

## Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC<sup>3</sup>

### Effect of gypsum content on the compressive strength of LC<sup>3</sup> cement

Christian Moreira<sup>1</sup>, João Henrique da Silva Rego<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC/UNB, CEP: 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

e-mail: concretoleve.eng@gmail.com, jhenriquerego@ig.com.br

---

#### RESUMO

A sociedade tem exigido da indústria cimenteira soluções para minimizar a emissão de CO<sub>2</sub> causada pelo processo de fabricação de cimento Portland. A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS's) substituindo parte do clínquer é uma das opções mais viáveis para reduzir a emissão desse poluente. O cimento LC<sup>3</sup> é um novo tipo de cimento que utiliza altos teores de MCS's, contando com a reação sinérgica entre argila calcinada e fíler calcário para obter resistências mecânicas similares às dos cimentos tradicionais. Esta pesquisa se propõe a investigar a influência do conteúdo de gipsita na resistência à compressão de um cimento LC<sup>3</sup> aos 1, 3, 7, 28 e 91 dias, tendo em vista que os efeitos da variação do teor de gipsita na resistência mecânica do cimento LC<sup>3</sup> são pouco compreendidos. Para a realização deste estudo foram produzidas seis argamassas. Em três delas o cimento de referência (clínquer+ gipsita) foi produzido com 3, 5, 7% de gipsita, sem adições. Em três argamassas foi utilizado um cimento LC<sup>3</sup> com 45% de substituição do clínquer (30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário). A proporção de gipsita nesses cimentos foi de 3, 5 e 7% em relação à massa total. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco por meio do ensaio de espalhamento, levando-se em consideração o teor de superplastificante utilizado em cada argamassa. Para a análise do estado endurecido, foi feita a comparação das resistências à compressão nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias. Foi realizada uma análise estatística (ANOVA e teste de DUNCAN) sobre os resultados. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que o teor de gipsita influencia na resistência à compressão do cimento LC<sup>3</sup>. Nas primeiras idades, de 1 a 7 dias, os maiores resultados de resistência à compressão foram obtidos por cimentos com teores de gipsita de 5%. Nessas três idades o cimento LC<sup>3</sup> com 5% de gipsita teve resultados comparáveis com os cimentos de referência. Aos 28 e 91 dias os cimentos LC<sup>3</sup> com 7% de gipsita levaram aos maiores valores de resistência à compressão, sendo que o maior valor aos 91 dias foi de 40,0 Mpa, comparável aos cimentos de referência.

**Palavras-chave:** cimento LC<sup>3</sup>; argila calcinada; fíler calcário; resistência à compressão; gipsita.

---

#### ABSTRACT

The cement industry has been required to minimize the CO<sub>2</sub> emissions caused by the Portland cement manufacturing process. The use of supplementary cementitious materials (MCS's) replacing part of the clinker is one of the most viable options to reduce the emission of this pollutant. LC<sup>3</sup> cement is a new type of cement that uses high MCS contents, counting on the synergistic reaction between calcined clay and limestone to obtain mechanical strength similar to that of traditional cements. This research intends to investigate the influence of the gypsum content on the compressive strength of a LC<sup>3</sup> cement at 1, 3, 7, 28 and 91 days, considering that the effects of the gypsite content on the mechanical resistance of the LC<sup>3</sup> cement are little understood. For the accomplishment of this study six mortars were produced. In three of them the reference cement (clinker + gypsum) was produced with 3.5% gypsum, without additions. In three mortars an LC<sup>3</sup> cement with 45% clinker replacement (30% calcined clay and 15% limestone) was used. The proportion of gypsum in these cements was 3, 5 and 7% in relation to the total mass. The properties in the fresh state were evaluated by means of the spreading test, taking into account the superplasticizer content used in each mortar. For the hardened state analysis, the compressive strengths were compared at the ages of 1, 3, 7, 28 and 91 days. A statistical analysis (ANOVA and DUNCAN test) was performed on the results.

From the results obtained it was possible to verify that the gypsite content influences the compressive strength of the LC<sup>3</sup> cement. In the early ages, from 1 to 7 days, the greatest results of compressive strength were obtained by cements with gypsum contents of 5%. At these three ages the 5% gypsum LC<sup>3</sup> cement had comparable results with the reference cements. At 28 and 91 days LC<sup>3</sup> cements with 7% gypsum led to the highest values of compressive strength, and the highest value at 91 days was 40.0 MPa, comparable to the reference cements.

**Keywords:** cement LC<sup>3</sup>; calcined clay; filler limestone; compressive strength; gypsum.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos produtos mais consumidos do mundo. Concretos e argamassas respondem por uma fatia imensa do mercado de materiais, sendo vitais ao desenvolvimento da indústria da construção de edifícios e de infraestrutura. Tão grande é sua importância que os índices de produção e consumo de cimento Portland costumam servir de indicadores de crescimento ou retração da economia de um país.

