

## Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição

Study of the proportion of calcined clay and limestone filler in the LC3 cement at different replacement levels

Enéas de Andrade Barbalho<sup>1</sup> Eugênia Fonseca da Silva<sup>1</sup>  
João Henrique da Silva Rêgo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília – PECC/UnB, Brasília, DF, Brasil.  
e-mail: eneas.barbalho@gmail.com, eugenia@unb.br, jhenriquerego@unb.br

### RESUMO

O Brasil ainda apresenta um baixo consumo de cimento (260 kg/hab./ano) quando comparado a média mundial (553 kg/hab./ano), aliado ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura do país. A expectativa de crescimento populacional aponta para uma retomada do crescimento na produção em médio/longo prazo, aumentando entre 60% e 120%, em 2050 com relação a 2014 (nas variantes de baixa e alta demanda, respectivamente). No entanto, a indústria de cimento é adversamente afetada pela sustentabilidade, representando cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> do mundo. O Brasil é atualmente uma das referências mundiais na redução da quantidade de clínquer no cimento, para tanto, diferentes adições minerais são usadas para substituir o clínquer na produção de cimentos, e também vem sendo desenvolvido vários estudos para elevar ainda mais o uso dessas adições, o que representa a principal alternativa e desafio do setor na mitigação de suas emissões. 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. Pesquisas buscam adições minerais que tenham em abundância em todo o planeta. A argila calcinada e o filer calcário foram eficientes quando utilizados simultaneamente, dando origem a um novo cimento: o LC<sup>3</sup>. Esta pesquisa propõe analisar a percentagem de substituição e relação entre as adições que propicie melhor resistência à compressão com maior sustentabilidade dos cimentos LC<sup>3</sup>. Foram produzidas argamassas, feitas de cimentos com diferentes teores de substituição de clínquer por adições minerais. Os resultados indicam a viabilidade técnica do bom desempenho obtido pelo cimento LC<sup>3</sup>, capaz de substituir até 45% da quantidade do clínquer, com proporções de substituições de 2:1 e 3:1 (argila calcinada: filer calcário).

**Palavras-chave:** LC<sup>3</sup>; argila calcinada; filer calcário; índice de desempenho; sustentabilidade.

### ABSTRACT

Brazil still has a low cement consumption (260 kg / inhab./year) when compared to the world average (553 kg / inhab./year), coupled with the country's high housing and infrastructure deficit and the expectation of population growth, points to a resumption of production growth in the medium / long term, increasing between 60% and 120% in 2050 compared to 2014 (in the low and high demand variants, respectively), however, the cement industry is adversely affected by about 5% of the world's CO<sub>2</sub> emissions. Brazil is currently one of the world references in reducing the amount of clinker in cement. Therefore, different mineral additions are used to replace clinker in cement production, and several studies have been developed to further increase the use of these additions, which represents the industry's main alternative and challenge in mitigating its emissions. Blast furnace slag and fly ash are already being used for this purpose, however, they are not sufficiently available to meet current market demand. Research looks for mineral additions that are in abundance all over the planet. The calcined clay and limestone filler were efficient when used simultaneously, giving rise to a new cement, LC<sup>3</sup>. This research proposes to analyze the percentage of substitution and relation between the additions that provides better compressive strength with greater sustainability of the LC<sup>3</sup> cements. Mortars were made of cements with different levels of clinker replacement by mineral additions. The results indicate the technical viability of the good performance obtained by the LC<sup>3</sup> cement, capable of replacing up to 45% of the clinker quantity, with substitution ratios of 2: 1 and 3: 1 (calcined clay: limestone).

**Keywords:** LC<sup>3</sup>; calcined clay; limestone filler; Performance index; sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

A 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.

A demanda mundial de cimento Portland é muito elevada, sendo nos dias atuais um dos produtos mais consumidos do planeta. Com demanda anual da ordem de 3,6 bilhões de toneladas/ano, o consumo do cimento deverá aumentar 2,5 vezes até 2050[1]. 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 CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera” [2]. O Brasil ainda apresenta um baixo consumo de cimento (260 kg/hab./ano) quando comparado a média mundial (553 kg/hab./ano), aliado ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura do país e à expectativa de crescimento populacional, aponta para uma retomada do crescimento na produção em médio/longo prazo, aumentando entre 60% e 120% em 2050 com relação a 2014 (nas variantes de baixa e alta demanda, respectivamente).[3]

A indústria de cimento hoje apresenta elevada taxa de emissão de CO<sub>2</sub>, sendo responsável por cerca de cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> do planeta [4]. No processo de fabricação do cimento, a etapa de maior emissão de CO<sub>2</sub> 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 [5], na produção de clínquer, aproximadamente 40% das emissões está relacionada ao combustível e eletricidade. O restante, representado por 60% das emissões, provém da decomposição da principal matéria-prima do cimento, calcário ou CaCO<sub>3</sub>.

Com o intuito de amenizar impactos ambientais gerados nesse processo, a redução do teor de clínquer na composição final dos cimentos vem sendo uma alternativa estudada em diversos países do mundo, com na na Suíça, Índia, Cuba, EUA, China e Brasil. Para tanto, a utilização de adições minerais em substituição a parte do clínquer vem sendo cada vez mais aplicada na busca de cimentos mais sustentáveis.

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 [5], afirma que a disponibilidade destes materiais é localizada e a quantidade produzida é muito menor do que a necessária para 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 apresenta 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. No Brasil, as adições minerais ativas normalmente incorporadas à composição do cimento são a cinza volante, a escoria de alto forno, sendo o filler calcário ainda utilizado como inerte [6], no entanto atualmente, verifica-se que o filler apresenta preenchimento de vazios, refinamento de poro e conseqüente aumento da resistência e da durabilidade.

