

Utilização de cinza volante (CV) para impressão 3D

Use of fly ash (FA) for 3D printing

Lívia Fernanda Silva, Doutoranda em Engenharia Civil, UEL – Universidade Estadual de Londrina

livia_fernanda5@hotmail.com

Gustavo de Pinho Tavares Filla, Bacharel, Bacharel em Engenharia Civil, UEL – Universidade Estadual de Londrina

filla96@hotmail.com

Ester Meira Ramos Amorim, Bacharel em Engenharia Civil, UEL – Universidade Estadual de Londrina

ester.ramorim@gmail.com

Monique de Brito Filgueiras, Mestranda em Engenharia Civil, UEL – Universidade Estadual de Londrina,

monique.filgueiras@uel.br

Berenice Martins Toralles, Doutora pela Universidade Politécnica de Catalunya, UEL – Universidade Estadual de Londrina.

betoralles@gmail.com

Resumo

Atualmente, a tecnologia de impressão 3D aplicada a construção civil apresenta inúmeras possibilidades e desafios, tais como: melhorias na produtividade, redução de desperdícios e desenvolvimento de materiais cimentícios. Este artigo investigou a potencialidade de uso de (CV) em materiais cimentícios para impressão 3D através da verificação dos aspectos de construtibilidade. Na primeira etapa foram realizados ensaios de consistência normal, tempo de início e fim de pega em pastas, com 4 % de óxido de cálcio e substituição de (CV) nas porcentagens de 8%, 10% e 15% em relação a massa de cimento. Na segunda etapa, com traço de 1:1,5, em massa, foram realizados ensaios de viscosidade, tensão de escoamento, extrudabilidade e verticalidade. Observou-se que a pasta com substituição de 15% de (CV) obteve maior tempo de início de pega e que o material cimentício demonstrou resultados favoráveis quanto a análise de construtibilidade com o uso de impressão 3D.

Palavras-chave: Materiais cimentícios; Adições minerais; Impressão 3D.

Abstract

Currently, 3D printing technology applied to civil construction offers advantages and challenges, such as: improvements in productivity, reduction of waste and development of cementitious materials. This article investigated the potential use of (FA) in cementitious materials for 3D printing by verifying the aspects of constructibility. In the first stage, tests were carried out for normal consistency, start and end times of setting in masses, with 4% calcium oxide and substitution of (FA) in the percentages of 8%, 10% and 15% in relation to the cement mass. In the second stage, with a 1: 1.5 trace, in mass, viscosity, yield stress, extrudability and verticality tests were carried out. Note that the paste with 15% (FA) replacement takes longer to start the grip and that the cementitious material gives favorable results when it achieves the aspects of constructibility with the use of 3D printing.

Keywords: *Cement materials; Mineral additions; 3D printing.*

1. Introdução

A impressão 3D é um exemplo de tecnologia única e com ampla capacidade de transformação, isto se deve ao fato de esta tecnologia poder promover mudanças e melhorias em diversos setores, tais como: setores automotivos, aeroespaciais, da saúde, nas indústrias em geral e, mais recentemente, na construção civil.

No setor da construção civil a tecnologia de impressão 3D tem sido aplicada com diferentes finalidades por grupos de pesquisa e empresas (KREIGER et al., 2015). Apesar de apresentar diferentes linhas de estudo, os grupos possuem como objetivo comum, a confecção de objetos sólidos de forma ágil, através da manufatura aditiva; com redução de tempo, custo, mão de obra e menos ocorrências de falhas no processo (WOHLERS, 2012).

Em se tratando de materiais cimentícios na impressão 3D estudos estão relacionados ao desenvolvimento de concretos especiais que atendam a necessidade de bombeamento e extrusão através das características reológicas específicas, que é a chave para garantir uma impressão estável (MA et. al., 2020; BOS et al., 2016; LE et al., 2012). Dessa forma, pode-se afirmar que não existe uma única mistura cimentícia que atenda aos requisitos de impressão, o que abre margem à inovação e uso de diferentes tipologias de materiais e misturas.

