

**ESTUDO DA PROPORÇÃO DE ARGILA CALCINADA E FILER
CALCÁRIO NO CIMENTO LC³ PARA DIFERENTES TEORES DE
SUBSTITUIÇÃO**

ENEAS DE ANDRADE BARBALHO

**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 PROPORÇÃO DE ARGILA CALCINADA E FILER CALCÁRIO NO
CIMENTO LC³ PARA DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

ENÉAS DE ANDRADE BARBALHO

ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO-2018

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

**ESTUDO DA PROPORÇÃO DE ARGILA CALCINADA E FILER
CALCÁRIO NO CIMENTO LC³ PARA DIFERENTES TEORES DE
SUBSTITUIÇÃO**

ENEAS DE ANDRADE BARBALHO

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

APROVADO POR:

Prof^a. Eugênia Fonseca da Silva, DSc (ENC-UnB)
(Orientadora)

Anne Neiry de Mendonça Lopes, DSc (FURNAS Centrais Elétricas)
(Examinador externo)

Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc (ENC-UnB)
(Examinador interno)

Brasília/DF, 13 de dezembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

Barbalho, Enéas de Andrade

Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no Cimento LC³ para Diferentes teores de substituição/ Enéas de Andrade Barbalho; Orientadora: Eugênia Fonseca da Silva. Brasília, 2018. 85 p.

ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Filer calcário 2. Argila calcinada 3. Resistência à compressão 4. Impactos ambientais

I. Da Silva, Eugênia, orient. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBALHO, E. A. (2018). Avaliação da relação argila calcinada e filer calcário no cimento LC³. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM- 28A /18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Enéas de Andrade Barbalho

TÍTULO: Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no Cimento LC3 para Diferentes teores de substituição

GRAU: Mestre ANO: 2018

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.

Enéas de Andrade Barbalho

E-mail: eneas.barbalho@gmail.com

*Dedico esse trabalho aos meus filhos
e a minha esposa, que me deram todo
apoio e encorajamento necessário
para realiza-lo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de adquirir novos conhecimentos e por sempre estar ao meu lado.

Aos meus pais, pelo amor incondicional e por me ensinarem a real dedicação aos estudos.

Aos meus filhos e minha esposa, pelo encorajamento nos momentos difíceis e pelas comemorações nas vitórias.

À professora Eugênia Fonseca da Silva, pela excelente orientação durante toda a pesquisa e por ser muito mais que uma orientadora, ser uma amiga. Serei eternamente grato pela ajuda.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília – PECC/UnB, por todo conhecimento repassado.

Ao professor João Henrique da Silva Rêgo e Dra. Anne Neiry de Mendonça Lopes, por aceitarem compor a banca e contribuir com este trabalho.

Ao amigo Alexandre Negredo, que colaborou em diversas etapas deste estudo.

À Ciplan Cimento Planalto, pela doação de materiais utilizados.

À Universidade de Brasília (UnB).

A todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente com a realização deste trabalho.

RESUMO

ESTUDO DA PROPORÇÃO DE ARGILA CALCINADA E FILER CALCÁRIO NO CIMENTO LC³ PARA DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

Autor: Enéas de Andrade Barbalho

Orientador: Dra. Eugênia Fonseca da Silva

Programa de Pós-graduação em estruturas e construção civil

Brasília, dezembro de 2018.

Com o avanço da construção civil, é de suma importância analisar os impactos ambientais gerados, especialmente os causados pela produção do cimento Portland, responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂ mundiais. Uma medida mitigadora para diminuir essas emissões é a redução do teor de clínquer na composição do cimento. A escória de alto forno e a cinza volante já vem sendo utilizadas com esse propósito, entretanto, não têm disponibilidade suficiente para atender a demanda atual do mercado. Adições disponíveis em abundância no planeta, como a argila calcinada e o filer calcário, usados simultaneamente, vem sendo pesquisadas recentemente e se mostram bastante eficiente, compondo um novo cimento, chamado LC³. Essa pesquisa trata do estudo experimental do efeito da argila calcinada + filer calcário, em substituição parcial ao cimento Portland, no índice de desempenho, determinado a partir da resistência à compressão de argamassas, segundo a NBR 5752 (2014), com modificações. As argamassas foram produzidas com areia normal, relação a/c fixa e teor de superplastificante variável, para atender ao intervalo de espalhamento definido. Foram estudados três teores de substituição ao cimento: 35%, 40% e 45% e três distintas proporções de argila em relação ao filer: 2:1, 3:1 e 4:1. Os resultados mostram que o cimento LC³ consegue atingir resistência semelhante ou até mesmo superior à do cimento de referência, em função do teor de substituição e da proporção utilizados. Destaca-se a proporção 2:1 e o teor de 45% de substituição, como a de melhor custo-benefício obtido experimentalmente, considerando a idade de 28 dias.

Palavras chaves: Cimento LC³; filer calcário; argila calcinada; resistência à compressão; impactos ambientais.

ABSTRACT

STUDY OF THE PROPORTION OF CALCINED CLAY AND CALCARY FILTER IN THE LC³ CEMENT FOR DIFFERENT REPLACEMENT CONTENT

Author: Enéas de Andrade Barbalho

Supervisor: Dr. Eugênia Fonseca da Silva

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasilia, december 2018

With the advance of civil construction, it has become important to analyze the environmental impacts, in particular the production of Portland cement, responsible for about 5% of the world's CO₂ emissions. The mitigating step to reduce these emissions is the reduction of the clinker content in the cement composition. Blast furnace slag and fly ash have been used for this purpose, however, they are not available enough to meet current market demand. Supplementary cementitious materials available in abundance on the planet, such as calcined clay and limestone filler, used simultaneously, have been researched recently and are very efficient, composing a new cement, called LC³. This research deals with the experimental study of the effect of calcined clay + limestone filler, in partial replacement with Portland cement, on the performance index, determined from the compressive strength of mortars, produced with a fixed water-cement ratio and variable superplasticizer content, to meet the set spreading interval. Three cement substitution contents were studied: 35%, 40% and 45% and three different clay proportions in relation to the limestone filler: 2: 1, 3: 1 and 4: 1. The results showed that the LC³ cement can achieve equal or greater compressive strength than the control, depending on the substitution content and the proportion used. The 2:1 ratio and the 45% substitution ratio were the best cost-benefit obtained experimentally, considering an age of 28 days.

Keywords: Cement LC³; limestone filler; calcined clay; compressive strength; environmental impacts.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO.....</u>	1
1.1	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	3
1.2	OBJETIVOS	5
1.2.1	OBJETIVO GERAL	5
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
2	<u>CIMENTO PORTLAND</u>	6
2.1	IMPACTO AMBIENTAL NA PRODUÇÃO CIMENTO PORTLAND.....	9
2.3	MEDIDAS MITIGADORAS PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂	13
2.3.1	CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO.....	13
2.3.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	14
2.3.3	UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	15
2.3.4	SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER	15
3	<u>CIMENTOS COM MISTURAS TERNÁRIAS.....</u>	19
3.1	O CIMENTO LC ³	19
3.1.1	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO LC ³	20
3.1.2	DESEMPENHO MECÂNICO DO CIMENTO LC ³	23
3.1.3	DURABILIDADE DO LC3.....	27
3.1.4	O CIMENTO LC ³ NOS DIAS ATUAIS	29
4	<u>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</u>	31
4.1	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	32
4.1.1	CIMENTO PORTLAND	32
4.1.2	ADIÇÕES	32
4.1.3	AREIA.....	32
4.1.4	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	32
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	33
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS.....	33

4.2.2	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	37
4.3	DESEMPENHO DO CIMENTO LC3	40
4.3.1	COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS	40
4.3.2	PREPARAÇÃO DAS MISTURAS	42
4.3.3	ÍNDICE DE DESEMPENHO	44
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	46
5	<u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	<u>48</u>
5.1	AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO	48
5.2	AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	49
5.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	49
5.2.1.1	Avaliação do índice de desempenho dos cimentos LC ³ em diferentes teores e com proporções fixas	51
5.2.1.2	Avaliação do índice de desempenho dos cimentos LC ³ nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias .	54
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	58
5.3.1	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	58
5.3.2	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	59
5.3.3	TESTE DE DUNCAN.....	61
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6	<u>SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS</u>	<u>64</u>
	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>65</u>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Produção de cimento mundial no ano de 2015, dividida por regiões e alguns países. (CEMBUREAU, 2015).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 - Consome de cimento no Brasil (SNIC 2016).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 - Previsão de crescimento do consumo de cimento até 2050 (SCRIVENER, 2014).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4 - Análise comparativa das emissões de CO₂/tonelada de cimento de diversos países e regiões (WBCSD-CSI, 2009 apud BATTAGIN, 2010).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5 - Evolução do fator clínquer/cimento de 1990 até 2013 em diferentes regiões (BATTAGIN, 2016)..</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 - Difratometria de raio-x das 4 pastas realizadas, nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias. (SCRIVENER, 2012).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7 - Resistência à compressão das misturas (Fonte: ANTONI et al., 2012).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8 - Resistência à compressão das argamassas produzidas (VIZCAÍNO ANDRÉS et al., 2015).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9 - Resistencia a compressão versus teor de caulinita na argila (SCRIVENER, 2014).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10 - Resistência à compressão dos concretos (DHANDAPANI et al., 2018)</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11 - Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (SCRIVENER, 2014)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12 - Ensaio de penetração a íons cloreto (SCRIVENER, 2014)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 - Comparação de custos de fabricação (JOSEPH, JOSEPH, BISHNOI, 2015).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 14 - Organograma da etapa experimental.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15 - Curva granulometria da argila calcinada</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16 - Curva granulometria do filer calcário.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17 - Difratograma da argila calcinada</i>	<i>36</i>
<i>Figura 18 - Difratograma do filer calcário</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19 - Granulometria a laser do cimento CPV ARI</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22 - Ensaio de índice de consistência. (a) Moldagem do corpo de prova troncônico; (b) espalhamento da argamassa</i>	<i>43</i>
<i>Figura 23 - Moldagem de corpos de prova.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 24 - Cura dos corpos de prova</i>	<i>44</i>
<i>Figura 25 - Ruptura dos corpos de prova.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 26 – Resultado médio de resistência à compressão das argamassas, nas idades estudadas: a) proporção 2:1, b) proporção 3:1, c) proporção 4:1</i>	<i>50</i>
<i>Figura 27 - Índice de desempenho para as misturas com proporção de adições 2:1</i>	<i>51</i>
<i>Figura 28 - Índice de desempenho para todas as misturas com proporção de adições 3:1</i>	<i>52</i>
<i>Figura 29 - Índice de desempenho das misturas com proporção de adições 4:1</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32 - Índice de desempenho dos cimentos LC³ para todas as misturas com teor de substituição de 45%</i>	<i>57</i>

<i>Figura 33 – Gráfico de Pareto para efeitos de teor e proporção de adições minerais em relação à resistência à compressão aos 28 dias.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 34 – Superfície de resposta tridimensional da resistência à compressão aos 28 dias.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 35 - Superfície de resposta bidimensional da resistência à compressão aos 28 dias</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36 - Médias globais de resistência à compressão em função dos cimentos estudados (teste de Duncan).</i>	<i>62</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Os 20 maiores produtores de cimento do mundo, (CEMBUREAU, 2015).</i>	7
<i>Tabela 2 - Produção mundial de cimento (MINERAL COMMODITY SUMMARIES,2017)</i>	7
<i>Tabela 3 - Composição das misturas para análise de Difratomia de raio-x (Antoni et al, 2012).</i>	21
<i>Tabela 4 - Composição do aglomerante das argamassas (ANTONI et al., 2012).</i>	23
<i>Tabela 5 - Diâmetros do material passante e diâmetro médio</i>	34
<i>Tabela 6 - Determinação da massa específica das adições minerais</i>	34
<i>Tabela 7 - Determinação do blaine das adições minerais</i>	35
<i>Tabela 8 - Determinação da área da superfície</i>	35
<i>Tabela 9 - Composição química das adições minerais expressas em porcentagem</i>	37
<i>Tabela 10 - Características físicas e químicas do cimento (CPV ARI)</i>	38
<i>Tabela 11 - Diâmetros referentes a 10%,50%,90% do material passante, e diâmetro médio.</i>	38
<i>Tabela 12 - Óxidos presentes na composição química do cimento expresso em porcentagem</i>	40
<i>Tabela 13 - Composição da argamassa de referência (NBR 5752:2014)</i>	41
<i>Tabela 14 – Composição das argamassas</i>	41
<i>Tabela 15 – Variáveis dependentes e independentes da pesquisa</i>	46
<i>Tabela 16 – quantidade de aditivo e espalhamentos obtidos</i>	48
<i>Tabela 17 – Resultados de análise de variância (ANOVA) realizada com dados de teor de substituição e proporção de adição mineral</i>	58
<i>Tabela 18 – Grupos de valores de resistência à compressão das argamassas na idade de 28 dias, formados através da comparação múltipla de médias do teste de Duncan</i>	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C	Graus Celsius
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileiro de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFm	Monosulfoaluminato (etringita secundária)
AFt	Trisulfoaluminato (etringita)
Al ₂ O ₃	Alumina
ASTM	American Society for Testing and Materials
BaO	Óxido de bário
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de cálcio (cal livre)
CEMBUREAU	European Cement Association
CH/Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
cm ²	Centímetro quadrado
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
COP	Conferência das Partes
CP	Corpo de prova
CP I	Cimento Portland tipo I
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
dm ³	Decímetro cúbico
DRX	Difração de raio-x
EUA	Estados Unidos da América
F ₂ O ₃	Óxido de ferro
G	Gramas
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K ₂ O	Óxido de potássio
Kg	Quilograma (10 ³ g)
LC ³	Limestone Calcined Clay Cement
m	Metro
MgO	Óxido de magnésio (Magnésio livre)
MnO	Óxido de manganês
MPa	Mega Pascal (10 ⁶ Pa)
NBR	Norma Brasileira Registrada
P ₂ O ₅	Pentaóxido de difósforo
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
SiO ₂	Óxido de silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
SO ₃	Óxido sulfúrico
SrO	Óxido de estrôncio
TiO ₂	Dióxido de titânio
UnB	Universidade de Brasília
WBCDS	World Business Council for Sustainable Development
μm	Micrômetro (10 ⁻⁶ m), ou microstrain

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da construção civil desempenha importante papel na economia de diversos países do mundo, dando uma resposta rápida na geração de emprego e renda. Por outro lado, é um importante consumidor de recursos naturais e gerador de impactos ambientais, sendo urgente a busca por um equilíbrio entre crescimento do setor e um desenvolvimento sustentável.

O mercado de trabalho no Brasil vem passando por diversas transformações oriundas de políticas públicas aplicadas aos setores da indústria. De acordo com pesquisas, o setor da construção civil mostrou evidente expansão entre os anos de 1994 a 2013, que por sua vez contribuiu tanto para o papel econômico quanto social do País (SINDUSCON-MG, 2014). Contudo, em função do cenário econômico do Brasileiro, no ano de 2016, a produção de cimento no Brasil apresentou uma queda de 22% em relação ao ano de 2013,

Apesar disso, o cimento ainda é dos produtos mais consumidos no planeta, estima-se que em 2015 que seriam produzidas cerca 4,6 bilhões de toneladas de cimento no mundo (CEMBUREAU, 2016). E de acordo com as projeções, acredita-se que no ano de 2050, as industriais de todo o planeta totalizem 6 bilhões de toneladas produzidas (SCRIVENER, 2014).

No Brasil, nos últimos dois anos, a atividade da construção civil foi 7,6% menor, refletindo na indústria do cimento, com uma retração de 9,5% no consumo do insumo. Contudo, o consumo de cimento no Brasil é muito expressivo, totalizando 65 milhões de toneladas. (SNIC 2016)

Tanto no Brasil como no mundo, a demanda pelo cimento Portland é muito elevada, da ordem anual de 3,6 bilhões de toneladas/ano e o consumo do cimento deverá aumentar 2,5 vezes até 2050, alavancado pelo crescimento dos países em desenvolvimento. “Sem inovações, estudos mostram que no futuro o setor poderá ser responsável por cerca de 20% do total de CO₂ emitido na atmosfera” (JOHN, 2013).

A indústria de cimento é uma das principais fontes de emissões antropogênicas de mudanças climáticas. Embora muitas vezes seja difícil estabelecer, com precisão, a quantidade de gás de efeito estufa proveniente de fontes individuais, e como isso se compara a um total igualmente inseguro, as estimativas na literatura concordam que a

indústria de cimento emite cerca de 5% dos gases de efeito estufa sintéticos. Isso faria da indústria de cimento uma das cinco maiores fontes individuais de gases de efeito estufa e a segunda maior fonte industrial depois da indústria de aço (CULLEM, *et al.*, 2011).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change*), que representa a maior autoridade mundial a respeito do aquecimento global, aponta que a maior parte do aumento do aquecimento global que vem ocorrendo ao longo dos anos, é decorrente da influência humana sobre o clima. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) produzidas pelas atividades humanas, como a indústria, a queima de combustíveis fósseis, o uso de fertilizantes, o desperdício de alimentos e o desmatamento, são a principal causa do problema, e elas têm crescido sem cessar, estando atualmente nos níveis mais altos já verificados na história. Os efeitos negativos do aquecimento global sobre a sociedade humana e a natureza são vastos e disseminados globalmente.

O efeito estufa é um mecanismo importante para regular a temperatura. A Terra retorna a energia recebida do sol para o espaço ao refletir a luz e emitindo calor. Parte do calor despreendido é absorvida pelos gases de efeito estufa e irradiado de volta para a Terra. Embora ocorram naturalmente, as atividades antrópicas aumentaram a sua presença na atmosfera. Os gases de efeito estufa variam consideravelmente nas quantidades emitidas, mas também em seu efeito de aquecimento e no período de tempo que permanecem na atmosfera como agentes ativos do aquecimento.

Dados levantados por cientistas vinculados ao IPCC, afirmam que o século XX, em razão dos desdobramentos ambientais das revoluções industriais foi o período mais quente da história desde o término da última glaciação. Houve um aumento da temperatura média da superfície global de $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$, e a década de 90 foram consideradas o mais quente do último milênio (KERR, 2005).

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) aumentou de aproximadamente 280 partes por milhão por volume (ppmv) no período pré-industrial para a atual concentração de 380 ppmv, com uma taxa de aumento de 1,6ppmv por ano (MEARNS, 2000; IPCC, 2007). Existem projeções de que a concentração do CO_2 atmosférico duplicará até o final desse século, o que poderá provocar aumento na temperatura média do ar do planeta (STRECK, 2005; IPCC, 2007). Ainda não há unanimidade no valor do aumento da temperatura do ar

global, devido ao aumento da concentração do CO₂, mas estudos indicam um provável aumento entre 1,1 e 6,4° C na temperatura média do ar global até o final do século XXI, dependendo de cada região (MAHLMAN, 1997).

Fatores como estes expostos podem se agravar e tornar a problemática ambiental mais preocupante, caso não seja tomada medidas mitigadoras para a redução da emissão dos GEE. Diante disso, algumas medidas visando estabelecer limites para reduzir a quantidade de emissões de gases de efeito estufa no mundo como o Protocolo de Quioto, e reuniões como a Conferência das Partes (COP) tem sido realizada. Essas medidas têm como objetivo principal conter as previsões de riscos futuros apontadas pelo último relatório divulgado pelo IPCC, que apresenta dentre outros, riscos a perda dos meios de subsistência, da biodiversidade, mortalidade por altíssimo calor, redução significativa de redes de infraestrutura e riscos aos serviços essenciais como abastecimento de água e energia elétrica.

Diante disto, diversos esforços e estudos apontam tentativa de reduzir as emissões de CO₂ proveniente dos processos industriais da fabricação do cimento Portland. Segundo Scrivener (2014), o LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), surge como alternativa sustentável e viável ao cimento, que, envolve níveis crescentes de substituição de materiais cimentícios suplementares ao cimento, possibilitando uma redução elevada do teor de clínquer.

Ainda segundo a pesquisadora, o LC³ é mais resistente que Portland comum e seu processo de produção emite 30% menos CO₂.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Materiais cimentícios são comumente utilizados para substituir o clínquer na composição do cimento Portland. Estes materiais comumente usados são subprodutos industriais tais como: cinzas volantes e escória de alto forno. Porém, Scrivener (2014), afirma que a disponibilidade destes materiais é localizada e a quantidade produzida é muito menor do que a necessidade da ampla produção do cimento. A escória disponível no mundo, que tem alta capacidade de substituição nas misturas de clínquer, representa apenas cerca de 5% da quantidade de clínquer produzido. Já a cinza volante, apesar de apresentar uma quantidade maior de material disponível no mundo, é um produto ausente em diversos países, e sua

capacidade de substituição ao clínquer do cimento Portland é bem menor, pois contribui de forma menos significativa quanto à resistência mecânica do material, sendo muitas vezes inadequada para sua substituição, em função de ser um material de qualidade variável.

Os estudos e pesquisas em busca de um cimento mais sustentável confirma a necessidade de novos materiais capazes de substituir parte expressiva do clínquer produzido no mundo, a primeira atenção nos estudos é buscar materiais que tenham em abundância em todo Planeta. Que supram a demanda e segundo mantenham o desempenho atual do cimento Portland e as características no processo industrial.

A fundação Nanocem fundada e coordenada por Karen Scrivener tem realizado pesquisas sobre um novo tipo de cimento, onde a porcentagem do clínquer pode ser reduzida, a partir da utilização de argila calcinada e filer calcário, materiais disponíveis em abundância em todo planeta. Este novo cimento é chamado LC³ (Limestone Calcined Clay Cement). Estudos sobre o LC³ já estão sendo disseminados pelo mundo, projetos de pesquisa na Suíça, Índia e Cuba.