A interação entre argilas calcinadas e filler calcário foram comprovadas nos trabalhos de Antoni *et al.* [7], Antoni [8], Berriel *et al.* [9], e Medepalli *et al.* [10], mostraram que uma proporção de 2:1 de argila calcinada e filler garantiam um desempenho mecânico semelhante ao cimento Portland, com substituição de até 45%. Os resultados de Antoni *et al.* [6] também revelaram que a argila calcinada reagiu de forma mais eficiente juntamente com calcário em uma mistura ternária, do que em uma mistura binária. Para tanto, segundo Medeiros [11], é necessário de céleres metodologias avaliativas para, além da classificação, hierarquizar o desempenho das adições minerais a serem utilizadas na composição de cimento Portland.

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 filler calcário, materiais disponíveis em abundância em todo planeta. Este novo cimento é chamado LC<sup>3</sup> (Limestone Calcined Clay Cement).

Ainda segundo Scrivener [5], o LC<sup>3</sup> (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,

consequentemente, a produção de cimento com uma eficaz redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

Pesquisadores como, Antoni [8], Scrivener [5], Bishnoi *et al* [12], Lins [13], relatam uma ação potencializada quando se adiciona, simultaneamente, argila calcinada e filer calcário ao cimento, para formação do cimento (LC<sup>3</sup>).

No cimento LC<sup>3</sup>, a hidratação dos silicatos C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S 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.

Na mistura ternária que compõe o LC<sup>3</sup>, com a sinergia entre as adições, ocorre 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 à estabilização da etringita e, consequentemente, redução do mossulfoaluminato.[5]

No cimento LC<sup>3</sup>, a formação dos novos produtos de hidratação ocorre pela reação do aluminato, proveniente da argila calcinada(A), com o carbonato de cálcio(Cc), principal componente do filer calcário, na presença do hidróxido de cálcio(CH), formando o carboaluminato de cálcio hidratado (C<sub>3</sub>A.Cc.H<sub>12</sub>), conforme demonstrado na Equação 1 [5].



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste estudo foram produzidas argamassas compostas pelos seguintes materiais: cimento, areia, adições minerais, aditivo químico e água.

### 2.1 Cimento

Neste estudo, optou-se em utilizar o cimento CPV ARI por ser o cimento comercial utilizado no Brasil, com menor teor de adição e por consequência, maior teor de clínquer. Vale ressaltar que o cimento utilizado nesse estudo continha menor teor de filer calcário do que o CP V ARI, em vigor, pois foi produzido atendendo aos limites da antiga norma de cimento de alta resistência (ABNT NBR 5733:1991 [14], que estabelecia o teor de no máximo 5% de material carbonático. O cimento foi disponibilizado pela cimenteira Ciplan-DF. Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento se encontram no item 3.

### 2.2 Areia

Para a realização das argamassas foi utilizada areia normal brasileira, atendendo as especificações da NBR 7214 [16]. 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[17].

### 2.3 Adições minerais

As adições minerais utilizadas foram filer calcário e argila calcinada disponibilizadas pela cimenteira Ciplan-DF. Os resultados dos ensaios de caracterização das adições minerais se encontram no item 3.

### 2.4 Aditivo químico

Utilizou-se aditivo químico superplastificante a base de eterpolicarboxilato, tipo SP II, de acordo com a ABNT NBR 11768 [18], Tecflow 50N da Grace.

### 2.5 Água

Utilizou-se água da rede de abastecimento público fornecida pela companhia de água e esgoto de Brasília (CAESB).

### 2.6 Metodologia

Para a avaliação do comportamento mecânico das argamassas produzidas a partir do cimento LC<sup>3</sup>, objeto

deste estudo, optou-se por analisar o índice de desempenho, baseando-se nos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5752 [19], que permite avaliar novos cimentos produzidos em relação a um cimento de referência, a partir dos resultados em argamassas. Essa norma estabelece o uso do cimento CP II e descreve o índice de desempenho a ser realizado aos 28 dias. Nesse estudo, foram feitas algumas adaptações: o cimento utilizado foi o CP V ARI e foi calculado o índice para 3, 7, 28 e 91 dias.

Diferentes composições de cimento foram utilizadas na produção das argamassas, sendo três teores de substituição por adições minerais, (35%, 40% e 45%), sendo utilizadas três proporções de argila calcinada em relação ao filer calcário (2:1, 3:1 e 4:1), contabilizando um total de 10 misturas, 40 argamassadas e 160 corpos de prova cilíndricos de 5 cm x10 cm. Pesquisa realizada por DAMIDOT [20] estabeleceu a proporção de duas partes de metacaulim ou argila calcinada, para uma parte de filer 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 a melhor relação, e por se tratar de materiais de regiões diferentes, optou-se por três proporções de argila calcinada em relação ao filer calcário (2:1, 3:1 e 4:1). Na Tabela 1 são apresentadas as proporções utilizadas.

**Tabela 1:** Composição das argamassas.

Argamassa	CPV ARI (%)	Substituição total (%)	Relação argila/filer	Argila calcinada (%)	Filer calcário (%)
Referência	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

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

As argamassas foram preparadas utilizando-se um misturador mecânico, seguida da avaliação da consistência, conforme a ABNT NBR 13276 [21]. Foi estabelecido um espalhamento padrão de 200mm  $\pm$  10 mm, sendo necessária a utilização de aditivo superplastificante em todas as misturas, para que fosse obtido o índice de consistência estabelecido, a fim de manter a relação água/aglomerante 0,48 [17]. Os resultados encontrados para as características do cimento atendem os parâmetros de Norma Brasileira.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do cimento

A caracterização do cimento foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 16697:2018 [22]. Os resultados de caracterização obtidos estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Para análise quantitativa dos elementos químicos constituintes do cimento Portland de alta resistência inicial, utilizou-se o ensaio de fluorescência de raio-x por dispersão de energia e perda ao fogo (ABNT NBR NM 18:2012 [15]).

