CAPÍTULO 37 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/pyh4xn23
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/dtkpky09

DESEMPENHO DO CIMENTO PARA DIFERENTES LOTES NO FORNECIMENTO AO LONGO DE UM PERÍODO DE SEIS MESES

Diecson Ronei Meotti[1], Gustavo Alexandre Ferraz de Carvalho e Souza[2]*; Eduardo Polesello[3];
*Autor de contato: gustavodecarvalhoesouza@gmail.com

[1] Curso de Engenharia Civil, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil
[2] Curso de Engenharia Civil, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil
[3] Curso de Engenharia Civil, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil

RESUMO

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades de resistência e endurecimento. Contudo, variações em sua composição, relacionadas às matérias-primas e às adições minerais, podem influenciar o desempenho entre diferentes lotes. Este estudo analisou amostras de uma mesma classe de cimento coletadas durante seis meses. Foram avaliadas a massa específica, a resistência à compressão axial e o calor de hidratação por meio de curvas calorimétricas obtidas em calorímetro semi-adiabático. Também foram registrados os tempos de início e fim de pega das pastas de cimento. Os resultados mostraram variações na massa específica das amostras. Todas atenderam às exigências normativas de resistência à compressão. Aos 28 dias não houve influência significativa do lote na resistência. Entretanto, nas idades de 3 e 7 dias foram observadas diferenças relacionadas à mudança de lote. Amostras com maior temperatura apresentaram menores intervalos entre início e fim de pega.
Palavras-chave: cimento, resistência à compressão, calor de hidratação.

ABSTRACT

Portland cement is widely used in civil construction due to its strength and hardening properties. However, variations in its composition, related to raw materials and mineral additions, can influence performance between different batches. This study analyzed samples of the same cement class collected over a six-month period. Specific density, axial compressive strength, and heat of hydration were evaluated using calorimetric curves obtained from a semi-adiabatic calorimeter. The initial and final setting times of the cement pastes were also recorded. The results showed variations in the specific density of the samples. All samples met the standard requirements for compressive strength. At 28 days, there was no significant influence of the batch on compressive strength. However, at 3 and 7 days, differences related to batch changes were observed. Samples with higher temperatures showed shorter intervals between the initial and final setting times.

Keywords: Cement, compressive strength, heat of hydration.

1. INTRODUÇÃO

A NBR 12655 (ABNT, 2022, p.5) define o cimento Portland como "aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual, se adiciona, durante esta operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar materiais pozolânicos a essa mistura, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores indicados nas normas específicas."

No processo de hidratação do cimento, ocorre uma reação química dos compostos do cimento com a água transformando em calor a energia liberada por essa reação. Para a tecnologia do concreto esse calor de hidratação dos cimentos é fundamental, já que pode promover condições favoráveis e desfavoráveis para as características do concreto, como ganho de resistência e fissuração. O comportamento em relação ao tempo de pega e endurecimento dos cimentos podem ser descritos através de conhecimentos adquiridos por meio de estudos sobre o calor de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A velocidade de desenvolvimento de calor é considerada para determinadas finalidades mais relevantes que o calor total de hidratação, podendo ser afetada pela temperatura em que ocorre a hidratação. O calor de hidratação é uma propriedade decorrente da composição química do cimento. Os cimentos Portland mais usuais liberam no tempo compreendido entre 1 e 3 dias, próximo da metade do calor total gerado pela hidratação, em 7 dias próximo aos 75% e após 6 meses a liberação de 90% do seu calor total (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Viecili et al. (2018) registraram os tempos de início e fim de pega para diferentes amostras de cimentos CP II F-40 e CP V-ARI RS, através de calorimetria semi-adiabática, e verificaram comportamentos diferentes na elevação de temperatura de um cimento para o outro. Para as curvas do cimento CP V ARI RS foi registrada uma semelhança no período dormente e na aceleração, porém com maior variação nos picos de temperaturas máximas registradas, segundo os autores relacionado a presença dos resíduos insolúveis na composição do cimento e suas respectivas quantidades, que variam de 7,0 a 16,5%. No entanto, o estudo conclui que o ensaio de calorimetria semi-adiabática se mostrou eficaz para a análise dos tempos de início e fim das pastas de cimento analisadas, devido ao fato do método ter apresentado em geral, baixa variação nos resultados.