Para ser utilizada em impressão 3D, a mistura cimentícia deve apresentar ganho de resistência relativamente rápido e uma tensão de escoamento suficiente para que as camadas inferiores não se deformem ao receberem as cargas das camadas superiores (KHALIL et al., 2017). Essas características foram atingidas por experimentações no exterior utilizando-se, na maioria dos casos, o cimento sulfo-aluminoso como aglomerante (JIANCHAO et al., 2017).

O cimento sulfo-aluminoso não é comercializado no Brasil, assim, torna-se inviável a sua utilização. Porém, o estudo de sua composição e características é de considerável importância para a adequação dos cimentos comercializados através do uso de adições ou substituições minerais, que possibilitem obter características adequadas para a aplicação da tecnologia de impressão 3D no Brasil.

Em se tratando de uso de adições minerais em compósitos para impressão 3D a cinza volante (CV) é considerada promissora por possibilitar melhorias na coesão e alterações na viscosidade, influenciando nas propriedades reológicas dos compósitos cimentícios e, teores mais altos de (CV) nas misturas podem produzir melhor trabalhabilidade. (KONDEPUDI, 2021).

Assim, a fim de viabilizar a aplicação da tecnologia de impressão 3D no setor da construção civil, este artigo teve como objetivo investigar a potencialidade de materiais cimentícios com substituições de (CV) em termos de construtibilidade aplicada a prototipagem.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram cimento Portland de alta resistência inicial CP V – ARI; agregado miúdo – areia média quartzosa; cinza volante (CV); óxido de cálcio e água fornecida pela companhia de abastecimento local.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento CP V- ARI é o cimento mais puro dentre todos os comercializados no mercado brasileiro, sendo por este motivo o cimento utilizado nesta pesquisa. As características do cimento CP V – ARI estão especificadas na Tabela 1.

Resistência a compressão (MPa)				Finura Blaine (cm ² /g)	Tempo de Pega (min)	
24 horas	3 dias	7 dias	28 dias		Início	Fim
27	27	42	48	5330	160	265

Tabela 1: Propriedades mecânicas e físicas do cimento CP V – ARI. Fonte: InterCement

A caracterização do agregado miúdo foi realizada mediante análise dos ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária e teor de pulverulento, sendo que estes seguiram os procedimentos normativos da NBR 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 46 (ABNT, 2003) respectivamente. Na Figura 1 pode - se observar a curva granulométrica do agregado miúdo.

Nota-se, através da Figura 1, que a areia apresenta curva granulométrica dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Sendo a dimensão máxima de 2,4 mm que atende às condições impostas para materiais utilizados em impressão 3D. Bos et al. (2016) e Jianchao et al. (2017), relatam que o agregado deve possuir uma dimensão média de 2 a 3 mm. A areia empregada no ensaio possui módulo de finura igual a 2,45 o que a classifica, dentro dos limites, como uma areia média quartzosa, massa específica de 2,65 g/cm³; massa unitária sem compactar de 1,63 g/cm³ e teor de material pulverulento de 0,47%.

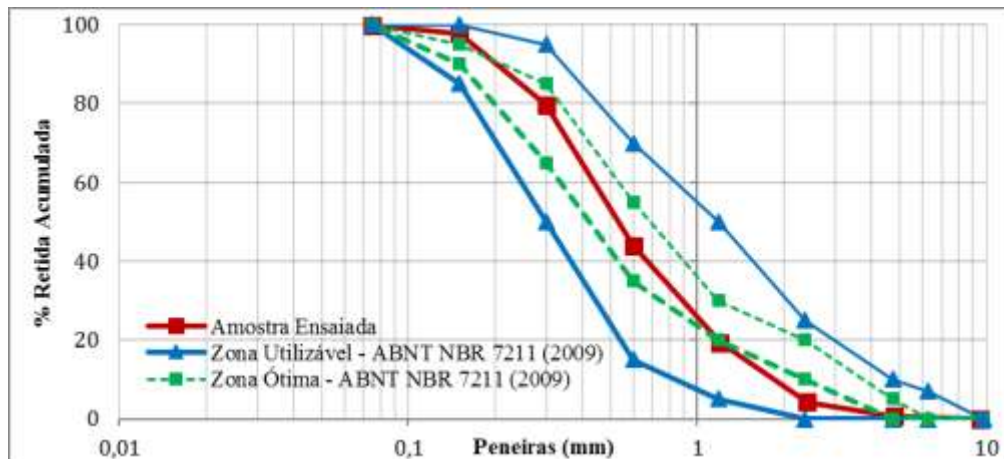


Figura 1: Curva granulométrica do agregado miúdo. Fonte: elaborado pelos autores.

