risco de corrosão diminuiu.

Alemán, Díaz e Hernandez (2019) também avaliaram a influência da resistividade com a utilização do cimento LC³, corroborando para os resultados encontrados neste trabalho. Os autores mencionam que os concretos com cimento LC³ aumentam a resistividade ao longo do tempo, no entanto, para o concreto de referência, este comportamento não é perceptível. Em um período de 180 dias os concretos com cimento LC³ se enquadraram com valores maiores que o concreto de referência em uma faixa de 11-16 vezes.

A partir dos resultados de resistividade elétrica volumétrica e superficial, foi realizada a classificação quanto ao risco de corrosão, conforme o boletim informativo nº 192 do *Comité Euro-Internacional du Béton* (CEB) (1989), boletim europeu COST 509 (RIBEIRO *et al.*, 2014) e quanto à penetração de cloretos, de acordo com a norma AASHTO TP 119 (2015). A classificação dos concretos dessa pesquisa encontra-se na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Classificação quanto ao risco de corrosão para os valores de resistividade elétrica volumétrica e superficial dos traços aos 112 dias de cura úmida.

Traço	Resistividade ρ (k Ω .cm)		Risco de corrosão		Permeabilidade a cloretos
	Volumétrica	Superficial	CEB - 192	COST 509	AASHTO TP 119
REF	6,7	-	Alto	Alto	Moderado
	-	12,1	Baixo	Moderado	Baixo
LC3-ARG1	24,0	-	Desprezível	Moderado	Muito Baixo
	-	86,3	Desprezível	Baixo	Muito Baixo
LC3-ARG2	23,7	-	Desprezível	Moderado	Muito Baixo
	-	86,1	Desprezível	Baixo	Muito Baixo

Fonte: Elaborado pela autora

A resistividade elétrica reflete a interconectividade dos poros no concreto e facilidade de movimentação iônica devido a presença de compósitos químicos, fornecendo uma indicação direta da qualidade do concreto no que diz respeito à resistência a propagação por corrosão do aço incorporado. Dhandapani *et al.* (2018) indicam que o concreto utilizando o cimento LC³ atingem altas resistividades em comparação com concretos de cimento Portland comum. Estudos comprovam que a diferença de resistividade entre os concretos produzidos com o cimento Portland e o LC³, deve-se a densificação da matriz cimentícia, influenciada pela reatividade do material (DHANDAPANI *et al.*, 2017).

Correlacionando os resultados de resistividade elétrica e resistência à compressão simples, aos 112 dias de cura úmida, é perceptível os traços com cimento LC³ apresentaram maiores valores, quando comparados ao traço de referência. Esse comportamento provavelmente está relacionado às características da microestrutura do concreto, como por exemplo, porosidade total, distribuição do tamanho de poros e condutividade da solução aquosa presente nos poros. Dessa maneira, como na hidratação do cimento LC³ ocorre a formação dos carboaluminatos (Hc e Mc), estes produtos tendem alterar o volume e a conectividade dos poros, melhorar a zona de transição pasta/agregado e, conseqüentemente, os resultados.

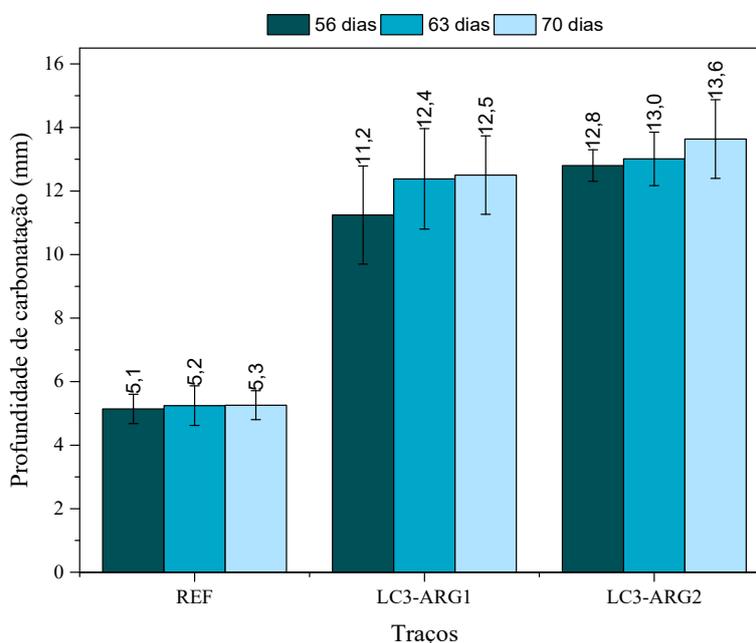
Ao realizar a análise de variância (ANOVA) para os valores do ensaio experimental de resistividade volumétrica e superficial, foi obtido Valor-p de 0,004911 e 0,001155, respectivamente. Desta forma, os traços tiveram influência significativa nos resultados do

ensaio. Conforme o teste de Duncan, para a resistividade volumétrica e superficial, os concretos foram divididos em dois grupos. O grupo maior foi composto pelos traços com cimento LC³ e o menor pelo traço de referência.

4.3.2.6 Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com as prescrições normativas da ISO 1920-12 (2015) aos 56, 63 e 70 dias de exposição do concreto ao CO₂. Este ensaio é importante para avaliar como o concreto irá se comportar em alta exposição de concentração de CO₂. Quando a frente de carbonatação atinge as armaduras ocorre sua despassivação, e na presença de umidade desencadeia um processo corrosivo. Na Figura 4.25 estão apresentadas as médias dos resultados obtidos no ensaio de carbonatação acelerada após a exposição, com a idade final de 112 dias. Todos os valores obtidos são correspondentes a média de pelo menos 10 leituras, realizadas ao longo da superfície que estava exposta ao fluxo de difusão.

Figura 4.25 - Resultados médios da profundidade de carbonatação dos concretos com e sem utilização do cimento LC³ (a/agl=0,5), nas idades de 56, 63 e 70 dias de exposição na câmara de carbonatação.



Fonte: Elaborado pela autora

No gráfico da Figura 4.25 foi observado um aumento do valor medido com o avanço do tempo de exposição dos concretos, principalmente nos traços contendo o cimento LC³. O traço de referência apresentou um menor valor de profundidade de carbonatação, em

comparação aos outros concretos, em todas as idades de exposição. Os concretos com utilização do cimento LC³, aos 70 dias de exposição, possuem um aumento de valor de frente da profundidade de carbonatação em comparação com o referência, de 135,8% e 154,7% para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2, respectivamente. Isso se deve ao fato do efeito pozolânico e por ter reduzido a quantidade de cimento Portland da mistura. O efeito pozolânico reduz a quantidade de CH na mistura, ocasionando uma diminuição da reserva alcalina, o que contribui para uma maior carbonatação no concreto. A redução da alcalinidade, faz com que a camada passiva de óxido formada na superfície da armadura se desintegre, tornando-a propensa à corrosão. Comparando as duas misturas contendo o cimento LC³, percebe-se que apresentam semelhantes quanto a maior vulnerabilidade a carbonatação.

Khan, Nguyen e Castel (2017) afirmaram que a frente de carbonatação acelerada em concretos submetidos a exposição de CO₂ é crescente com o aumento da taxa de substituição do cimento Portland. Com 15% de substituição do cimento Portland pelo cimento LC³, os resultados da frente de carbonatação foram menores que o traço de referência. Para concretos com 30% de substituição, os resultados de resistência à compressão simples e carbonatação do concreto com cimento LC³ são próximos aos do concreto de referência. E para os concretos com substituição acima de 30%, os resultados foram maiores. Miranda (2018) avaliou o avanço da frente de carbonatação acelerada de concretos autoadensáveis (CAA) com substituição de 20% do cimento Portland por metacaulim e filler calcário (proporção 2:1). A autora obteve resultados semelhantes entre o traço com cimento LC³ e o traço de referência. Dessa maneira, é importante avaliar os teores a serem substituídos na mistura de referência, visto que uma menor porcentagem de substituição podem proporcionar bons resultados para o uso de cimento LC³.