Quando a composição do cimento é constante, a taxa de reatividade e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência, podem ser aprimorados através da moagem mais fina do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A obtenção de cimento sem variação é considerada impossível devido a diversidade de componentes da matéria-prima e suas variações, além de outros fatores intervenientes como variações de temperatura da queima, tempo de exposição no forno de calcinação, moagem, incorporação de adições minerais ao clínquer entre outros, que fazem parte processo de fabricação do cimento Portland (GIRARDI, 2014). Para Helene e Terzian (1992), a variabilidade na composição do cimento Portland pode interferir em até 50% na resistência à compressão do concreto, observando que em uma obra de grande porte pode-se gerar uma economia de aproximadamente 10% se o cimento possuir uma baixa variabilidade em sua resistência à compressão.

Observa-se a necessidade e importância de verificar e conhecer as características do cimento, em detrimento de sua utilização posterior na produção de argamassas e concretos. Assim,

este estudo tem como objetivo analisar o comportamento mecânico e os tempos de pega de amostras de cimento, sempre da mesma classe, coletadas em diferentes lotes no fornecimento ao longo de um período de seis meses.

2. METODOLOGIA

O estudo contemplou a análise e monitoramento de dez amostras de cimento coletadas, ao longo de um período de 6 meses de fornecimento a granel, no recebimento junto a uma empresa parceira da região que produz concreto dosado em central.

2.1 Materiais

O cimento utilizado analisado neste estudo foi o cimento Portland CP II F-40 que, segundo especificações normativas, deve respeitar os limites impostos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), em particular às características detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros normativos para o cimento Portland tipo CP II F-40

Parâmetro	Resistência à compressão (MPa)			Tempos de pega (min)	
	3 dias	7 dias	28 dias	Início	Fim
Limite Normativo	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	≥ 60	≤ 600

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Segundo dados dos laudos fornecidos pelo fabricante, as características, das amostras de cimento utilizadas durante o período de ensaios, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados das amostras do cimento segundo laudos técnicos do fabricante

Amostra		A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10
Massa Específica (g/cm³)		3,08*									
Início de Pega (min)		240	255	273	263	258	250	253	245	250	250
Fim de Pega (min)		300	320	343	330	323	310	315	308	315	310
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	34,4	33,1	33,1	33,0	32,8	32,0	33,3	33,0	33,8	34,0
	7 dias	39,5	38,7	38,7	38,0	37,8	37,0	37,3	37,5	38,4	38,6
	28 dias	46,7	46,5	46,5	45,4	45,8	45,7	45,9	46,0	46,3	46,7

*Observa-se que nos certificados de análises das amostras estudadas, ao longo do período analisado, a informação do fornecedor é que a massa especifica permaneceu inalterada.

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica do Fabricante (2023).

Para determinação da resistência à compressão do cimento, seguiu-se as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019) e, para tal, além do cimento e água, utilizou-se areia normal em quatro diferentes frações. A quantidade para cada material é fixada pela norma, conforme detalhado na Tabela 3.

Material	Cimento	Água	Frações de Areia Normal			
			Grossa	Média grossa	Média fina	Fina

Quantidade (g)	624±0,4	300±0,3	468±0,3	468±0,3	468±0,3	468±0,3

Tabela 3 – Detalhamento dos materiais das argamassas para determinação da resistência à compressão do cimento
Fonte: Adaptado da NBR 7215 (ABNT, 2019).

A água de amassamento utilizada para preparo das misturas executadas neste estudo é uma água oriunda de poço artesiano, e atende aos critérios regidos pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009). A exemplo do resultado do ensaio de pH que relutou em 7,20, enquadrando-se com a prescrição da norma ao especificar que a água de amassamento deve apresentar pH ≥ 5, mostrando-se adequada para o uso na produção das misturas.

2.2 Métodos

De forma a avaliar o comportamento das amostras de cimento analisadas, além de validar as informações dos laudos técnicos disponibilizados pelo fabricante, realizaram-se os ensaios de massa específica, resistência à compressão do cimento e ensaio de calorimetria semi-adiabática.
O ensaio de massa específica de todas as amostras de cimento, conforme ensaio apresentado pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

Para esse ensaio de resistência à compressão do cimento, seguiu-se o que preconiza a NBR 7215 (ABNT, 2019), que estabelece a mistura da argamassa em misturador mecânico e moldagem de corpos de prova cilíndricos, em fôrmas metálicas com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Após realizada a mistura, em argamassadeira, e moldagem, os corpos de prova permaneceram nas formas, em cura inicial, por 24 horas. Posteriormente, foram submetidos ao processo de cura, permanecendo submersos em tanque de cura com solução saturada de hidróxido de cálcio, até as respectivas idades de rompimento estabelecidas no estudo.