**Tabela 2:** Características físicas do cimento.

Características	CPV	Parâmetro (ABNT NBR 16697:2018)
Perda ao fogo (%)	2,68	$\leq 6,5$
Finura # 0,075 mm (%)	0,11	$\leq 6$
Área específica - blaine (m <sup>2</sup> /kg)	399,80	-
Tempo de início de pega (horas)	2,30	$\geq 1$

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,18	-
---------------------------------------	------	---

**Tabela 3:** Composição química do cimento, expresso em porcentagem.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CAO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MGO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	NA <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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

Verifica-se que o cimento Portland utilizado está de acordo com os limites de óxido de magnésio ( $\leq 6,5$ ), e trióxido de enxofre ( $\leq 4,5$ ), estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018 [22].

### 3.2 Caracterização das adições minerais

Para caracterização das adições foram realizados os seguintes ensaios: distribuição granulométrica a laser, massa específica determinada no pentapicnômetro, finura Blaine, difração de raio-x (DRX), área superficial BET e fluorescência por raio-x, conforme Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

**Tabela 4:** Dados retirados da análise granulométrica a laser.

Análise granulométrica	Argila calcinada	Fíler calcário
Diâmetro a 10% ( $\mu\text{m}$ )	1,09	1,22
Diâmetro a 50% ( $\mu\text{m}$ )	15,26	17,19
Diâmetro a 90% ( $\mu\text{m}$ )	45,08	51,26
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	19,61	22,00

De acordo com os valores obtidos na Tabela 3, é possível observar que a argila calcinada apresenta finura um pouco mais elevada que a do fíler calcário, apresentando partículas de menores diâmetros, em todas as peneiras acumuladas (D10, D50 e D90)

**Tabela 5:** Resultados de massa específica.

Adição mineral	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Argila calcinada	2,64
Fíler	2,73

**Tabela 6:** Resultados da finura blaine.

Adição mineral	Blaine (m <sup>2</sup> /kg)
Argila calcinada	1460,00
Fíler	441,50

**Tabela 7:** Resultados da área superficial BET.

Adição mineral	BET (m <sup>2</sup> /g)
Argila calcinada	20,872
Fíler	4,875

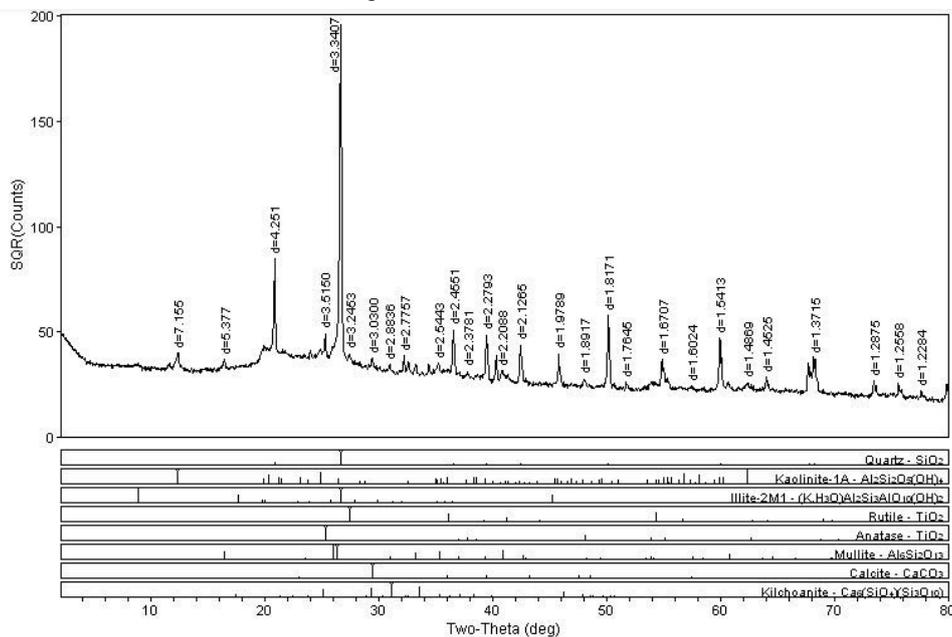
De acordo com os resultados obtidos, observa-se uma maior área superficial da argila calcinada em relação ao filer calcário.

**Tabela 8:** Composição química das adições minerais, expressas em porcentagem.

Óxidos	Argila calcinada	Fíler
SiO <sub>2</sub>	55,27	8,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,89	1,5
CaO	2,56	49,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,08	0,58
TiO <sub>2</sub>	2,01	0,08
MgO	0,73	-
K <sub>2</sub> O	0,49	9,43
SO <sub>3</sub>	0,48	-
BaO	0,36	-
MnO	-	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,08
SrO	-	-
Outros Óxidos	0,14	0,30
Perda ao fogo (%)	3,1	38,84

Os resultados obtidos para a argila calcinada estão de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 12653[23]. Os teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atendem à especificação mínima de norma, onde a soma desses óxidos deve ser igual ou superior a 70%. O teor de SO<sub>3</sub> também está dentro do limite de 4,0%.

Para a identificação dos principais compostos de cada uma das adições minerais, foi realizado o ensaio de difração de raios-X (DRX), conforme Figura 1.



**Figura 1:** Difratograma da argila calcinada.

Pelo difratograma são identificadas as fases cristalinas presentes, auxiliando também na verificação da amorficidade dos materiais, propriedade diretamente relacionada à pozolanicidade das adições. É possível observar picos cristalinos mais intensos de quartzo, caulinita e elita, além de picos menos intensos de diferentes formas cristalinas de óxido de titânio. Provavelmente o processo de queima não foi suficiente para desidroxilar completamente a caulinita, restando alguns picos cristalinos.

Em relação ao filer calcário, é possível observar picos mais intensos de carbonato de cálcio e quartzo

(Figura 2).