Resultados semelhantes ao deste trabalho foram encontrados por Shah *et al.* (2018) quando utilizou uma concentração de 3% de dióxido de carbono, temperatura de 27°C e umidade relativa de 60% em amostras com cimento LC³, na mesma proporção de substituição. Dessa maneira é perceptível a menor resistência à carbonatação dos concretos com substituição do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares. No geral, estudos comprovam a maior suscetibilidade ao efeito da carbonatação dos concretos com utilização do cimento LC³, devido a alcalinidade dos poros dos elementos, na proporção 2:1 (DÍAZ *et al.*, 2017a; NGUYEN *et al.*, 2018; GETTU *et al.*, 2018).

Ao realizar a análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada nos concretos sobre o efeito das 3 idades de exposição ao CO₂, foi obtido os valores apresentados na Tabela 4.16. A interação entre tipo de traço e as idades de cura do ensaio obteve um Valor-p = 0,004670, indicando que essas variáveis apresentaram efeitos significativos.

Tabela 4.16 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a carbonatação acelerada nos concretos.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Resultado
TRAÇO	221,658	2	110,829	35,5522	0,008145	Significativo
TEMPO	1,681	3	0,841	13,7759	0,005719	Significativo
TRAÇO*TEMPO	1,015	4	0,254	4,1586	0,004670	Significativo
Erro	0,366	6	0,061			

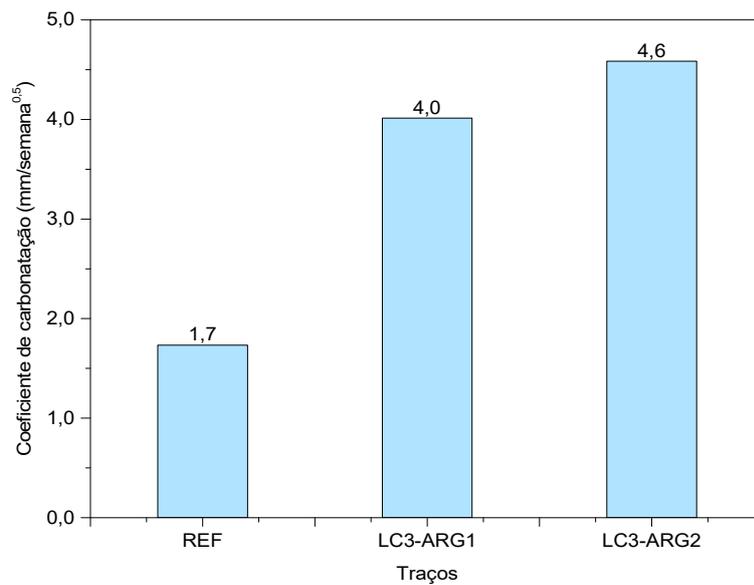
SQ = Soma dos quadrados; C = Número de categorias; MQ = Média dos quadrados; F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;

Fonte: Elaborado pela autora

Para uma melhor compreensão dos dados, realizou-se o teste de Duncan, em que os resultados indicaram dois grupos de médias estatisticamente semelhantes. Os grupos foram ordenados em sequência crescente, sendo o grupo 1 composto pelo traço de referência, e o grupo 2 pelos traços com cimento LC³.

Conforme a Equação 04, que relaciona a profundidade de carbonatação com o tempo de exposição, é possível obter o coeficiente de carbonatação (K) dos concretos. Com o coeficiente de carbonatação pode ser determinado o tempo necessário para atingir qualquer valor de profundidade de carbonatação, para a concentração de 3,0±0,5% de CO₂. Na Figura 4.26 é apresentado os resultados do coeficiente na idade de 70 dias de exposição.

Figura 4.26 - Resultados médios do coeficiente de carbonatação do concreto com e sem utilização do cimento LC³ (a/agl=0,5) em mm/semana^{0,5}



Fonte: Elaborado pela autora

Foi mencionado anteriormente a grande preocupação quando ocorre a carbonatação no concreto, devido a despassivação da armadura, que na presença de umidade pode desencadear um processo corrosivo. Observando a Figura 4.26, percebe-se que os coeficientes de carbonatação das misturas com cimento LC³ são maiores, ficando evidente que para efeitos de carbonatação, a substituição de 45% do cimento Portland, não é recomendada. Ressalta-se que a concentração de CO₂ no meio ambiente é em torno de 0,04%, cerca de 75 vezes menor que a utilizada neste cálculo.

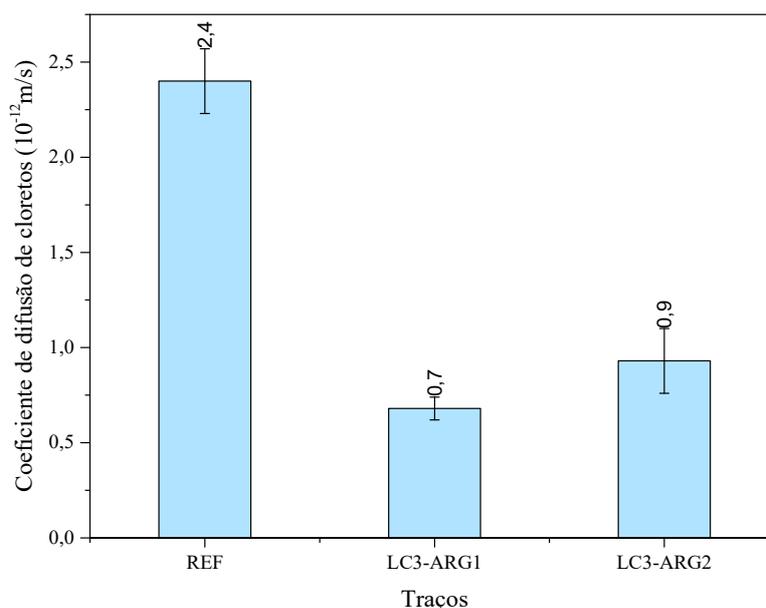
Miranda (2018) apresentou o mesmo cálculo do coeficiente de carbonatação no seu estudo, seguindo os mesmos parâmetros, para CAA com substituição de 20% do cimento Portland pelo metacaulim (20%) e filer calcário (5%). Os resultados dos coeficientes de carbonatação obtidos com essa substituição foram semelhantes a amostra de referência, em torno de 1,0%, fazendo com que a autora indicasse o traço como uma boa alternativa. No entanto, como foi utilizado outras porcentagens de substituição, isso pode ter influenciado para a piora nos resultados de frente de carbonatação, e, conseqüentemente, coeficiente de carbonatação.

4.3.2.7 Migração de cloretos no estado não estacionário

O ensaio de migração de cloretos foi realizado no intuito de obter o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, visto que, este dado é bastante representativo para o mecanismo de transporte de cloretos no concreto. Na Figura 4.27 é apresentado um gráfico

com os valores médios de coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário, usando a segunda lei de Fick da difusão, para os traços com 112 dias de cura úmida. Percebe-se que o traço de referência possui um coeficiente de difusão de cloretos maior, seguido pelo LC3-ARG2 com diminuição de 62,5% e, por último o traço LC3-ARG1 com diminuição de 70,83% com relação à referência. É interessante destacar que quanto menor o coeficiente, melhor é o desempenho do concreto quanto a este parâmetro.

Figura 4.27 - Resultados médios do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário dos traços aos 112 dias de cura



Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.27, é perceptível que há uma tendência de diminuição no coeficiente de difusão de cloretos, à medida que utiliza a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares, devido a formação do sal de Friedel. Outro ponto, é que o traço LC3-ARG1 possui menor coeficiente de difusão de cloretos comparado ao LC3-ARG2. Isso pode ser relacionada à variabilidade do material e ao índice de vazios do concreto obtido no ensaio de absorção de água.

Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) *apud* Gjorv (2014) citam limites que podem classificar o concreto em relação ao coeficiente de difusão de cloretos. Na Tabela 4.17 pode ser observado a classificação dos concretos desta dissertação. Todos os concretos enquadraram-se na faixa de resistência à penetração de cloretos extremamente alta, indicando uma boa qualidade, mesmo para os concretos com substituição de 50% do cimento Portland.

Tabela 4.17 - Classificação dos concretos quanto a resistência à penetração de cloretos, conforme a literatura de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) *apud* Gjorv (2014)

Difusão de cloretos (D28 x 10-12 m ² /s)	Resistência à penetração de cloretos	Classificação dos concretos desta pesquisa
> 15	Baixa	-
10 - 15	Moderada	-
5 - 10	Alta	-
2,5 - 5	Muito alta	REF*
< 2,5	Extremamente alta	LC3-ARG1 e LC3-ARG2

* Levando em consideração o desvio padrão, o traço nomeado por REF enquadra-se no grupo inferior aos demais

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos nesta pesquisa são compatíveis com os resultados da literatura (MARAGHECHI *et al.*, 2018; GETTU *et al.*, 2018; BORADE; KONDRAIVENDHAN, 2019) em que as misturas contendo cimento LC³ tiveram um aumento na resistência à penetração de cloreto em comparação com o cimento Portland comum. Sendo comprovado que o coeficiente de difusão diminui com o menor raio crítico de entrada dos poros.

Maraghechi *et al.* (2018) afirmaram que há uma melhora no resultado conforme o aumento no grau de caulinita da argila utilizada. As argilas com cerca de 40% ou mais de caulinita reduziram os valores de difusividade de cloretos em ordem de 1-2 de magnitude, devido a menor quantidade de impurezas, como quartzo, óxidos de ferro e titânio, calcita e outros tipos.

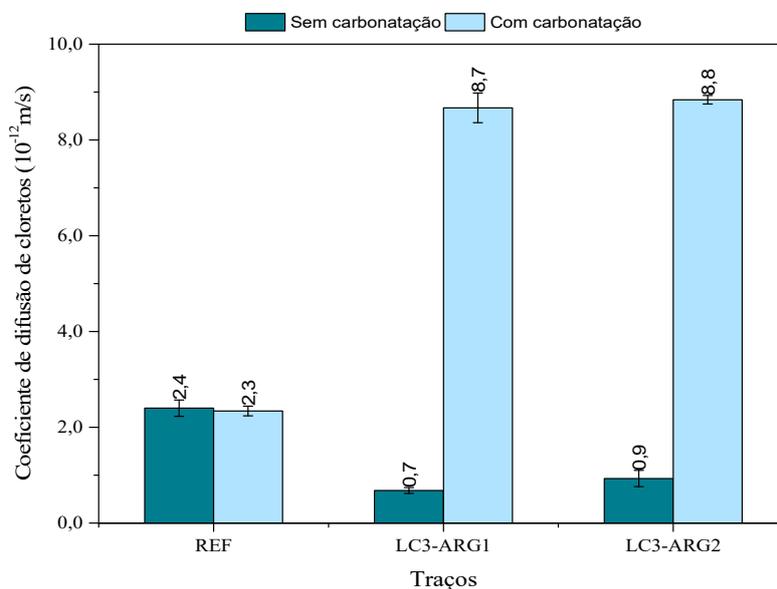
A análise de variância (ANOVA) e teste de Duncan confirmaram a diferença entre os traços com Valor-p de 0,044939 e dois grupos distintos, sendo o grupo 1 formado pelos traços que contém o cimento LC³, e o grupo 2 pelo traço de referência.

4.3.2.8 Efeito combinado da carbonatação acelerada e migração de cloretos

Nos itens anteriores, foram discutidos os efeitos isolados da carbonatação acelerada e ação dos íons cloreto. No entanto, o que ocorre na prática é a ação combinada desses dois agentes externos. Para isso, a Figura 4.28 apresenta as médias dos resultados do coeficiente de difusão de cloretos sob ação combinada de carbonatação e migração de cloretos aos 112 dias de idade. Os resultados do coeficiente de migração foram apresentados novamente para permitir a comparação e auxiliar no entendimento do comportamento. Vale ressaltar que os concretos não carbonatados foram submetidos ao ensaio de migração de cloretos aos 112 dias, permanecendo até esse tempo em cura úmida. Enquanto que os concretos carbonatados,

foram curados por 28 dias, e então submetidos ao período de pré-condicionamento, carbonatação e a migração de cloretos aos 112 dias.

Figura 4.28 - Resultados médios do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário dos traços sob ação do efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos aos 112 dias de cura



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da Figura 4.28 verifica-se que os concretos com cimento LC³ carbonatados, apresentam coeficientes de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário maiores que os concretos não carbonatados, indicando que a carbonatação tem grande influência neste resultado. Os resultados dos concretos com utilização do cimento LC³ apresentam um aumento de aproximadamente 278,3% e 282,6%, para os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2, respectivamente, em comparação com a mistura de referência.

Como mencionado anteriormente, o concreto tem a capacidade de combinar cloretos com os aluminatos presentes no cimento e nas adições, formando um composto estável e não agressivo ao concreto, denominado Sal de Friedel (cloroaluminato de cálcio hidratado). A quantidade de Sal de Friedel em cimento LC³ é maior que nos concretos de referência, sendo explicado devido a maior quantidade de fases de carboaluminato nesses sistemas. Quando o mecanismo de difusão de CO₂ é iniciado em direção ao interior do concreto, tem-se uma redução do pH, resultado da carbonatação, que desestabiliza os cloretos combinados, fazendo com que estes se descombinem com os aluminatos. Como resultado este fenômeno disponibiliza mais cloretos livres para a solução porosa dos concretos, potencializando o processo de migração para o interior da estrutura.

Além do fenômeno químico, pela desestabilização das ligações cloretos da formação do sal de Friedel, tem-se uma densificação da microestrutura do concreto, capaz de reduzir a taxa de penetração de cloretos, devido a precipitação da calcita (WANG *et al.*, 2017; YE *et al.*, 2016). Esse aumento no teor de cloretos livres aumentam o gradiente de concentração nos poros, favorecendo ao ingresso desses íons na matriz cimentícia (YE *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2016b), atingindo o limite crítico de cloreto das armaduras (ROVENTI; BELLEZE; CONTI, 2014; BACKUS; MCPOLIN, 2016).

Conforme apresentado anteriormente, Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) *apud* Gjorv (2014) propôs limites que podem classificar o concreto em relação ao coeficiente de difusão de cloretos. A classificação dos concretos sob o efeito combinado da carbonatação e migração de cloretos é apresentada na Tabela 4.18. O concreto sem substituição enquadrou-se na faixa de resistência à penetração de cloretos extremamente alta, enquanto que os concretos com substituições apresentaram na faixa de resistência à penetração de cloretos alta.

Tabela 4.18 - Classificação dos concretos quanto a resistência à penetração de cloretos, conforme a literatura de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998) *apud* Gjorv (2014)

Difusão de cloretos (D28 x 10-12 m ² /s)	Resistência à penetração de cloretos	Classificação dos concretos desta pesquisa
> 15	Baixa	-
10 - 15	Moderada	-
5 - 10	Alta	LC3-ARG1 e LC3-ARG2
2,5 - 5	Muito alta	-
< 2,5	Extremamente alta	REF

Fonte: Elaborado pela autora

A análise de variância (ANOVA) do ensaio experimental do efeito combinado da carbonatação acelerada e migração de cloretos apontou um Valor-p equivalente a 0,000002, o que indica que o tipo de traço foi significativo para os resultados médios obtidos. Após realizar o teste de Duncan, verificou que os concretos com cimento LC³ (LC3-ARG1 e LC3-ARG2) não diferem estatisticamente entre si, estando em um mesmo grupo, com coeficiente menor. Já o grupo com o maior resultado foi composto pelo concreto de referência (REF).