O cimento Portland é constituído de clínquer. O processo de fabricação do clínquer envolve alta emissão de CO<sub>2</sub>, devidos à queima de combustíveis e ao processo de descarbonatação do calcário. Para a fabricação de uma tonelada de cimento, emite-se aproximadamente 900 kg de CO<sub>2</sub>, o que torna a fabricação do produto responsável por 5 – 8% de todas as emissões antropogênicas do gás [1].

Por isso o processo de produção do cimento é considerado invasivo e lesivo ao meio ambiente. Tornou-se um ponto capital na indústria cimenteira o desenvolvimento de produtos que atendam a demandas tecnológicas e comerciais cada vez mais complexas e ao mesmo tempo sejam menos agressivos ao meio, sem comprometer as qualidades essenciais do produto. Várias soluções têm sido experimentadas. Uma das mais viáveis é a utilização, em larga escala, dos materiais cimentícios suplementares (MCS's) em composição com o clínquer.

Os MCS's mais utilizados são a escória de alto forno, a cinza volante, a argila calcinada e o fíler calcário. Cinzas volantes, escórias de alto forno e argilas calcinadas são adições pozolânicas, que reagem com o hidróxido de cálcio (CaOH<sub>2</sub>) gerado na hidratação do clínquer e formam C-S-H extra. Ocorre que a utilização de escória e de cinza volante depende de sua disponibilidade que é vinculada a outros processos industriais. Já as argilas e os fileres são abundantes na natureza em praticamente toda crosta terrestre. A diminuição do consumo de clínquer e o aumento no consumo de MCS's representa um passo importante no sentido de tornar o cimento mais sustentável, já que conjuga materiais abundantes, menor consumo energético e menor emissão de CO<sub>2</sub> em relação aos cimentos com maiores quantidades de clínquer.

LC<sup>3</sup> é a sigla para “limestone / calcined clay cement” ou cimento de fíler calcário e argila calcinada. Esses cimentos começaram a ser produzidos, inicialmente de forma experimental e depois em larga escala, principalmente na Índia e em Cuba [1]. Os bons resultados obtidos chamaram a atenção da comunidade internacional para a pesquisa do produto.

As características de hidratação dos MCS's componentes do cimento LC<sup>3</sup> (argila calcinada e fíler calcário) isoladamente são amplamente conhecidas. É aceito atualmente que o fíler calcário reage com os componentes do clínquer quando adicionado em pequenas quantidades e acelera a hidratação do cimento nas primeiras idades. O fíler cria pontos extras de nucleação heterogênea, favorece as reações e melhora o empacotamento do sistema. Proporciona, porém, o efeito diluição, o que limita o seu percentual de utilização. [2]. As argilas calcinadas atuam como pozolanas, reagindo com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do clínquer e formando C-S-H extra. As argilas também atuam como pontos de nucleação nas primeiras idades, devido à sua finura e também colaboram no empacotamento do sistema [3].

Vários autores [1-13] afirmam que existe uma reação sinérgica entre a argila calcinada e o fíler calcário. Essa reação melhoraria ainda mais as características microestruturais da pasta, levando a uma elevação na resistência mecânica e melhoria no sistema de poros.

Em trabalho de 2012, pesquisadores [4] estudaram cimentos com adição de metacaulim e fíler calcário. Os autores trabalharam vários percentuais de substituição ao clínquer. Os resultados das resistências mecânicas das amostras mostraram valores maiores, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, que os valores das argamassas de referência.

Vários fatores influenciam o desempenho dos cimentos LC<sup>3</sup> e são parâmetros importantes na formulação destes. O teor de substituição é um desses fatores. Isso foi comprovado por MARTIRENA e SCRIVENER [14], que apresentaram um prognóstico baseado em modelagem termodinâmica que mostra que até 60% de clínquer pode ser substituído sem diminuir o volume total de produtos de reação produzidos durante a hidratação do cimento. A resistência mecânica, afirmam os autores, não deve ser comprometida,

assim como o ganho de resistência nas primeiras idades. Este sistema de cimento pode alterar os limites da substituição do clínquer sem comprometer o desempenho em comparação com um cimento normal.

Trabalhando com mistura contendo 55% de clínquer, 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário, colocar sobre nome dos autores (vide acima)[15] investigaram o efeito da finura dos vários elementos nas propriedades mecânicas e na microestrutura. A argila calcinada continha 50% de caulinita. O aumento da finura da argila calcinada e do clínquer melhora a resistência mecânica em todas as idades e o aumento da finura do fíler tem efeitos apenas nas primeiras idades. A formação de carboaluminatos hidratados devido à combinação de argila calcinada com fíler calcário é confirmada neste caso, mesmo a argila possuindo um índice moderado de caulinita.