No Brasil, os estudos são principiantes. Na UnB existem apenas dois trabalhos publicados sobre o assunto. O primeiro, a dissertação, sobre o cimento LC³, que envolveu tema relacionado com resistência mecânica, com diferentes teores de substituição de adições, utilizando o cimento Portland comum; dissertação de LINS (2017), do Programa de Pós Graduação em Estrutura e Construção Civil, intitulada Análise da Resistência à Compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho. O segundo a Monografia e projeto final por ROCCHI, A.C.N.L.; OLIVEIRA, J.M. (2017) do Programa de graduação Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, com o tema Avaliação da Resistência à Compressão de Argamassas com o uso de Cimento LC³ com diferentes proporções de filer calcário e argila calcinada.

A presente dissertação está inserida na linha de pesquisa “Tecnologia, componentes e Materiais de Construção”, do PECC/UnB - Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil da Universidade de Brasília, abordando especialmente o estudo do cimento LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), no que tange a melhor proporção de argila calcinada em relação ao filer calcário.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o efeito da relação argila calcinada/filer calcário na resistência à compressão do cimento LC³, a partir da produção de argamassas, nas quais serão utilizadas misturas ternárias compostas por cimento, argila calcinada e filer calcário.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir argamassas com diferentes teores de argila calcinada e filer calcário, em substituição ao cimento Portland (CP V ARI), nos teores de 0, 35, 40 e 45%, utilizando três proporções de argila calcinada em relação ao filer (2:1, 3:1 e 4:1).
- Avaliar a resistência à compressão das argamassas.
- Avaliar o índice de desempenho das argamassas.

2 CIMENTO PORTLAND

O uso de materiais com propriedades cimentícias para fins construtivos é uma atividade muito antiga na história da civilização. O material, conhecido dos antigos egípcios, ganhou o nome atual no século XIX graças à semelhança com as rochas da ilha britânica de Portland. A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos, porém, a evolução significativa deste material ocorreu em 1756, através de John Smeaton, que pelo processo de calcinação de calcários moles e argilosos obteve um produto de alta resistência (BATTAGIN, 2009).

Posteriormente, em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin realizou um experimento onde foram queimadas pedras calcárias e argila conjuntamente, transformando-se em um pó fino. Aspdin então percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções, uma vez que a mistura não se dissolvia em água. Ao produto obtido foi dado o nome de cimento Portland e patentado no mesmo ano por Josph Aspdin (NEVILLE e BROOKS 2013).

O cimento Portland é classificado como sendo um aglomerante hidráulico, ou seja, o produto resistente a final é estável em meio aquoso. A reação de hidratação consiste no endurecimento do cimento, e está se dá por reações químicas quando o material entra em contato com água (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Devido a estas características importantes e particulares, este material se torna cada vez mais indispensável ao setor da construção civil, o que reflete diretamente no aumento do consumo e produção.

Com o início da crise financeira em 2008, a indústria mundial de cimento começou a fazer grandes transformações, como; consolidação da indústria e o aumento da eficiência operacional. A produção global de cimento atingiu 4,2 bilhões de toneladas em 2014, mantendo-se praticamente estável até 2016. Conforme mostrado nas tabelas (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1 - Os 20 maiores produtores de cimento do mundo, (CEMBUREAU, 2015).

País	2011	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
China	661,0	1361,2	1388,4	1644,0	1881,9	2063,2	2137,0	2438,0	2350,0	2350,0
Índia	102,9	170,5	185,0	205,0	220,0	270,0	239,0	272,0	280,0	270,0
União Europeia	225,6	209,1	250,8	209,0	192,1	191,6	170,5	157,5	165,8	172,0
EUA	88,9	95,5	86,3	63,9	65,2	68,6	74,0	77,2	83,2	83,4
Brasil	39,4	45,9	51,6	51,1	59,1	63,0	68,0	71,9	72,0	65,3
Turquia	30,0	49,3	51,4	54,0	62,7	63,4	63,8	70,8	72,6	72,8
Rússia	28,7	59,9	53,5	44,3	50,4	56,1	53,0	55,6	68,4	69,0
Japão	79,5	71,4	67,6	59,6	56,6	56,4	59,3	61,7	61,9	59,5
Rep. Da Coreia	52,0	52,2	51,7	50,1	47,4	48,2	46,9	47,3	47,0	49,1
Arábia Saudita	20,0	30,3	37,4	37,8	42,5	48,0	43,0	48,0	51,1	54,0
Indonésia	31,1	35,0	38,5	36,9	39,5	45,2	53,5	52,0	54,2	54,4
México	33,2	38,8	37,1	35,1	34,5	345,4	36,8	37,0	39,4	40,0
Alemanha	32,1	33,4	33,6	30,4	29,9	33,5	32,4	31,9	32,5	32,0
Itália	39,8	47,5	43,0	36,3	34,4	33,1	26,2	23,1	21,4	20,8
França	19,1	22,1	21,2	18,1	18,0	19,4	18,0	17,5	16,4	15,6
Canadá	12,1	15,1	13,7	11,0	12,4	12,0	12,5	12,1	12,8	12,5
Argentina	5,5	9,6	9,7	9,4	10,4	11,6	10,7	11,9	11,8	12,2
África do Sul	8,4	13,7	13,4	11,8	10,9	11,2	13,8	14,9	13,8	14,0
Austrália	6,8	9,2	9,4	9,2	8,3	8,6	8,8	8,6	9,0	9,1
Reino Unido	11,9	12,6	10,5	7,8	7,9	8,5	7,9	8,5	9,2	9,6

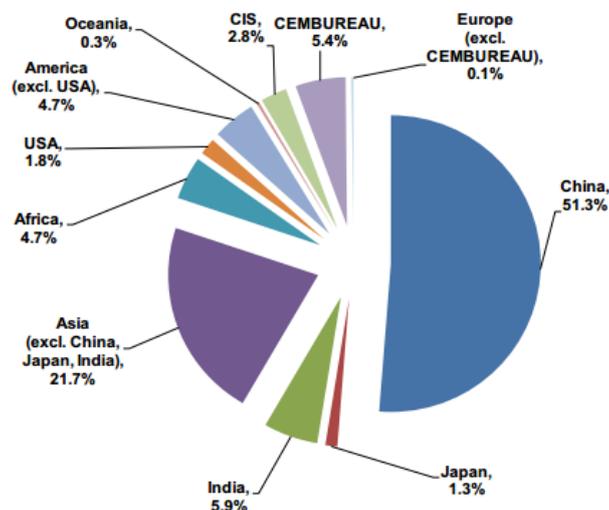
Tabela 2 - Produção mundial de cimento (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2017).

Países	Produção de cimento (Milhões ton.)	
	2015	2016
E.U.A (Incluindo Porto Rico)	84,300	85,900
Brasil	65,300	60,000
China	2350,000	2410,000
Egito	55,000	55,000
Índia	3000,000	290,000
Indonésia	58,000	63,000
Iran	58,000	53,000
Japão	54,800	56,000
República da Coreia	51,700	55,000
Rússia	62,100	56,000
Arábia Saudita	61,900	61,000
Turquia	71,400	77,000
Vietnã	67,400	70,000
Outros países (arredondado)	760,000	810,000
Total mundial (Bilhões de ton.)	4,2	4,2

O crescimento mundial de cimento está alicerçado nos resultados positivos do continente asiático e, mais recentemente, também da retomada do crescimento nos Estados Unidos, que juntos representam 66 por cento de todo cimento produzido no planeta, com destaque

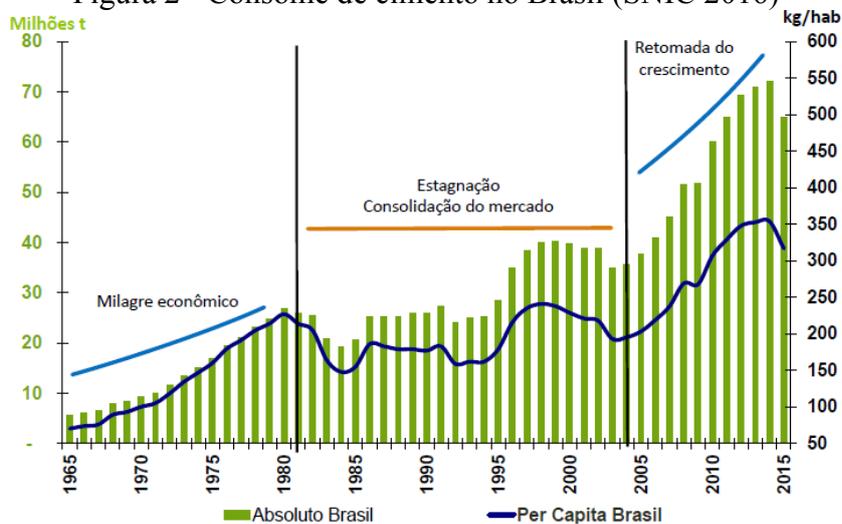
para a produção da China, que lidera o ranking mundial, sendo responsável por mais da metade da produção de cimento do planeta, conforme é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Produção de cimento mundial no ano de 2015, dividida por regiões e alguns países. (CEMBUREAU, 2015)



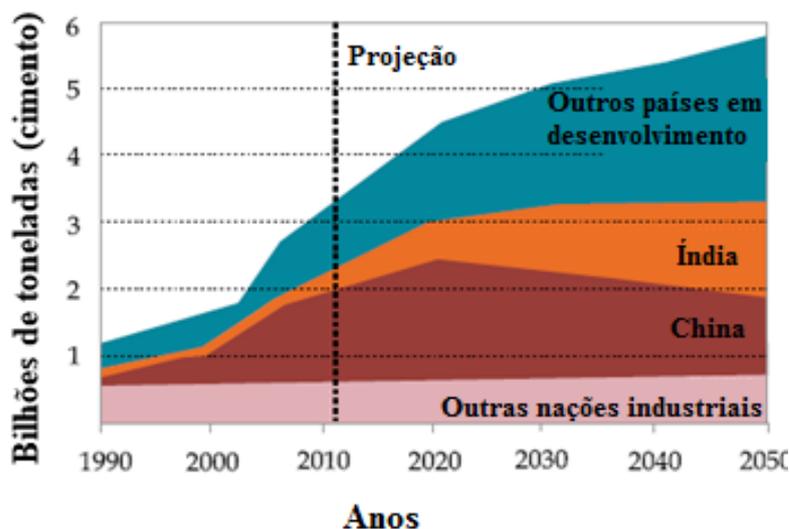
O Brasil é o maior produtor de cimento da América do Sul e em 2015 chegou a ocupar a 5ª posição entre os maiores produtores de cimento no mundo, ficando atrás apenas de China, Índia, União Europeia e Estados Unidos. O grande aumento da produção de cimento no Brasil está diretamente relacionado ao aumento de seu consumo, que acompanhou também o crescimento da renda per capita brasileira entre 2005 a 2015, mostrado na Figura 2. Neste período a produção de cimento no Brasil cresceu cerca de 74% (SINC 2016). Nos últimos dois anos com o agravamento da crise econômica e política no país, o Brasil vem registrando retração no índice de produção e consumo, no entanto, continua ocupando posição de destaque, 8º lugar no ranking mundial do setor.

Figura 2 - Consome de cimento no Brasil (SNIC 2016)



Mesmo com queda na produção de cimento registrada no Brasil em torno de 9 % no ano de 2014 para 2015, acompanhado também pelas quedas de 3,7% na China, 2,3% no Canadá e 3,9%, no Japão, estima-se que o crescimento da indústria cimenteira se mantenha elevado nos próximos anos, podendo alcançar quase 6 bilhões de toneladas de cimento produzidas em 2050, apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Previsão de crescimento do consumo de cimento até 2050 (SCRIVENER, 2014)



Diante deste prognóstico de um grande crescimento da produção mundial de cimento, impulsionada por fatores como o crescimento populacional, econômico e das tendências de urbanização mundial, torna-se positiva no âmbito econômico e social. Porém, apesar de diversos pontos favoráveis e de ser um produto imprescindível perante as necessidades de habitação e infraestrutura, a alta da produção de cimento no mundo vem acompanhada de consequências negativas quanto à sustentabilidade e preservação do planeta, originadas principalmente, pela elevada taxa de emissão de CO₂, proveniente do processo de produção.

2.1 IMPACTO AMBIENTAL NA PRODUÇÃO CIMENTO PORTLAND

Ao longo dos anos a indústria cimenteira busca novas tecnologias, maior controle do processo, melhoria na automação, visando menores custos produção e maior produtividade, com redução do consumo energético e de emissões de gases poluentes, contribuindo para redução nos impactos ambientais.

O dióxido de carbono ou gás carbônico (CO₂) é o gás que mais contribui para o efeito estufa e está atingindo altas concentrações na atmosfera. Os gases de efeito estufa (GEE) são apontados como a principal causa de um dos maiores impactos ambientais, o aquecimento global.

A atenção de nações mundial está às voltas para este problema. A partir da Conferência Mundial das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (COP 21), há em comum um consenso de que o aumento da temperatura global deve ser mantido abaixo de, pelo menos, 2°C. No entanto, para que esse objetivo seja atingido, são necessárias reduções drásticas no nível de emissões mundiais de GEE, atingindo valores de redução de 41% a 72% até o ano de 2050, e de 78% a 118% até 2100 (ISAKSSON, 2016).

Para que estes números sejam atingidos, e o mundo possa diminuir os efeitos do aquecimento, deve se focalizar principalmente em reduzirmos ao máximo as emissões de CO₂ principalmente industriais, com políticas inovadoras que venha ao encontro a significativa redução na emissão de gás carbônico em seus processos de produção. Incluindo nestas a indústria cimenteira, que deve aprimorar e reavaliar seu processo produtivo para reduzir sua taxa de emissão de CO₂ na atmosfera.

Os líderes da indústria de cimento anunciam planos para reduzir suas emissões em 20% a 25% até 2030. Os planos de ação lançados hoje na COP21 pelas empresas de cimento exigem uma estrutura internacional de política de CO₂ e a remoção das barreiras existentes para liberar o potencial de redução total do setor (CSI, 2015).

Com base em 15 anos de colaboração, a CSI e seus membros estão trabalhando para ampliar seus esforços e alavancar a implementação de soluções de negócios identificadas para uma ampla maioria das empresas de cimento em todo o mundo. Envolver todo o setor de cimento seria oferecer uma redução adicional de para 1 Gt de CO₂ até 2030, o que é aproximadamente o mesmo montante total de emissões de CO₂ da Alemanha em 2013. (CSI, 2015).

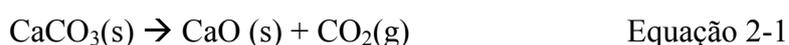
A Indústria de cimento é classificada com uma das principais fontes de emissão de gás carbônico entre as atividades industriais. De acordo com Van Ruijven et al. (2016), as emissões desses setores aumentaram rapidamente entre 1980 e 2010. Taxas de crescimento entre 2 e 4% ao ano (SAYGIN, 2012).

Nos dias atuais, a indústria cimentícia de forma global tem grande notoriedade no que tange aos aspectos ambientais do planeta. Estima-se que esta seja responsável por 5% das emissões antropogênicas mundiais de CO₂ (GARTNER e HIRÃO, 2015). Já Scrivener (2014) acredita que esta taxa pode atingir até 8%.

A emissão de CO₂ varia de país para país e depende da tecnologia/matéria-prima empregada na produção. O Brasil tem hoje um fator de emissão de aproximadamente 610 kg CO₂/t cimento; a Espanha, 698 kg CO₂/ton cimento; a Inglaterra, 839 kg CO₂/ton cimento; e a China, 848 kg CO₂/ton cimento (JONH-2013). Damtoft (2008) afirma que cada 1 tonelada de clínquer produzido, são produzidas 0,8 -0,9 toneladas de CO₂. Observa-se que estes teores elevados grandes impactos ambientais.

No processo de fabricação do cimento, a etapa de maior emissão de CO₂ ocorre durante a produção de clínquer, seja na calcinação/descarbonatação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. A parcela restante resulta do transporte de matérias-primas e das emissões pelo consumo de energia elétrica na fábrica.

Segundo Scrivener (2014), aproximadamente 40% das emissões está relacionada ao combustível e eletricidade. O restante, representado por 60% das emissões provêm da decomposição da principal matéria-prima do cimento, calcário ou CaCO₃, conforme apresentado na equação 2-1

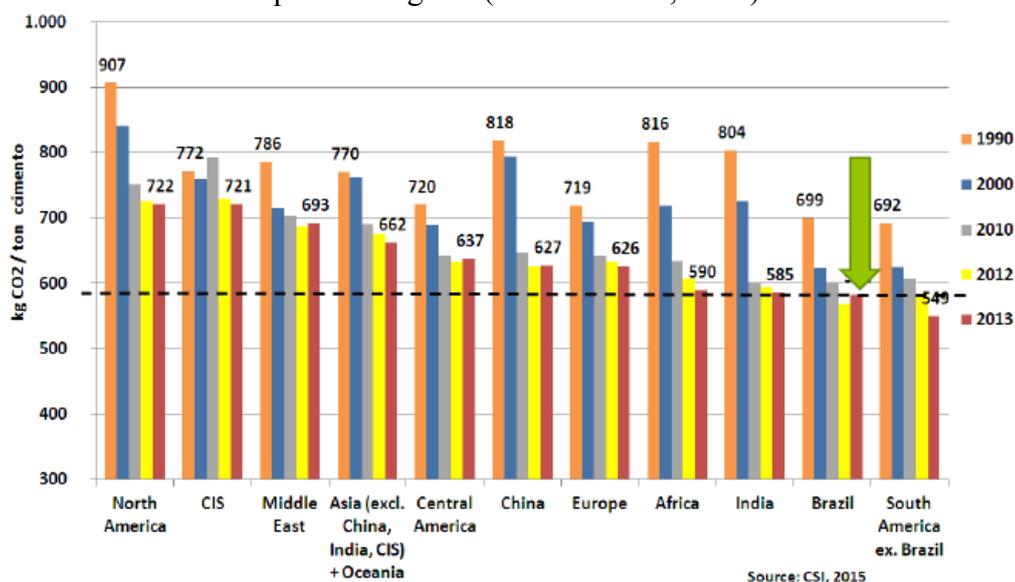


Considerando-se que o principal fator responsável pela emissão de dióxido de carbono no processo de fabricação de cimento Portland é descarbonatação do CaCO₃, que ocorre no processamento da formação do clínquer. Com o intuito de amenizar impactos ambientais gerados neste processo, a redução do teor de clínquer na composição final dos cimentos vem sendo uma alternativa estudada no mundo inteiro. Estes estudos buscam cimentos mais sustentáveis. Para tanto, a utilização de adições minerais em substituição a parte do clínquer vem sendo cada vez mais aplicada na busca da maior redução do teor de clínquer.

É de suma importante ressaltar que este teor de emissão varia em função do tipo de cimento e processos produtivos, no entanto, observa-se que os teores são elevados e geram grande impacto ao meio ambiente. Na Figura 4 é possível observar que os teores de

emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido variam também de acordo com o país responsável pela produção.

Figura 4 - Análise comparativa das emissões de CO₂/tonelada de cimento de diversos países e regiões (WBCSD-CSI, 2009)



Observa-se claramente uma redução do teor de emissões ao longo dos anos, porém a maior parte dos países ainda mantém elevados níveis de emissão e que no ano de 2013 a maioria das regiões citadas não havia atendido o patamar de excelência conforme representação por linha pontilhada. No entanto, é possível verificar o desempenho e superioridade da América do Sul na redução das emissões provenientes dos processos produtivos de cimento, com grande destaque para o Brasil.

Para que a redução no impacto ambiental global seja significativa, é necessário que as emissões de CO₂ sejam reduzidas nas indústrias cimenteiras de todo o mundo.

Os esforços atuais são inúmeros na tentativa de reduzir as emissões de GEE associadas à produção de cimento. Como exemplo, temos o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) que lançou a Cement Sustainability Initiative (CSI), uma iniciativa que reúne as 23 maiores empresas de cimento do mundo, todas concentradas no objetivo de reduzir a emissão de CO₂ na produção de cimento (WBCSD, 2012).

O cimento é um material de construção onipresente nos países em desenvolvimento e desenvolvido devido à sua flexibilidade de produção e uso. Apesar de ser um material relativamente sustentável, as grandes quantidades de cimento produzido, o torna um dos maiores contribuintes para as emissões de CO₂ (BISHNOI, 2017).

O cimento é o material mais produzido no mundo. O crescimento populacional nos países em desenvolvimento necessita de uma crescente infraestrutura. Devido a esta situação, a indústria de cimento deve encontrar o melhor para aumentar a produção de cimento e sem aumentar o impacto ambiental negativo. Uma solução promissora foi encontrada no uso de materiais cimentícios adicionais (SCM), estes materiais são usados para substituir o clínquer no cimento devido à sua reatividade pozolânica. (S. SANCHEZ BERRIEL et al, 2016)

Para que as emissões de CO₂ sejam reduzidas de forma significativa, é necessária a implantação de medidas mitigadoras no processo produtivo do cimento, efetuadas a partir de inovações tecnológicas.

2.3 MEDIDAS MITIGADORAS PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

Diversos estudos focados no potencial de sustentabilidade da indústria cimenteira têm obtidos resultados semelhantes quanto à aplicação de medidas mais eficazes para reduzir consideravelmente as emissões de dióxido de carbono na atmosfera (IEA, WBCSD, 2009). De acordo com o IEA (2009) as quatro principais medidas mitigadoras são:

- Captura e armazenamento de carbono;
- Eficiência energética;
- Utilização de combustíveis alternativos
- Substituição do clínquer.