4.3.3 Comportamento do cimento LC³: Resumo dos principais resultados

Neste item serão apresentados os principais resultados obtidos nas pastas cimentícias e concretos, após o desenvolvimento do programa experimental dessa pesquisa.

- Na análise do tempo de pega das pastas cimentícias com o cimento LC³, o ajuste do teor de gesso controlou a diminuição do tempo de início e fim de pega.
- Na avaliação do comportamento da resistência à compressão e índice de desempenho nas pastas cimentícias, nota-se um aumento nos resultados das idades avançadas, nos traços com cimento LC³. Aos 3, 7 e 28 dias, as pastas com cimento LC³ tiveram uma menor tendência de crescimento na resistência à compressão, em comparação com a referência. Já aos 91 dias de idade, as pastas com cimento LC³ alcançaram e ultrapassaram a resistência observada no traço de referência. Para os 112 dias, os traços com cimento LC³ (ARG1 e ARG2) promoveram um ganho considerável na resistência, respectivamente.
- Em relação aos difratogramas apresentados das pastas cimentícias com cimento LC³, observa-se picos que indicam reações pozolânicas e reações sinérgicas entre os MCS, na proporção de substituição de 2:1 (argila calcinada:filler calcário). O aparecimento dos picos de carboaluminatos convergem com os resultados de resistência para os traços com LC³, que são maiores ao longo das idades. Também foi verificado, sutilmente, a presença de halo amorfo nas amostras com cimento LC³.
- Avaliando o comportamento no estado fresco, em relação ao ensaio de consistência do concreto, pode-se concluir que houve a necessidade de maior quantidade de aditivo superplastificante para obter o mesmo espalhamento especificado. Quanto a massa específica dos concretos, os resultados de todos os traços foram semelhantes, indicando que não houve diferença significativa com a inserção do cimento LC³.
- Se tratando do comportamento dos concretos em relação às propriedades mecânicas como resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade, constatou-se que a utilização dos traços com cimento LC³ apresentaram vantagens em relação ao traço de referência. O maior desempenho pode ser explicado devido ao efeito pozolânico e sinérgico, que reduz a porosidade da matriz e melhora a zona de transição de concretos com cimento LC³.
- Quanto a resistência à compressão dos traços com cimento LC³, este efeito foi mais expressivo nos corpos de prova de concreto, do que nas pastas cimentícias, provavelmente devido a zona de transição interfacial, que existe entre o agregado e a matriz de cimento. Até os 28 dias de cura das pastas cimentícias, a resistência à compressão simples foi semelhante para todos os traços, a partir dessa idade, os traços com cimento LC³ apresentaram resultados superiores que a referência. Já para

o concreto, o aumento nos resultados médios de resistência à compressão foi identificado a partir dos 7 dias de cura.

- Na análise dos parâmetros de durabilidade dos concretos com utilização do cimento LC³, foi constatada uma redução na absorção de água por imersão, índice de vazios e coeficiente de migração de cloretos, comparando com a referência. Observou também um aumento na resistividade elétrica volumétrica e superficial, frente de carbonatação acelerada e coeficiente de migração de cloretos sob efeito combinado.
- Os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios do concreto com cimento LC³ foram menores que o concreto de referência, em aproximadamente 16%. Estes resultados são justificados devido a reação sinérgica entre a argila calcinada e filer calcário (presença dos carboaluminatos).
- Observa-se que a utilização do cimento LC³ melhorou os resultados de resistividade elétrica. Os traços LC3-ARG1 e LC3-ARG2 obtiveram resultados superiores de resistividade volumétrica e superficial, em comparação com a referência, enquadrando-se em moderado/baixo risco de corrosão. Este comportamento pode ser explicado devido a densificação da matriz cimentícia dos traços que contém argila calcinada e filer calcário.
- Avaliando o comportamento dos concretos com mistura ternária no ensaio de carbonatação acelerada, percebe-se uma maior vulnerabilidade para o ingresso desse agente deletério. A utilização do cimento LC³, na proporção 2:1 (argila calcinada e filer cálcio) apresentou um maior avanço da profundidade da frente de carbonatação, ao longo das idades de exposição. Este comportamento pode ser explicado devido a diminuição da reserva alcalina da mistura, o que facilita o avanço de frente de carbonatação. Ressalta-se que os demais trabalhos que utilizaram outras proporções, obtiveram valores diferentes, dificultando a comparação entre resultados.
- Observou-se no ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário que ao utilizar o cimento LC³ na fabricação do concreto, houve uma diminuição no coeficiente de difusão de cloretos. Este comportamento está interligado ao refinamento da porosidade, produtos de hidratação e presença do sal de Friedel. Dessa maneira, pode-se dizer que esses resultados indicaram que os traços com cimento LC³ é mais resistente à penetração desses agentes deletérios.
- O coeficiente de difusão de cloretos quando submetido ao efeito da carbonatação acelerada (efeito combinado), aproximadamente dobrou o valor, em comparação

com concretos não carbonatados. Podendo ser explicado devido à redução do pH do concreto com a carbonatação, que desestabiliza os cloretos combinados, aumentando a quantidade de cloretos livres para a solução porosa dos concretos, que eleva o processo de difusão para o interior da estrutura. Comparando estes resultados com o ensaio de migração de cloretos, percebe-se que a carbonatação tem grande influência nos concretos com cimento LC³.

- De um modo geral, ficou evidente o alto teor de substituição do clínquer por argila calcinada e filer calcário. Em termos de propriedades mecânicas e algumas propriedades de durabilidade, o desempenho dos traços com cimento LC³ pode ser uma alternativa viável. No entanto, sabendo da importância da durabilidade, recomenda-se a aplicação em menores teores de substituição de argila calcinada e filer calcário, mesmo que não haja um ganho significativo nas propriedades mecânicas.

Nas Tabelas 4.19 e 4.20 são apresentados resumo dos resultados encontrados para as pastas cimentícias e concreto com e sem cimento LC³ do programa experimental desta pesquisa, respectivamente.

Tabela 4.19 - Resumo dos resultados obtidos para as pastas cimentícias com e sem cimento LC³ (a/agl=0,5).

Ensaio	Traços		
	PREF	PLC3-ARG1	PLC3-ARG2
Teor de superplastificante (%)	0,09	0,75	1,05
Consistência (mm)	95,0	92,0	97,0
Tempo de início de pega (min)	180	252	250
Tempo fim de pega (min)	235	356	360
Resistência a compressão simples (MPa)	3 dias	30,1	23,2
	7 dias	32,2	28,8
	28 dias	34,6	32,1
	91 dias	35,7	37,8
	112 dias	37,8	46,7
Índice de desempenho (%)	3 dias	100,0	76,9
	7 dias	100,0	89,7
	28 dias	100,0	92,7
	91 dias	100,0	106,6
	112 dias	100,0	123,4
Principais picos encontrados nos difratogramas de raios-X	Et, Mc, P, A, B, Cc e V.	Et, Hc, Mc, Q, P, A, B, Cc e V.	Et, Hc, Mc, Q, P, A, B, Cc e V.

Et-etringita, Hc-hemicarboaluminato, Mc-monocarboaluminato, P-portlandita, Q-quartzo, A-alita, B-belita, Cc-calcita e V-vaterita.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 4.20 - Resumo dos resultados obtidos para os concretos com e sem cimento LC³ (a/agl=0,5).