Em se tratando de (CV), são consideradas pozolanas, obtidas através da calcinação do carvão nas caldeiras de leito fluidizado, que fazem parte do processo de produção de energia, e são denominadas desta forma por serem obtidas através do recolhimento nos gases de exaustão da caldeira (METHA e MONTEIRO; 2008). Segundo Almaruzzaman (2010), a produção mundial anual de cinzas volantes é estimada em 500 milhões de toneladas, o que corresponde a 75 a 80% do total gerado.

No que diz respeito ao desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D com substituições de (CV), tem-se que poderá diminuir a quantidade de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 na mistura, uma vez que a sua liberação está relacionada a hidratação do cimento. A menor quantidade de Ca(OH)_2 na mistura diminui a reatividade das pozolanas, pois além de permanecerem inativas até a hidratação de cimento, a liberação será menor devido a substituição por (CV) (DONATELLO, 2010), o material também é mais denso em comparação ao cimento Portland, proporcionando um efeito de enchimento a massa (HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017). Como forma de acelerar as reações nas primeiras horas, a adição de óxido de cálcio pode promover alterações nos tempos de início de pega (WITZKE, 2018).

Dessa forma, neste artigo, foram adicionados 4% em relação a massa de cimento de óxido de cálcio para todas as pastas e materiais cimentícios desenvolvidas no programa experimental.

2.2 Método experimental

O método experimental foi dividido em duas etapas de estudos: pastas e materiais cimentícios, sendo que as misturas desenvolvidas foram nomeadas de acordo com os materiais utilizados, como por exemplo, para a pasta e material cimentício sem substituições, adotou-se p_referência para a pasta e mat_referência para o material cimentício. Para as demais, a nomenclatura se deu através da porcentagem da substituição de (CV), como por exemplo, para a substituição de 8% de (CV) adotou-se p_8CV e mat_8CV respectivamente. Na Figura 2, é possível observar o fluxograma referente as etapas experimentais.