Para cada amostra de cimento analisada, moldaram-se 9 corpos de prova, 3 para cada idades de ensaio, definidas neste estudo em 3, 7 e 28 dias. Os rompimentos dos corpos de prova foram realizados com o uso da uma prensa hidráulica elétrica, marca Solotest.
Os resultados obtidos foram registrados em planilhas e posteriormente analisados, apresentando os resultados individuais, média, desvio padrão e coeficiente de variação. Adicionalmente, os dados foram submetidos a uma análise estatística.

Com o auxílio de um calorímetro semi-adiabático (Figura 1), foram registrados o calor de hidratação e os tempos de início e fim de pega, seguindo o procedimento apresentado por Sandberg e Benini (2008).

Figura 1 – Calorímetro semi-adiabático utilizado na pesquisa



Fonte: Acervo dos Autores (2024).

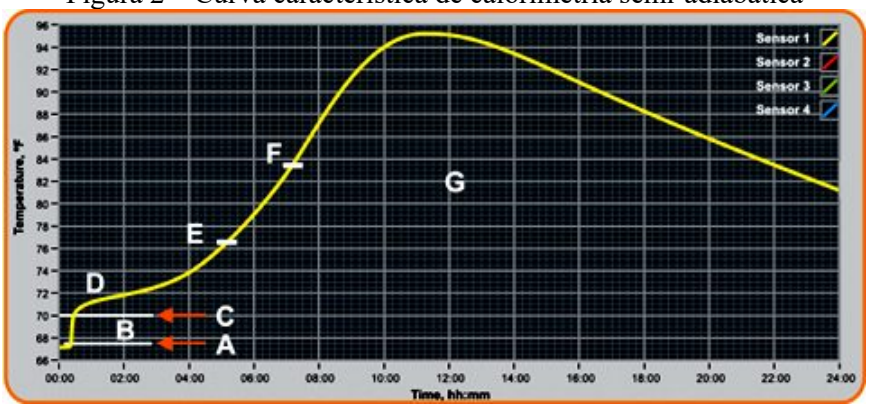
Adotou-se como método de preparo, para as pastas de cimento, o mesmo utilizado por Nunes e Polesello (2022). Para o preparo das pastas de cimento, em função do tamanho dos

compartimentos e posição dos sensores, foram utilizados copos plásticos com capacidade para 500 ml. Em decorrência desse volume, adotou-se como padrão, para produção das pastas, uma quantidade de 400 gramas de cimento e 260 gramas de água, mantendo-se fixa a relação água/cimento.

Para garantir uma boa homogeneização dos materiais, definiu-se um tempo de mistura de 60 segundos. Após esse processo, as pastas de cimento foram imediatamente levadas ao calorímetro semi-adiabático e submetidas ao ensaio de calorimetria semi-adiabática.

Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada em 22±2 °C. Ainda, para cada ensaio, as pastas ficaram acondicionadas dentro do calorímetro por um período, mínimo, de 72 horas. A leitura e coleta de dados foi realizada a cada minuto, por meio de sensores termopares conectados ao software AdiaCal, específico do equipamento utilizado. Assim, foi possível extrair os resultados e gerar as curvas calorimétricas das amostras, analisando os tempos de pega e a máxima temperatura gerada da mistura, segundo metodologia de coleta dos dados do calorímetro realizada considerando os critérios apresentados por Sandberg e Benini (2008), conforme curva típica de um ensaio em um calorímetro semi-adiabático, apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Curva característica de calorimetria semi-adiabática



Fonte: Sandberg e Benini (2008).