Ensaio	Traços			
	REF	LC3-ARG1	LC3-ARG2	
Teor de superplastificante (%)	0,40	1,48	1,42	
Consistência (mm)	127,5	127,5	125,0	
Massa específica (kg/m ³)	2287,7	2249,1	2300,0	
Resistência a compressão simples (MPa)	3 dias	33,7	24,3	26,1
	7 dias	38,1	36,6	37,3
	28 dias	42,5	46,9	47,4
	91 dias	45,5	59,3	51,1
	112 dias	47,0	61,2	51,5
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	28 dias	3,4	4,3	4,6
Módulo de elasticidade (GPa)	28 dias	37,7	38,3	36,1
	91 dias	37,1	38,8	37,8
	112 dias	37,5	38,8	38,1
Massa específica real (g/cm ³)	112 dias	2,3	2,3	2,3
Absorção de água por imersão (%)	112 dias	4,0	3,3	3,4
Índice de vazios (%)	112 dias	9,4	7,7	7,9
Resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm)	112 dias	6,7	24,0	23,7
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	112 dias	12,1	86,3	86,1
Profundidade de carbonatação (mm)	56 dias*	5,1	11,2	12,8
	63 dias*	5,2	12,4	13,0
	70 dias*	5,3	12,5	13,6
Coefficiente de carbonatação acelerada (mm/semana ^{0,5})	70 dias*	1,7	4,0	4,6
Coefficiente de migração de cloretos (10 ⁻¹² m ² /s)	112 dias	2,4	0,7	0,9
Coefficiente de migração de cloretos com carbonatação (10 ⁻¹² m ² /s)	112 dias	2,3	8,7	8,8

* Tempo de exposição na câmara de carbonatação.

Fonte: Elaborado pela autora

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas à pesquisa desenvolvida, a qual teve um foco na avaliação do efeito da utilização do cimento LC³ em pastas cimentícias e concretos, visando compreender a influência desses materiais nas propriedades mecânicas e de durabilidade. Foi realizado um programa experimental com três traços de pastas cimentícias e concreto convencional, com substituição de 45% de cimento Portland por 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário, nas misturas com cimento LC³. A premissa da pesquisa foi manter fixa a consistência e a relação água/aglomerante em todos os traços. A partir disso, foram tiradas as seguintes conclusões:

- A análise dos produtos de hidratação das pastas cimentícias com cimento LC³ indicou a presença dos carboaluminatos, decorrentes da reação sinérgica entre os aluminatos da argila calcinada, carbonatos do fíler calcário e hidróxido de cálcio.
- Foi observado que a utilização do cimento LC³ tendeu a aumentar a resistência à compressão simples das pastas cimentícias e concretos. Nos resultados de resistência à tração por compressão diametral também foi constatado um aumento nos valores obtidos para as misturas com LC³. Já para o módulo estático de elasticidade à compressão, os resultados entre todos os traços foram semelhantes. As propriedades mecânicas estão intimamente ligadas a formação do C-A-S-H e carboaluminatos, característicos do efeito sinérgico dos MCS.
- Os traços com cimento LC³ proporcionaram melhorias nos resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios, resistividade elétrica volumétrica e superficial e migração de cloretos no estado não estacionário sem carbonatação. Este comportamento provavelmente ocorre devido a reação pozolânica, que diminui a porosidade e interconexão entre os poros.
- Observou-se também uma maior vulnerabilidade dos concretos com cimento LC³ quanto ao avanço da frente de carbonatação, apresentando um desempenho inferior ao concreto de referência. Esse comportamento foi associado ao consumo de hidróxido de cálcio, produto de hidratação que garante a alcalinidade do concreto, que é consumido pela reação pozolânica. Ressalta-se que esse comportamento corresponde a uma substituição de 45% de cimento Portland por 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário.
- A combinação da argila calcinada com o fíler calcário alcançou uma excelente resistência ao transporte de íons cloreto, especificamente na mistura que apresentava

um maior conteúdo de caulinita (LC3-ARG1). Essa melhoria pode ser atribuída, principalmente, ao refinamento dos poros desse material, permitindo um menor coeficiente de difusão/migração de cloretos.

- No ensaio combinado de carbonatação e migração de cloretos observa-se que os concretos com utilização do cimento LC³ possuem uma menor resistência quanto ao ingresso desses agentes deletérios. Esse comportamento pode ser explicado pela redução do pH dos concretos após a carbonatação e desestabilização dos cloretos, elevando o coeficiente de difusão de cloretos.

Diante do exposto, percebe-se que a substituição de 45% do cimento Portland pelo cimento LC³ não acarreta perda na resistência à compressão, resistividade elétrica, absorção de água/índice de vazios e coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário. Pelo contrário, promove até um incremento nessas propriedades, sendo justificado pelo refinamento dos poros com a utilização de materiais cimentícios suplementares. No entanto, possuem maiores frentes de penetração de carbonatação acelerada e maior coeficiente de migração de cloretos quando exposto ao ataque combinado da carbonatação e migração. Pensando na melhoria dos resultados quanto a estes parâmetros, deve ser reduzido o teor de substituição de argila calcinada e fíler calcário.

De maneira geral, os traços com cimento LC³ podem ser uma alternativa viável em termos de propriedades mecânicas, para a redução dos impactos ambientais do cimento Portland. Por outro lado, em regiões litorâneas e industriais, o processo de carbonatação e penetração de cloretos ocorrem de maneira simultânea mais expressiva, sendo verificado que a combinação desses ensaios mostram um efeito mais severo nos concretos com este tipo de cimento, diminuindo a vida útil. Dessa forma, fica evidente que para efeitos de durabilidade, o teor de 45% de substituição ao cimento Portland, não é a melhor proporção.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar concretos com cimento LC³ em outros teores de substituições e proporções de argila calcinada e filer calcário, pensando em melhorar a durabilidade.
- Estudar a durabilidade de concretos com cimento LC³ utilizando outras relações água/aglomerante (a/agl), consideradas como baixas e altas;
- Avaliar a possibilidade de realização da análise quantitativa das fases minerais, através da difração de raios-X das pastas cimentícias com cimento LC³, pela técnica de Rietveld;
- Investigar a microestrutura das misturas com cimento LC³, realizando o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia por varredura eletrônica para conhecer as dimensões e distribuições dos poros na matriz cimentícia;
- Determinar a reserva alcalina e o potencial hidrogeniônico (pH) de concretos com cimento LC³ carbonatados e não carbonatados;
- Determinar o teor de cloretos livres após o ensaio de migração em concretos com cimento LC³ carbonatados e não carbonatados;
- Analisar a microestrutura dos concretos após ação combinada de carbonatação acelerada e migração de cloretos, a fim de identificar a formação de Sal de Friedel e a porosidade do concreto;
- Estudar as características mecânicas e de durabilidade com cimento LC³ em idades mais avançadas, certificando do ritmo de evolução dessas propriedades.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Vol 5. São Paulo: Blucher, 2011. 137 p.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho: Tradução Geraldo G. Serra**. São Paulo: Pini, 2000. 667 p.

ALEMÁN, E. V.; DÍAZ, Y.; MARTIRENA-HERNANDEZ, J. F. Studies Carried Out on Concretes Produced with LC3 According to Cuban Standard NC 120: 2014. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 339-347, 22 jun. 2019. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_38.

ALEMÁN, E. V.; RODRIGUEZ, V. R.; MARTIRENA-HERNANDEZ, J. F. Concrete Manufactured with LC3 Following the Cuban Standard NC 120: 2014. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 217-225, 22 jun. 2019. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_25.

ALVAREZ, G. L.; NAZARI, A.; BAGHERI, A.; SANJAYAN, J. G.; LANGE, C. Microstructure, electrical and mechanical properties of steel fibres reinforced cement mortars with partial metakaolin and limestone addition. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 135, p. 8-20, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.170>.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **TP119-2015**: Electrical Resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI. **Committee 222**: Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C-1069:2014** - Standard Test Method for Specific Surface Area of Alumina or Quartz by Nitrogen Adsorption, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C-1202:2012** -

Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C-1556:2011** - Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **G-57**: Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, 2012.