Desde o trabalho de idem [16] a proporção entre argila calcinada e fíler calcário mais utilizada é a 2:1, ou seja, duas partes de argila e uma de fíler. Outros autores [4, 17] também sugerem essa proporção. A proporção ótima depende da quantidade de caulinita presente na argila [13].

Em um estudo utilizando argilas caulínicas “pobres” (44% de caulinita), calcinadas a 750°C em combinação com fíler calcário, idem [18] demonstraram que as fases hidratadas encontradas correspondem à reação pozolânica (contribuição da argila calcinada) e à estabilização de fases (contribuição do fíler), modificando a estrutura porosa e desenvolvendo interessantes propriedades mecânicas com larga redução de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Os autores concluíram que os cimentos compostos com argila calcinada e fíler calcário demonstram resistência mecânica similar à da referência aos 28 dias (ainda que a argila calcinada tenha um baixo grau de pureza) devido à interação entre esses dois componentes.. A adição de argila calcinada e fíler aumenta o volume de poros com menor diâmetro [18].

Não foi encontrado nenhum trabalho que enfoque a influência do teor de gesso no comportamento do cimento LC<sup>3</sup>, embora Antoni (2012) afirme que o sistema é sensível a esse parâmetro. O teor ótimo de gesso nos cimentos LC<sup>3</sup> permanece como uma lacuna que demanda maiores pesquisas. Neste contexto, esta pesquisa visa compreender o resultado da variação do teor de gipsita na resistência mecânica dos cimentos LC<sup>3</sup>.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para realização dos experimentos, os cimentos foram fabricados em laboratório. O cimento de referência foi do tipo CP-I, fabricado apenas com clínquer e gipsita. Esses materiais foram fornecidos separadamente por uma indústria cimenteira da região de Brasília/DF/Brasil. O clínquer foi moído juntamente com 3, 5 e 7% de gipsita, em massa, dando origem a três tipos de CP-I. Clínquer e gipsita foram introduzidos em um moinho de bolas com 25 kg de bolas de aço e capacidade de 7 kg de material. O tempo de moagem foi definido para se obter um intervalo padrão que resultasse em um cimento com granulometria adequada para obedecer aos limites estabelecidos pelas normas brasileiras [19]. A finura foi verificada através da sua área superficial obtida com o método de Blaine. Por tentativas foi definido 180 minutos como tempo de moagem mais adequado.

Para a obtenção do cimento LC<sup>3</sup>, os 7 kg de materiais moídos (clínquer + gesso) representaram 55 % da massa total de cimento. Nesse caso foi necessário alterar as proporções de clínquer e gipsita colocados no moinho de forma que ao final do processo de produção dos cimentos LC<sup>3</sup> existissem a proporção de 3, 5 e 7% em massa de gipsita, em relação à massa total do cimento LC<sup>3</sup> produzido. Os outros 45 % foram compostos de argila calcinada (30%) e fíler calcário (15%).

A argila calcinada utilizada na produção dos cimentos LC<sup>3</sup> foi fornecida por uma indústria cimenteira localizada no Brasília já na granulometria adequada para substituição do clínquer. O fíler calcário utilizado na produção dos cimentos LC<sup>3</sup> foi doado por uma empresa mineradora situada em nos arredores de Brasília já devidamente moída. A argila calcinada e o fíler foram misturados posteriormente aos processo de moagem do clínquer e da gipsita para produção dos cimentos LC<sup>3</sup>.

Para manter a uniformidade dos resultados, a areia que foi utilizada nesse trabalho é a Areia Normal Brasileira. Essa areia é especificada pelas normas brasileiras [20].

O aditivo superplastificante usado foi do tipo polifuncional. O aditivo foi utilizado com a finalidade de manter o índice de consistência das demais argamassas, semelhante ao índice obtido na argamassa de referência, respeitando a variação máxima de até  $\pm 10$  mm, sendo dispensável o seu uso quando a consistência obtida nas demais argamassas forem maiores ou iguais ( $\pm 10$  mm) à obtida na argamassa de

referência.

Para realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos químicos constituintes dos materiais complementares, foi realizado o ensaio de fluorescência por raios-x. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 1.

**Tabela 1:** Resultados da fluorescência de raios X, área superficial BET e granulometria a laser da argila calcinada, filer calcário, clínquer e gesso.

DADOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	Argila Calcificada (%)	Clínquer(%)	Fíler Calcário(%)	Gipsita (%)
	SiO <sub>2</sub>	61,13	17,60	4,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,9	4,20	0,35	1,4
MgO	0,4	6,40	3,9	2,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	3,70	0,13	1,5
CaO	3,45	65,52	48,73	37,2
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,30	0,009	0,4
K <sub>2</sub> O	0,51	0,90	0,012	0,2
TiO <sub>2</sub>	1,9	0,24	0,015	0,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,14	0,009	0,0
MnO	0	0,03	0,002	0,0
SO <sub>3</sub>	0	0	0	37,3
Perda ao fogo (%)	2,2	0,67	42,37	14,8
<b>Total (%)</b>	<b>99,77</b>	<b>99,7</b>	<b>99,53</b>	<b>99,80</b>
GRAN.	D10	1,86	-	1,66
	D50	20,33	-	19,74
	D90	56,59	-	71,48
	Diâmetro Médio	25,14	-	29,16
BET	Area Sup. BET (m <sup>2</sup> /g)	13,979	-	3,774

Através da análise da fluorescência de raios X do clínquer, nota-se que foram atendidas as exigências da norma [21] sendo elas: a porcentagem de óxido de magnésio menor ou igual a 6,5% e de trióxido de enxofre (não identificado no ensaio) menor ou igual a 4,0%.

A norma [22] determina os requisitos mínimos para o uso de materiais pozolânicos em cimentos Portland, sendo eles: a soma dos óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deve ser maior que 70%, o teor de SO<sub>3</sub> (não identificado no ensaio) deve ser 4%, no máximo, e a perda ao fogo deve ser, no máximo, 10%. Analisando o resultado da argila calcinada, infere-se que ela atende todos os requisitos.

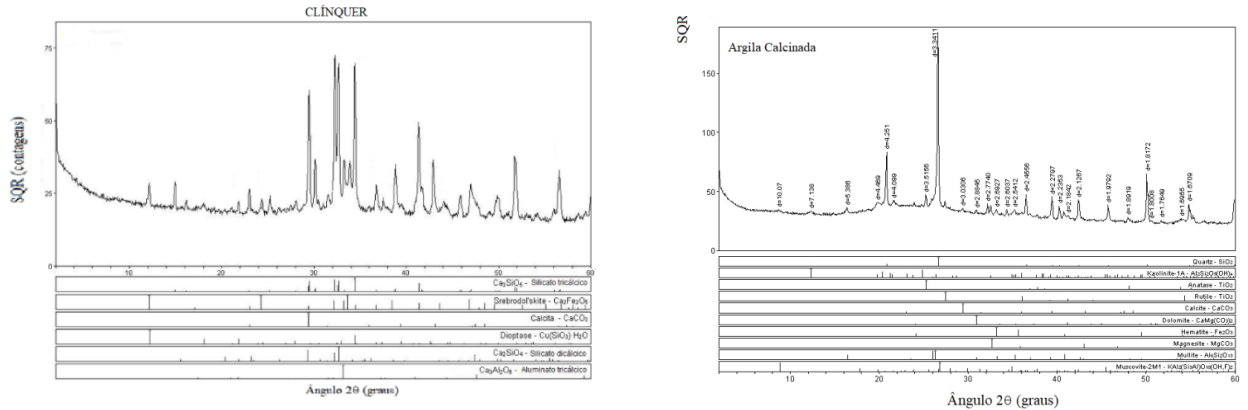
O ensaio de BET mede a área superficial dos materiais, sendo importante ressaltar que esse ensaio considera a rugosidade do material. Nota-se que a área superficial da argila calcinada é bem maior do que a do filer calcário.

A Tabela 1 demonstra os diâmetros nos quais passam 10%, 50% e 90 % do material, além dos diâmetros médios. A argila calcinada e o filer calcário tem distribuições granulométrica semelhantes

Foi realizado, também, o ensaio de difração de raios-X dos materiais. A difratometria de raios X mostra de forma qualitativa os compostos cristalinos presentes no material. A figura 1 apresenta os difratogramas de cada material utilizado nos cimentos utilizados no artigo.

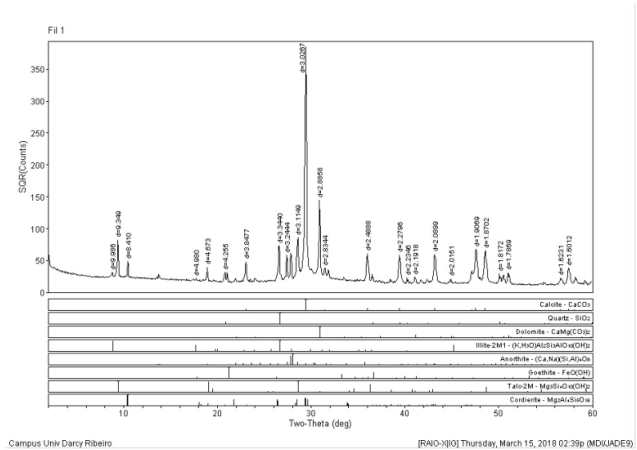
Como esperado, o difratograma de raios-X do clínquer apresentou pico nos silicatos (C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S), compostos responsáveis pela resistência do cimento e também do aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A). Nota-se que, por não estar presente no banco de dados do equipamento, o ensaio não detectou a presença do outro principal composto do clínquer, o ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF).