A Figura 2 apresenta o calor de hidratação do cimento em relação ao tempo, indicado na curva traçada. Cada uma dessas letras, destacadas na imagem, representa um comportamento diferente no processo: a letra A representa o início do ensaio, quando a amostra de pasta é inserida no porta amostras do calorímetro; a letra B representa o momento de equalização das temperaturas entre equipamento e a pasta; a letra C apresenta a temperatura da amostra de pasta coletada; a letra D compreende o período de dormência; as letras E e F correspondem aos tempos aproximados de início e fim de pega respectivamente; e, por fim, a letra G representa o progresso da resistência da mistura cimentícia provindo da hidratação dos silicatos.

Conforme detalhado pelo método adotado, com o auxílio do software específico do equipamento (AdiaCal), foi possível o registro dos tempos de início e fim de pega, conforme ilustram as letras E e F.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as dez amostras de cimento coletadas, ao longo do período de 6 meses de fornecimento a granel, no recebimento junto a uma empresa parceira da região que produz concreto dosado em central, são detalhados na sequência.

3.1 Massa Específica

A fim de verificar o resultado apresentado pelo fornecedor da massa específica do cimento que, segundo registro nas fichas técnicas, permaneceu inalterado ao longo do período de coleta de amostras analisadas neste estudo, realizou-se a determinação da massa específica de cada uma das amostras. Os resultados encontrados encontram-se detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica obtida para as amostras de cimento analisadas

Amostra	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10
Massa específica (g/cm³)	3,08	3,12	3,10	3,08	3,07	3,05	3,06	3,07	3,05	3,06

Fonte: Autores (2024).

Observa-se, pelos resultados obtidos, que não há uma uniformidade no resultado da massa específica das amostras, assim como apresentado pelo fornecedor, de 3,08 g/cm³. O resultado dos ensaios registrou mínimas diferenças, registrando um coeficiente de variação inferior a 1,0%, não sendo possível identificar se há alguma variabilidade na produção do cimento ao longo do período analisado. No entanto, ao analisar um período mais longo de tempo, Girardi (2014) aponta a impossibilidade de obter cimento com um padrão uniforme, devido as consideráveis variações tanto na homogeneidade das matérias primas quanto no processo de fabricação do cimento.

3.2 Resistência à Compressão

Os resultados médios de resistência, desvio padrão e desvio relativo médio dos rompimentos dos corpos de prova de cimento estão apresentados no Tabela 5.

Tabela 5 - Resistência à compressão média, desvio padrão e desvio relativo das amostras

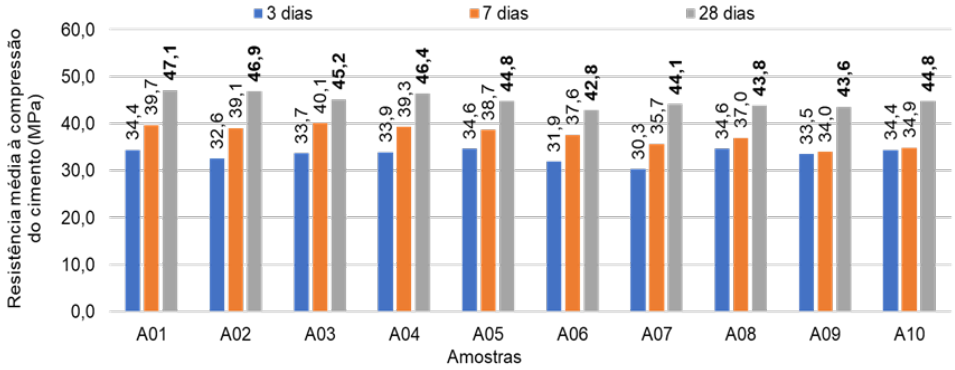
Idade	3 DIAS			7 DIAS			28 DIAS		
Amostra	fcj médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio relativo médio	fcj médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio relativo médio	fcj médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio relativo médio
A01	34,4	0,1	0,3%	39,7	2,5	2,3%	47,1	1,7	3,7%
A02	32,6	0,9	3,0%	39,1	0,2	0,7%	46,9	3,0	3,3%
A03	33,7	0,7	2,1%	40,1	1,0	2,6%	45,2	1,3	3,1%
A04	33,9	0,5	1,7%	39,3	1,7	5,1%	46,4	1,3	3,2%
A05	34,6	1,6	5,2%	38,7	1,0	2,6%	44,8	2,3	5,5%
A06	31,9	0,3	0,9%	37,6	1,3	3,7%	42,8	0,9	2,3%
A07	30,3	0,9	3,4%	35,7	0,6	3,9%	44,1	2,5	2,2%
A08	34,6	1,1	3,6%	37,0	1,0	3,0%	43,8	1,3	3,5%
A09	34,4	0,1	0,3%	39,7	2,5	2,3%	47,1	1,7	3,7%
A10	32,6	0,9	3,0%	39,1	0,2	0,7%	46,9	3,0	3,3%

Fonte: Autores (2024).