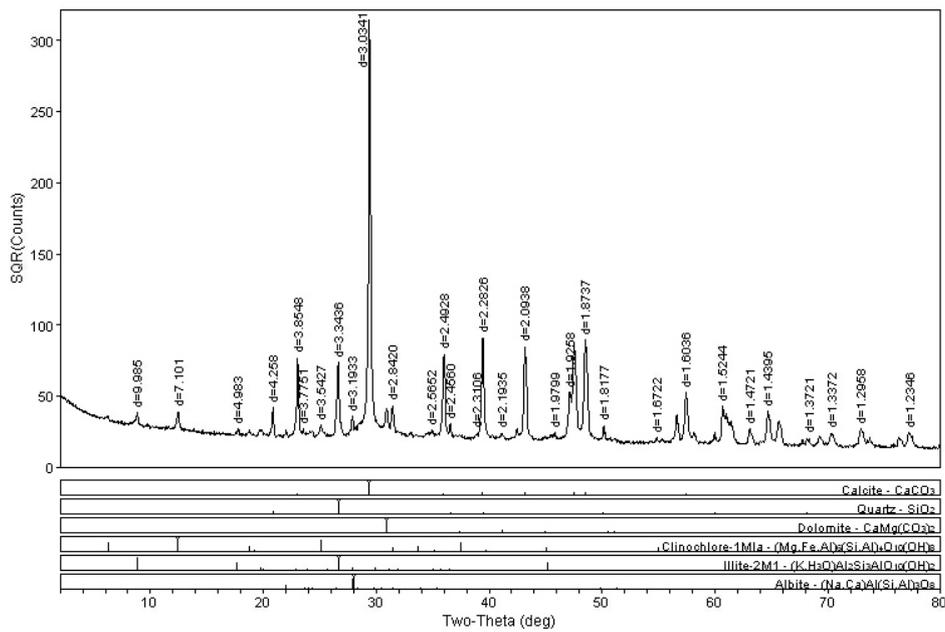
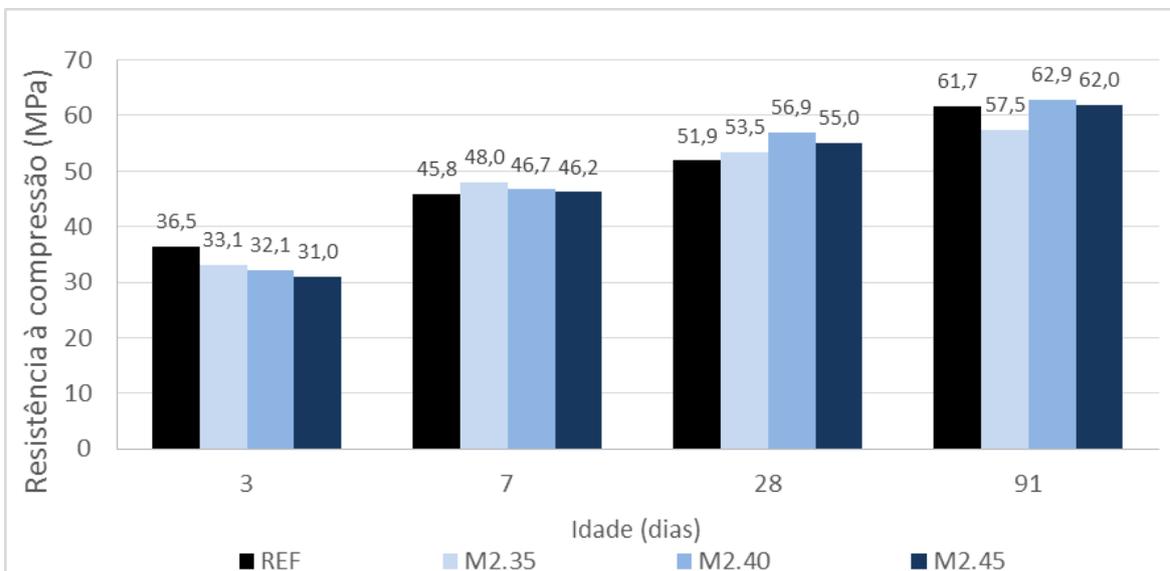


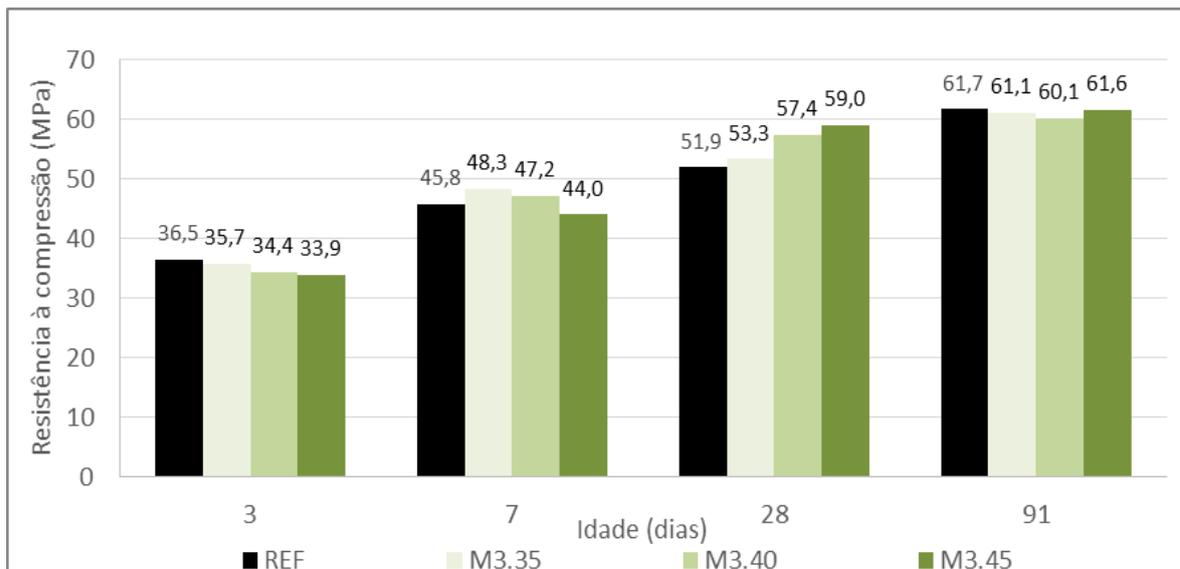
Figura 2: Difratoograma do filer calcário