A argila calcinada exibiu compostos cristalinos semelhantes, apresentando picos de grandes intensidades, relacionados ao quartzo e à caulinita. Outro fator importante a ser observado é a presença de material amorfo, já que esses compostos são diretamente relacionados à reatividade. Esses materiais, diferentemente dos cristalinos, apresentam picos mais largos gerando um desvio da linha base (Hoppe Filho et al., 2017), como exibido na Figura 1 entre os ângulos de 15 e 35 graus. Observa-se que o filer apresentou os principais picos nos mesmos compostos cristalinos, quartzo e calcita. Entretanto, podem ser percebidas grandes diferenças na intensidade desses picos. A gipsita apresentou o pico principal no sulfato de cálcio, com a presença de picos menores de quartzo e alumina.

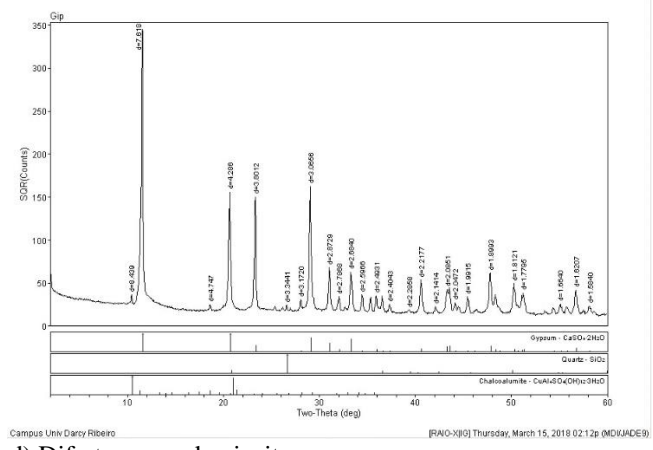


a) Difratograma do clínquer

b) difratograma da argila calcinada



c) Difratograma do filer calcário



d) Difratograma da gipsita

Figura 1: Difratogramas de raios X do a) clínquer, b) argila calcinada, c) filer calcário e d) gipsita.

## 2.2 Métodos

Nesta fase da pesquisa foram investigadas seis formulações de cimentos, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2: Formulações percentuais de cimentos de referência e LC <sup>3</sup> (para 624 g de cimento) Nomenclatura	CL(%)	GP(%)	AC(%)	FA(%)	CL (g)	GP(g)	AC(g)	FA(g)
REF3	97	3	-	-	605,28	18,72	-	-
REF5	95	5	-	-	592,80	31,20	-	-
REF7	93	7	-	-	580,32	43,68	-	-
AC345A	52	3	30	15	324,48	18,72	187,20	93,60
AC545A	50	5	30	15	312,00	31,20	187,20	93,60
AC745A	48	7	30	15	299,52	43,68	187,20	93,60

Sendo:

CL – teor de clínquer.

AC – teor de argila calcinada

GP – teor de gipsita

FA – teor de fíler calcário

As argamassas foram preparadas de acordo com colocar nome [23]. A argamassa de referência REF5 serviu de base para o estabelecimento de um espalhamento padrão (+- 10 mm) a ser obtido pelas demais misturas. Para isso foi utilizado aditivo superplastificante caso os espalhamentos tivessem valores inferiores aos das referências.

Os cilindros moldados foram rompidos aos 1, 3, 7, 14, 28 e 91 dias e sua resistência mecânica foi avaliada. Para fazer a análise das argamassas, o resultado final também será expresso em índice de desempenho, calculado através da norma brasileira que determina o índice de desempenho de materiais pozolânicos usados no cimento Portland [24]. Seguindo os procedimentos dessa norma é possível utilizar o índice para comparação entre outros tipos de cimentos. O índice de desempenho é expresso pela equação:

$$I_{\text{cimento}} = F_{\text{cm}} / F_{\text{cr}}$$

Sendo:

$I_{\text{cimento}}$  - Índice de desempenho do cimento

$F_{\text{cm}}$  - Média das resistências a compressão das argamassas com MCS's

$F_{\text{cr}}$  - Média das resistências a compressão da argamassa de referência.

Os resultados de resistência a compressão passaram por uma análise estatística, tendo sido empregados o Teste de Variância, ANOVA, e o Teste de Duncan. O Teste de Variância mostra se existem diferenças significativas nos resultados em função de alterações nas variáveis independentes. O Teste de Duncan divide os resultados em grupos por semelhança estatística. A análise de variância ANOVA foi realizada no software Microsoft Office Excel na opção "Anova: fator único", com nível de significância 0,05. O teste de Duncan foi realizado no software Statística V10, com nível de significância 0,05.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Avaliação no estado fresco

Os resultados de espalhamento e o teor de aditivo superplastificante utilizado em cada argamassa encontram-se expostos na Tabela 3.