Observa-se que todas as 10 amostras de cimento ensaiadas (Tabela 5) obtiveram para as três idades de ensaio, 3, 7 e 28 dias, os resultados de resistência à compressão acima do especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para o cimento CP II-F 40, que limita em, no mínimo, 15 MPa, 25 MPa e 40 MPa, respectivamente.

Para melhor visualização, os resultados médios, para as três idades analisadas, estão apresentados no gráfico da Figura 3.

Figura 3 – Resistência média à compressão do cimento aos 3, 7 e 28 dias



Fonte: Autores (2024).

É possível observar as pequenas variações na resistência média à compressão das amostras de cimento. Ainda, é pertinente destacar que as amostras A01, A02, A03 e A04 apresentaram os maiores resultados médios, aos 28 dias, assim como as maiores massas específicas já apresentadas pela Tabela 4.

Para melhor análise, os dados individuais passaram por uma Análise Estatística de Variância (ANOVA), conforme detalham as tabelas da Figura 4.

Figura 4 – ANOVA para resistência à compressão: (a) 3 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Amostra	54,09	9	6,01	8,76	0,000031	sim
Erro	13,72	20	0,69			

(a)

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Amostra	135,85	9	15,09	5,25	0,000988	sim
Erro	57,51	20	2,88			

(b)

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Amostra	58,03	9	6,45	2,01	0,093482	não
Erro	64,29	20	3,21			

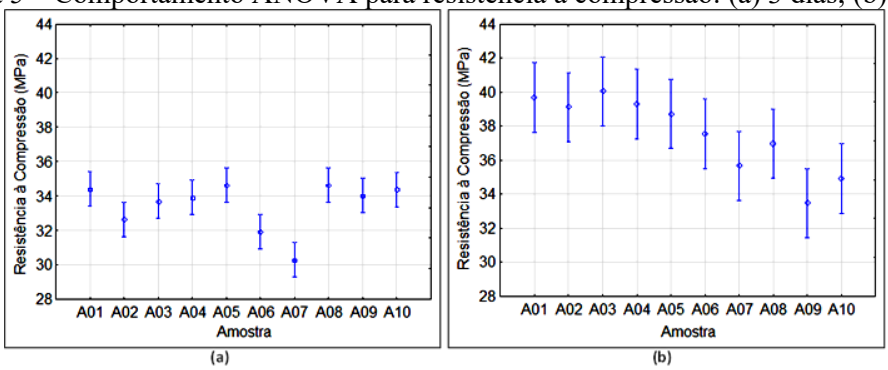
(c)

Fonte: Autores (2024).

Analisando os dados para os 28 dias de idade, verifica-se que o fator P, responsável pela significância que as variáveis independentes têm sobre a variável dependente, apresentou resultado acima de 0,05, comprovando que a amostra não exerce influência significativa sobre o resultado da resistência à compressão do cimento aos 28 dias de idade.

Para uma melhor compreensão da influência das amostras de cimento na resistência à compressão aos 3 e aos 7 dias de idade, a Figura 5 apresenta os gráficos do comportamento registrado na ANOVA para as essas idades analisadas.

Figura 5 – Comportamento ANOVA para resistência à compressão: (a) 3 dias; (b) 7 dias



Fonte: Autores (2024).

Para auxiliar na análise, foi realizado o teste de Tukey, conforme tabelas da Figura 6.