### 3.3 Resistência à compressão

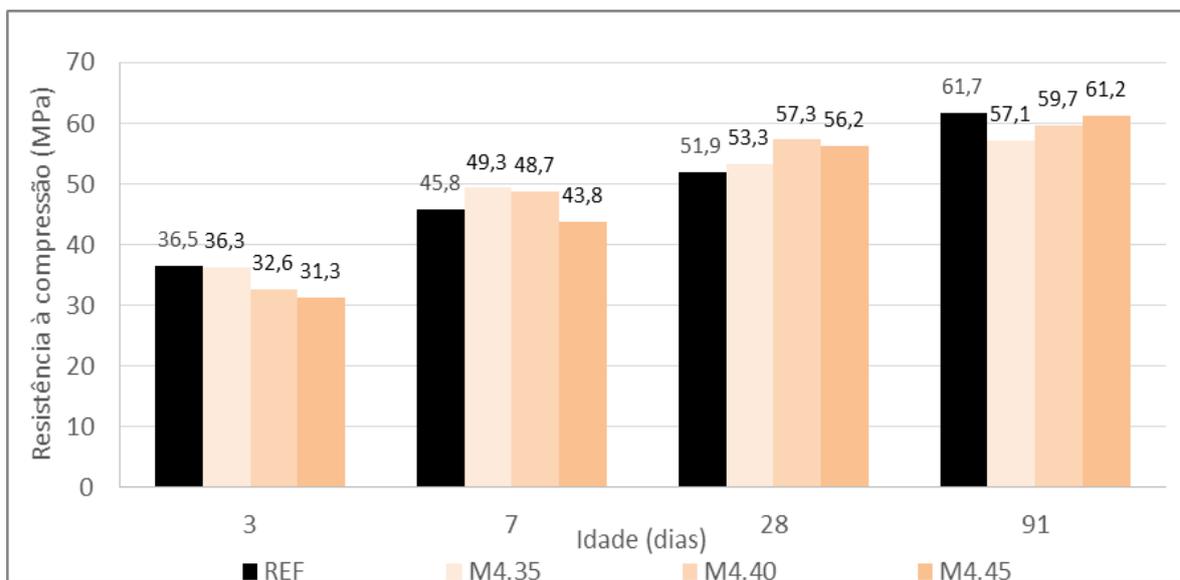
A determinação da resistência à compressão obedeceu à norma ABNT NBR 7215 [17]. A resistencia media foi calculada a partir dos resultados individuais de quatro corpos de prova, de 5 cm x10 cm. Na Figura 3 são apresentados os resultados médios de resistência à compressão das argamassas, nas idades 3,7,28 e 91 dias.



(a)



(b)



(c)

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

A partir dos resultados apresentados para as proporções de adição estudadas (2:1, 3:1 e 4:1), verifica-se que nas idades menores, 3 e 7 dias, o teor de substituição tende a ser inversamente proporcional à resistência à compressão obtida, ou seja, à medida que o teor de substituição aumenta, a resistência diminui. 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 pesquisa de ANTONI [8], tendem a ser formados em idades mais tardias.

### 3.4 Índice de desempenho

Na Figura 4, 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.

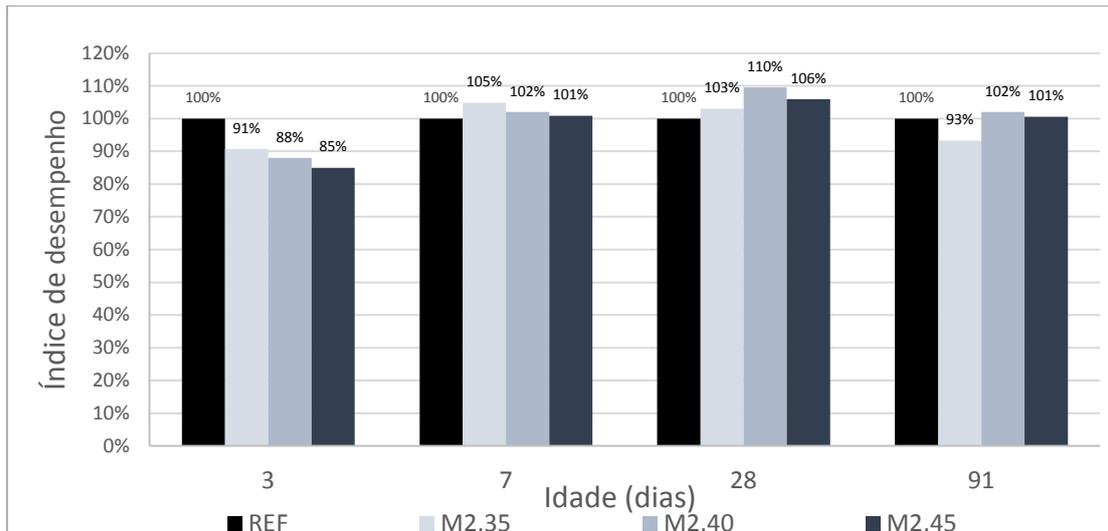


Figura 4: Índice de desempenho para as misturas com proporção de adições 2:1

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 a provavelmente formação de carboaluminato. A formação desse composto a partir de 7 dias está de acordo com a pesquisa de ANTONI *et al.* [7].

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

Aos 91 dias de idade, à mistura com 35% de substituição apresentou redução 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.

O resultado do índice de desempenho com teor de substituição de 35% deste estudo está muito próximo ao resultado com teor de substituição de 30% encontrado por LINS [7].