**Tabela 3:** Dosagem de aditivo superplastificante e espalhamentos obtidos.

Argamassa	Espalhamento sem superplastificante (mm)	Espalhamento com superplastificante(mm)	Superplastificante (%)
REF3	211,20	-	-
REF5	210,80	-	-
REF7	210,50	-	-
AC345A	112,50	209,90	0,75
AC545A	125,40	210,60	0,73
AC745A	128,50	211,50	0,70

Nota-se que nenhuma das argamassas precisou de um teor de superplastificante maior do que o recomendado pelo fabricante (1,5%). Os cimentos LC<sup>3</sup> precisaram de teores semelhantes de superplastificante para atingir espalhamentos próximos aos das referências. O cimento com maior teor de gipsita foi o que requereu menos superplastificante. O fíler calcário utilizado apresentou uma superfície específica semelhante à do clínquer. A argila calcinada, por sua vez, apresentou uma superfície específica quase quatro vezes maior que a do clínquer. Esse fato explica o comportamento dos cimentos LC<sup>3</sup>. A superfície específica elevada da argila calcinada aumenta a demanda de água para mistura das argamassas, o que determina a utilização dos superplastificantes [15].

### 3.2 Avaliação no estado endurecido

A tabela 4 mostra os resultados do teste ANOVA para as resistências à compressão em cada idade.

**Tabela 4:** ANOVA para a resistência à compressão aos 1, 3, 7, 28 e 91 dias de hidratação.

IDADE	SQ	MQ	F	p-valor	F crítico	Resultado
<b>1 dia</b>	342,7485	68,5497	52,8341	3,95E-10	2,7729	Significativo
<b>3 dias</b>	104,1971	20,8394	16,7344	3,25E-06	2,7729	Significativo
<b>7 dias</b>	223,9637	44,7927	4,1427	0,0111	2,7729	Significativo
<b>28 dias</b>	185,8630	37,1726	3,7056	0,0176	2,7729	Significativo
<b>91 dias</b>	122,0865	24,4173	8,9558	0,0002	2,7729	Significativo

Onde:

SQ= Soma dos quadrados;

MQ= Média dos quadrados;

F= Parâmetro de Fisher para o teste de significância;

p-valor= probabilidade de significância;

F crítico= Parâmetro de Fisher crítico para o teste de significância

A variável independente avaliada foi o teor de gipsita. Como o p-valor foi menor que o nível de significância 0,05 em todas as idades analisadas, os resultados foram significativos, caracterizando heterogeneidade entre os resultados de resistência à compressão dos traços em cada uma das idades estudadas. Isso quer dizer que o teor de gipsita é uma variável que interfere nos resultados de resistência a compressão em cada idade estudada. A tabela 5 mostra os resultados do Teste de Duncan para as resistências à compressão em cada idade. Ao formar os grupos, o Teste de Duncan mostra que não existe diferença estatística significativa entre as médias pertencentes a um mesmo grupo, expressando para esses valores uma igualdade estatística. Pode-se, assim, comparar o desempenho dos cimentos com menor possibilidade de erro. A mesma tabela traz os índices de desempenho dos cimentos com relação aos cimentos de referência de mesmo teor de gipsita, em cada idade.

**Tabela 5:** Classificação por grupos de resistência à compressão aos 1, 3, 7, 28 e 91 dias.

Idade	Traço	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Índice de Desemp.
1 dia	REF3	19,0	0,6771			X			1,00
	REF5	20,8	1,0508				X		1,00
	REF7	23,1	0,4394					X	1,00
	AC345	12,8	0,6265	X					0,67
	AC545	22,3	1,5327				X	X	1,07
	AC745	15,0	1,8131		X				0,65
3 dias	REF3	26,3	1,7406		X		-	-	1,00
	REF5	29,8	1,6639			X	-	-	1,00
	REF7	25,3	0,9867	X	X		-	-	1,00
	AC345	26,2	0,4384		X		-	-	1,00
	AC545	29,4	0,6355			X	-	-	0,99
	AC745	24,1	0,3225	X			-	-	0,95
7 dias	REF3	27,4	0,9160	X	X		-	-	1,00
	REF5	32,3	2,3788		X	X	-	-	1,00
	REF7	34,7	2,4816			X	-	-	1,00
	AC345	29,5	4,7426	X	X	X	-	-	1,08
	AC545	32,8	1,1294			X	-	-	1,01
	AC745	26,1	5,3339	X			-	-	0,75
28 dias	REF3	34,1	2,6479	X	X		-	-	1,00
	REF5	38,4	1,7087		X	X	-	-	1,00
	REF7	40,4	1,0776			X	-	-	1,00
	AC345	32,4	5,5463	X			-	-	0,95
	AC545	33,8	4,1153	X	X		-	-	0,88
	AC745	36,2	1,1833	X	X	X	-	-	0,90
91 dias	REF3	37,6	1,5950	X	X			-	1,00
	REF5	41,5	2,4730			X	X	-	1,00
	REF7	43,4	1,1474				X	-	1,00
	AC345	39,1	0,4361	X	X	X		-	0,90
	AC545	36,8	0,7015	X				-	0,89
	AC745	40,0	2,3875		X	X		-	0,92

Observação: Os grupos são independentes entre as idades. Dessa forma, os grupos de uma idade não estão relacionados com os grupos das demais idades.