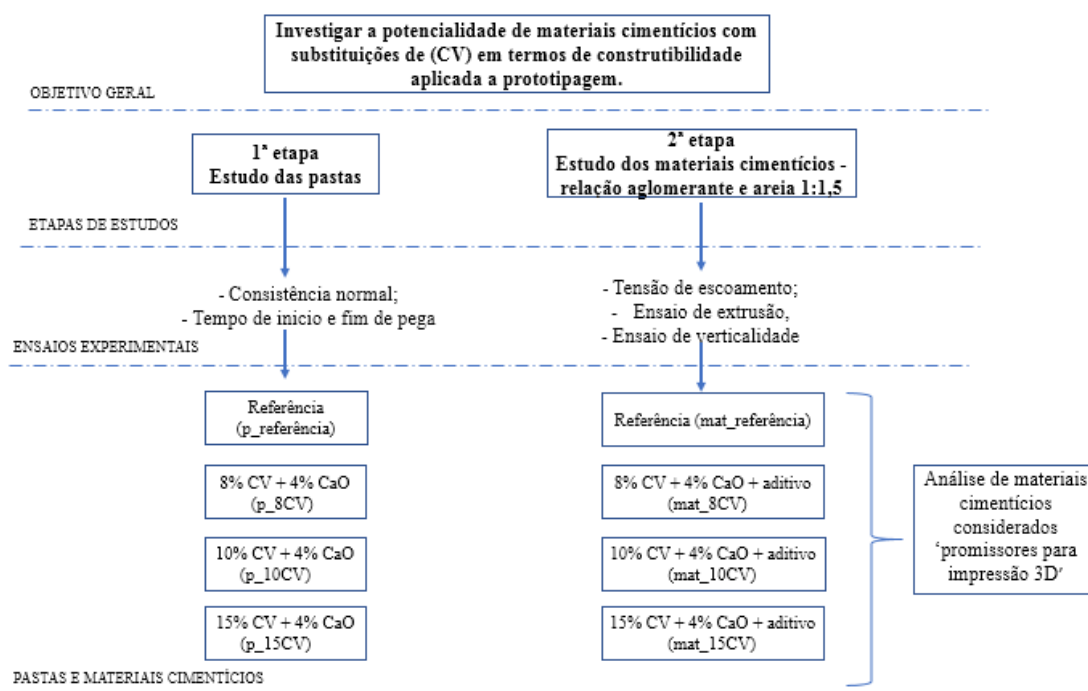


Figura 2: Fluxograma do programa experimental. Fonte: elaborado pelos autores.

Na primeira etapa, denominada de estudo das pastas, foram realizados ensaios de consistência normal do cimento de acordo com a NBR 16606 (ABNT, 2017) e tempo de início e fim de pega de acordo com UNE 196-3 9 (EN, 2016), com aparelho Vicatronic da empresa Matest. O ensaio de consistência normal do cimento teve como finalidade definir a relação água/cimentícios ideal para o desenvolvimento das pastas a serem submetidas ao ensaio de tempo de início e fim de pega. Para o ensaio de consistência normal foram utilizadas as quantidades de materiais conforme proporções demonstradas na Tabela 2, sendo que o volume de água foi determinado gradualmente durante os ensaios até atingir a profundidade de 5 a 7 mm conforme recomendações da normativa.

Pastas	Cimento CPV - ARI	CV	CaO
p_referência	1	0	0
p_8CV	0,92	0,08	0,04
p_10CV	0,90	0,10	0,04
p_15CV	0,85	0,15	0,04

Tabela 2: Proporção de materiais nas pastas. Fonte: Elaborado pelos autores.

Após serem definidos as relações água/cimentícios para cada uma das pastas, deu-se sequência ao ensaio de tempo de início e fim de pega, a fim de se estabelecer o tempo mínimo de início de pega para cada uma das pastas com e sem substituições (CV), para posteriormente relacioná-las com os resultados de tensão de escoamento obtidos na segunda etapa – estudo dos materiais cimentícios. Este fato se justifica porque após o início de pega os materiais cimentícios tendem a promover maiores resistências ao serem extrudados

devido ao aumento de tensão de escoamento, além de haver formação de uma fina película entre as camadas ocasionando dificuldade na verticalização, como o empilhamento e a aderência (DAMS, et. al. 2018).

Na segunda etapa foram realizados ensaios de tensão de escoamento, extrudabilidade e verticalidade em materiais cimentícios desenvolvidas através das pastas estabelecidas na primeira etapa, com relação aglomerante e areia de 1:1,5 e relação água/cimentícios de 0,4, conforme quantidades dos materiais dispostas na Tabela 3.

Materiais cimentícios	Cimento CPV - ARI	CV	Areia	CaO	Aditivo
mat_referência	1	0	1,5	0	0
mat_8CV	0,92	0,08	1,5	0,04	variável
mat_10CV	0,90	0,10	1,5	0,04	variável
mat_15CV	0,85	0,15	1,5	0,04	variável

Tabela 3: Proporção dos materiais cimentícios. Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma sequencial, em todos os materiais cimentícios a quantidade de aditivo superplastificante foi alterada conforme a faixa recomendada pelo fabricante, de 0 a 0,5% em relação a massa de cimento, de modo que os materiais cimentícios foram analisados quanto ao ganho de tensão de escoamento em função do tempo, e, aqueles que obtiveram os melhores resultados foram submetidas aos ensaios de extrusão e de verticalidade, características consideradas necessárias para aplicação em impressão 3D conforme estudo feito por Khalil et. al. (2017).