Na Figura 5 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.

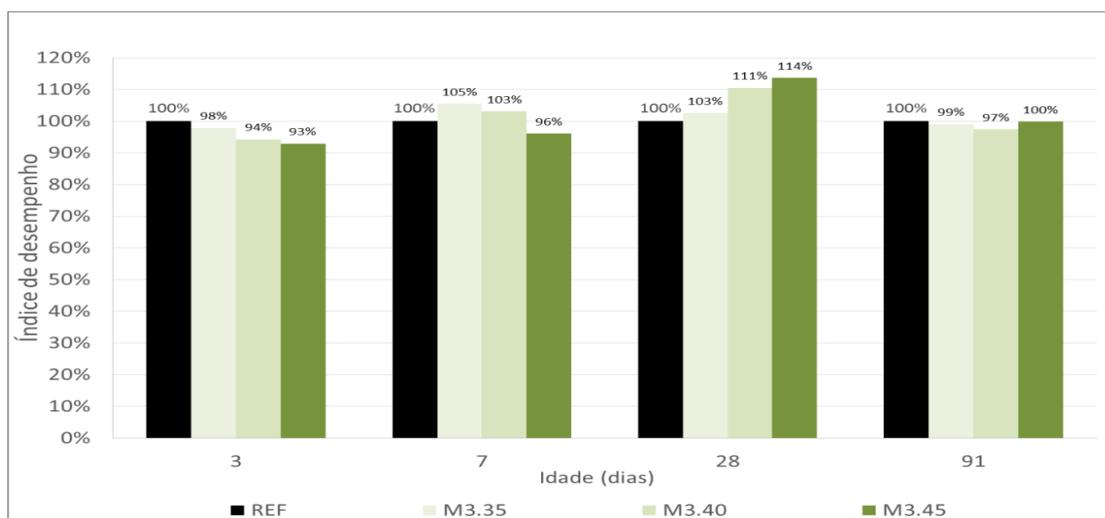


Figura 5: Índice de desempenho para todas as misturas com proporção de adições 3:1.

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.

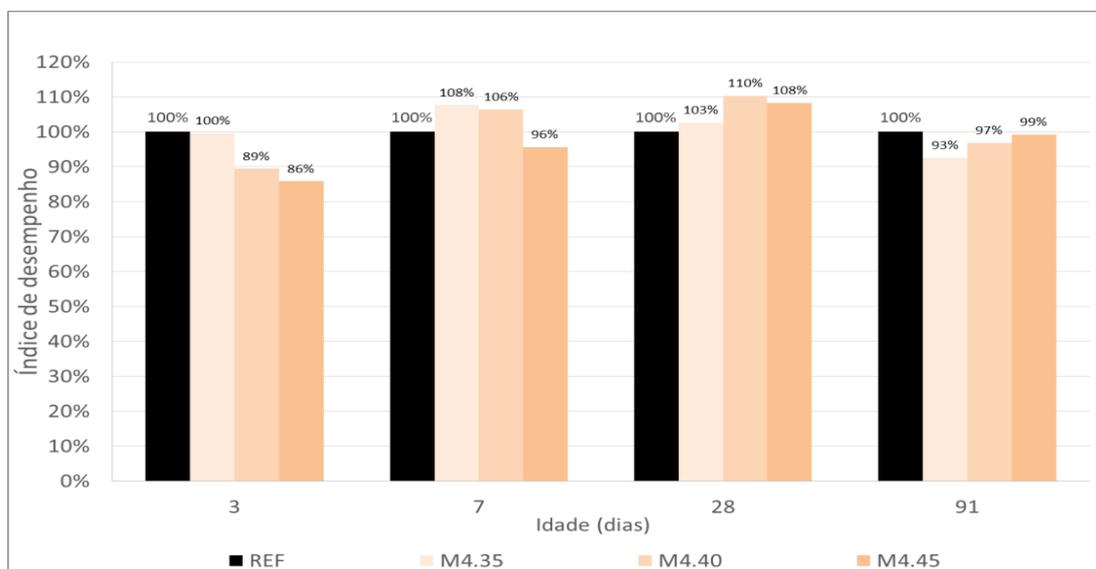
Aos 7 dias de idade, os resultados apresentam valores muito próximos ao de referência, chegando a um ligeiro aumento de resistência de até 5% na mistura com substituição de 35%, como ocorreu aos 7 dias para a proporção 2:1.

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 material mais caro.

Na Figura 6 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 6:** 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 maior custo.

### 3.5 Análise e estatística

Realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para averiguar a influência do tipo de cimento em função das variações do teor de substituição e do tipo de adição mineral. A idade adotada para a realização da análise estatística foi aos 91 dias de hidratação, tendo em vista que as reações pozolânicas são mais acentuadas em idades mais avançadas.

Para 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.

### 3.5.1 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 dessa pesquisa, foi considerado 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.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da análise de variância, considerando os resultados de resistência à compressão das argamassas, aos 91 dias.

**Tabela 9:** Resultados de análise de variância (ANOVA).

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Resultado
Proporção	20,10609	2	10,05304	5,31250	0,010181	Significativo
Teor	48,58989	2	24,29495	12,83859	0,000081	Significativo
Proporção x teor	41,89528	4	10,47382	15,71674	0,000001	Significativo