Há necessidade de expressar graficamente os dados. São os dados principais e não há nenhum gráfico a respeito. Graficamente é sempre mais prático de se identificar resultados.

Ao realizar o teste de Duncan com as resistências médias na idade de 1 dia, foi observado que foram formados 5 grupos de valores de resistência à compressão. Aos 3, 7 e 28 dias, os dados de resistência à compressão foram agrupados em 3 classes. Aos 91 dias foram formados 4 grupos de resistência à compressão.

Entre os cimentos CP-I, com exceção da idade de 3 dias, em todas as outras a resistência à compressão aumenta com o teor de gipsita.

Com 1 e 3 dias de hidratação, os maiores valores de resistência mecânica entre os cimentos LC<sub>3</sub> foram com teores de gipsita de 5%, sendo que os resultados dos dois grupos são estatisticamente iguais. Aos 7 dias mais uma vez os cimentos com 5% de gipsita obtiveram os melhores resultados, desta vez acompanhados pelos cimentos LC<sub>3</sub> com 3% de gipsita.

Em trabalho de 2018, pesquisadores [25] demonstraram os inconvenientes tanto da falta quanto do excesso de SO<sub>3</sub> nas primeiras horas. Para esses autores, a etringita, formada pela reação da gipsita com o C<sub>3</sub>A



do cimento, é o principal hidrato responsável pelas resistências nas primeiras horas. A falta de gipsita gera uma condição de subsulfatação do cimento, reduzindo as taxas de hidratação da alita e as resistências mecânicas iniciais. O excesso de gipsita causa grande formação de etringita, por causa da aceleração das reações antes do pico principal de hidratação, aumentando a porosidade da matriz e diminuindo as resistências mecânicas.

Existe a afirmação que o tipo e a quantidade de gipsita incorporada ao cimento tem influência significativa na resistência mecânica das idades iniciais, e ajustes devem ser feitos na quantidade de gipsita a fim de otimizar os resultados mecânicos da mistura [26]. Para esses autores, a taxa de gipsita nos cimentos LC<sup>3</sup> deve ser cuidadosamente controlada porque é ela que regula a reação dos aluminatos e as resistências iniciais.

Aos 28 dias e 91 dias de hidratação, entre os cimentos LC<sub>3</sub>, o de teor de gipsita mais alto levou às maiores resistências de compressão. A explicação desse comportamento pode estar no fato de que os cimentos apropriadamente sulfatados levam a uma taxa ideal de produção de etringita que, estabilizada, pode contribuir nas idades tardias para o preenchimento dos poros da matriz, com conseqüente aumento da resistência mecânica [27]. Tal resultado também corrobora as afirmações que o efeito combinado da gipsita e do fíler (CaCO<sub>3</sub>) pode aumentar as resistências mecânicas nas idades finais, já que a presença do SO<sub>3</sub> extra faz com que se conservem os aluminatos da matriz. Estes ficam disponíveis para reagir com o CaCO<sub>3</sub>, formando monocarboaluminatos que contribuem para a resistência mecânica final [27].

Considerando o baixo teor de clínquer dos cimentos LC<sup>3</sup>, e também que o pior índice de desempenho dos cimentos aos 91 dias foi de 89 %, os resultados confirmam o desempenho mecânico adequado do cimento LC<sup>3</sup>, mostrado por pesquisas anteriores [28-29].

#### 4. CONCLUSÕES

Em resumo, pode-se catalogar as seguintes conclusões:

- Os cimentos LC<sub>3</sub> apresentam valores de resistência compatíveis aos de referência na maioria dos casos, demonstrando a viabilidade da sua utilização.
- Os cimentos com 5% de gipsita demonstram, inicialmente, ser os que tem o teor mais próximo do teor ótimo para utilização nos cimentos LC<sub>3</sub>.
- Acontece uma melhora progressiva no índice de desempenho dos cimentos LC<sub>3</sub> com 7% de gipsita, com a idade.

Nas idades iniciais, os cimentos com 5% de gipsita apresentam melhores resultados. Nas idades tardias, os cimentos com maior índice de gipsita, 7%, apresentam maiores valores de resistência. As diferenças, porém, são pequenas nas idades tardias, de menos de 10%. Assim, pode-se afirmar que o teor de gipsita que leva aos melhores resultados de resistência mecânica é o de 5%.

Ainda são necessários maiores estudos dos cimentos LC<sup>3</sup> com diferentes teores de gipsita. Trabalhos futuros que analisem aspectos microestruturais das diversas pastas auxiliarão na compreensão dos resultados.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelos apoios financeiros para a realização de pesquisas no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB).