ANJOS, M. A. S.; CAMÕES, A.; JESUS, C. M. G. CAMPOS, P. Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - CONPAT. Lisboa, Portugal, 2015.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. 2013. 223 f. Thèse (Doctoral) - Docteur ès Sciences, Programme Doctoral en Science et Génie des Matériaux, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2013.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 42, n. 12, p. 1579-1589, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL (ABESC). **Manual do Concreto Dosado em Central**. São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland: BT-106**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2008.

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

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

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 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

AVET, F.; BOEHM-COURJAULT, E.; SCRIVENER, K. Investigation of C-A-S-H composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 115, p. 70-79, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.011>.

- AVET, F.; LI, X.; SCRIVENER, K. Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 106, p. 40-48, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.009>.
- AVET, F.; SCRIVENER, K. Hydration Study of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Using Various Grades of Calcined Kaolinitic Clays. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 35-40, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_6.
- AVET, F.; SCRIVENER, K. Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3). **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 131, p. 1-5, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106031>.
- AVET, F.; SNELLINGS, R.; DIAZ, A. A.; HAHA, M. B.; SCRIVENER, K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 85, p. 1-11, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>.
- AVET, F.; SOFIA, L.; SCRIVENER, K. Concrete Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Compared with Conventional Cements. **Advances In Civil Engineering Materials**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 20190052, 1 mar. 2019. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/acem20190052>.
- BACKUS, J.; MCPOLIN, D. Effect of Cyclic Carbonation on Chloride Ingression in GGBS Concrete. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 7, p. 04016037, jul. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001529](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001529).
- BACKUS, J.; MCPOLIN, D.; HOLMES, N. Monitoring the interaction of combined mechanisms in the deterioration of concrete. In: Cement and Concrete Science Conference Paper, 32, 2012, Belfast. **Anais [...]**. PRE38, 2012.
- BALESTRA, C. E. T.; LIMA, M. G.; MENDES, A. Z.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Effect of corrosion degree on mechanical properties of reinforcements buried for 60 years. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. 474-498, maio 2018. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000300003>.
- BARBALHO, E. A. **Estudo da Proporção de Argila Calcinaada e Filer Calcário no Cimento LC³ para Diferentes Teores de Substituição**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado)

- Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P.; TSIVILIS, S.; BADOGIANNIS, E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 27, n. 1, p. 125-130, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.041>.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. **Journal Of The American Ceramic Society**, [s.l.], v. 97, n. 12, p. 3764-3773, 18 ago. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jace.13177>.

BERRIEL, S. S.; FAVIER, A.; DOMÍNGUEZ, E. R.; MACHADO, I. R. Sánchez; HEIERLI, U.; SCRIVENER, K.; HERNÁNDEZ, F. M.; HABERT, G. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 124, p. 361-369, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>.

BISHNOI, S.; MAITY, S.; MALLIK, A.; JOSEPH, S.; KRISHNAN, S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the indian experience. **Indian Concrete Journal**, [s.l.], v. 88, n. 7, p. 22-28, jul. 2014.

BOLINA, C. C. **Inibidores de Corrosão**: Avaliação do desempenho frente a corrosão do aço induzida por carbonatação e cloretos. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiânia, 2008.

BONAVETTI, V.; DONZA, H.; MENÉNDEZ, G.; CABRERA, O.; IRASSAR, E.F. Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 865-871, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01087-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01087-6).

BONAVETTI, V.; RAHHAL, V. F.; IRASSAR, E. F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 6, p. 853-859, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00491-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00491-4).

BORADE, A. N.; KONDRAIVENDHAN, B. Corrosion behavior of reinforced concrete blended with metakaolin and slag in chloride environment. **Journal of Sustainable Cement**, p. 1-20, 2019.

BOROSNYÓI, A. Long term durability performance and mechanical properties of high performance concretes with combined use of supplementary cementing materials. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 112, p. 307-324, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.224>.

BROUWERS, H. J. H. Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. **Physical Review e**, [s.l.], v. 74, n. 3, p. 1-14, 26 set. 2006. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.74.031309>.

CAMACHO, G.; MALHEIRO, R.; CAMÕES, A.; MEIRA, G. Ação Combinada da Carbonatação e dos Iões Cloreto em Betões com Cinzas Volantes. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. 02, 2014, [s. l.]. **Anais [...]**, 2014.

CARMO, J. B. M. **Análise Comparativa do Desempenho de Concretos Compostos com Sílica Ativa e Metacaulim Face à Resistência Mecânica e à Viabilidade Econômica**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1999. 237 p.

CASSAGNABÈRE, F.; DIEDERICH, P.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G.; LACHEMI, M. Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 37, p. 95-107, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.001>.

CEB. **Durability of concrete structures**. Report of CEBRILEM International Workshop. Copenhagen, May 1983. CEB Bulletin D' Information n. 152, 1984.

DADSETAN, S.; BAI, J.. Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 146, p. 658-667, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158>.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, cap.12, vol 1, p.345–379, 2005.

DAMIDOT, D.; LOTHENBACH, B.; HERFORT, D.; GLASSER, F. P. Thermodynamics and cement science. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 7, p. 679-695, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.018>.

DELAGRAVE, A.; PIGEON, M.; MARCHAND, J.; REVERTÉGAT, É. Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (Part II). **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 26, n. 5, p. 749-760, maio 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(96\)85012-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(96)85012-5).

DHANDAPANI, Y.; SAKTHIVEL, T.; SANTHANAM, M.; GETTU, R.; PILLAI, R. G. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 107, p. 136-151, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>.

DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 84, p. 36-47, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012>.

DHANDAPANI, Y.; VIGNESH, K.; RAJA, T.; SANTHANAM, M. Development of the Microstructure in LC3 Systems and Its Effect on Concrete Properties. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 131-140, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_21.

DÍAZ, E.; GONZÁLEZ, R.; ROCHA, D.; ALUJAS, A.; MARTIRENA, F. Carbonation of Concrete with Low Carbon Cement LC3 Exposed to Different Environmental Conditions. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 141-146, 28 out. 2017b. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_22.

DÍAZ, Y. C.; BERRIEL, S. S.; HEIERLI, U.; FAVIER, A. R.; MACHADO, I. R. S.; SCRIVENER, K. L.; HERNÁNDEZ, J. F. M.; HABERT, G. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, [s.l.], v. 2, p. 82-91, 2017a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001>.

EMMANUEL, A. C.; HALDAR, P.; MAITY, S.; BISHNOI, S. Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience. **The Indian Concrete Journal**, [S.L.], v. 90, n. 00, p. 00-00, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 197-1: 2011**. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, Bélgica, 2011.

FARIAS, E. C. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO₂ e Cl⁻ em concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FAVIER, A.; ZUNINO, F.; KATRANTZIS, I.; SCRIVENER, K. The Effect of Limestone on the Performance of Ternary Blended Cement LC³: limestone, calcined clays and cement. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 170-175, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_27.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, filer calcário e adição de cal hidratada**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GALAN, I.; GLASSER, F. P. Chloride in cement. **Advances In Cement Research**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 63-97, fev. 2015. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.13.00067>.

GARG, N.; SKIBSTED, J. Thermal Activation of a Pure Montmorillonite Clay and Its Reactivity in Cementitious Systems. **The Journal Of Physical Chemistry C**, [s.l.], v. 118, n. 21, p. 11464-11477, 15 maio 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jp502529d>.

GETTU, R.; PILLAI, R. G.; SANTHANAM, M.; BASAVARAJ, A. S.; RATHNARAJAN, S.; DHANYA, B. S. Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 51, n. 6, p. 1-16, dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-018-1291-z>.

GJORV, O. E. Probability of steel corrosion. In: *Durability Design of concrete structures in Severe Environments*. London and New York. Published by Taylor & Francis, Second Edition, chapter 8, 2014, p. 114.

GRUYAERT, E.; HEEDE, P. V. D.; BELIE, N. Carbonation of slag concrete: effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient effect of carbonation on the pore structure. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 39-48, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>.