Figura 6 – Teste Tukey para resistência à compressão: (a) 3 dias; (b) 7 dias

	Amostra	Resistência à Compressão (MPa)	1	2	3
7	A07	30,3			****
6	A06	31,9		****	****
2	A02	32,6	****	****	****
3	A03	33,7	****	****	
4	A04	33,9	****	****	
9	A09	33,5	****	****	
10	A10	34,4	****		
1	A01	34,4	****		
8	A08	34,6	****		
5	A05	34,6	****		

(a)

	Amostra	Resistência à Compressão (MPa)	1	2	3
9	A09	33,5			****
10	A10	34,9	****		****
7	A07	35,7	****	****	****
8	A08	37,0	****	****	****
6	A06	37,6	****	****	****
5	A05	38,7	****	****	
2	A02	39,1	****	****	
4	A04	39,3	****	****	
1	A01	39,7	****	****	
3	A03	40,1		****	

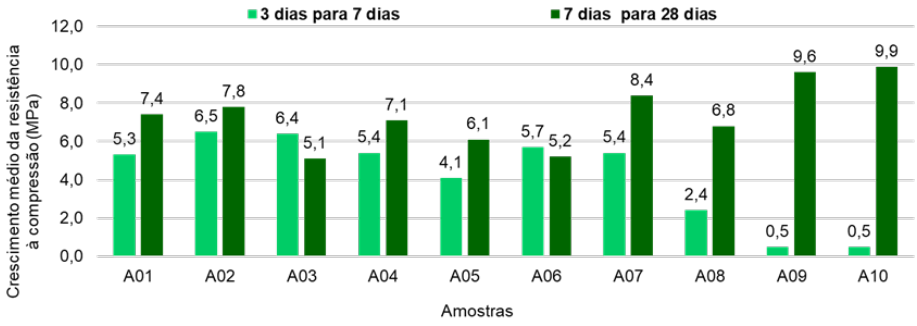
(b)

Fonte: Autores (2024).

Ao analisar a Figura 6, é possível verificar estatisticamente que aos 3 dias de idade, apenas a amostra A02 apresenta resistência à compressão equivalente a todas as demais amostras. Diferentemente, aos 7 dias de idade observaram-se mais interações, onde 3 das amostras apresentaram resistência à compressão equivalente a todas as demais amostras, sendo elas, as amostras A06, A07 e A08.

Foi realizada também uma análise quanto ao comportamento do crescimento da resistência à compressão do cimento ao longo do tempo. O crescimento médio registrado para cada amostra entre as idades de 3 para 7 dias e, posteriormente, de 7 para 28 dias, está apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Crescimento médio da resistência à compressão do cimento



Fonte: Autores (2024).

Pela análise da Figura 7, identifica-se uma considerável variação de comportamento quanto ao crescimento da resistência do cimento, principalmente de 3 para 7 dias, não mantendo-se um padrão de crescimento ao registrar crescimentos variando de 0,5 MPa a 6,5 MPa. Observa-se, em particular, as amostras 09 e 10 que obtiveram um crescimento de 3 dias para 7 dias muito abaixo das demais amostras, apenas 0,5 MPa para ambas as amostras.

O resultado da Análise Estatística de Variância (ANOVA) do crescimento da resistência dos 3 para os 7 dias e dos 7 para os 28 dias está detalhado na Figura 8.

Figura 8 – ANOVA quanto ao crescimento da resistência à compressão das amostras do cimento de: (a) 3 dias para 7 dias; (b) 7 dias para 28 dias

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Amostra	140,1795	9	15,5755	9,3432	0,000019	sim
Erro	33,3410	20	1,6671			

(a)

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Amostra	73,082	9	8,120	2,3319	0,055112	não
Erro	69,644	20	3,482			

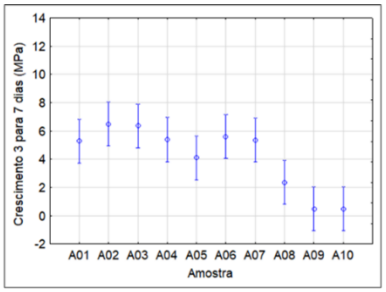
(b)

Fonte: Autores (2024).

Analisando a Figura 8, observa-se que, para o crescimento de 7 para 28 dias não há influência significativa da amostra sobre o crescimento da resistência, visto que o fator P, apresentou resultado acima de 0,05. No entanto, registra-se que esse efeito ficou muito próximo do limite, registrando-se um fator P de 0,055. Por outro lado, ao analisar o crescimento de 3 para 7 dias a análise estatística mostrou que existe influência da amostra no crescimento da resistência à compressão do cimento.

Para uma melhor compreensão da influência da amostra de cimento no crescimento da resistência à compressão de 3 para 7 dias, a Figura 9 apresenta o gráfico do comportamento verificado na ANOVA para o crescimento analisado, e o resultado do teste de Tukey realizado.