2.3.1 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO

De acordo com Cembureau (2013), no que diz respeito à eficiência, os resultados iniciais desta medida mitigadora mostram que com as tecnologias atuais disponíveis é possível capturar até 90% do CO₂ emitido na indústria, contribuindo de forma ímpar na redução dos índices de emissão de gás carbônico. Diante do grande potencial sustentável, se torna imprescindível a continuidade de estudos que possibilitem a implementação desta tecnologia, no entanto, a captação de carbono enfrenta desafios cruciais que ameaçam sua competitividade.

Se a captura de uma parte substancial das emissões de CO₂ é tecnicamente possível, ainda há que resolver a questão do que fazer com o CO₂ que foi capturado. Três cenários possíveis estão previstos: utilização de captura de carbono (CCU), valorização de captura de carbono e captura e armazenamento de carbono. Além destes fatos, tem a questão do custo para essa captação. A indústria de cimento aumentaria os custos de produção em 25 a 100%, incluído um aumento de energia de 50 a 120%, além da necessidade de grandes mudanças e modernização em suas plantas industriais (CEMBUREAU, 2013).

2.3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em função do consumo energético está associado às principais etapas produtivas do cimento, o consumo específico de energia é um indicador imprescindível para avaliação da eficiência de uma fábrica, e conseqüentemente do seu desempenho ambiental (MADLOOL et al., 2013). No entanto, a eficiência energética das indústrias cimenteiras depende de diversos fatores, associados principalmente ao tipo de processo utilizado na fabricação do cimento, e aos equipamentos empregados na planta industrial (LINS, 2017).

De acordo com MADLOOL et al., (2013), para redução do consumo energético, seria necessário à modernização das plantas industriais, como por exemplo, a utilização de sistemas de transporte mais eficientes das matérias-primas, através de dutos substituindo os processos pneumáticos, a utilização de moinhos de rolo em substituição aos moinhos de bola, implementação de separadores de alta eficiência, a utilização de refratários isolantes mais eficientes para evitar a perda de calor, dentre outras inovações tecnológicas.

Uma medida promissora para o aumento da eficiência energética, e conseqüente redução da emissão de dióxido de carbono, é a recuperação de calor proveniente dos processos de aquecimento que ocorrem na indústria, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica (BENHELAL et al. 2013).

Esta medida possibilitaria a minimização destas emissões porem a dificuldade ocorre principalmente em função da questão econômica, relacionada ao alto investimento de capital para a adoção de novos equipamentos e instalações, além da complexidade que envolve a paralisação do funcionamento das fábricas de cimento para a instalação de novas tecnologias (BENHELAL et al. 2013).

2.3.3 UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

A demanda mundial por cimento e concreto aumentou exponencialmente nos últimos vinte anos, resultado da combinação de fortes tendências em curso, como o crescimento da população e a necessidade crescente de infraestrutura e moradia. Conseqüentemente, esta demanda foi satisfeita pela expansão das cimenteiras, aumentando a extração de matérias-primas, aumentando consumo de energia fóssil e impacto ambiental negativo. A indústria de cimento enfrentou pressões significativas e fez esforços para melhorar sua eficiência de produção (ISHAK e HASHIM, 2015), bem como o seu impacto ambiental (KAJASTE E HURME, 2016). Entre as principais melhorias, o desenvolvimento de processo de calcinação em vez de via úmida, e um aumento do uso de combustíveis alternativos reduziu drasticamente o consumo de energia associados a emissões de CO₂ na produção de cimento (DEJA et al. 2010; FEIZ *et al.* 2015).

A indústria cimentícia, entre diversas outras, tem capacidade de utilizar combustíveis a partir de variadas misturas, incluindo o uso de combustíveis fosseis, biomassas, resíduos de materiais e subprodutos industriais (CEMBUREAU, 2013)

De modo geral, esta medida mitigadora torna-se necessária que haja uma análise de viabilidade técnica e ambiental para utilização de determinados materiais. Além disso, a mudança na estrutura fabril terá dificuldades econômicas e de disponibilidade.

2.3.4 SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER

Conforme mencionado anteriormente, cerca de 60% das emissões totais de CO₂ são provenientes da etapa de descarbonatação no processo de fabricação do cimento, ou seja, da calcinação do carbonato de cálcio, que posteriormente dá origem ao clínquer. Em vista esta grande parcela de contribuição na redução da emissão de gás carbônico, a redução da proporção clínquer/cimento se torna fundamental para que o processo produtivo tenha seu impacto ambiental minimizado.

Para que ocorra a redução na quantidade de clínquer utilizado na fabricação do cimento, sem que haja prejuízo às características de resistência e durabilidade, faz-se necessária a utilização de outros materiais, de modo que estes possam contribuir com a manutenção ou melhora das principais propriedades do cimento Portland comum. Ou seja, as chamadas

adições minerais em substituição à parte do cimento irão reduzir a relação clínquer/cimento (LINS, 2017).

Materiais cimentícios suplementares já são comumente adicionados ao cimento introduzidos em sua composição, constituindo os cimentos com adições. Além de trazerem melhorias na qualidade dos cimentos, as adições permitiram a obtenção de melhor desempenho e redução do fator de clínquer no cimento. De acordo com Scrivener (2014), dentre os principais materiais adicionados ao cimento, destacam-se a escória de alto-forno e a cinza volante, que apresentam excelente desempenho. Porém, a disponibilidade destes produtos não é bem distribuída em termos geográficos e o montante produzido é muito menor do que a produção de cimento mundial nos próximos anos.

O uso destas adições minerais traz grande benefício à sociedade, por dar um destino a esses resíduos ou subprodutos e, principalmente, por reduzir o consumo de energia e poluição do ar, gerados pela produção do cimento, ao substituir grande parte deste produto pelas adições.

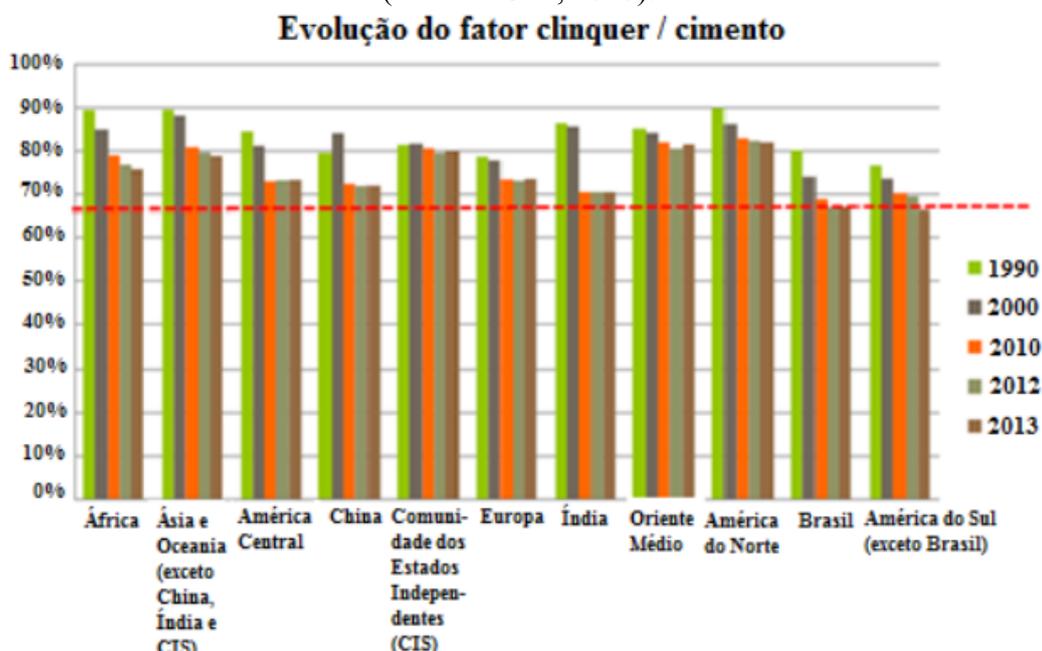
De forma geral, as adições minerais são compostas por material inorgânico, de finura geralmente menor ou igual a do cimento (DUART, 2008). E estas adições podem ser classificadas em dois grupos, em função de sua ação físico-química:

- Adições minerais quimicamente ativas ou reativas, estas se subdividem em cimentantes e pozolânicas, sendo as cimentantes aquelas que necessitam apenas de água para realizar seu processo de hidratação, além disso, podem ter suas reações aceleradas na presença de hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Exemplo de adição mineral cimentante: escória de alto-forno e as pozolânicas são materiais siliciosos ou sílico-aluminoso que por si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de águas, reage quimicamente com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Devido a esse consumo de hidróxido de cálcio, ocorre a formação de produtos eficientes no preenchimento de espaços capilares da pasta de cimento, produzindo melhorias na resistência mecânica e impermeabilização do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2014). São exemplos típicos de adições minerais pozolânicas: cinzas vulcânicas, argila calcinada, cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim.

- Adições quimicamente inativas ou inertes são definidas por Bauer (1995) como sendo um agregado inerte com graduação de até 0,075mm (ou 75µm). Em geral, são materiais obtidos por decantação nos tanques de instalações de lavagem de britas de pedreiras e possuem granulometria próxima ou mais fina que o cimento Portland. As adições inertes são compostas por filer, sendo responsável pelo refinamento dos poros em materiais cimentícios através do chamado efeito filer, no entanto, quando adicionado juntamente com outras adições minerais específicas, o filer calcário pode participar de reações químicas, que contribuem com a resistência mecânica do material formado (SCRIVENER, 2014).

Diversos países do mundo têm adotado a utilização destas adições alternativas. Na Figura 5 é possível analisar a taxa de clínquer/cimento de acordo com regiões, destacando países como China, Índia e Brasil. Observa-se um desempenho positivo da produção brasileira, mantendo a relação clínquer/cimento dentro da faixa ideal de aproximadamente 68%, representada pela linha tracejada vermelha (LINS, 2017).

Figura 5 - Evolução do fator clínquer/cimento de 1990 até 2013 em diferentes regiões (BATTAGIN, 2016).



O Brasil é um dos países com melhor desempenho ambiental na produção de cimento Portland. As adições minerais são consumidas pela indústria cimenteira, sendo utilizadas na fabricação de diversos cimentos, tais como: cimento Portland composto com adição de

escoria (CPII-E), Cimento Portland composto com adição de pozolana (CP II-Z), cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI).

Outra adição como a cinza da casca de arroz vem sendo analisadas, porém, a quantidade disponível é relativamente pequena e localizada em pequenas regiões. Já as cinzas vulcânicas, além de serem regionais muitas vezes pouco reativas e apresentam grande variação conforme a localização.

De acordo com SCRIVENER (2014), o único material disponível e em quantidade abundante em todo o planeta, e tecnicamente capaz de suprir a instituições mais usadas atualmente, é a argila calcinada.

Diamidot et al (2011), Antoni (2012), Scrivener (2014), Vizcaíno Andrés *et al* (2015), S Sanchez et al. (2016), Lins (2017), determinam, que quando adicionado filer calcário ao cimento contendo argila calcinada, ocorre uma reação sinérgica entre as adições, capaz de formar um produto hidratado denominado carboaluminato. Este produto preenche os vazios existentes, corroborando assim com o desempenho e características mecânicas do produto final.

Esta mistura composta por cimento, filer calcário e argila calcinada, mistura ternária, denominada de LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) contempla uma nova possibilidade para um cimento técnico e sustentável, minimizando o problema da insuficiência de outras adições. Tem sido considerada uma promissora medida mitigadora na redução da relação clínquer/cimento, conseqüentemente a produção de cimento com uma eficaz redução da emissão de CO₂.

3 CIMENTOS COM MISTURAS TERNÁRIAS

Cimentos Portland produzidos em quase todo mundo já utilizam adições minerais para reduzir a quantidade de clínquer em sua composição. Dentre os principais materiais adicionados ao cimento destacam-se a escória de alto-forno e a cinza volante, que apresentam excelente desempenho quando incorporadas ao cimento, porém, a disponibilidade destes produtos não é bem distribuída em termos geográficos e o montante produzido é muito menor do que a produção de cimento mundial (ANTONI *et.al*, 2012).

As escórias podem substituir até 70% de clínquer, mas a quantidade disponível de escória é de apenas 5% da quantidade de clínquer produzida. Portanto, não é a escória uma alternativa global para o cimento.

Pesquisas têm sido realizadas em busca de novos cimentos que utilizem outras adições de modo que estas apresentem altas disponibilidades por período duradouro, e garantam ao cimento propriedades mecânicas e durabilidade (LINS 2017).

Diante das necessidades citadas, diversos países do mundo vêm ganhando destaque nos últimos anos com estudos e apresentação de resultados satisfatórios a partir da substituição de parte do cimento por fíler calcário e argila calcinada; mistura ternária denominada” cimento LC³.

3.1 O CIMENTO LC³.

Desde 2005, um esforço colaborativo entre a *Ecole Polytechnique Federal de Lausanne* (EPFL), na Suíça, e a *Universidad Central de las Villas*, em Cuba, levantou a possibilidade do desenvolvimento de um cimento baseado na sinergia entre a argila calcinada e o material carbonático finamente moído, que permite a substituição em cerca de 50% o teor de clínquer (MARTIRENA e SCRIVENER, 2012).

A busca por alternativas levou à tecnologia inovadora para desenvolvimento de um cimento de calcário e argila calcinada (LC³), um material alternativo à indústria de construção civil, que diminui as emissões de CO₂ e o consumo de energia, durante o processo de produção.

Pesquisadores como Antoni (2013), Scrivener (2014), Bishnoi e al (2014), Lins (2017), relatam uma ação potencializada quando se adiciona, simultaneamente, argila calcinada e filer calcário ao cimento, para formação do cimento (LC³).

Vários países do mundo, como China, Índia, Cuba e Brasil, vêm tendo resultados positivos na resistência mecânica e na durabilidade, a partir da utilização dessa mistura ternária (cimento, argila calcinada e filer calcário), o denominado cimento LC³, estes resultados obtidos, são associados principalmente à reação sinérgica que ocorre entre as adições.

3.1.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO LC³

No cimento LC³, a hidratação dos silicatos C₃S e C₂S ocorrem de maneira semelhante à dos demais cimentos Portland, formando os produtos de hidratação C-S-H e hidróxido de cálcio. Além disso, ocorre a formação de C-S-H secundário para o sistema cimentício, devido às reações pozolânicas da argila calcinada e o hidróxido de cálcio disponível no sistema.

Nesta mistura ternária que compõe o LC³, devido à sinergia entre as adições, ocorre a potencialização da reação entre o filer calcário e a argila calcinada, que pode contribuir com a resistência mecânica e a durabilidade do material. Isso ocorre a partir da formação do carboaluminato hidratado, que propicia o preenchimento de vazios no sistema cimentício, e reduz o tamanho dos poros do material. Em função da formação do carboaluminato, também ocorre a estabilização da etringita e, conseqüentemente, redução do mossulfoaluminato.

A formação do carboaluminato no cimento LC³ tem sua cinética de hidratação semelhante àquela que ocorre no caso de cimentos com adição exclusiva de filer calcário. No entanto, neste último caso, a principal fonte de alumina é o C₃A, o qual tem o seu quantitativo limitado na composição dos cimentos Portland por normas técnicas, que visam à redução das manifestações patológicas por ataque de sulfatos, restringindo assim a formação do novo composto (LINS, 2017).

No cimento LC³, a formação dos novos produtos de hidratação ocorre pela reação do aluminato, proveniente da argila calcinada, com o carbonato de cálcio, principal

componente do filer calcário na presença do hidróxido de cálcio, formando o carboaluminato hidratado, conforme mostrado na Equação 3.1 (SCRIVENER. 2014).



Onde:

A: aluminato

Cc: carbonato de cálcio (filer calcário)

CH: hidróxido de cálcio

C3A. Cc.H12: carboaluminato hidratado

Antoni et al. (2012) analisou por meio de ensaios de difração de raio-x, quatro pastas com diferentes composições de cimento para verificar a formação dos novos compostos provenientes das reações sinérgicas entre as adições, apresentado na Tabela 3. É possível verificar o difratômetro gerado a partir das argamassas expostas.

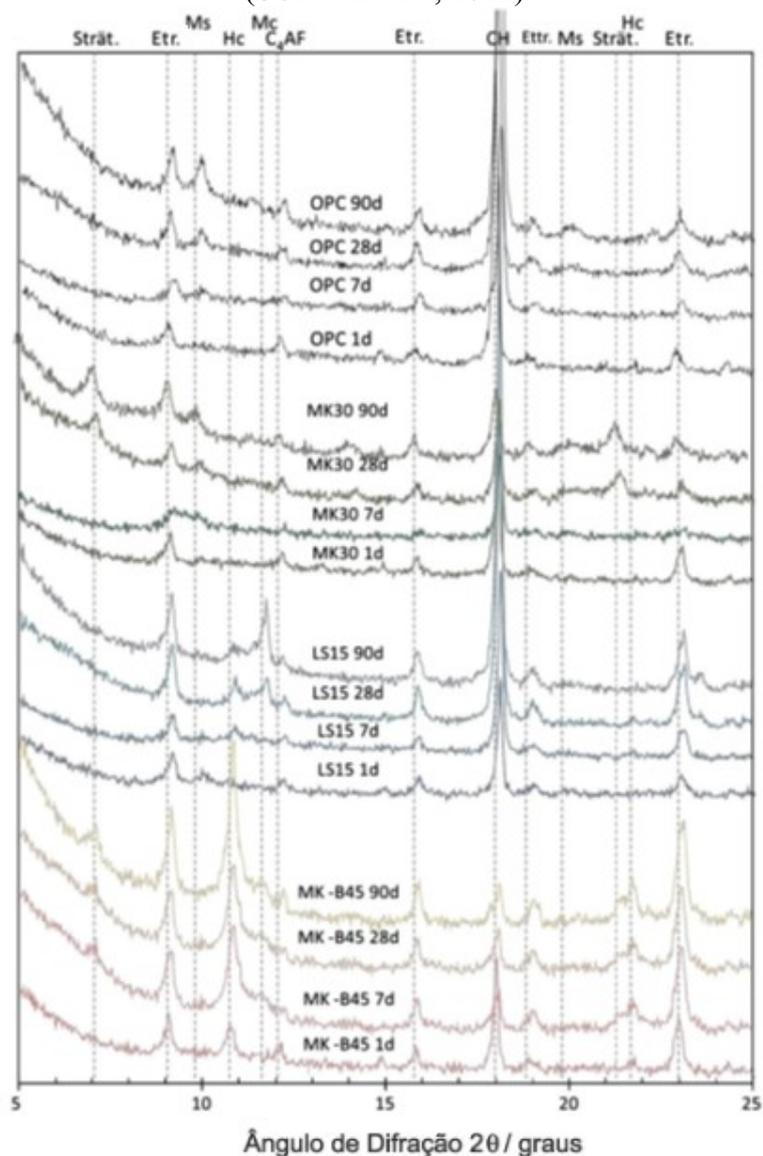
Tabela 3 - Composição das misturas para análise de Difractometria de raios-X (Antoni et al, 2012).

Argamassa	Cimento (%)	Filer (%)	Metacaulim (%)	Quartzo (%)
OPC	100	0	0	0
MK30	70	0	30	0
LS15	85	15	0	0
B45	55	15	30	0

Na difratometria, foi avaliado a formação de compostos nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias. Na mistura de referência foi utilizado o cimento padrão (OPC), sem adições minerais, onde se observa a formação de etringita, monossulfoaluminato, e portlandita em quantidade crescente. Já na mistura que se utilizou 30% de substituição por metacaulim, nota-se a formação de etringita, estratilingita, e monossulfoaluminato, no entanto, observa-se uma redução no quantitativo de portlandita, em virtude das reações pozolânicas provocadas pela presença da adição mineral.

No sistema quando o filer calcário passa a incorporar a composição da pasta, a partir da mistura identificada como LS15, é possível identificar, formação dos compostos hemicarboaluminato e monocarboaluminato, sendo o primeiro identificado aos 7 dias, e o segundo a partir dos 28 dias, quando passa a substituir o monossulfoaluminato anteriormente formado.

Figura 6 - Difratometria de raios-X das 4 pastas realizadas, nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias. (SCRIVENER, 2012)



Já na mistura MKB45 (cimento LC³), percebe-se a formação da etringita de forma mais acentuada. Além disso, é verificado um crescimento expressivo de hemicarboaluminato a partir da idade de 1 dia. Também é possível observar a formação do composto hemicarboaluminato mais acentuado a partir dos 28 dias.

Para aplicação do cimento LC³ em escalas de produção, é tão importante verificar a formação de novos compostos durante o processo de hidratação, como também, avaliar a contribuição destes nas propriedades do produto final.

3.1.2 DESEMPENHO MECÂNICO DO CIMENTO LC³

Em vários países do mundo estão sendo desenvolvidos estudos com a finalidade de demonstrar o desempenho mecânico de argamassas e concretos produzidos a partir da utilização destas composições de cimentos com argila calcinada e filer calcários (LC³)

O potencial para misturas ternárias de calcário, argila calcinada e clínquer, o LC³, já consegue um bom desempenho com redução a 50% ou menos o conteúdo de clínquer. Como tem sido demonstrado na pesquisa colaborativa entre o Laboratório de Materiais de Construção (LMC) Na EPFL, na Suíça e no CIDEM em Cuba.

O potencial desta mistura ternária de clínquer, filer calcário e argila calcinada denominada de LC³ foi demonstrado por Antoni et al. (2012) onde em sua pesquisa realizou diversas misturas de argamassa, utilizando diferentes composições de LC³, a partir de variadas porcentagens de adição de filer calcário, metacaulim e quartzo, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição do aglomerante das argamassas (ANTONI *et al.*, 2012).