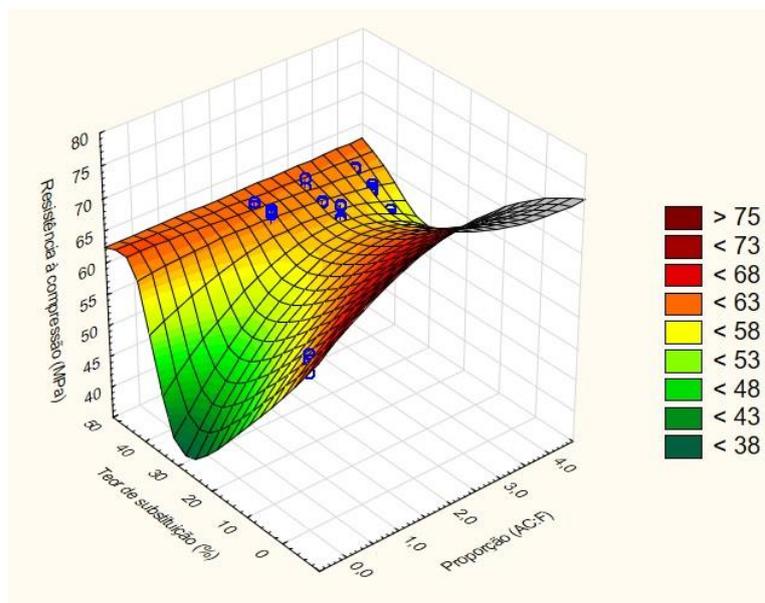
SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro fisher; Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não.

Verifica-se que tanto a proporção como o teor de adições minerais foi significativo, ou seja, tiveram influência significativa sobre a resistência à compressão, com destaque maior ao teor de substituição, por apresentar P valor igual a 0,000081 bem menor que o nível de significância ( $P < 0,05$ ).

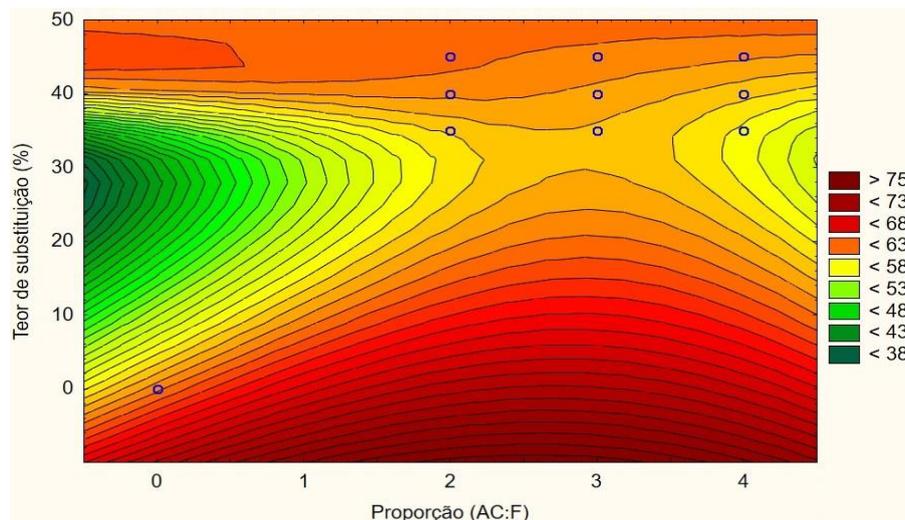
### 3.5.2 Superfície de resposta

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 7 e 8 estão representadas as superfícies de resposta obtidas, a partir dos resultados de resistência à compressão das argamassas, aos 91 dias de hidratação.

Nota-se um aumento na resistência à compressão com o aumento do teor de substituição do cimento por adições minerais. Por outro lado, ao se caminhar pelo eixo da proporção das adições, percebe-se ligeira variação dos resultados de resistência à compressão.



**Figura 7:** Superfície de resposta tridimensional da resistência à compressão aos 91 dias



**Figura 8:** Superfície de resposta bidimensional da resistência à compressão aos 91 dias.

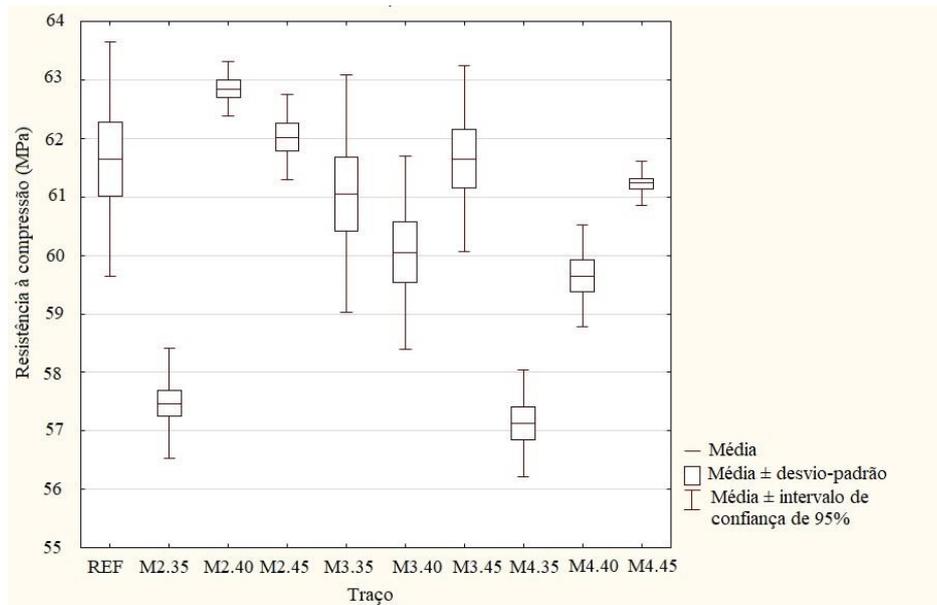
### 3.5.3 Teste de Duncan

O teste de Duncan permite o agrupamento de médias que sejam estatisticamente semelhantes e a separação de resultados estatisticamente diferentes (Tabela 10).