Figura 9 – (a) Comportamento ANOVA ao crescimento da resistência à compressão de 3 dias para 7 dias; (b) Teste Tukey para o crescimento da resistência à compressão de 3 para 7 dias



(a)

	Amostra	Crescimento 3 dias para 7 dias (MPa)	1	2	3
9	A09	0,5			****
10	A10	0,5			****
8	A08	2,4		****	****
5	A05	4,1	****	****	****
1	A01	5,3	****	****	
7	A07	5,4	****	****	
4	A04	5,4	****	****	
6	A06	5,7	****	****	
3	A03	6,4	****		
2	A02	6,5	****		

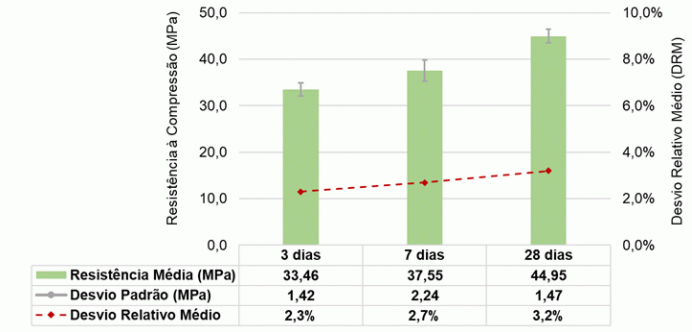
(b)

Fonte: Autores (2024).

Analisando o teste de Tukey, verifica-se que as amostras A01, A02, A03, A04, A05, A06 e A07 são estatisticamente equivalentes entre si, assim como as amostras as amostras A05, A08, A09 e A10. É possível observar ainda, que a amostra A05, é a única amostra estatisticamente equivalente a todas as demais. É interessante observar que, a exceto da A05, formam-se dois grupos distintos de amostras, as amostras A08, A09 e A10 são diferentes das demais amostras estudadas.

Na Figura 10 é possível observar os resultados gerais das médias, desvio padrão e desvio relativo médio obtidos entre as 10 amostras de cimento analisadas, para cada uma das três idades, 3, 7 e 28 dias.

Figura 10 – Resistência média, desvio padrão e desvio relativo médio geral das amostras



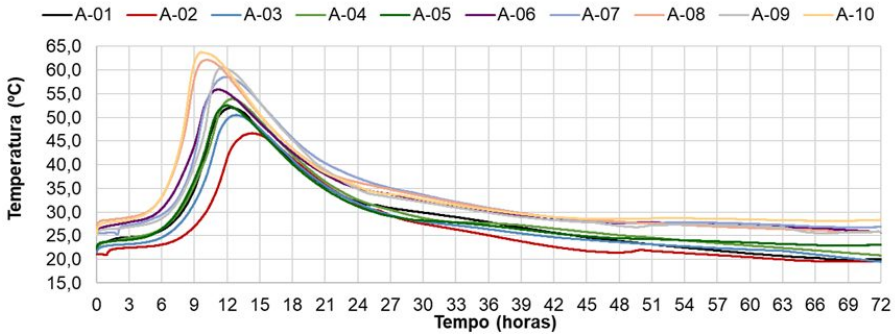
Fonte: Autores (2024).

Verifica-se que aos 28 dias de idade (Figura 10), analisando o comportamento médio das amostras, registrou-se um desvio padrão de apenas 1,47 MPa, com desvio relativo médio de 3,2%, podendo-se dizer, e considerando a análise estatística já apresentada aos 28 dias para as amostras estudadas no período analisado, que há certa uniformidade no fornecimento do cimento.

3.3 Calorimetria Semi-adiabática

As curvas calorimétricas geradas no ensaio de calorimetria semi-adiabática, para as pastas produzidas com cada amostra de cimento, estão apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Curvas do calor de hidratação das pastas (água + cimento)



Fonte: Autores (2024).

Considerando esse registro (Figura 11) feito pelas curvas calorimétricas, pela Tabela 6 são apresentados os dados obtidos das curvas em relação as máximas temperaturas registradas, assim como, com software específico do equipamento, os tempos de início e fim de pega e intervalo entre esses, para cada amostra de pasta de cimento ensaiada.