Argamassa	Cimento (%)	Filer (%)	Metacaulim (%)
REFERÊNCIA	100	0	0
LS 15	85	15	0
MK30	70	0	30
MK-B15	85	5	10
MK-B30	70	10	20
MK-B45	55	15	30
MK-B60	40	20	40

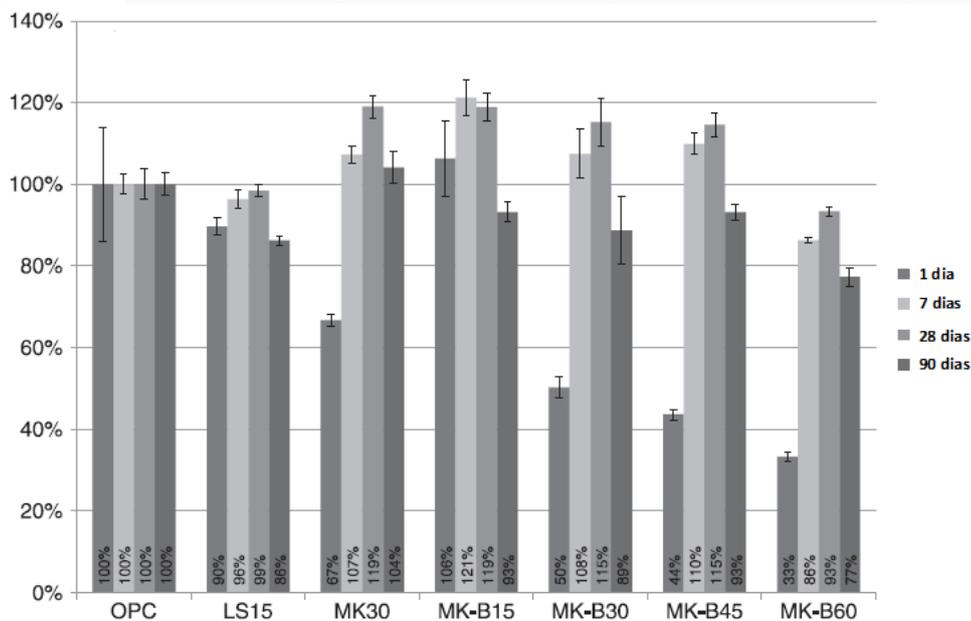
As substituições combinadas contendo filer calcário e metacaulim foram feitas em um nível total de substituição de 15%, 30%, 45% e 60%. Para efeito comparação, Antoni optou por fazer substituições com apenas uma adição, para tanto, fez duas argamassas, uma utilizando 15% de filer calcário e outra contendo 30% metacaulim. Para verificar os efeitos reativos das adições tanto quando usadas apenas uma adição; o filer calcário e metacaulim ou quando a substituição combinada das duas adições foi realizada quatro misturas utilizando com adição o quartzo, para tanto se utilizaram os teores de 15%, 30%, 45% e 60%, para fornecer uma comparação com material de enchimento inerte.

Antoni *et al.*(2012) para realização das misturas ternárias combinadas, utilizou a proporção 2:1 (metacaulim: filer calcário). Os pesquisadores optaram por esta relação baseados em

um modelo termodinâmico de Diamidot et al.(2011) cuja a melhor relação encontrada foi a de 2:1 utilizando estas duas adições.

Na Figura 7 são apresentados os resultados de índices de desempenho da pesquisa de Antoni et al. (2012) que utilizaram a relação 2:1.

Figura 7 - Resistência à compressão das misturas (Fonte: ANTONI *et al.*, 2012).

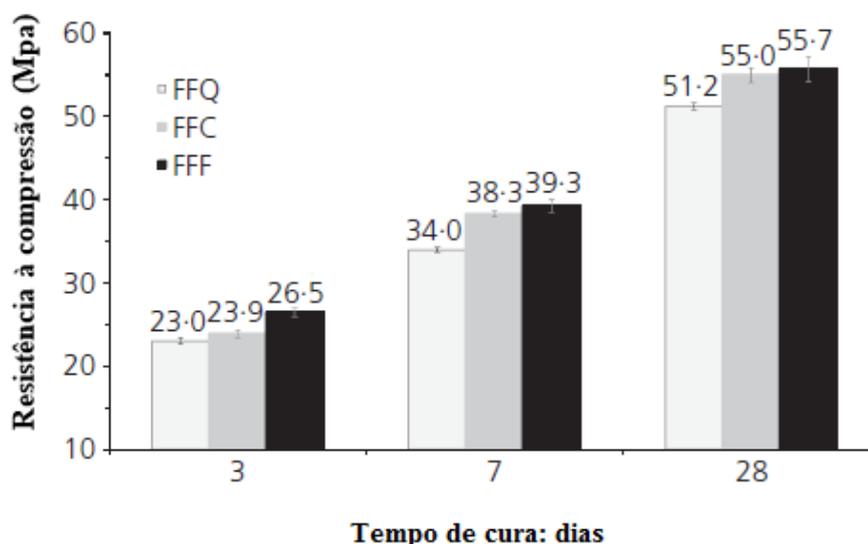


Pela Figura 3-2, observou-se que a mistura MK-B15 (5% de filer calcário e 10% de metacaulim) obteve resistências maiores nas idades de 1, 7 e 28, quando comparados à sem adição (OPC). As misturas MK-B30 (10% de filer calcário e 20% de metacaulim) e MK-B45 (15% de filer calcário e 30% de metacaulim) apresentaram resistências maiores aos 7 e 28 dias em relação à mistura de referência – OPC. A mistura MK-B60 (20% de filer calcário e 40% de metacaulim) obteve todos os resultados inferiores à referência, no entanto aos 28 dias, apresentou resultado expressivo; 93% do valor da resistência à compressão, comparada à mistura de referência com 100% de cimento portland.

Vizcaíno Andrés et al. (2015), neste estudo, realizaram duas misturas com cimento LC³, na composição de 55% de clínquer, 30% de argila calcinada e 15% de filer calcário, apenas variando a finura do material carbonático: uma com filer mais fino (FFF), e outro com filer mais grosso, denominado (FFC). Das misturas citadas, foi analisada, outra, onde se substituiu o teor de filer calcário por quartzo, ou seja, material inerte. O objetivo deste estudo foi verificar a sinergia dos materiais, a partir de seus resultados físicos, optaram por analisar a contribuição mecânica do carboaluminato formado, além disso, uma terceira

mistura foi analisada, e nesta substituiu-se o teor de filer calcário por quartzo, ou seja, material inerte. A partir de ensaios de resistência à compressão foram obtidos os valores expressos na Figura 8

Figura 8 - Resistência à compressão das argamassas produzidas (VIZCAÍNO ANDRÉS et al., 2015).

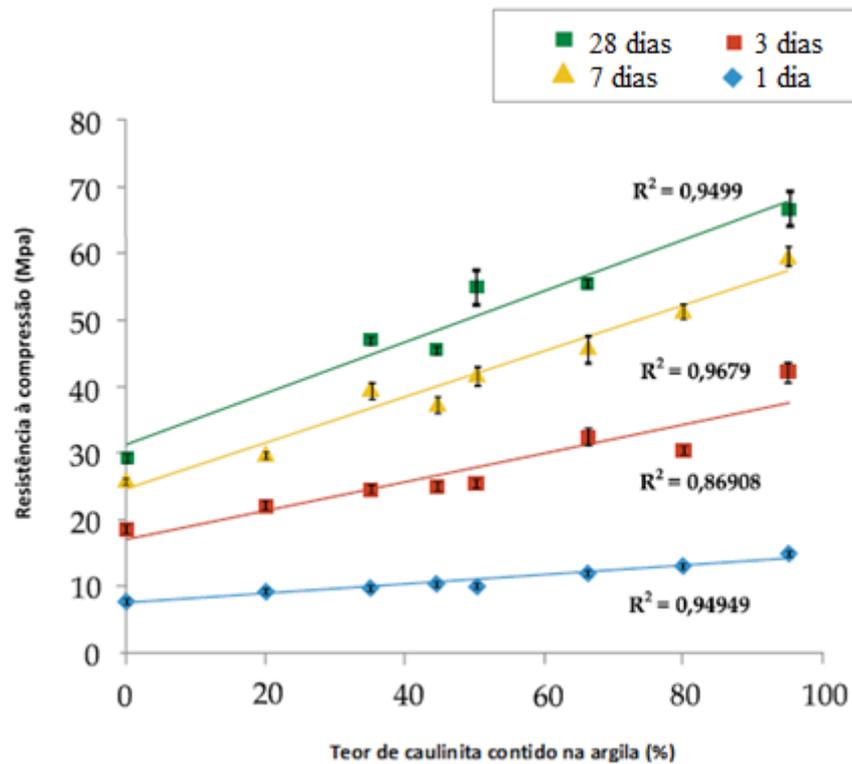


Observa-se no estudo Vizcaíno Andrés et al. (2015), que os cimentos formados a partir da mistura de clínquer, argila calcinada e filer calcário obtiveram resultados expressivamente melhores que aquele em que o quartzo passou a compor a mistura ternária, juntamente à argila calcinada e o clínquer. Confirmando assim, melhorias de propriedades mecânicas em função da reação sinérgica que ocorre entre a argila calcinada e o filer calcário.

A proporção de substituição de cada adição é muito importante para o desempenho mecânico do LC³, porém, a sua qualidade, também é de suma importância para o bom desempenho do produto final, Segundo Scrivener (2014) a composição da argila utilizada é o principal fator para o bom desempenho do LC³, enquanto que o tipo de calcário pouco influencia resistência das misturas, podendo até mesmo, ser utilizado um calcário dolomítico. A finura das adições minerais tem maior importância no desempenho.

As argilas com maiores teores de caulinita ocorrem em abundância em solos que se formaram a partir do desgaste químico de rochas em climas quentes e úmidos. O conteúdo de caulinita da argila é o principal parâmetro determinante para o desenvolvimento da resistência das misturas (SCRIVENER 2014), conforme Figura 9.

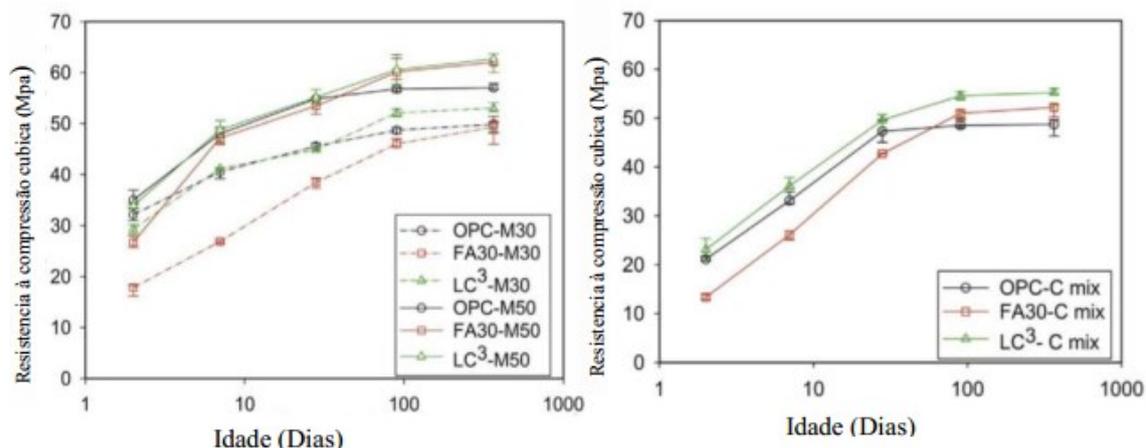
Figura 9 - Resistência a compressão versus teor de caulinita na argila (SCRIVENER, 2014).



De acordo com Figura 9, é possível notar que à medida que aumentou o teor de caulinita na argila, ocorreu um aumento da resistência à compressão. Este comportamento é apresentado em todas as idades. Observou-se também que este aumento é mais expressivo em idades mais avançadas.

Dhandapani et al (2018) estudou a resistência à compressão de cimento LC³ em concretos. Os autores compararam o cimento LC³ (clínquer: argila calcinada: calcário: gesso; 50: 31: 15: 4%, respectivamente) com outros dois tipos de cimento Portland, o OPC sem adições e o FA30 que possuía 70% OPC e 30% de cinza volante. Para analisar o desempenho mecânico dos cimentos, o autor realizou 3 traços de concreto para cada tipo de cimento. Dois concretos M30 e M50 foram dosados para atingirem 30 MPa e 50MPa aos 28 dias, respectivamente. Já o terceiro traço (C mix) foi dosado com a mesma relação água cimento e mesmo teor de ligante. A Figura 10 mostra os resultados de resistência à compressão.

Figura 10 - Resistência à compressão dos concretos (DHANDAPANI et al., 2018)



Observa-se que os concretos feitos com LC^3 mostram características de desenvolvimento de resistência comparáveis com OPC e melhor desenvolvimento de resistência do que o FA30 em todas as misturas de concreto. E que em idades avançadas, maiores resistências à compressão que os outros cimentos nas 3 dosagens realizadas. Segundo o autor, os resultados do traço C-mix exibem as melhores características de hidratação do cimento LC^3 . Esses resultados mostram que concretos com cimento LC^3 , utilizando a mesma proporção de material, podem alcançar resultados de resistência à compressão superiores a concreto dosados com os cimentos OPC e FA30 (DHANDAPANI et al., 2018).

3.1.3 DURABILIDADE DO LC^3

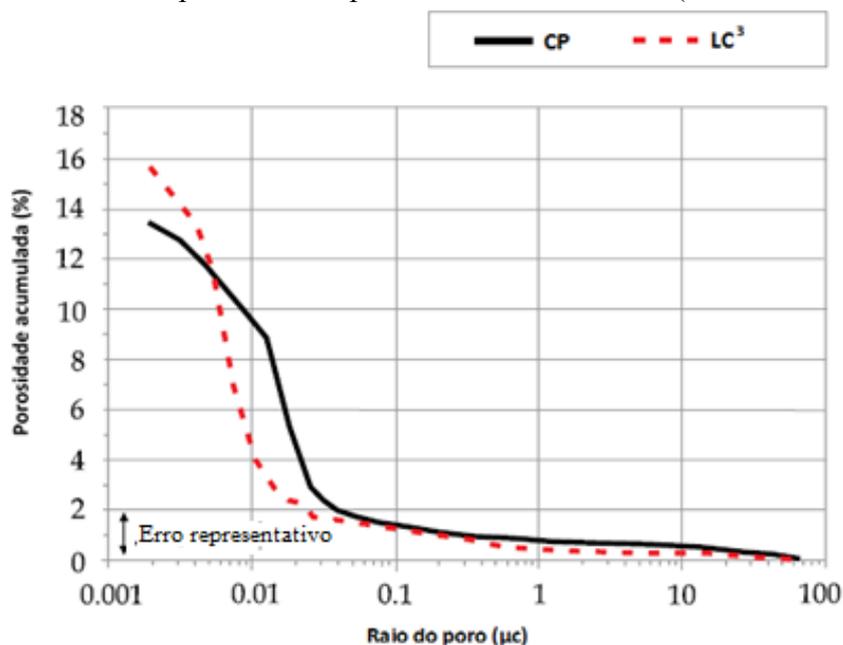
Tendo em vista o LC^3 ser um cimento com tecnologia recente, Scrivener (2014) acredita em alguns indícios relevantes, e fortalece a ideia de que o LC^3 irá apresentar boa durabilidade. Estes indícios baseiam-se principalmente na semelhança com o cimento Portland. As fases formadas pelos dois tipos de cimento são semelhantes, além do LC^3 formar fases como monocarboaluminato, hemicarboaluminato e etringita formado pelo cimento Portland usado há anos.

Scrivener (2014), analisou a durabilidade utilizando-se de duas técnicas: ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e resistência à penetração de íons cloreto.

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, conforme Figura 11, é possível observar que, com o uso do LC^3 , a porosidade total é ligeiramente superior, porém, há uma

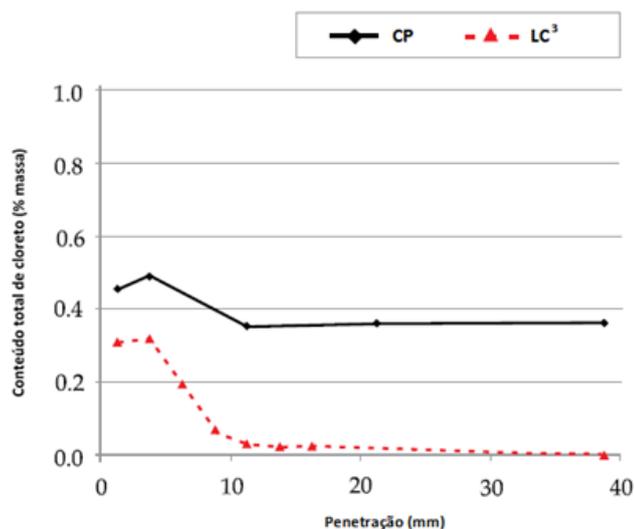
diminuição do tamanho dos poros, que segundo a pesquisadora, há um refinamento da microestrutura que pode ser relacionado também a uma maior resistência mecânica.

Figura 11 - Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (SCRIVENER, 2014)



Na análise de resistência à penetração de íons cloreto, conforme Figura 12, observa-se que a penetração de íons cloreto ocorreu de forma muito menos agressiva quando se utilizou o LC3. A concentração de cloretos diluindo com a profundidade, tendendo a 0% nas camadas mais profundas.

Figura 12 - Ensaio de penetração a íons cloreto (SCRIVENER, 2014)



3.1.4 O CIMENTO LC³ NOS DIAS ATUAIS

Na Índia, estudo de Maity, Bishnoi e Kumar (2015) avaliaram o ganho de sustentabilidade da utilização do cimento LC³ a partir da construção de um edifício residência, onde apontou uma redução de 0,5 kg de CO₂ por m² de área construída, e uma economia deste novo cimento em relação ao cimento Portland comum, podendo chegar a 40%, dependendo do custo de transporte da argila.

Em Cuba foi aprovada em 2016 pela Organização Nacional de Normalização a nova norma para a produção de cimento LC³. Esta normalização abrange a fabricação para o mercado de um cimento no qual 50% do clínquer pode ser substituído por calcário e argila calcinada, desde que este atenda alguns critérios de desempenho especificados. Com isto a fabricação desse cimento poderá reduzir de 20% a 30% a emissão de CO₂ em relação às emissões geradas pelo cimento Portland anterior.

Berriel et al. (2015) no estudo “A eficiência do cimento LC³”, avaliaram a sustentabilidade do novo produto a partir da comparação do ciclo de vida de três cimentos produzidos em Cuba. Um cimento Portland comum, um cimento pozolânico e o LC³, fabricado a partir de 45% de substituição do clínquer por argila calcinada e filer calcário. Os resultados mostraram uma redução de cerca de 30% das emissões de CO₂ do cimento LC³, em relação ao cimento Portland comum. Já com relação ao cimento pozolânico utilizado na região, o desempenho do LC³ no que diz respeito à sustentabilidade, apresentou uma redução de apenas 13% de emissões de CO₂ em relação ao cimento de referência.

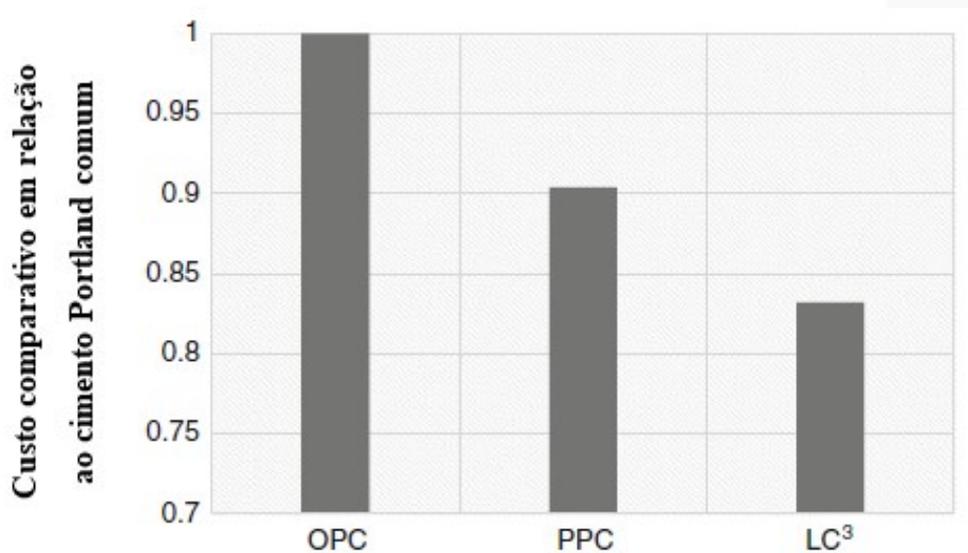
Estudo realizado considerando a produção deste novo cimento em escala industrial aponta que a produção em massa do LC³ pode reduzir em até 25% as emissões de CO₂ resultantes das etapas produtivas do material (VISCAÍNO *et al*, 2015).

Na Índia, a produção experimental do LC³ foi concluída em janeiro de 2015. Hoje, dois edifícios construídos, são prova da tecnologia: a embaixada da Suíça em Nova Delhi e o Taragam Orchha, próximo a Jhanis, na Índia central, que abriga um escritório da Development Alternatives (DA) uma das mais antigas organizações sociais da Índia com foco em desenvolvimento sustentável. O DA colaborou em um projeto de desenvolvimento da tecnologia LC³ com a École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), localizada na Suíça., que conduziu a pesquisa.

O cimento LC³ está liderando os caminhos contemporâneos para enfrentar desafios ambientais e escassez de recursos e também apresenta pontos positivos relacionado à sua fabricação. Uma das vantagens é a semelhança entre as plantas industriais já utilizadas para a produção de cimento usuais e as para produção do LC³. Este fato leva a uma grande agilidade, bem como, um baixo custo na implantação do novo produto.