GUTIÉRREZ, R. M.; TORRES, J. A.; GUERRERO, C. E. Análisis del proceso térmico de producción de una puzolana. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 54, n. 274, p. 65-72, 30 jun. 2004. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i274.233>.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI. SENAI., 1992.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13823-08**: General principles on the design of structures for durability. Geneva, Switzerland, 2008.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12**: Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland, 2015.

ISAIA, G. C. Carbonatação do concreto: Uma revisão. 41 p. Santa Maria, 1999.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 78, p. 71-80, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 12, p. 1232-1243, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.

JUNG, S.; CHOI, Y.; LEE, B. Influence of Carbonation on the Chloride Diffusion in Concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 07, 2007, Seoul. **Anais [...]**. Korea: Sb07, 2007. p. 1191-1196.

KAKALI, G; TSIVILIS, S; AGGELI, E; BATI, M. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 7, p. 1073-1077, 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00292-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00292-1).

KANCHANASON, V.; PLANK, J. Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of slag and calcined clay blended cements. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 119, p. 44-50, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.007>.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KHAN, M. S. H.; NGUYEN, Q. D.; CASTEL, A. Carbonation of Limestone Calcined Clay Cement Concrete. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 238-243, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_38.

KHATIB, J. M; CLAY, R. M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 34, n. 1, p. 19-29, jan. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00188-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00188-1).

KRISHNAN, S.; BISHNOI, S. Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 108, p. 116-128, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.010>.

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A. C.; SHAH, V.; PARASHAR, A.; MISHRA, G.; MAITY, S.; BISHNOI, S. Industrial production of limestone calcined clay cement: experience and insights. **Green Materials**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 15-27, mar. 2019. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/jgrma.18.00003>.

KRISHNAN, S.; KANAUIA, S. K.; MITHIA, S.; BISHNOI, S. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 164, p. 265-274, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240>.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 1189-1195, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.005>.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. Belo horizonte, 2008.

LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 32, n. 11, p. 1699-1704, nov. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00861-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00861-x).

LAVANYA, J.; RAO, R. V. Mechanical and Durability Properties of Limestone Calcined Clay Cement (Lc3). **International Journal of Recent Technology and Engineering**, Vijayawada, v. 7, n. 6, p. 359-365, abr. 2019.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIN, R.; WANG, X.; LEE, H.; CHO, H. Hydration and Microstructure of Cement Pastes with Calcined Hwangtoh Clay. **Materials**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 458, 1 fev. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12030458>.

LI, D.; WEI, R.; LI, L.; GUAN, X.; MI, X. Pitting corrosion of reinforcing steel bars in chloride contaminated concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 199, p. 359-368, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.003>.

LI, X.; BERTOS, M. F.; HILLS, C. D.; CAREY, P. J.; SIMON, S. Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 9, p. 1200-1206, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.06.011>.

LINS, D. N. **Análise da Resistência à Compressão do Cimento LC³ e a Influência das Adições Minerais em seu Desempenho**. 2017. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LINS, D.; RÊGO, J.; SILVA, E. Analysis of the Mixing Performance Containing the LC3 as Agglomerant with Different Types of Calcined Clay. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 279-285, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_45.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; WANG, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y. Degradação do concreto de cinzas volantes sob o efeito de carbonatação e entrada de aerossóis de cloretos. **Corrosion Science**, 112, 364-372, 2016a.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; WANG, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 112, p. 364-372, nov. 2016b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.004>.

LOSER, R.; LOTHENBACH, B.; LEEMANN, A.; TUCHSCHMID, M. Chloride resistance of concrete and its binding capacity – Comparison between experimental results and thermodynamic modeling. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 34-42, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.001>.

LOTHENBACH, B.; SAOUT, G. L.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 38, n. 6, p. 848-860, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1244-1256, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

LÜBECK, A.; GASTALDINI, A.L.G.; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 392-399, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>.

LUPING, T.; NILSSON, L. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 247-253, mar. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90089-r](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(93)90089-r).

MAGALHÃES, T. A. **Análise da Penetração de Íons Cloreto em Compósitos Cimentícios Contendo Diferentes Teores de Escória de Alto-Forno**. 2019. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MAITY, S.; BISHNOI, S.; KUMAR, A. Field Application of Limestone-Calcined Clay Cement in India. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 435-441, 2015. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_54.

MARAGHECHI, H.; AVET, F.; WONG, H.; KAMYAB, H.; SCRIVENER, K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to

chloride transport. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 51, n. 5, p. 1-17, 20 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-018-1255-3>.

MARANGU, J. M. Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay -Limestone cement (LC3). **Case Studies In Construction Materials**, [s.l.], v. 12, p. 1-13, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00333>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARIANO, A. M.; SANTOS, M. R. **Revisão da literatura**: Apresentação de uma abordagem integradora. AEDem International Conference. Reggio di Calabria, Itália. 2017.

MARTHO, A. C. R. **Cimento Portland composto tipo Z**: estudo comparativo de argilas calcinadas como material cimentício suplementar (MCS). 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia das Edificações, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016.

MEDEPALLI, S.; SHAH, V.; BISHNOI, S. **Production of lab scale limestone calcined clay cements using low grade limestone**. In: International Conference On Sustainable Built Environment, VII, 2017, Índia. **Anais...** New Delhi: ICSBE, 2017.

MEDJIGBODO, G.; ROZIÈRE, E.; CHARRIER, K.; IZORET, L.; LOUKILI, A. Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 183, p. 114-126, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.138>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 4. ed. (inglês) / 2.ed. (Português). Berkeley: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade da Califórnia, 2014.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: Fundamentos, diagnóstico e prevenção. 127 p. IFPB: João Pessoa, 2017.

MENÉNDEZ, G; BONAVETTI, V; IRASSAR, E. F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 61-67, jan. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00056-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00056-7).

MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; KIMINAMI, R. H. G. A.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas de Cubati, Paraíba, Brasil: Caracterização física-mineralógica. **Cerâmica**, [s.l.], v. 55, p. 163-169, 2009.

MIRANDA, L. R. M. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais**. 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

MISHRA, G.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 52, n. 5, p. 1-13, 24 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-019-1390-5>.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da Capacidade de Proteção de Alguns Tipos de Cimentos Nacionais, em Relação à Corrosão de Armaduras sob a Ação Conjunta de CO₂ e Íons Cloretos**. 1996. 161 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. 2010. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MOREIRA, C. **Efeitos do teor de gipsita na microestrutura de pastas de cimento LC³**. 2020. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA e SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G; CARVALHO, J. R. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Ibracon - Instituto Brasileiro do Concreto, 2012.

NAIR, N.; HANEEFA, K. M.; SANTHANAM, M.; GETTU, R. A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 254, p. 119326, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119326>.

NARAYANAN, S. K.; MUNIASAMY, G. Strength Characteristics of High Performance Lime Calcined Clay Cement (Lc3) Concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, [s.l.], v. 9, n. 13, p. 1883-1889, dec. 2018.

NEGREDO, A. S. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NEVES, Í. B. F. **Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Harlow: Bookman, 2015. 912 p.

NGUYEN, Q. D.; AFROZ, S.; CASTEL, A. Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. **Journal Of Marine Science And Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 5, p. 301, 25 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse8050301>.

NGUYEN, Q. D.; KHAN, M. S. H.; CASTEL, A. Engineering Properties of Limestone Calcined Clay Concrete. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, [s.l.], v. 16, n. 8, p. 343-357, 17 ago. 2018. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.16.343>.

NICOLAS, R. S. **Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash**. 2011. 329 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Université de Toulouse, Toulouse, 2011.

NT BUILD. **492**: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 2011.

OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos**. 2007. 276 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

OLIVEIRA, F. T. **Influência do tipo de filer na resistência à compressão de cimento LC³**. 2018. 86 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 42, n. 4, p. 607-612, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.01.005>.

PÉRA, J.; HUSSON, S.; GUILHOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 99-105, abr. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(98\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(98)00020-1).