Tabela 6 - Temperatura máxima, tempos de início e fim de pega e intervalo entre início e fim de pega

Amostra	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10
Temp. Máx. (^{0}C)	52,0	46,7	50,5	53,9	52,5	55,9	58,6	62,2	60,7	63,8
Início de Pega (min)	466	509	497	462	444	419	358	377	491	406
Fim de Pega (min)	581	619	614	594	571	533	441	484	591	485
Intervalo (min)	115	110	117	132	127	114	83	107	100	79

Fonte: Autores (2024).

Analisando a Tabela 6, é possível identificar que a partir da amostra A07, identifica-se uma maior temperatura máxima das amostras em relação as demais. É possível visualizar ainda, para essas mesmas amostras (A07, A08, A09 e A10), uma tendência de início de pega mais rápido, além de um menor intervalo entre o início e o fim de pega, associando esse comportamento a uma hidratação mais rápida, liberando mais calor.

Este fato pode estar atrelado a finura da amostra do cimento, pois cimentos mais finos possuem uma área de superfície maior, permitindo assim uma hidratação mais rápida e, consequentemente, uma liberação de calor mais intensa. Mehta e Monteiro (2014) destacam que, quando a composição do cimento é constante, a taxa de reatividade e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência, podem ser aprimorados através da moagem mais fina do cimento, o que pode justificar o comportamento registrado nas amostras A07 até A10.

O comportamento destas pastas de cimento reflete também na resistência à compressão do cimento, já que essa hidratação mais rápida e alta liberação de calor, faz com que as amostras apresentem uma resistência à compressão inicial alta, a exemplo das A08, A09 e A10 ao atingir já aos 3 dias de idade uma resistência muito próxima à atingida com 7 dias (Figura 3), diminuindo com isso, o crescimento da resistência entre as idades (Figura 7).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento destas pastas de cimento reflete também na resistência à compressão do cimento, já que essa hidratação mais rápida e alta liberação de calor, faz com que as amostras apresentem uma resistência à compressão inicial alta, a exemplo das A08, A09 e A10 ao atingir já aos 3 dias

de idade uma resistência muito próxima à atingida com 7 dias (Figura 3), diminuindo com isso, o crescimento da resistência entre as idades (Figura 7).

2.1.1 Área do texto

O tipo de cimento analisado não registrou uniformidade nos resultados da massa específica das amostras ensaiadas, conforme ficha técnica do fornecedor, que registra ser constante a massa específica do cimento durante todo o período em que as amostras foram coletadas para este estudo.

A resistência à compressão de todas as amostras apresentou resultados satisfatórios, partindo do pressuposto de que todas as amostras ensaiadas apresentaram resistência à compressão em atendimento aos limites especificados pela norma para o tipo de cimento utilizado. Estatisticamente, concluiu-se que aos 28 dias de idade, as amostras de cimento analisadas não apresentaram influência sobre o desempenho mecânico da resistência à compressão do cimento, apresentando significância apenas em idades menores, 3 dias e 7 dias. Assim como para o crescimento da resistência à compressão do cimento, que estatisticamente não apresentou significância para o crescimento de 7 para 28 dias, porém, apresentou no crescimento de 3 para 7 dias.

Registrou-se que as amostras com maiores temperaturas máximas, registradas pela curva do calor de hidratação, apresentaram menor diferença no crescimento da resistência, comportamento associado a alta taxa de liberação de calor inicial, fazendo com que se tenha uma reação mais acelerada. Concluiu-se também, que as amostras com maiores temperaturas também apresentaram menores tempos de início de pega e, ainda, são as que registraram os menores intervalos de tempo entre início e fim de pega.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos e prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15900-1: **Água para amassamento do Concreto – Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M**. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2ª ed. Ibracon. São Paulo. 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2ª ed. Bookman. São Paulo. 2013.

SANDBERG, P; BENINI, H. **O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais**. Revista Concreto & Construções, v. 51, p.22-26, jun./set. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 2008

GIRARDI, R**. Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 167. 2014. https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10849

NUNES, J. S.; POLESELLO, **E. Estudo experimental da compatibilidade entre aditivos químicos e cimento Portland em misturas cimentícias através de calorimetria. Revista Matéria**, v. 27, n. 1, 2021. https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1329

VIECILI, M. J. C..; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. **Comparativo entre o teste de Vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos Portland.** Revista Matéria, v. 23, n. 3, 2018. https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0506