No estudo de Joseph, Joseph e Bishnoi (2015), “Viabilidade econômica da produção do LC³ na Índia”, foi realizado uma comparação do custo de produção de um cimento Portland comum (OPC), um cimento pozolânico (PPC), composto por 60% de clínquer, 35 % de cinza volante e 5% de gipsita e o cimento LC³ com teores de 30% de argila calcinada e 15% de filer, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Comparação de custos de fabricação (JOSEPH, JOSEPH E BISHNOI, 2015)

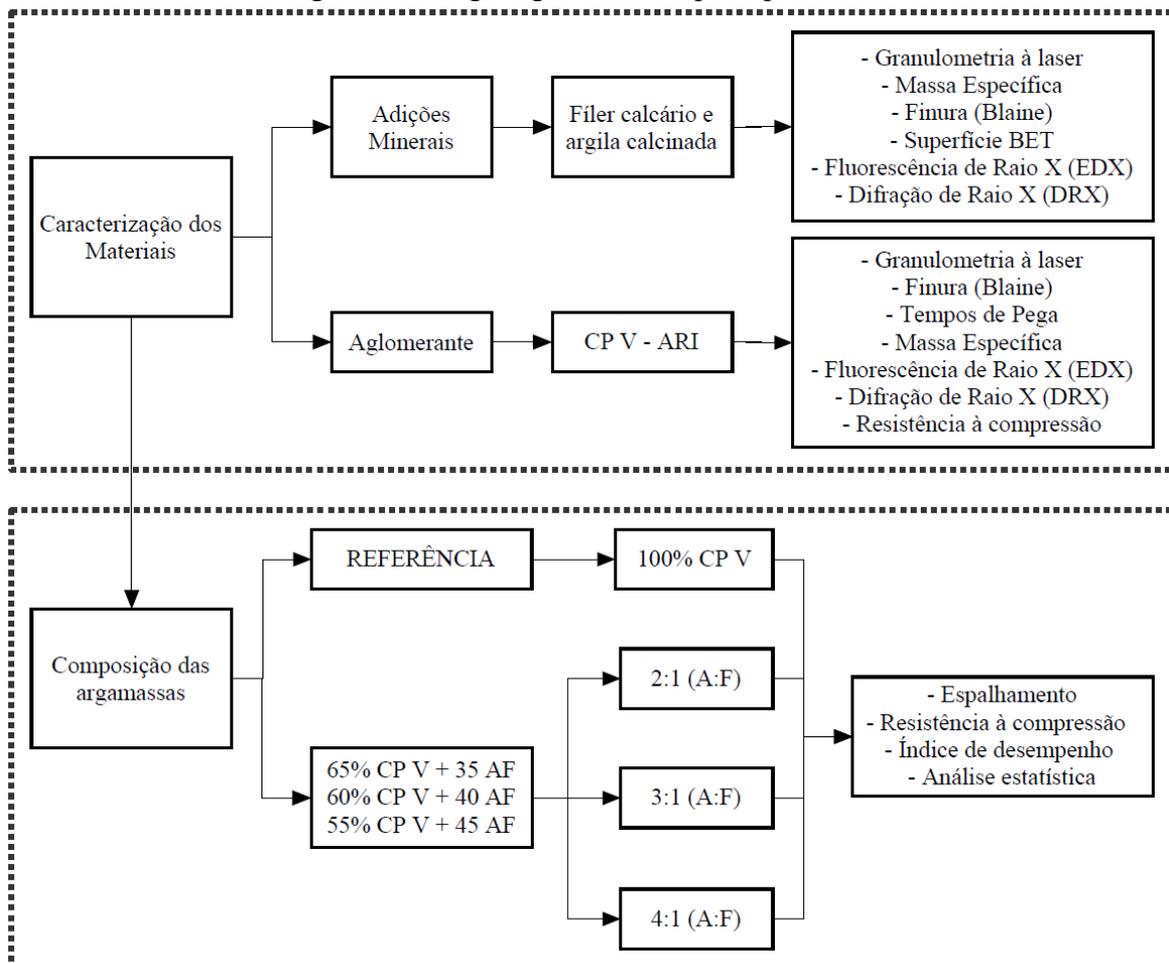


Observa-se uma vantagem econômica do cimento LC³ em relação aos demais, isso ocorre principalmente devido a dois fatores, baixo teor de clínquer e menor necessidade de combustível e eletricidade para calcinação de argila, em comparação com a produção de clínquer (JOSEPH, JOSEPH e BISHNOI, 2015). No entanto, vale ressaltar que a economia e a viabilidade da produção do LC³ são afetadas diretamente pela disponibilidade das adições minerais presentes em cada região fabril.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta etapa da pesquisa tem por finalidade mostrar a realização do planejamento experimental, apresentando inicialmente a origem e coletas dos principais materiais que foram utilizados, seguido das técnicas realizadas para a sua caracterização. Posteriormente, foram apresentadas as composições das misturas e por último, os métodos de preparação e avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, conforme Figura 14.

Figura 14 - Organograma da etapa experimental



4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Para realização deste estudo foram produzidas argamassas compostas pelos seguintes materiais: CPV ARI prescrito na ABNT NBR 5753(2014), filer calcário, argila calcinada, areia normal brasileira, aditivo superplastificante e água.

4.1.1 CIMENTO PORTLAND

Neste estudo, diferentemente de alguns estudos de cimento LC3, optou-se em utilizar o cimento CPV ARI – ABNT 5733 (2014), por ser o cimento comercial utilizado no Brasil, com menor teor de adição e por consequência, maior teor de clínquer. Este cimento foi disponibilizado pela Ciplan–DF.

4.1.2 ADIÇÕES

Nesta pesquisa os materiais utilizados em substituição ao cimento foi o filer calcário e a argila calcinadas; ambos disponibilizados pela CIPLAN-DF.

4.1.3 AREIA

Para a realização das misturas foi utilizada areia normal brasileira, atendendo às especificações da NBR 7214 (2015). A areia normal é um material natural quartzoso extraído do Rio Tietê, produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em quatro frações granulométricas diferentes pré-estabelecidas para a execução de ensaio de resistência à compressão do cimento Portland, de acordo com a NBR 7215(1996). Parte da areia foi disponibilizado pela Ciplan–DF e a outra adquirida com recursos próprios.

4.1.4 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Para a realização das misturas foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato, tipo SP II de acordo com ABNT NBR 11768 (2011), O Tec flow 50N da marca (Grace Constrution & Packaging), este foi utilizado com a finalidade de manter o índice consistência de todas as argamassas dentro do limite estabelecido como padrão (200±10 mm).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS

Para a caracterização do filer calcário e da argila calcinada foi realizada os seguintes ensaios

a) Distribuição granulométrica a laser

A distribuição granulométrica é um ensaio capaz de caracterizar os materiais quanto ao tamanho e à distribuição de suas partículas. Os ensaios de granulometria a laser foram executados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (lacer) da UFRGS. Foi utilizado um Granulômetro CILAS 1180, que possibilitou a verificação da distribuição granulométrica de 0,04 a 2,5mm.

Figura 15 - Curva granulometria da argila calcinada

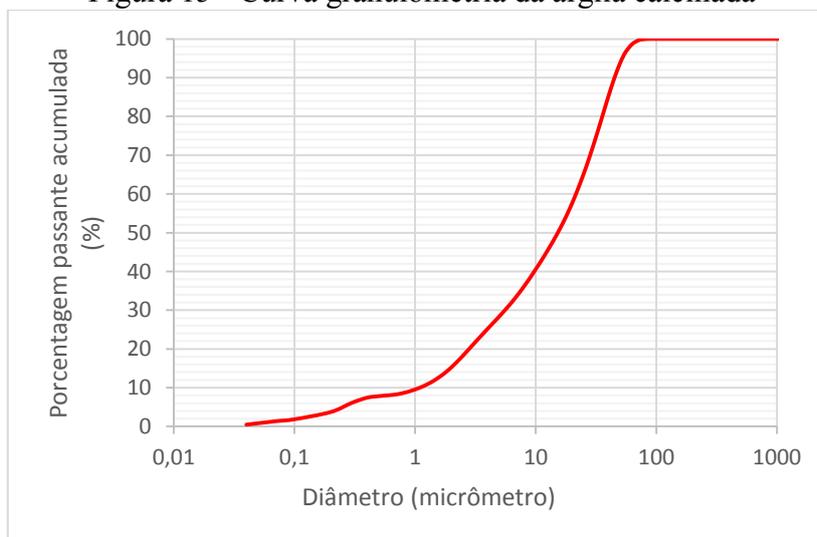
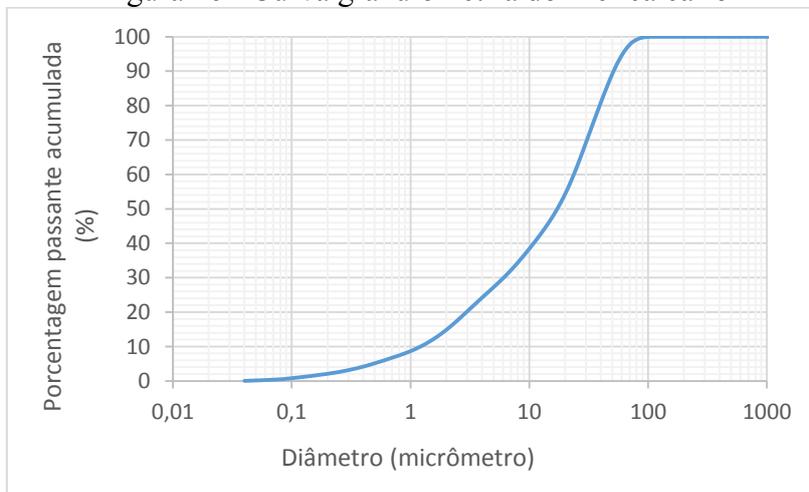


Figura 16 - Curva granulometria do filer calcário



Na Tabela 5, estão representados os diâmetros referentes à análise de 10% da quantidade total passante (D_{10}), seguido pelos quantitativos referentes à análise de 50% (D_{50}), e 90% (D_{90}) do material, e por fim, o valor do diâmetro médio obtido.

Tabela 5 - Diâmetros do material passante e diâmetro médio

Análise granulométrica	Argila calcinada	Filer calcário
Diâmetro a 10% (μm)	1,09	1,22
Diâmetro a 50% (μm)	15,26	17,19
Diâmetro a 90% (μm)	45,08	51,26
Diâmetro médio (μm)	19,61	22,00

De acordo com as curvas granulométricas das Figuras 15 e 16 e os valores obtidos na tabela 5, é possível observar que a argila calcinada apresenta finura muito próxima a do filer calcário.

A finura das adições minerais influencia de maneira relevante as características a serem analisadas no estado fresco. A partir da utilização de adições mais finas, a exigência de aditivo superplastificante pode ocorrer de maneira mais acentuada, a fim de que sejam obtidos índices de consistência semelhantes em diferentes argamassas. Além das características no estado fresco, de acordo com Vizcaíno Andrés *et al.* (2015), Dal Molin (2011), Lawrence, Cyr e Ringot (2003), dentre outros pesquisadores, a finura das adições poderá influenciar também no desempenho mecânico do produto final, principalmente em idades iniciais, em função dos efeitos de nucleação, que podem ser favorecidos a adições minerais de finuras mais elevadas.

b) Massa Específica

O ensaio baseia-se na determinação do volume real ocupado por determinada fração de material, a partir da utilização de um pentapicnômetro. Para a avaliação da massa específica, foi realizado o ensaio no Laboratório CONTROLE – DF.

Tabela 6 - Determinação da massa específica das adições minerais

Adição Mineral	Massa Específica (g/cm^3)
Argila Calcinada	2,64
Filer	2,73

Para que seja realizada a substituição para produção do cimento LC³, deve haver um ajuste em função das massas específicas de cada adição, para que, dessa forma, não haja uma imprecisão volumétrica do produto final.

c) Blaine

Para determinação da finura das adições optou-se por realizar o ensaio pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), NBR 16372 (2015). Os resultados constam na Tabela 7.

Tabela 7 - Determinação do Blaine das adições minerais

Adição Mineral	Blaine (m ² /kg)
Argila Calcinada	1460,0
Filer	441,5

De acordo com os resultados obtidos, observa-se uma maior área superficial da argila calcinada em relação ao filer calcário. Mesmo com tamanho das partículas muito próximas, no entanto, este fato provavelmente em função de diferentes morfologias.

d) Área específica (BET)

Para melhor avaliação da área superficial da argila calcinada realizou-se o ensaio pelo método de absorção BET. A análise foi realizada no Laboratório da Universidade do Rio Grande do sul.

Tabela 8 - Determinação da área da superfície

Adição Mineral	Área da superfície (m ² /g)
Argila Calcinada	20,872

e) Difractometria de raios-X

Para identificação dos principais compostos de cada uma das adições foi realizado o ensaio de difração de raios-X (DRX), o qual é capaz de identificar as fases cristalinas presentes, auxiliando também na verificação da amorficidade dos materiais, que está diretamente ligado à pozolanicidade das adições. O ensaio foi realizado Instituto de Geociências da UnB, e os parâmetros de medidas utilizados foram 2°, 80°2θ com passo angular de 0,05°2θ, tempo passo de 5° e potência de 35 kV/15mA. De acordo com os difratogramas

da argila calcinada, Figura 17, é possível observar picos cristalinos mais intensos de quartzo, caulinita e ilite, além de picos menos intensos de diferentes formas cristalinas de óxido de titânio. Já em relação ao filer calcário, Figura 18, é possível observar picos mais intensos de carbonato de cálcio e quartzo.

Figura 17 - Difratoograma da argila calcinada

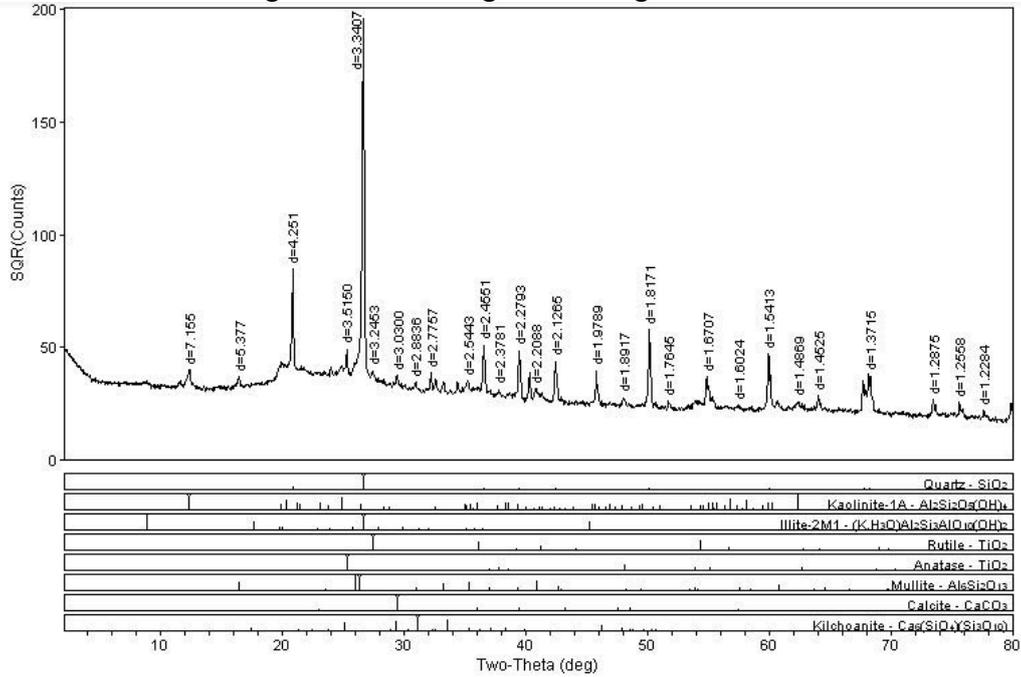
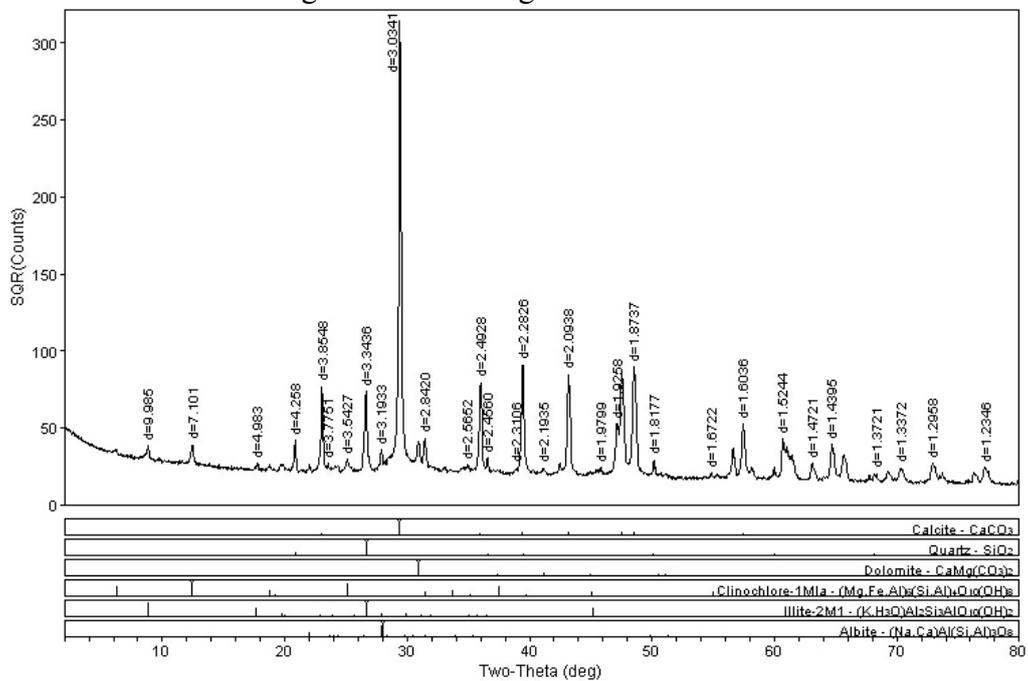


Figura 18 - Difratoograma do filer calcário



f) Fluorescência por Raios-X

Para realizar uma análise quantitativa dos elementos químicos constituintes dos materiais complementares, foi realizado o ensaio de fluorescência por raios-X através da dispersão de energia. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geocronologia, do Instituto de Geociências, e no Laboratório do Instituto de Química, na Universidade de Brasília. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química das adições minerais expressas em porcentagem

Óxidos	Argila Calcificada	Filer
SiO ₂	55,27	8,23
Al ₂ O ₃	35,89	1,5
CaO	2,56	49,1
Fe ₂ O ₃	2,08	0,58
TiO ₂	2,01	0,08
MgO	0,73	-
K ₂ O	0,49	9,43
SO ₃	0,48	-
BaO	0,36	-
MnO	-	0,02
P ₂ O ₅	-	0,08
SrO	-	-
Outros Óxidos	0,14	0,3
Perda ao fogo (%)	3,1	38,84

De acordo com os resultados obtidos é possível inferir que a argila calcificada está de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 12653 (2015). Os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, atendem à especificação mínima da norma, que estabelece que a soma desses óxidos deve ser igual ou superior a 70%. O teor de SO₃ também está dentro do limite máximo de 4,0%. Como também ao valor da perda ao fogo. O filer apresenta elevado teor de CaO, o que caracteriza grande quantidade de carbonato de cálcio.

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A caracterização do cimento foi realizada de acordo com as normas e parâmetros estabelecidos pela NBR 5733 (1991), responsável pela especificação das propriedades físicas e químicas do cimento Portland de alta resistência (CPV ARI). Os resultados de caracterização obtidos estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Características físicas e químicas do cimento (CPV ARI).

Características	CP I	Parâmetro (NBR 5733:1991)
Perda ao fogo (%)	2,68	≤ 4,5
Finura # 0,075 mm (%)	0,11	≤ 6
Área específica - blaine (m ² /kg)	399,8	≥ 300
Tempo de início de pega (horas)	2,3	≥ 1
Massa específica (g/cm ³)	3,18	-

a) Distribuição granulométrica à laser

A distribuição granulométrica é um ensaio capaz de caracterizar os materiais quanto o tamanho e distribuição de suas partículas. Os ensaios de granulometria a laser foram executados no Laboratório da VOLTORANTIM CIMENTOS, foi utilizado um Granulômetro CILAS 920 líquido, que possibilitou a verificação da distribuição granulométrica de 0,03 a 4,0mm.

Figura 19 - Granulometria a laser do cimento CPV ARI

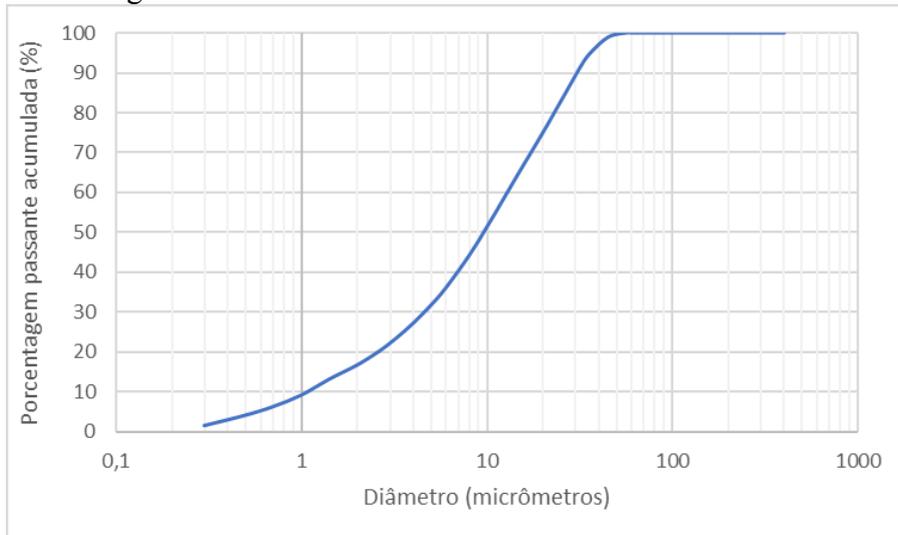


Tabela 11 - Diâmetros referentes a 10%,50%,90% do material passante, e diâmetro médio.