PEREZ, A.; FAVIER, A.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Influence of the Manufacturing Process on the Performance of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 283-289, 2015. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_35.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. 2013. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 44, p. 50-57, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.003>.

PESSÔA, P. O. A. **Avaliação da influência do consumo de cimento na corrosão de armaduras em estruturas de concreto carbonatadas**. 2002. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

PIERKES, R.; SCHULZE, S. E.; RICKERT, J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 366-371, 28 out. 2017. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_59.

POLISSENI, G. C. **Efeito de finos reciclados de concreto (FRC) de diferentes origens nas propriedades físico-químicas e mecânicas de matrizes cimentícias**. 2018. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em meio urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POURBAIX, M. (1974). **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**, p. 644.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análises**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RINALDI, R.; SACERDOTI, M.; PASSAGLIA, E. Strätlingite: crystal structure, chemistry, and a reexamination of its polytype vertumnite. **European Journal Of Mineralogy**, [s.l.], v. 2, n. 6, p. 841-850, 19 dez. 1990. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/ejm/2/6/0841>.

ROADMAP. **Relatório tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. 68p. SNIC: Rio de Janeiro, 2019.

ROCCHI, A. C. N. L., OLIVEIRA, J. M. **Avaliação da Resistência à Compressão de Argamassas com uso de Cimento LC³ com Diferentes Proporções de Filer Calcário e Argila Calcificada**. 2017. 93 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ROUSSEL, N. **Understanding the Rheology of Concrete**. [s.l.]: Woodhead Publishing Series, 2012. 384 p.

ROVENTI, G.; BELLEZE, T.; CONTI, C. Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet-dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. **Cement and Concrete Research**, v. 65, p. 76-84. 2014.

SADATI, S.; MORADLLO, M. K.; SHEKARCHI, M. Long-term durability of onshore coated concrete —chloride ion and carbonation effects. **Frontiers Of Structural And Civil Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 150-161, 1 abr. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-016-0341-2>.

SAKIR, S.; RAMAN, S. N.; SAFIUDDIN, M.; KAISH, A. B. M. A.; MUTALIB, A. A. Utilization of By-Products and Wastes as Supplementary Cementitious Materials in Structural Mortar for Sustainable Construction. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 3888, 9 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12093888>.

SANTOS, L. **Avaliação da Resistividade Elétrica do Concreto como Parâmetro para a Previsão da Iniciação da Corrosão Induzida por Cloretos em Estruturas de Concreto**.

2006. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1992. 1 v.

SANTOS, W. F. **Influência da Cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e filer calcário**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SCHÖLER, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; ZAJAC, M. Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 55, p. 374-382, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001>.

SCRIVENER K. L., AVET, F., MARAGHECHI, H., ZUNINO, F., STON, J., HANPONGPUN, W., FAVIER, A., Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3), **Green materials**, [s.l.], v. 7, p. 3-14, 2019.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [s.l.], v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 114, p. 2-26, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 114, p. 49-56, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. s.l: Crc Press, 2016. 558 p.

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 64, p. 121-129, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048>.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction And**

Building Materials, [s.l.], v. 178, p. 219-232, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.162>.

SHAH, V.; SCRIVENER, K.; BHATTACHARJEE, B.; BISHNOI, S. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 109, p. 184-197, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.016>.

SHI, Z.; GEIKER, M. R.; LOTHENBACH, B.; WEERDT, K.; GARZÓN, S. F.; ENEMARK-RASMUSSEN, K.; SKIBSTED, J. Friedel's salt profiles from thermogravimetric analysis and thermodynamic modelling of Portland cement-based mortars exposed to sodium chloride solution. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 78, p. 73-83, abr. 2017a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.002>.

SHI, Z.; GEIKER, M. R.; WEERDT, K.; LOTHENBACH, B.; KAUFMANN, J.; KUNTHER, W.; FERREIRO, S.; HERFORT, D.; SKIBSTED, J. Durability of Portland Cement Blends Including Calcined Clay and Limestone: interactions with sulfate, chloride and carbonate ions. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 133-141, 2015. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_17.

SHI, Z.; GEIKER, M. R.; WEERDT, K.; ØSTNOR, T. A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; SKIBSTED, J. Role of calcium on chloride binding in hydrated Portland cement–metakaolin–limestone blends. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 95, p. 205-216, maio 2017b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.003>.

SILVA, C. M. M. A. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem**. 2019. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SILVA, E. F. S. **Concreto de alto desempenho**: Estudo de propriedades mecânicas. 1997. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: Ibracon, cap.25, vol. 1, p. 791-823, 2010.

SILVA, S. R. **Contribuição ao estudo dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição e cinza volante, em diferentes teores de substituição**. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado sob tensão, executadas em escala natural e reduzida**. 2007. 306 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, [s.l.], v. 31, n. 11, p. 2352-2360, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>.

SOARES, J. O. **Avaliação das Propriedades da Argamassa com Utilização de Cimento LC³**. 2018. 79 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SOARES, L. W. **Utilização da cinza da casca de arroz em cimentação de poços de petróleo**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 3rd ed.; Thomas Telford: London, UK, 1997.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J.a.; ALAEJOS, P.; JUAN, M. Sánchez de. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p. 1054-1065, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>.

TIRONI, A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Blended Cements with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay: filler and pozzolanic effects. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 9, p. 04017116, set. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001965](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001965).

TIRONI, A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 195-201, 2015. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_24.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 37, p. 319-327, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, [s.l.], v. 117, n. 2, p. 547-556, 27 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-014-3816-1>.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish, Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VANCE, K.; AGUAYO, M.; OEY, T.; SANT, G.; NEITHALATH, N. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 39, p. 93-103, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.028>.

VARGAS, J. F. G.; GUAMÁN, F. M.; CÁRDENAS, Y. D.; DIAZ, A. H.; MARTIRENA-HERNANDEZ, J. F. Production of Durable Concrete with a Mineral Addition Blend of Calcined Clay-Limestone-Gypsum (LC2) and Portland Cement. **Rilem Bookseries**, [s.l.], p. 183-193, 22 jun. 2019. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_21.

VIZCAÍNO ANDRÉS, L. M. et al. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, p. 045, 2015.

VOGT, C. J. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico na resistência a fadiga e na tenacidade a fratura para concretos convencionais**. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z.. A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 181, p. 659-672, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHEER, P. A. M. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 140, p. 173-183, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>.

WEERDT, K. de; HAHA, M. Ben; SAOUT, G. Le; KJELLEN, K.O.; JUSTNES, H.; LOTHENBACH, B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 279-291, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical Resistivity of Concrete - A Literature Review**. PCA R&D Serial n°. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p.

XIE, X.; FENG, Q.; CHEN, Z.; JIANG, L.; LU, W. Diffusion and distribution of chloride ions in carbonated concrete with fly ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 218, p. 119-125, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.041>.

YANG, P.; DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M.; NEITHALATH, N. Simulation of chloride diffusion in fly ash and limestone-calcined clay cement (LC3) concretes and the influence of damage on service-life. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 130, p. 106010, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106010>.

YE, H.; JIN, X.; FU, C.; JIN, N.; XU, Y.; HUANG, Tao. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 112, p. 457-463, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; AÏT-MOKHTAR, A.; STAQUET, S. Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: effect of interactions between hydration and drying. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 43, p. 25-33, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.008>.

YU, J.; WU, H.; LEUNG, C. K. Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength Engineered Cementitious Composites (ECC). **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 262, p. 121343, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121343>.

YUAN, Q.; SHI, C.; SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K.; DENG, D. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 1-13, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.004>.

ZHANG, D.; JAWORSKA, B.; ZHU, H.; DAHLQUIST, K.; LI, V. C. Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 114, p. 01-31, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103766>.

ZHU, X.; ZI, G.; LEE, W.; KIM, S.; KONG, J. Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 124, p. 667-680, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.120>.