2.2.1 Avaliação da tensão de escoamento

Para determinação da tensão de escoamento (τ) através do ensaio com o aparelho de Vicat, Lootens et al. (2009) estabeleceu uma relação entre o raio R da sonda Tetmajer, e a altura de penetração (h) no material cimentício, de acordo com a equação (1):

$$\tau = 3/(2\pi R h) \quad (1)$$

Sendo que, para o raio R da sonda a medida é de 5 mm, e para se obter a altura h de penetração, considera-se 0 mm a altura em que a sonda toca a superfície do material cimentício no molde, e, ao se soltar a sonda, mede-se quantos milímetros obteve-se de penetração no material cimentício.

Em seu estudo, Le et. al. (2017), avaliou a evolução da tensão de escoamento de materiais cimentícios para impressão 3D com corpos de provas referente aos tempos de 10, 15, 20, 25, 30 e 45 minutos e observou aumento considerável da tensão de escoamento a partir dos 25 min de ensaio. Dessa forma, para esta pesquisa, τ_{final} corresponde a tensão de escoamento obtida no corpo de prova no tempo de 45 minutos e $\tau_{inicial}$ a tensão de escoamento aos 10 minutos de ensaio, em mm^{-2} .

Wangler et al., (2016) considerou compósitos cimentícios promissores para impressão 3D, aqueles que a relação entre a tensão final e inicial esteve no intervalo entre 25 e 150, em que o cálculo da relação, deu-se, através da equação (2):

$$\text{Relação } \tau = \frac{\tau_{\text{final}}}{\tau_{\text{inicial}}} \quad (2)$$

Assim, além dos gráficos de tensão de escoamento por tempo, neste artigo foram determinadas as relações entre as tensões para verificar se algum dos materiais cimentícios apresentam-se dentro do intervalo proposto por Wangler et. al. (2016). Os materiais cimentícios que apresentaram a melhor evolução na tensão de escoamento foram então submetidas aos ensaios de extrudabilidade e de verticalidade.

2.2.2 Avaliação da extrudabilidade

O ensaio de extrusão dos materiais cimentícios foi realizado através de uma pistola de silicone. Para isso, foi cortado o bico da pistola de forma a deixar uma abertura de 20 mm, o qual atende ao sugerido por Bos et al. (2016) como abertura ideal para impressões 3D com bico circular. Após cortado o bico, foi inserido o material cimentício e este foi pressionado através do gatilho da pistola, até a sua completa saída. A extrusão dos materiais cimentícios foi avaliada de forma visual e através das seguintes premissas:

- mistura trabalhável para passar pelo bocal da pistola;
 - mistura com tensão de escoamento tal que não flua pela abertura de saída apenas por seu peso próprio;
 - mistura que flua sem segregação ou filtração (saída apenas da nata).
- Após a verificação da capacidade de extrusão deu-se início ao ensaio de verticalidade.

2.2.3 Avaliação da Verticalidade

Para o ensaio de verticalidade, como não há normativa que avalie esta característica, tomou-se como referência o estudo realizado por Khalil et al. (2017). Desta forma, foi considerada uma parede de 0,20 m de largura por 3 m de altura, e assim, decidiu-se adotar uma escala horizontal de 1:10 e vertical de 1:20. Sendo assim, foi impressa uma parede 3D de 2 cm de largura e 15 cm de altura.

Foi decidido adotar uma escala maior verticalmente pois acreditou-se que em uma escala de 1:10 estaria se inserindo uma elevada esbeltez no elemento, e que dessa forma haveria a possibilidade de o elemento entrar em colapso – não necessariamente por não atender às características de uma impressão 3D – mas sim, devido à elevada esbeltez e essa propriedade não será avaliada nesse trabalho.

Para a determinação do tempo entre a impressão de cada camada, considerou-se o tempo no qual a combinação apresentasse maior ganho de tensão de escoamento, de acordo com Khalil et al. (2017).

3 Resultados e discussões

3.1 Estudo das pastas

Na tabela 4 estão apresentados os diferentes resultados obtidos em relação as relações água/cimentícios para cada uma das pastas com e sem substituição (CV).