**Tabela 10:** Grupos de resistência à compressão das argamassas aos 91 dias.

Traço	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Referência	61,7	1,3				X	X
M2. 35	57,5	0,3	X				
M2. 40	62,9	0,3					X
M2. 45	62,0	0,5				X	X
M3. 35	61,1	1,3			X	X	
M3. 40	60,1	1,0		X	X		
M3. 45	61,6	1,0				X	X
M4. 35	57,1	0,5	X				
M4. 40	59,7	0,5		X			
M4. 45	61,2	0,2			X	X	

A partir da resistência à compressão obtida por cada argamassa, aos 91 dias, observa-se a formação de 5 grupos distintos, cujo resultado de resistência à compressão é crescente à medida que o número de identificação do grupo é maior. Na Figura 9, é possível verificar a representação gráfica da Tabela , com os valores médios de resistência à compressão e respectivos desvios-padrão.



**Figura 9:** Médias globais de resistência à compressão em função dos cimentos estudados (teste de Duncan).

Observa-se pelo teste de Duncan que os cimentos LC3 na proporção de 2:1 (com teor de substituição de 40 e 45%) e na proporção 3:1 (com teor 45%), pertencem a um mesmo agrupamento, correspondente às maiores resistências e aos melhores resultados obtidos nessa pesquisa, do ponto de vista mecânico. Ressalta-se que essas misturas apresentam resultados estatisticamente iguais aos do cimento de referência, da ordem de 62,0 MPa. Entretanto, para fins de sustentabilidade recomenda-se à proporção de 2:1 (argila calcinada: fíler calcário) e teor de 45% de substituição de cimento, em virtude do menor consumo de argila calcinada, que é mais cara que o fíler, e maior teor de substituição de cimento por adição.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados das argamassas feitas com diferentes teores de substituição de cimento Portland por adições mineiras, conclui-se que, nas primeiras idades (3 e 7 dias), à medida que o teor de substituição do aglomerante aumenta, a resistência diminui. Porém, observa-se que aos 28 dias, o comportamento foi alterado e a resistência cresce com o aumento do teor de adição. Esse comportamento também é verificado aos 91 dias de hidratação, quando as reações pozolânicas são mais acentuadas, considerando com as adições mineiras usadas nessa pesquisa.

Com relação ao índice de desempenho aos 91 dias dos cimentos LC3, observou-se que as misturas na proporção 2:1 (argila calcina:fíler calcário), contendo teores de substituição de 40 e 45%, e a mistura na proporção 3:1, com teor de substituição de 45% (argila calcina : fíler calcário), obtiveram resultados estatisticamente iguais ao do cimento de referência.

Destaca-se que os valores de substituição obtidos nessa pesquisa são bastante expressivos, promovendo grande redução da relação clínquer/cimento e reduzindo por consequência, as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Entretanto, quando avaliado o custo benefício, à proporção de 2:1 com teor de 45% de substituição é a mais promissora, pois além de não haver perda na resistência à compressão, comparada à mistura de referência, sua composição apresenta maior teor de substituição e menor quantidade de argila calcinada, tornando-se mais sustentável e mais econômica. Porém, outros estudos são necessários para avaliar a durabilidade e investigar a microestrutura dos cimentos LC<sup>3</sup>.

Diamidot *et al* [20], trabalhando com modelo termodinâmico chegou à mesma proporção encontrada nessa pesquisa (2 de argila calcinada para 1 de fíler calcário). O teor de substituição de 45% em relação ao cimento Portland também foi recomendado por ANTONI *et al*, [7].

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília, Cimenteira CIPLAN-DF e Controle Construções e Consultoria Ltda.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] JOHN, V. M, ESCOLA POLITÉCNICA, <http://www.poli.usp.br/pt/comunicacao/noticias/arquivo-de-noticias/1200>, acessado em maio de 2017.
- [2] DÍAZ, Y. C., BERRIEL, S. S., HEIERLI, U., *et al.*, “Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies”, *Development Engineering*, v. 2, pp.82-91, 2017.
- [3] ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO 2019 - Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.
- [4] GARTNER, E., HIRAO, H., “A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v.78, part A, pp.126-142, Dec. 2015.
- [5] SCRIVENER, K.L. “Options for the future of cement”, *Indian Concrete Journal*, v. 88, n. 7, pp. 11-21, July. 2014.
- [6] HOPPE FILHO, Juarez. REVISTA MATÉRIA, <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/13764/9416>, acessado em junho de 2019.
- [7] ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTIRENA, F., *et al.*, “Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone”, *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 12, pp. 1579-1589, Dec. 2012.
- [8] ANTONI, M., “Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone”, Tese de Doutorado, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2013.
- [9] BERRIEL, S. S., *et al.* “Assessment of Sustainability of Low Carbon Cement in Cuba. Cement Pilot Production and Prospective Case”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, pp. 189-194, 2015.
- [10] MEDEPALLI, S., SHAH, V., BISHNOI, S., “Production of lab scale limestone calcined clay cements using low grade limestone”, In: *International Conference On Sustainable Built Environment*, VII, 2017, Índia. New Delhi: ICSBE, 2017.
- [11] MEDEIROS, Marcelo, REVISTA MATÉRIA, <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/13765/9417>, acesso em junho de 2019.
- [12] BISHNOI, S., MAITY, S, MALLIK, A., *et al.*, “Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: The Indian experience”, *The Indian Concrete Journal*, v. 88, n.6, pp. 22-28- July.2014.
- [13] LINS, D. N. “Análise de Resistência à Compressão do Cimento LC<sup>3</sup> e a influência das adições minerais em seu desempenho”, Dissertação de Mestrado, PECC/UNB Brasília, DF, Brasil, 2017.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para cimento - Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, ABNT, 1996.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768 Aditivos para Concreto de Cimento Portland requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- [20] DAMIDOT, D. “Thermodynamic sand cement science”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, pp. 679-695, Nov. 2011
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos - Preparo. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.



**ORCID**

Enéas de Andrade Barbalho

Eugênia Fonseca da Silva

João Henrique da Silva Rêgo

<https://orcid.org/0000-0001-9804-6872>

<https://orcid.org/0000-0001-8097-6107>

<https://orcid.org/0000-0001-9060-2010>