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] SCRIVENER, K. L., "Options for the future of cement", *Indian Concrete Journal*, v.88, n.7, pp. 11-21, jul. 2014.
- [2] TIRONI, A., CASTELLANO, C.C., BONAVETTI, V.L., *et al.*, "Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: hydration and properties", *Construction Building Materials*, v.64, n.8, pp.215–221, ago. 2014.
- [3] TIRONI, A., SCIAN, A. N., IRASSAR, E. F., "Ternary blended cement with limestone filler and kaolinitic calcined clay", In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, pp. 195-201, Dordrecht, out. 2015.
- [4] 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, dez. 2012.
- [5] MAITY, S., BISHNOI, S., KUMAR, A., "Field Application of Limestone-Calcined Clay Cement in India", *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, pp. 435-441, Dordrecht, out. 2015.

- [6] TAYLOR-LANGE, S.C., LAMONE, L., RIDING, K.A., *et al.*, “Calcined kaolinite–bentonite clay blends as supplementary cementitious materials”, *Applied Clay Science*, v.108, pp. 84-93, mai. 2015.
- [7] PARASHAR, A., KRISHNAN, S., BISHNOI, S., “Testing of suitability of supplementary materials mixed in ternary cements”, *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v. 1, pp. 419-426, Dordrecht, out. 2015.
- [8] NIED, D., STABLER, C., ZAJAC, M., “Assessing the Synergistic Effect of Limestone and Metakaolin”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.1, pp. 245-251, Dordrecht, out. 2015.
- [9] PUERTA-FALLA, G., BALONIS, M., LE SAOUT, G., *et al.*, “The influence of metakaolin on limestone reactivity in cementitious materials”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.1, p. 11-19, Dordrecht, out. 2015.
- [10] BISHNOI, S., MAITY, S., “Limestone calcined clay cement: The Experience in India This Far”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.2, pp.64-68, Genebra, mai. 2017.
- [11] BERRIEL, S.S., DÍAZ, Y.C., MARTIRENA J.F., *et al.*, “Assessment of sustainability of low carbon cement in Cuba: cement pilot production and prospective case”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, v.1, pp. 189-194, Dordrecht, out. 2015.
- [12] AVET, F., SCRIVENER, K., “Hydration study of limestone calcined clay cement (LC3) using various grades of calcined kaolinitic clays”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.2, pp.35-40, Genebra, mai. 2017.
- [13] SCRIVENER, K., MARTIRENA, F., BISHNOI, S., MAITY, S., “Calcined clay limestone cements (LC<sup>3</sup>)”, *Cement and Concrete Research*, v. 114, pp.49-56, dez. 2018.
- [14] MARTIRENA, F., SCRIVENER, K., “Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.1, pp. 323-329, Dordrecht, out. 2015.
- [15] VIZCAÍNO ANDRÉS, L. M., “Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements”, *Advances in Cement Research*, v. 27, n. 9, pp. 546-556, jul. 2015.
- [16] DAMIDOT, D., LOTHENBACH, HERFORT, D., *et al.*, “Thermodynamic sand cement science”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, pp. 679-695, mai. 2011.
- [17] BISHNOI, S., MAITY S., KUMAR M., SAXENA S.K., WALI S.K., “Pilot scale production of limestone calcined clay cement”, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.2, pp.69-74, Genebra, mai. 2017.
- [18] TIRONI, A., CASTELLANO, C.C., BONAVETTI, V.L., *et al.*, “Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: hydration and properties”, *Construction and Building Materials*, v. 64, pp.215–221, ago. 2014.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- [25] HERRERA-MESEN, C., SALVADOR, R.P., CAVALARO, S., H., P., *et al.*, “Effect of gypsum content on sprayed cementitious matrices: early age hydration and mechanical properties”, *Cement and concrete composites*, v.95, pp.81-91, jan. 2019.
- [26] MEDEPALLI, S., SHAH, V., BISHNOI, S., “Production of lab scale limestone calcined clay cements using low grade limestone”, In: *7th International Conference on Sustainable Built Environment*, 1382-1, Kandy, Sri Lanka, 16-18 dez.2016.
- [27] ZHANG, Y., ZHANG, X., “Research on effect of limestone and gypsum on C3A, C3S and PC clinker system”, *Construction and building materials*, v. 22, pp. 1634-1642, abr. 2008.

[28] ANTONI, M., “Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone”, Tese de D.Sc., École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Suíça, 2013.

[29] LINS, D., REGO, J.H.S, SILVA, E., “Analysis of the mixing performance containing the LC3 as agglomerant with different types of calcined clay” 2017, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, v.2, pp.279-285, Genebra, mai. 2017.

**ORCID**

Christian Moreira <https://orcid.org/0000-0002-1819-1963>

João Henrique Silva Rego <https://orcid.org/0000-0001-9060-2010>