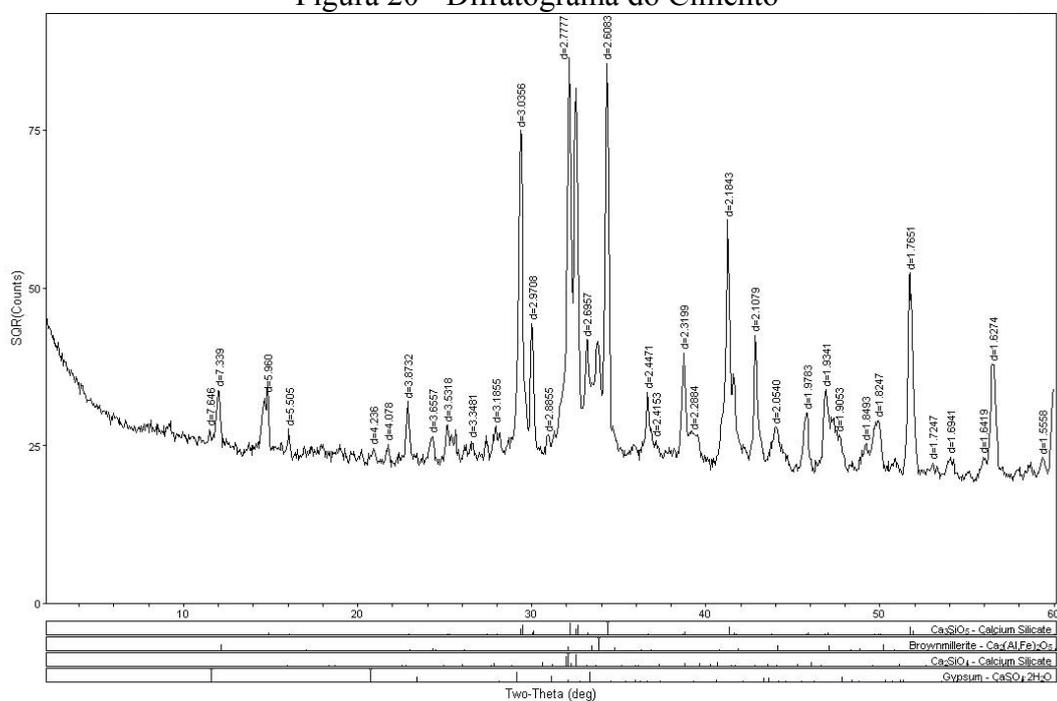
Análise granulométrica	Cimento CPV ARI
Diâmetro a 10% (µm)	1,07
Diâmetro a 50% (µm)	9,59
Diâmetro a 90% (µm)	30,59
Diâmetro médio (µm)	13,10

A partir da curva granulométrica da Figura 18 e da Tabela 11 é possível verificar que o cimento possui um diâmetro médio inferior às adições analisadas. No entanto, esse resultado vai de encontro ao valor de finura (Blaine), que indica uma maior finura das adições minerais em relação ao cimento CP V.

b) Difração de raios-X

O ensaio foi realizado Instituto de Geociências da UnB, com os mesmos parâmetros estabelecidos para a análise das adições minerais; medidas utilizadas foram 2° , $80^\circ 2\theta$ com passo angular de $0,05^\circ 2\theta$, tempo passo de 5° e potência de 35 Kv/15mA.

Figura 20 - Difratoograma do Cimento



De acordo com o difratograma da Figura19, pode-se observar a presença de picos cristalinos de alita (Ca_3SiO_5), belita(Ca_2SiO_4) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

c) Fluorescência por raios-x

Para análise quantitativa dos elementos químicos constituintes do cimento Portland de alta resistência inicial, utilizou-se o ensaio de fluorescência por raios-X por dispersão de energia. O ensaio foi realizado no Laboratório da cimenteira Ciplan em Brasília. (Tabela 12)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 12, verifica-se que o cimento Portland utilizado está de acordo com os limites de óxido de magnésio ($\leq 6,5$), e trióxido de enxofre ($\leq 3,5$ ou $4,5$) em função do C_3A , estabelecidos pela NBR 5733 (1991).

Tabela 12 - Óxidos presentes na composição química do cimento expresso em porcentagem

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Mno	LOI	Outros Óxidos
CPV ARI	19,40	3,80	60,64	2,23	0,19	5,19	0,90	4,23	0,45	0,21	0,05	2,68	0,03

4.3 DESEMPENHO DO CIMENTO LC3

Para a avaliação do comportamento mecânico das argamassas produzidas a partir do cimento LC³, objeto deste estudo, optou-se por analisar o índice de desempenho, baseando-se nos procedimentos estabelecidos pela NBR 5752 (2014). Esta metodologia permite avaliar novos cimentos produzidos em relação a um cimento de referência, a partir dos resultados em argamassas. A norma estabelece a utilização do cimento CP II F-32 e descreve o índice de desempenho aos 28 dias. Neste estudo, foi feita algumas adaptações; o cimento utilizado foi o CP V ARI e foi calculado o índice para 3,7 e 28 dias.

Para isso, inicialmente foram determinadas as diferentes composições de cimento a serem utilizados na produção das argamassas baseando-se em três teores de substituição por adições minerais (30%, 40% e 45%), utilizando três proporções de argila calcinada em relação ao filer calcário (2:1, 3:1 e 4:1), contabilizado um total de 10 traços de argamassa, 40 argamassadas e 160 corpos de prova. Em seguida, realizado o ensaio de compressão nos corpos de prova, nas idades 3, 7, 28 e 91, determinando assim, o índice de desempenho nas respectivas idades.

4.3.1 Composição das argamassas

A composição das argamassas teve sua composição de acordo com os quantitativos de cimento, areia e água, estabelecidos pela ABNT NBR 5752 (2014), conforme tabela 4-9. O traço em massa seca é de 1:3 e $a/c = 0,48$

Tabela 13 - Composição da argamassa de referência (NBR 5752:2014)

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia Normal (Fração grossa)	468 ± 0,3
Areia Normal (Fração média grossa)	468 ± 0,3
Areia Normal (Fração média fina)	468 ± 0,3
Areia Normal (Fração fina)	468 ± 0,3

Neste estudo optou-se por teores totais de substituição ao cimento portland 35%, 40%, 45%, valores dentro de intervalo baseados no estudo realizado por Antoni (2012), no qual os teores de substituição 30% a 45% apresentaram melhores índices de desempenho, considerando maiores teores de substituição, e maior redução no fator clínquer.

Pesquisa realizada por Damidot *et al.* (2011) estabeleceram a proporção de duas partes de metacaulim ou argila calcinada, para uma parte de filler calcário, como proporção ideal, com resultados desta proporção para compor a porcentagem de substituição do aglomerante total. Porém, neste trabalho, com o intuito de verificar essa relação, e por se tratar de materiais de regiões diferentes, optou-se por três proporções de argila calcinada em relação ao filler calcário (2:1, 3:1 e 4:1). Para melhor entendimento, segue Tabela 14, contendo valores das proporções utilizadas.

Tabela 14 – Composição das argamassas

Argamassa	CPV ARI (%)	Substituição Total (%)	relação argila/filer	argila calcinada (%)	filer calcário (%)
REFERENCIA	100	0	0	0	0
M2.35	65	35	2:1	23,3	11,7
M3.35	65	35	3:1	26,3	8,8
M4.35	65	35	4:1	28,0	7,0
M2.40	60	40	2:1	26,7	13,3
M3.40	60	40	3:1	30,0	10,0
M4.40	60	40	4:1	32,0	8,0
M2.45	55	45	2:1	30,0	15,0
M3.45	55	45	3:1	33,8	11,3
M4.45	55	45	4:1	36,0	9,0

Sendo: Mn.n - M:mistura de argila calcinada e filler calcario, o primeiro numero (n) relação entre as adições e o segundo número (n) o teor de substituição total..

4.3.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

Os procedimentos de mistura dos materiais constituintes das argamassas, moldagem dos corpos de prova, as condições de cura e a determinação da carga de ruptura foram de acordo com a ABNT NBR 7215 (1996). A preparação e determinação da resistência à compressão das argamassas baseia-se na ABNT NBR 5752 (2014). As argamassas foram preparadas em um misturador mecânico, de acordo com a ABNT NBR 7215 (1996), conforme Figura 21.

Figura 21 - Procedimento de mistura de argamassa



As argamassas foram preparadas por meio de um misturador mecânico, em seguida foi avaliada a consistência. Para todas as argamassas executadas foi estabelecido um espalhamento padrão de 200 mm, consideração à tolerância de norma (± 10 mm). O espalhamento foi obtido pela medida de dois diâmetros ortogonais do processo pelo tronco de cone e mesa metálica, demonstrado na Figura 20.

Os moldes contendo os corpos de prova foram conservados em atmosfera úmida para cura inicial de 20 a 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada com cal. Na data prevista para ruptura, os corpos de prova foram retirados e preparados de acordo com procedimento normalizado, e rompidos para determinação da resistência a compressão.

Figura 22 - Cura dos corpos de prova



4.3.3 ÍNDICE DE DESEMPENHO

Para avaliação do índice de desempenho foi adotado o parâmetro de resistência à compressão, estabelecido pela NBR 5752 (2014). Foi executada a ruptura de 04 corpos de prova, para cada uma das idades (3, 7, 28 e 91) referentes a diferentes amassadas realizados para cada argamassa de acordo com parâmetros estabelecidos na NBR 7215 (1996),

Os corpos de prova foram rompidos, onde foram utilizados discos de neoprene, confinados em pratos metálicos nas superfícies dos corpos de prova. Com finalidade de uma distribuição homogênea de carregamento, e para que as irregularidades das superfícies dos corpos de prova não prejudicassem os resultados de resistência à compressão.

Figura 23 - Ruptura dos corpos de prova



Para determinação do índice de desempenho a ABNT NBR 5752 (2014) estabelece a idade de 28 dias, porém, nesta pesquisa para avaliação do índice de desempenho se fez necessário adaptações em relação à norma, conforme a seguir;

- O tipo de cimento utilizado na pesquisa; CPV ARI
- Diversas porcentagens de adição utilizadas
- Cálculo do índice de desempenhos para diferentes composições das argamassas nas quatro idades de ruptura já especificadas

Índice de desempenho foi calculado conforme equação 4-1:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (\text{Equação 4-1})$$

onde:

I: índice de desempenho com cimento Portland (%),

f_{cB}: resistência média dos corpos de prova moldados a partir da utilização da adição para substituição de parte do aglomerante

f_{cA}: resistência média dos corpos de prova moldados, apenas com o cimento, sem que haja teor de substituição do cimento por adição mineral (mistura de referência)

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos ensaios do programa experimental foram submetidos à análise estatística, utilizando o *software* STATISTICA v10, desenvolvido pela StatSoft®.

A Tabela a seguir apresenta as variáveis dependentes e independentes utilizadas nesta pesquisa, sendo que a variável dependente é aquela que se pretende estudar, sendo, nesta pesquisa, a resistência à compressão aos 28 dias. As variáveis independentes, a saber, teor de substituição e proporção de adições minerais, são aquelas as quais se tem controle sobre elas e foram fixadas com o intuito de entender se elas causam influência significativa ou não na variável dependente.

Tabela 15 – Variáveis dependentes e independentes da pesquisa

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	VARIÁVEL DEPENDENTE
Teor de substituição	Resistência à compressão aos 28 dias
Proporção (argila calcinada: filer calcário)	-

Com o intuito de verificar a influência das variáveis independentes na resistência à compressão dos cimentos LC³, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA). Em seguida, de maneira complementar, os dados foram submetidos à comparação múltipla de médias, pelo teste de Duncan, o qual agrupa as médias que não diferem de forma significativa entre si.

A Análise de Variância (ANOVA) identifica se as médias diferem de maneira significativa, logo, a variável independente tem efeito sobre a variável dependente. É possível avaliar tal influência através do Valor-P, também chamado de probabilidade de significância. Cada hipótese é testada a um nível de significância α , que para este trabalho foi estabelecido em 5%, determinando $\alpha = 0,05$. Desta maneira o nível de confiança do teste realizado é de 95%.

Diante da probabilidade de significância estabelecida, se o Valor-P for inferior a 0,05, a variável independente tem influência sobre a variável dependente analisada (significativo). Já no caso de Valor-P igual ou superior a 0,05, a variável independente não exerce influência sobre a variável dependente analisada (não significativo).

Ao final, será realizado o teste de Duncan a fim de identificar grupos estatisticamente semelhantes para embasar a discussão dos resultados. A Análise de Variância (ANOVA) será discutida com mais detalhes no próximo capítulo através do Valor-P obtido.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados a partir do programa experimental descrito no Capítulo 4. É realizada uma análise do estado fresco, a partir do espalhamento obtido em cada argamassa e da necessidade da utilização de superplastificante, e em seguida, a partir dos resultados dos ensaios de compressão, será avaliado o desempenho mecânico dos cimentos LC³ produzidos e seus respectivos índices de desempenho.

5.1 AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO

A avaliação das argamassas no estado fresco se deu pela análise da consistência por meio do espalhamento. Na Tabela 16 determinada segundo ABNT NBR 13276/2005 mostrado os quantitativos de superplastificante utilizado em cada argamassa produzida e seus respectivos espalhamentos. Como já foi citado anteriormente, para todas as argamassas executadas foi estabelecido um espalhamento padrão (200±10 mm).

Tabela 16 – quantidade de aditivo e espalhamentos obtidos

Argamassa	Aditivo Superplastificante (%)	Espalhamento (mm)
REFERENCIA	0,120	200,4
M2.35	0,552	195,2
M3.35	0,565	209,2
M4.35	0,591	208,4
M2.40	0,612	192,2
M3.40	0,645	205,7
M4.40	0,692	205,9
M2.45	0,725	196,8
M3.45	0,765	202,4
M4.45	0,796	200,8

Em todas as misturas foi necessária adição de aditivo superplastificante para atender o espalhamento especificado.

À medida que o teor de substituição de adição mineral é aumentado, a exigência de aditivo plastificante cresce, o mesmo acontece à medida que relação de argila calcinada por filer calcário aumenta. Isto já mostra a influência da finura da adição na trabalhabilidade, tendo em vista que a finura blaine da argila é quase três vezes a do filer calcário.

De acordo com estudo de Vizcaíno Andrés et al. (2015), a necessidade de aditivo à base de policarboxilato ocorre em função da finura e da área superficial especificadas adições minerais utilizadas, e também do teor de substituição aplicado em cada mistura. Fato este comprovado neste trabalho, à medida que o teor de substituição é foi aumentado, a exigência de aditivo plastificante cresceu, o mesmo acontecendo à medida que a relação argila calcinada por filer calcário aumentado. Contudo a dosagem do aditivo policarboxilato utilizada apresentou quantidade dentro da dosagem de 1,2% em relação à massa de cimento, recomendada pelo fabricante do produto.

5.2 AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

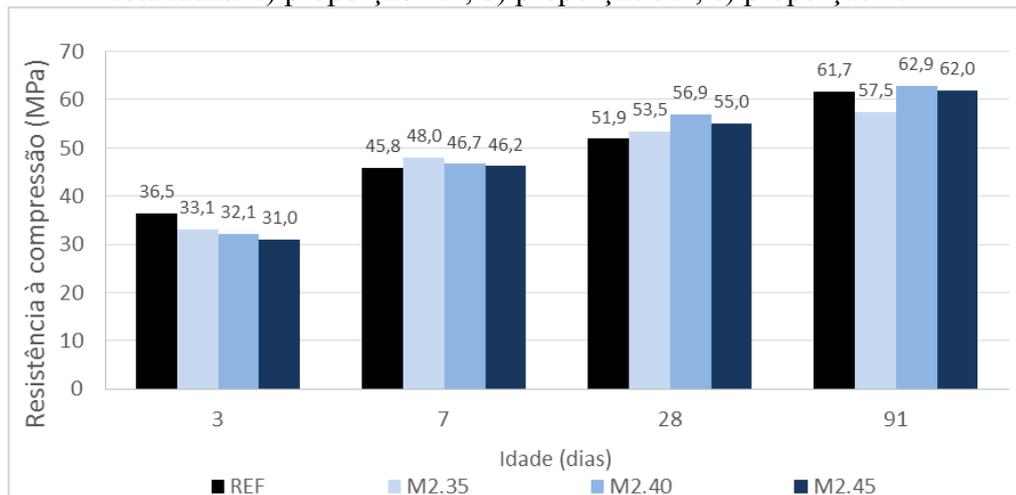
Para esta análise, optou-se por avaliar a propriedade de resistência à compressão das argamassas. A partir dos resultados de resistência à compressão, foi analisado o índice de desempenho em diferentes idades, de cada cimento.

O índice de desempenho consiste na avaliação da resistência à compressão do cimento composto por adições minerais, em relação ao cimento de referência.

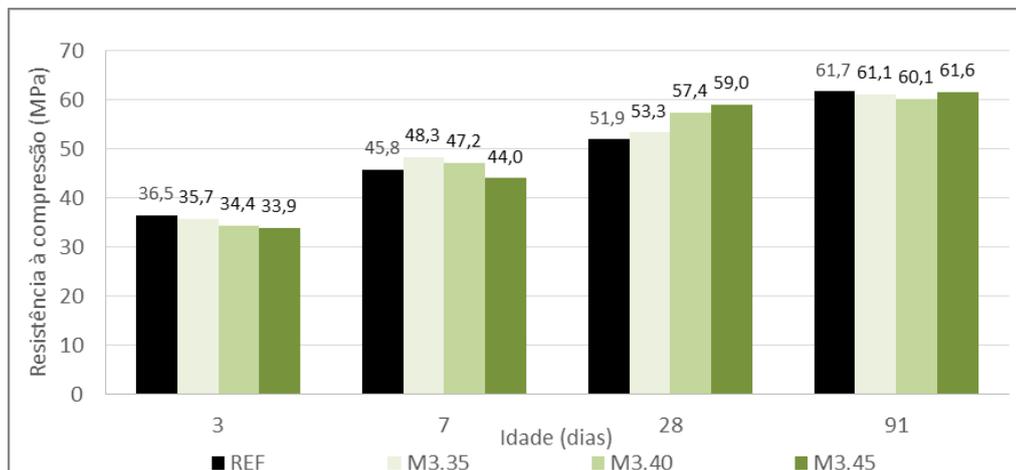
5.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A análise da resistência à compressão obedeceu à norma ABNT NBR 7215 (1996). Após a ruptura, calculado as resistências individuais de cada argamassa, determinou-se a resistência média da série de quatro corpos de prova. Os valores que se afastem da média em mais de 6%, foram excluídos, validando uma nova média. Na Figura 24, são apresentados os resultados médios de resistência à compressão das argamassas, nas idades estudadas e nos itens a seguir avaliação do índice desempenho.

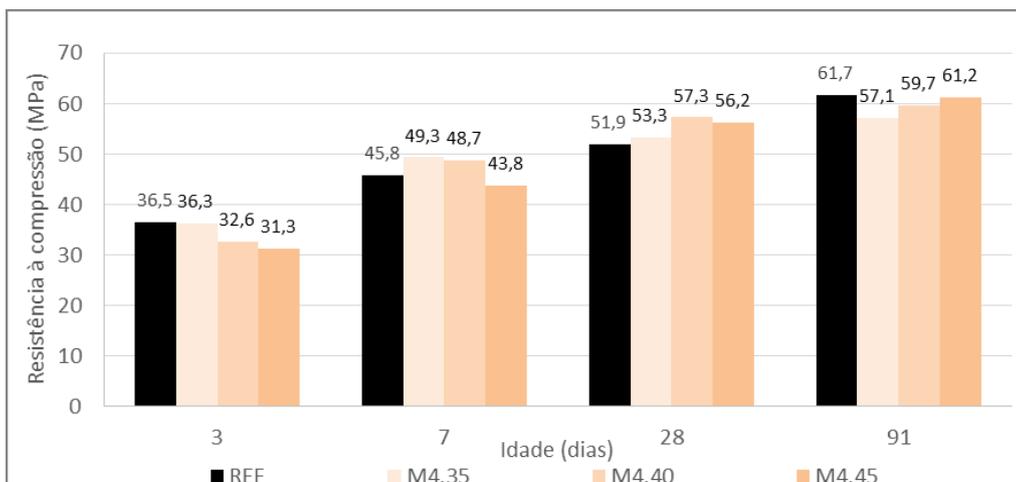
Figura 24 – Resultado médio de resistência à compressão das argamassas, nas idades estudadas: a) proporção 2:1, b) proporção 3:1, c) proporção 4:1



(a)



(b)



(c)

A partir dos resultados apresentados para todas as proporções de adições (2:1, 3:1 e 4:1), verifica-se que nas idades menores, 3 e 7 dias, o teor de substituição é inversamente proporcional a resistência à compressão obtida, ou seja, a medida que o teor de substituição aumenta a resistência diminui. Podendo ser atribuído a pouca formação dos carboaluminatos em idades iniciais. No entanto, este comportamento é alterado em idades mais avançadas, a partir de 28 dias.

Esta mudança de comportamento pode ser atribuída à formação de C-S-H secundário, devido às reações pozolânicas e também à formação dos compostos carboaluminato, graças à presença da argila calcinada, que segundo pesquisas de Antoni (2012), tendem a ser formados em idades mais tardias.

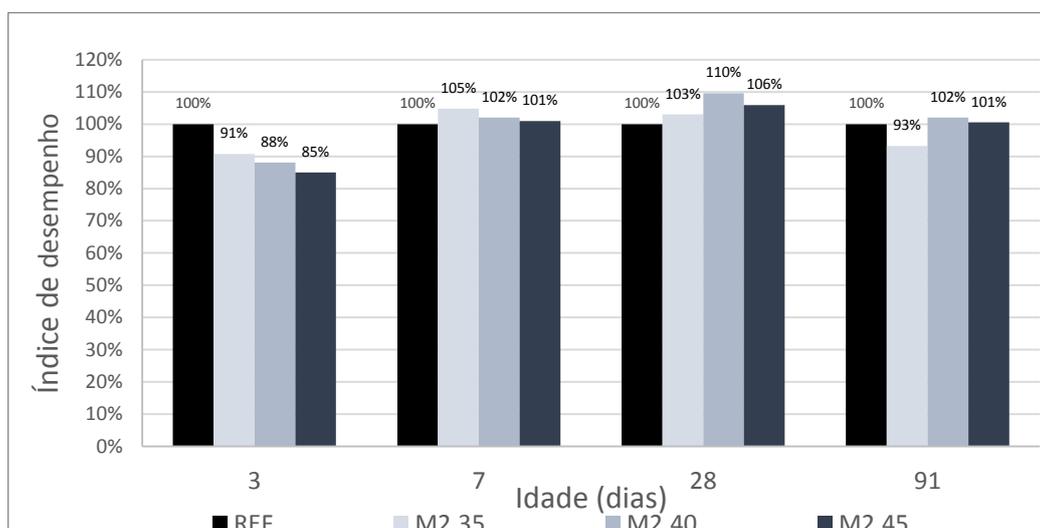
A seguir, é analisado o comportamento mecânico através do índice de desempenho das argamassas com cimento LC³.

5.2.1.1 Avaliação do índice de desempenho dos cimentos LC³ agrupados por proporção estudada

a) Proporção 2:1

Na Figura 25, são apresentados os resultados dos índices de desempenho, das misturas com proporção de adições 2:1 (argila calcinada: filer calcário), nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Figura 25 - Índice de desempenho para as misturas com proporção de adições 2:1



Aos 3 dias, observa-se que houve uma redução de 11, 12 e 15% respectivamente na resistência a compressão em relação à argamassa de referência. Nota-se uma redução no índice de desempenho à medida que se aumentou o teor de substituição de clínquer.

Aos 7 dias de idade, os resultados das misturas ternárias estão muito próximos entre si e ligeiramente superiores ao de referências, chegando a 5% na mistura com teor de 35% de substituição. Isso mostra que, nessa idade há provavelmente formação de carboaluminato. A formação desse composto a partir de 7 dias está de acordo com a pesquisa de Antoni et al. (2012)

Aos 28 dias de idade, os resultados superam os de referência como ocorreu aos 07 dias, porém com ganho um pouco maior, chegando a 10% para o teor de substituição de 40% de clínquer.

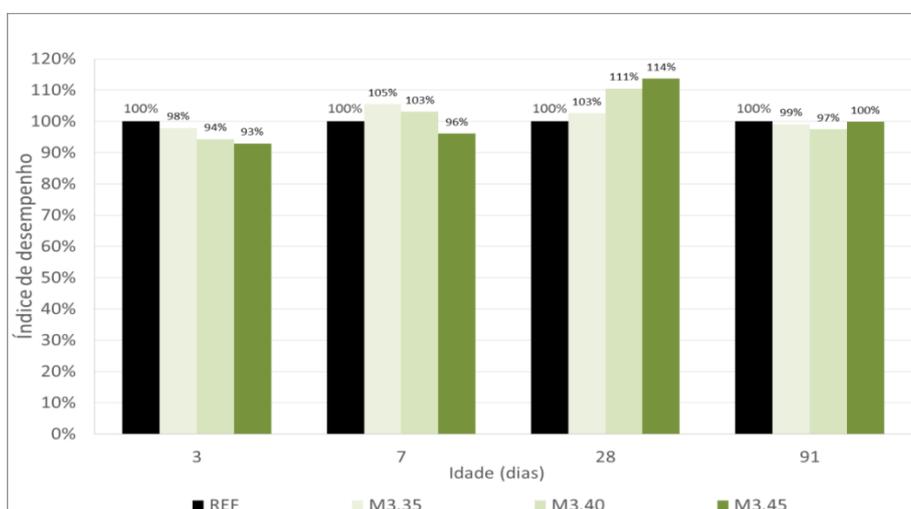
Aos 91 dias de idade, à mistura com 35% de substituição apresentaram reduções de 7% no índice de desempenho em relação à de referência. Porém, com resultado de resistência superior a de 28 dias em 7,5%. Já as misturas com 40 e 45% de substituição apresentaram índices de desempenho semelhantes entre si e a de referência.

O resultado do índice de desempenho com teor de substituição de 35% deste estudo está semelhante ao encontrado por LINS (2017) para um teor de substituição de 30%.

b) Proporção 3:1

Na Figura 26, são apresentados os resultados dos índices de desempenho das misturas com proporção de adições 3:1 (argila calcinada: filer calcário), nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Figura 26 - Índice de desempenho para todas as misturas com proporção de adições 3:1



Aos 3 dias, observa-se que houve uma redução da resistência à compressão de até 7% com o aumento do teor de substituição. Porém, a mistura com teor de 35% de substituição apresentou um resultado muito próximo ao cimento de referência, com índice de desempenho igual a 98%, revelando um resultado ligeiramente melhor do que os determinados para a proporção 2:1 na mesma idade.

Aos 7 dias de idade, os resultados apresentam valores muito próximos ao de referência, chegando a um ligeiro aumento de resistência de até 5% na mistura com substituição de 35%, como ocorreu aos 7 dias para a proporção 2:1.

Aos 28 dias de idade, as misturas de cimento LC³ obtiveram índices de desempenhos superiores à mistura de referência, chegando a 14% na mistura com teor de substituição 45%. Estes resultados estão muito próximos aos obtidos na proporção 2:1.

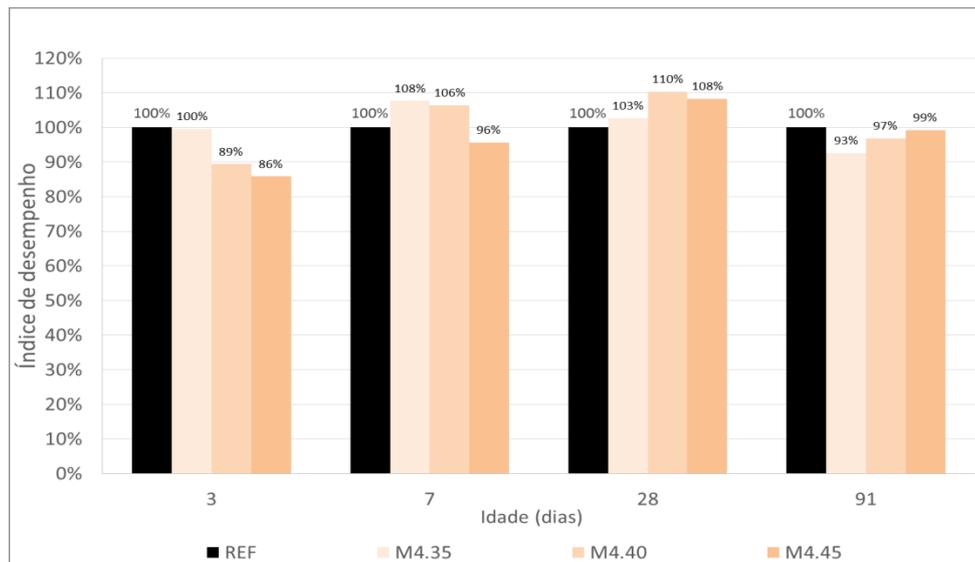
Aos 91 dias de idade, as argamassas com cimento LC³ apresentaram índices de desempenho equivalentes à argamassa de referência, e tal comportamento foi próximo ao obtido na proporção 2:1 nessa idade.

Comparando os resultados obtidos usando a proporção 2:1 e 3:1 observa-se que, o comportamento do índice de desempenho está muito próximo, e os respectivos valores de resistência também, nas quatro idades estudadas. Desta forma não se justifica aumentar a proporção de argila calcinada em relação ao filer calcário, haja vista que a argila calcinada é um material mais caro.

c) Proporção 4:1

Na Figura 27, é mostrada a evolução do índice de desempenho para todas as misturas com proporção de adições 4:1 (argila calcinada: filer calcário), nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Figura 27 - Índice de desempenho das misturas com proporção de adições 4:1



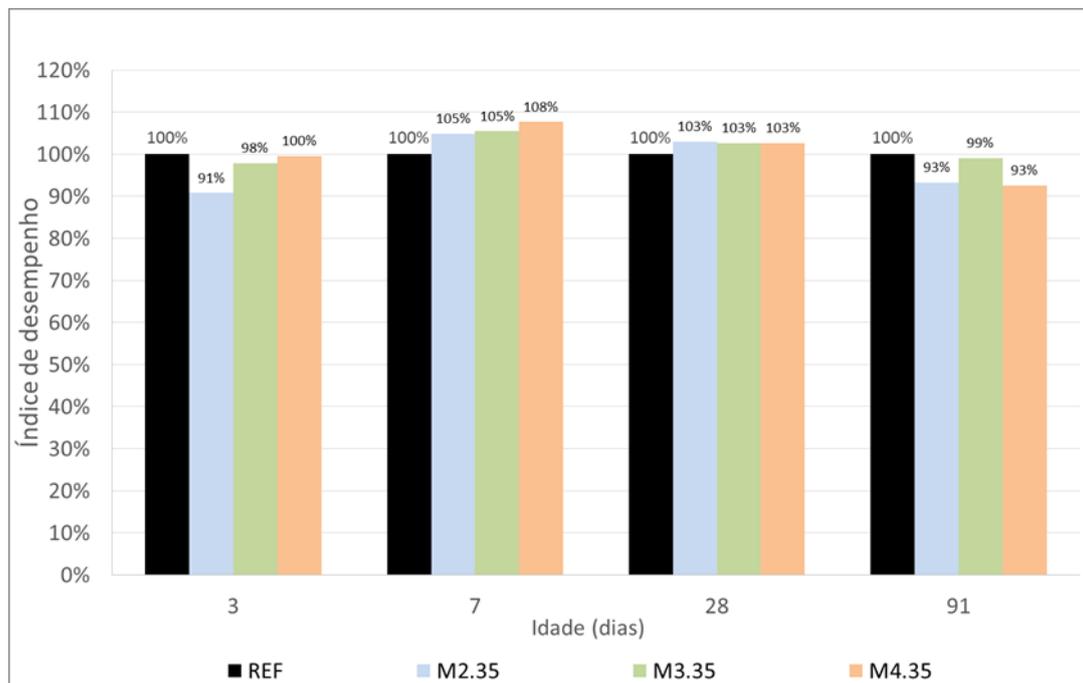
Os resultados de resistências à compressão obtidos experimentalmente, bem como, os valores calculados para índice de desempenho estão muito próximos ao obtidos nas proporções anteriores (2:1 e 3:1). Isso mostra que não se justifica o uso da proporção 4:1, por não apresentar benefício na resistência e ainda apresenta maior custo.

5.2.1.2 Avaliação do índice de desempenho dos cimentos LC³ agrupados por teor de substituição

a) Teor de substituição de 35%

Na Figura 30, é possível verificar o índice de desempenho para as misturas com 35% de substituição.

Figura 30 - Índice de desempenho dos cimentos LC³ para todas as misturas com teor de substituição de 35%.



Aos 3 e 7 dias de idade, à medida que aumentou a proporção de argila calcinada em relação ao filer calcário, houve aumento do índice de desempenho. Esta melhora pode estar correlacionada com o aumento da adição de maior finura, capaz de aumentar o grau de hidratação do sistema cimentício e proporcionar os efeitos de nucleação, corroborando com os benefícios apresentados por Cyr e Ringont (2003), Dal Molin (2011) e Vizcaíno Andrés et al. (2015).

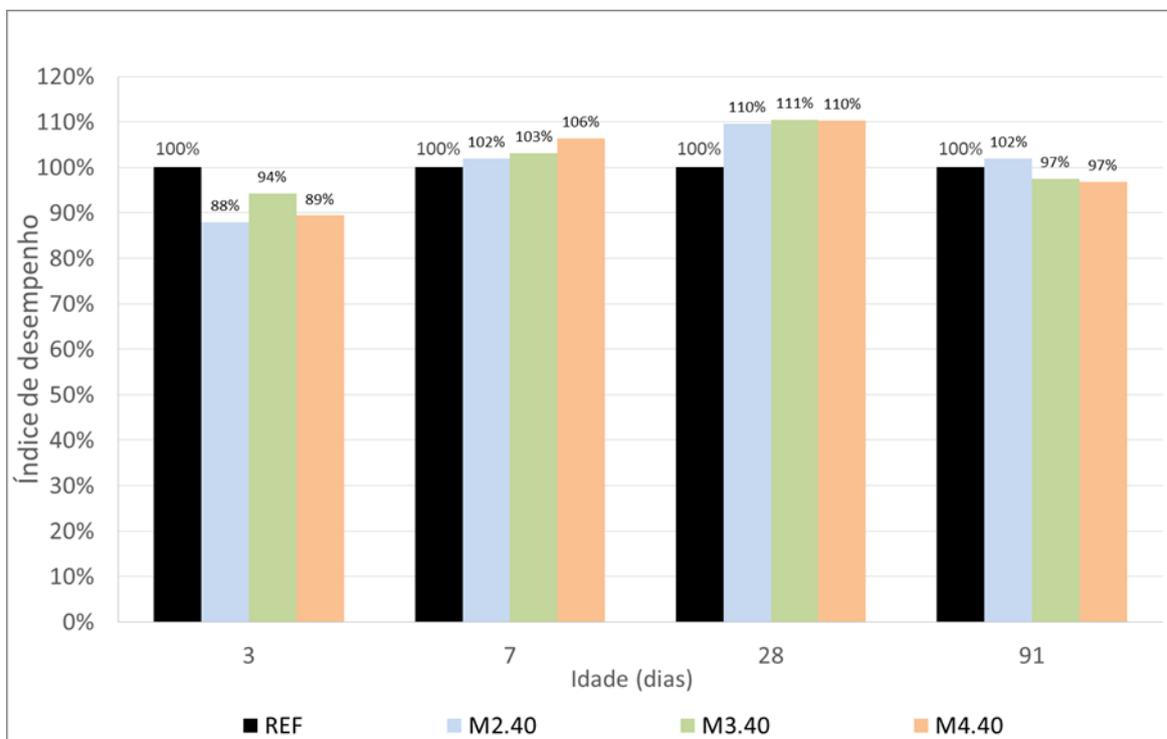
Analisando os resultados aos 28 dias de idade, as misturas apresentaram resultados ligeiramente superiores ao cimento de referência. Não houve aumento na resistência com o aumento da proporção de argila em relação ao filer para este teor. No entanto, avaliando o custo-benefício pode-se adotar a proporção 2:1 como melhor resultado, por apresentar menor quantidade de argila calcinada.

Aos 91 dias de idade, as misturas M2.35 e M4.35 apresentaram reduções no índice de desempenho de 7% em relação à mistura de referência. Porém a resistência à compressão foi superior a de 28 dias. Por outro lado, a mistura de M3.35 apresentou resultado equivalente ao traço de controle com 99% de índice de desempenho.

b) Teor de substituição de 40%

Na Figura , é apresentado o índice de desempenho para as misturas com 40% de substituição.

Figura 31 - Índice de desempenho dos cimentos LC³ para as misturas com teor de substituição de 40%.



Aos 3 e 7 as misturas apresentam comportamentos bastante semelhantes aos com teor de 35%.

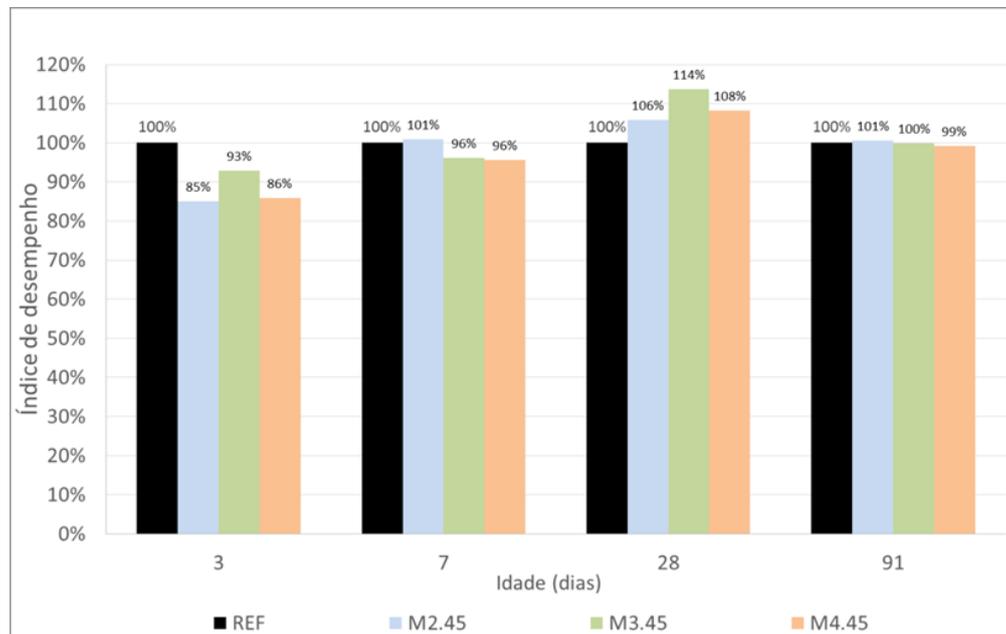
Na idade de 28 dias, os resultados das misturas ternárias estão muito próximos entre si e superiores ao de referências, sendo a proporção 2:1 a de melhor custo-benefício por apresentar menor quantidade de argila calcinada.

Aos 91 dias de idade, as misturas M3.40 e M4.40 apresentaram reduções de resistência à compressão de 3% em relação à mistura de referência. Por outro lado, à mistura M2.40 apresentou resultado superior ao traço de controle com 102% de índice de desempenho.

c) Teor de substituição de 45%

Na Figura 28, é apresentado o índice de desempenho dos cimentos LC³ para as misturas com teor de substituição de 45%.

Figura 28 - Índice de desempenho dos cimentos LC³ para todas as misturas com teor de substituição de 45%



De acordo a Figura 28, a mistura M4.45 ou seja, com maior quantidade de argila, apresentou índices de desempenho menores ou semelhante as demais. Isso pode ser justificado pela elevada quantidade de adição pozolânica utilizada, e que pode ter permanecido parcialmente inerte no sistema cimentício, diminuído a quantidade de produtos hidratados. Em suma não se justifica aumentar a quantidade de argila calcinada em relação ao filer calcário, e a melhor proporção é a de 2:1, corroborando com os resultados obtidos por Diamidot (2011) e adotados por Antoni (2012), Scrivener (2014) e Vizcaíno Andrés et al.(2015).

Com relação ao melhor teor de substituição de clínquer, considerando a análise dos resultados aos 28 dias, idade na qual se avalia o índice de desempenho, conforme a ABNT NBR 5232, as misturas com 40 e 45% de substituição de adição em relação ao clínquer apresentam resultados semelhantes. Desta forma, recomenda-se a utilização de 45% de substituição de clínquer por argila calcinada e filer calcário. Com relação a melhor proporção, embora 3:1 e 4:1 tenham apresentado maiores resistências, inclusive como demonstrado no teste de Duncam apresentado no item 5.3.3 a seguir, recomenda-se a proporção 2:1, sendo este cimento mais sustentável, com grande redução das emissões de CO₂, o que é bastante promissor. Esta proporção está de acordo com Diamidot et al. (2011), trabalhando com modelo termodinâmico.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de averiguar a influência do tipo de cimento utilizado, em função das variações do teor de substituição e do tipo de adição mineral existentes na composição de cada um, optou-se por realizar uma análise de variância (ANOVA). Para realização da análise estatística, optou-se por avaliar, aos 28 dias de hidratação, os resultados de resistência à compressão das argamassas, tendo em vista que o índice de desempenho final do cimento é avaliado nesta idade.

Em seguida, de maneira a complementar a análise estatística, realizou-se o teste de Duncan, que tem como objetivo verificar se há diferença significativa entre as médias obtidas, e assim, realizar a divisão de grupos de acordo com as médias consideradas estatisticamente semelhantes.

5.3.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Realizou-se a análise de variância (ANOVA) para que fossem analisados os efeitos das variáveis independentes na variável de resposta. No caso desta pesquisa, consideram-se como variável independente o teor de substituição aplicado, e a proporção de adição mineral utilizada, enquanto a variável de resposta (variável dependente) é representada pela resistência à compressão obtida.

Na Tabela 17 estão expostos os resultados da análise de variância realizada, considerando resultados de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

Tabela 17 – Resultados de análise de variância (ANOVA) realizada com dados de teor de substituição e proporção de adição mineral

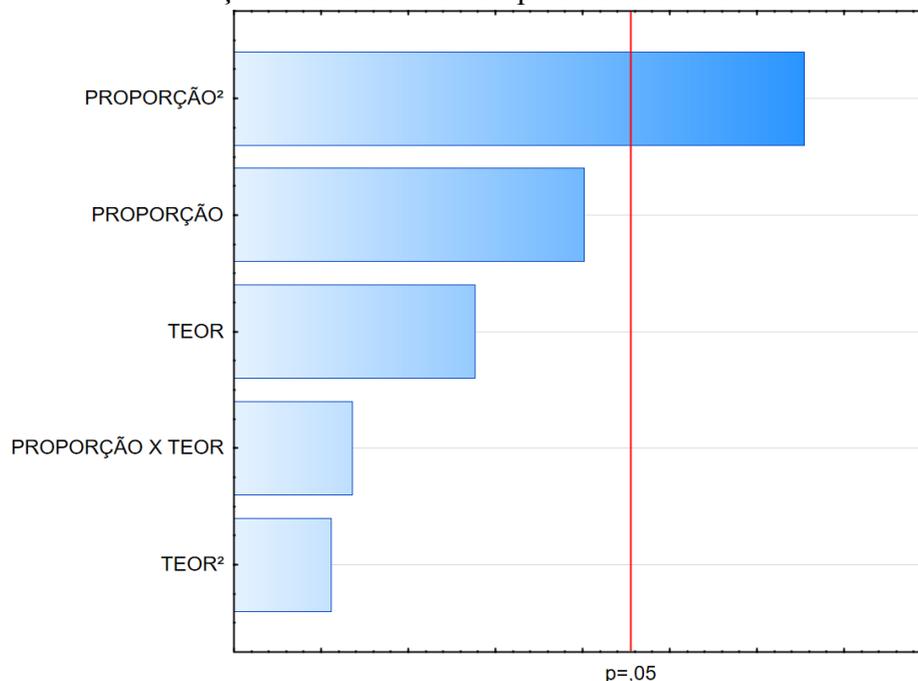
EFEITO	SQ	C	MQ	F	P	RESULTADO
PROPORÇÃO	8,85003	1	8,85003	6,30160	0,066036	Não significativo
PROPORÇÃO²	19,96216	1	19,96216	14,21391	0,019602	Significativo
TEOR	4,99277	1	4,99277	3,55507	0,132439	Não significativo
TEOR²	1,57592	1	1,57592	1,12212	0,349189	Não significativo
PROPORÇÃO X TEOR	1,94865	1	1,94865	1,38752	0,304119	Não significativo
ERRO	76,66725	9	1,40441			

SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro fisher; Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não.

Diante da análise, verifica-se que o fator quadrático da proporção de adições minerais foi significativo, ou seja, este teve influência significativa sobre a resistência à compressão.

No entanto, é possível observar que todos os outros efeitos analisados não foram significativos e, portanto, não influenciaram na variável resposta (resistência à compressão). A visualização da análise de variância pode ser auxiliada pelo gráfico de Pareto, representado pela Figura 29.

Figura 29 – Gráfico de Pareto para efeitos de teor e proporção de adições minerais em relação à resistência à compressão aos 28 dias.



A partir do gráfico de Pareto é possível observar que a proporção quadrática de adições minerais (argila calcinada: filer calcário) é quem exerce influência significativa sobre a resistência à compressão. No entanto, os outros fatores não exercem influência significativa sobre a variável resposta.

5.3.2 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Diante da verificação dos fatores significativos, optou-se pela reprodução de uma superfície de resposta, a fim de representar graficamente a variável de resposta em função das variáveis independentes. Nas Figuras 34 e 35 estão representadas as superfícies de resposta obtidas, a partir dos resultados de resistência à compressão das argamassas, aos 28 dias de hidratação.

Figura 30 – Superfície de resposta tridimensional da resistência à compressão aos 28 dias

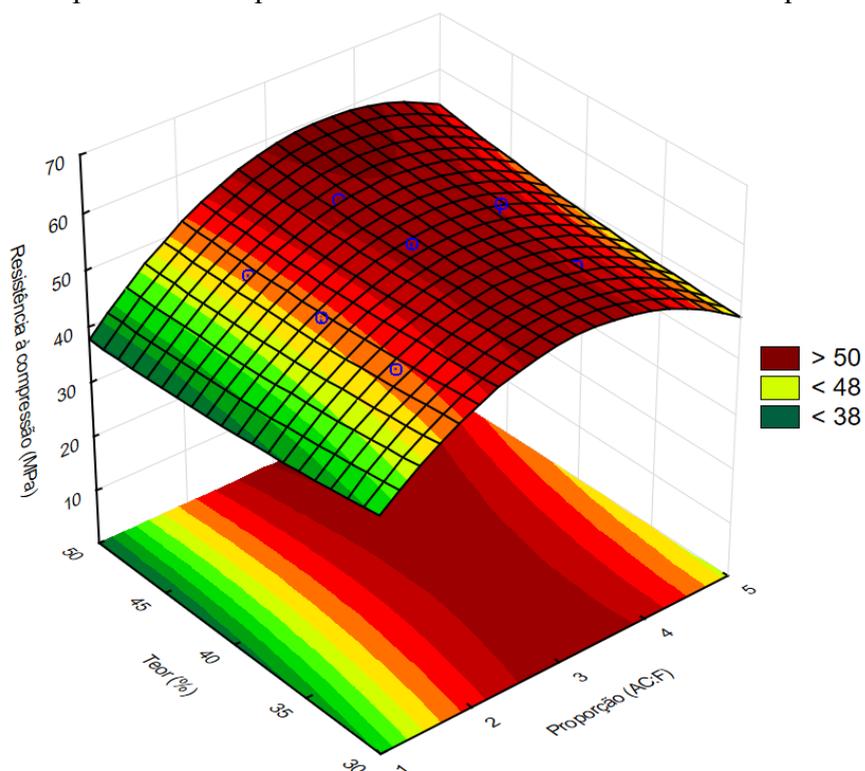
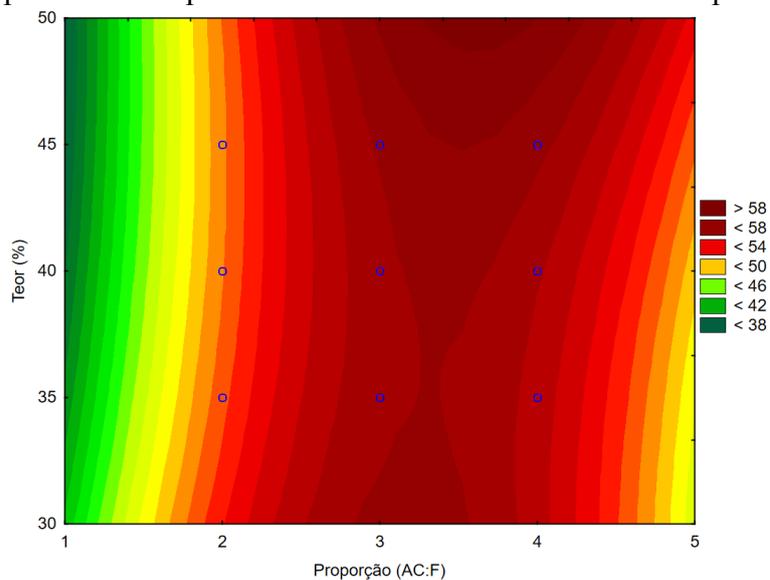


Figura 31 - Superfície de resposta bidimensional da resistência à compressão aos 28 dias



Diante da variação dos valores obtidos, que pode ser notada através da mudança de cores na superfície, é possível verificar uma variação maior quando se caminha no eixo da proporção de adições minerais, se comparado ao eixo do teor de substituição. Por outro lado, ao caminhar pelo eixo do teor de substituição nota-se que há pouca ou nenhuma variação dos resultados de resistência à compressão. Esta análise corrobora com a determinação da análise de variância e sua representação no gráfico de Pareto, que

demonstram uma maior influência na resistência à compressão em função da variação da proporção das adições minerais (argila calcinada: filer calcário).

5.3.3 TESTE DE DUNCAN

Tendo em vista que a análise de variância identificou diferenças significativas entre as resistências à compressão das argamassas produzidas, optou-se por analisar a diferença entre as médias das resistências obtidas, a fim de comparar o desempenho proporcionado por cada tipo de cimento utilizado.

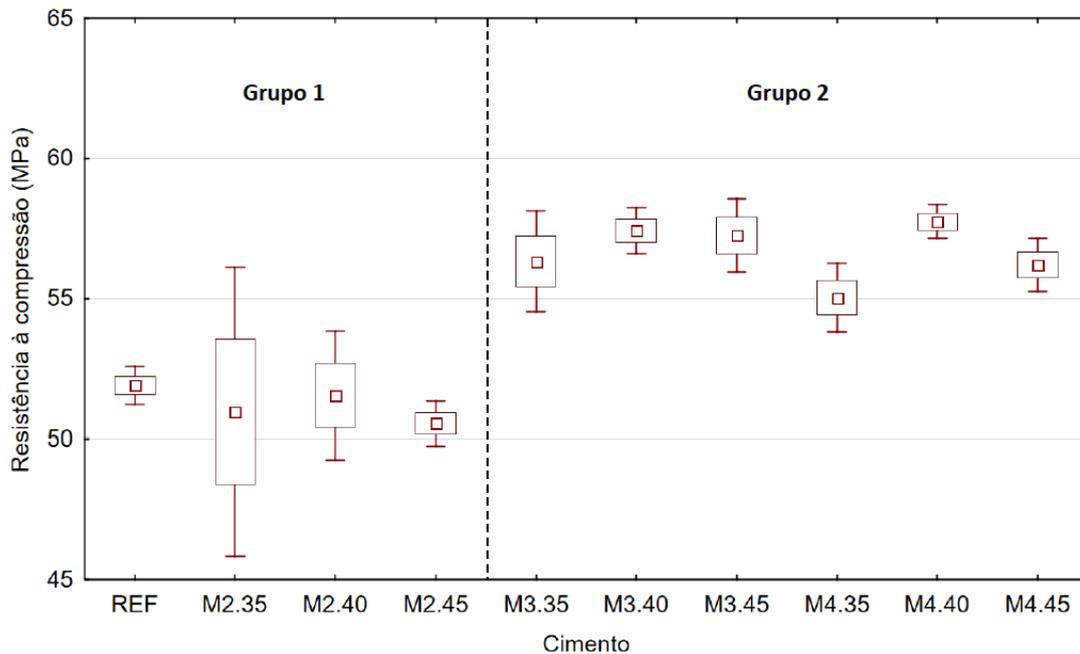
Para isso foi realizado o teste de Duncan, que permite, através da formação de diversos grupos, o agrupamento de médias que sejam estatisticamente semelhantes, e a separação de resultados estatisticamente diferentes. Na Tabela 18 são apresentados os grupos formados através do teste de Duncan.

Tabela 18 – Grupos de valores de resistência à compressão das argamassas na idade de 28 dias, formados através da comparação múltipla de médias do teste de Duncan.

CIMENTO	GRUPO 1	GRUPO 2
REF	X	
M2.35	X	
M2.40	X	
M2.45	X	
M3.35		X
M3.40		X
M3.45		X
M4.35		X
M4.40		X
M4.45		X

A partir da resistência à compressão obtida por cada argamassa aos 28 dias, formaram-se 2 grupos distintos, de modo que o resultado de resistência à compressão é crescente à medida que o número de identificação do grupo é maior. Na Figura a seguir, é possível verificar a representação gráfica da Tabela 18, com seus valores médios de resistência à compressão e seus desvios-padrão.

Figura 32 - Médias globais de resistência à compressão em função dos cimentos estudados (teste de Duncan).



Através da divisão efetuada pela Tabela 18 e a Figura 32, torna-se possível realizar diversas análises comparativas entre o desempenho dos cimentos utilizados. Porém, vale ressaltar algumas observações pontuais, e estas estão destacadas a seguir.

- Todos os cimentos LC³ com proporção de adições 2:1 (argila calcinada: filer calcário) estão localizadas no grupo 1, juntamente com o cimento de referência, os quais apresentaram os menores resultados de resistência à compressão.
- Todos os cimentos LC³ com proporção de adições 3:1 e 4:1 (argila calcinada: filer calcário) estão localizados no grupo 2, os quais apresentaram os maiores resultados de resistência à compressão.
- É possível notar, também, que as maiores proporções de argila calcinada/filer calcário apresentam os maiores valores de resistência à compressão, como visto antes pela análise de variância (ANOVA).
- Segundo o teste de Duncan, pode-se afirmar, também, que os cimentos LC³ com proporções de 3:1 e 4:1 apresentam resistências à compressão estatisticamente iguais, por se enquadrarem no mesmo grupo de resistência. Diante disso, do ponto de vista mecânico, seria mais interessante à utilização dos cimentos com proporção de 3:1 ou 4:1 com 45% de substituição.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o índice de desempenho aos 28 dias dos cimentos LC³ produzidos, observou-se que todas as misturas formadas a partir do cimento CPV ARI, filer e argila calcinada, obtiveram resultados superiores ao cimento de referência, dentro dos teores de substituição estudados; 35,40 e 45% e proporções 2:1, 3:1, 4:1 (argila calcina/filer calcário). Porém, quando o teor de substituição foi de 45%, na proporção 3:1 (argila calcina/filer calcário); foi alcançado índice de desempenho 114%. Este valor obtido pelo LC³ com 45% substituição com esta proporção é muito expressivo, tendo em vista o elevado teor de substituição, e conseqüentemente a grande redução da relação clínquer/cimento. Entretanto quando avaliado o custo benefício à proporção de 2:1 com teor de 45% de substituição é a mais satisfatória, pois além de não haver perda de resistência à compressão, na sua composição contem menor quantidade de argila calcinada, tornando-se mais sustentável. Diamidot et al (2011) trabalhando com modelo termodinâmico chegou a esta mesma proporção 2:1 (argila calcinada : filer calcário).

O teor de substituição de 45% em relação ao cimento Portland também foi recomendado por ANTONI et al, (2012).

Devido às reações sinérgicas, que ocorrem entre o filer e argila calcinada e as reações pozolânicas, é preciso avaliar o consumo de hidróxido de cálcio e conseqüentemente a redução do pH, pois afetam a durabilidade do concreto.

O cimento LC³ é bastante promissor, pois apresentou resultados de resistências à compressão superiores ou similares ao cimento de referência. Sendo ele um cimento mais sustentável, com uma grande redução nas emissões de CO₂.

6 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

- Estudar a durabilidade de argamassas do cimento LC³.
- Análise do consumo de hidróxido de cálcio devido às reações pozolânicas e sinérgicas no cimento LC³.
- Investigar a microestrutura do cimento LC³.
- Estudo do teor de caulinita nas argilas disponíveis na região e correlacionar com resistência à compressão no LC³.
- Estudar de forma mais aprofundada a influência da mistura de argila calcinada e o filer na hidratação do cimento.
- Estudar a reatividade do cimento LC³
- Estudar a análise do ciclo de vida dos cimentos LC³

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: **Cimento Portland comum.**, ABNT, 1991.

_____.NBR 5752: **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, ABNT, 2014

_____.NBR 7214: **Areia normal para cimento - Especificação.** Rio de Janeiro, BNT, 2015

_____.NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

_____.NBR 11582: **Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, ABNT 2016.

_____. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

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

_____. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

_____. NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

_____. NBR NM 76: **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, ABNT, 1996.

ANTONI, M. *et al.* **Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone.** Cement and Concrete Research, v. 42, n. 12, p. 1579-1589, 2012

BARKER, A. P., Cory, H. P., **The Early Hydration of Limestone-Filled Cements.** Blended Cements in Construction, R. N. Swamy, Ed. Elsevier, 1991, pages 107 to 124.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O cimento Portland no Brasil. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 2, p. 761-790, 2010.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. Disponível em: <www.abcp.com.br>. 2009. Acessado em: 15 set. 2017.

BATTAGIN, Arnaldo. **As adições como substitutos do clínquer no contexto do Projeto Cement Technology Roadmap 2050**. 7º Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo. 2016.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1995

BENHELAL, Emad et al. **Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry**. Journal of cleaner production, v. 51, p. 142-161, 2013.

BENSTED, J. **Some Hydration Investigations Involving Portland Cement–Effect of Calcium Carbonate Substitution of Gypsum**. World Cement Technology, vol. 11, no. 8, October 1980, pages 395 to 406.

BENTZ, D. P. **Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D**. Cement and Concrete Composites, v. 28, n. 2, p. 124-129, 2006.

BISHNOI et al. **Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: The Indian experience**. The Indian Concr J, v88, n.6, p22-28-2014.

Carbon Emissions and Their Mitigation in the Cement Sector S Bishnoi - Carbon Utilization, 2017 – Springer acessado em 10 de abril de 2018.

CEMBUREAU – **THE EUROPEAN CEMENT. Activity Report 2015**. Disponível em: < http://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport_cembureau.pdf>. Acessado em: 30 abr. 2017.

CEMBUREAU – **THE EUROPEAN CEMENT. The role of cement in the 2050 low carbono economy**. (2013) Disponível em: < <http://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/uploads/Modules/MCMedias/1380546575335/cembureau---full-report.pdf>>. Acessado em: 30 abr. 2017

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry: the Cement CO₂ and Energy Protocol**. Version3.0. Washington: World Business Council for Sustainable Development, 2011

CIMENTO ITAMBE– **cimento: Fabricação e características** – DUDA W 2002Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAepdEAI/apostila-cimento-itambe>> acessado em 26 de abril 2017

CULLEN, JM AND ALLWOOD, JM AND BORGSTEIN, EH (2011) **Reducing energy demand: what are the practical limits?** Environ Sci Technol, 45. pp. 1711-1718.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições minerais**. In: G. C. Isaia, Ed., Concreto: ciência e tecnologia, São Paulo: IBRACON, 2011. P. 261-309.

DAMIDOT, D.*et al.* **Thermodynamic sand cement science**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 679-695, 2011.

DAMTOFT, J. S. *et al.* **Sustainable development and climate change initiatives**. Cement and concrete research, v. 38, n. 2, p. 115-127, 2008.

DA ROCHA, Guilherme Gallo Neves. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Minas Gerais: Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica e de minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DE LIMA, A.B. **O processo produtivo do cimento Portland**. Minas Gerais: Monografia de Projeto Final de Curso, Especialização em engenharia de recursos minerais, Universidade de Federal de Minas Gerais, 2011.

DHANDAPANI, Y. et al. **Cement and Concrete Research Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC 3)**. Cement and Concrete Research, v. 107, n. February, p. 136–151, 2018.

DUART, M. A. **Estudo da Microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de Arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 126p.

GARTNER, E.; HIRAO, H. **A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete**. Cementand Concrete Research, 15 de junho de 2015. 126–142.

IEA, WBCSD. Cement Technology Roadmap 2009–**Carbon emissions reductions up to 2050. 2009.**

ISAKSSON, R. **Process based system models for detecting opportunities and threats – the case of World Cement Production. International Journal of Quality and Service Sciences, Vol. 8 Issue: 3, pp.246-262**, doi: 10.1108/IJQSS-05-2016-0043. Disponível em: <<http://www-emeraldinsight-com.ez54.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1108/IJQSS-05-2016-0043>> Acessado em: 01 mai. 2017

JOHN, V. M. **Cimento – produção mundial de pode dobrar sem aumentar CO2** -17 de abril de 2013 Disponível em <<http://www.poli.usp.br/pt/comunicacao/noticias/arquivo-de-noticias/1200>> acessado em 28 de maio de 2017.

JOSEPH, Shiju; JOSEPH, Aneeta Mary; BISHNOI, Shashank. **Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC³) in India**. In: Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer, Dordrecht, 2015. p. 501-507.

KERR, R.A. **Millennium’s Hottest Decade Retains its title, for now**. Science, Washington - DC v.307, 2005. 828-829.

LINS, D. N. **Análise de Resistência à Compressão do Cimento LC3 e a influência das adições minerais em seu desempenho**, Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2017.

MADLOOL, N. A. et al. **An overview of energy savings measures for cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 19, p. 18-29, 2013.

MAITY, Soumen; BISHNOI, Shashank; KUMAR, Arun. **Field Application of Limestone-Calcined Clay Cement in India**. In: Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer, Dordrecht, 2015. p. 435-441.

MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen. **Ecomaterials in low-cost housing, connecting cutting-edge science with the grassroots**. In: Technologies and Innovations for Development. Springer Paris, 2012. p. 101-111.

MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, PAULO J.M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1a Edição. São Paulo, IBRACON 2008.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

OLIVEIRA, MP de; BARBOSA, Normando P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006.

OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico, et al. **Strategies for the minimization of CO2 emissions from concrete**. Ambiente Construído 14.4 (2014): 167-181.

RAMOS, Márcio Dimas. **Estudo da Formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento**. 2015. Dissertação de Mestrado.

ROCCHI, A.C.N.L.; OLIVEIRA, J.M. (2017). **Avaliação da resistência à compressão de argamassas com o uso de cimento LC3 com diferentes proporções de filer calcário e argila calcinada**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81 p.

RODRIGO, F. L. **Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries**. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, v. 4309, p. 178, 2009.

SAYGIN, Deger. **Assessing industrial energy use and CO2 emissions: Opportunities for energy efficiency, biomass and CCS**. 2012. Tese de Doutorado.

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

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **SNIC 50 anos: História do cimento no Brasil**. Rio de Janeiro, 2003.

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

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **SNIC 50 anos: História do cimento no Brasil**. Rio de Janeiro, 2003.

SINDUSCON – MG. **O desempenho da construção civil nas duas décadas do Plano Real e desempenho recente**. Revista Pini Web, 8 ago. 2014. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/negocios/construcao-civil-cresceu-7425-nos-ultimos-20-anos-revela-estudo-323993-1.aspx>>. Acessado em: 25 novembro. 2017.

SNIC-SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC), **Produção Regional de cimento, Rio de Janeiro 2016**

THE CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE - CEMENT INDUSTRY CSI ASPIRES TO REDUCE CO₂, Disponível em <<https://www.wbcscement.org/.../2015/473-cement-industry-> Springer acessado em 9 de abril de 2018.>

VALDERRAMA, C. *et al.* **Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study**. Journal of Cleaner Production, v. 25, p. 60-67, 2012.

VAN RUIJVEN, Bas J. *et al.* **Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries**. Resources, Conservation and Recycling, v. 112, p. 15-36, 2016.

VIZCAÍNO ANDRÉS, Leng M. *et al.* **Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements**. Advances in Cement Research, v. 27, n. 9, p. 546-556, 2015.

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.