Pastas	Relação água/cimentício
p_ referência	0,32
p_8CV	0,34
p_10CV	0,34
p_15CV	0,35

Tabela 4: Resultados das relações água/cimentícios do ensaio de consistência normal. Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o ensaio de tempo de início e fim de pega, foram realizadas 86 penetrações através do aparelho Vicatronic Basic da Matest conforme recomendação normativa da EN UNE 196-3. Na Figura 3, constam os resultados em relação ao tempo de início de pega para pasta referência e com substituição de (CV).

Verificou-se que todas as pastas sem e com substituição de (CV) tem o início do decaimento da penetração aproximadamente no mesmo instante, entre 130 e 140 minutos, indicando o momento em que as reações de hidratação se intensificam na pasta, e consequentemente o início de pega. De acordo com a norma EN – UNI 196-3 o início da pega ocorre quando a altura de penetração é igual ou inferior a 36 mm e o fim da pega acontece quando a penetração é igual ou inferior a 2,5 mm.

Entretanto, ressalta-se que a presença de óxido de cálcio em adição maximizou a velocidade das reações de hidratação do cimento, para as pastas p_8CV e p_10CV e consequentemente, as pastas entraram em pega antecipadamente.

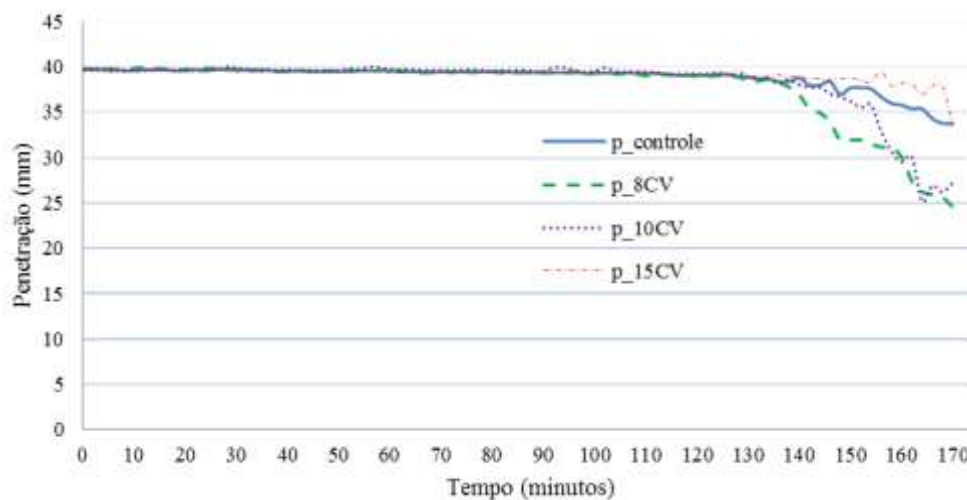


Figura 3: Resultados de tempo de início e fim de pega das pastas. Fonte: Elaborado pelos autores.

Observou-se que a pasta com substituição de 15% de (CV), p_15CV, apresentou um maior retardo do tempo de início de pega quando comparada a outras porcentagens. Desta forma, a p_15CV é a pasta que apresentou um maior tempo até o início da pega, o que para o processo de impressão trará como benefício o estendimento do tempo de execução sem que haja o comprometimento na ligação entre as camadas. Ainda, é possível verificar da Figura 4 que, após 170 minutos nenhuma das pastas haviam finalizado a pega.

Dessa forma, concluiu-se que apenas com o ensaio de tempo de pega não é possível ainda constatar se a substituição de (CV) apresenta um melhor desempenho para ser aplicada em impressões 3D. Para tanto foi necessário a análise de tensão de escoamento, de forma a garantir que quando a segunda camada for executada a primeira tenha uma tensão de escoamento adequada e a mistura não tenha entrado em pega.

3.2 Estudo dos materiais cimentícios

No ensaio de tensão de escoamento, nos materiais cimentícios, foi adicionado porcentagens de aditivo superplastificante afim de se obter resultados de tensão promissores para aplicação em impressão 3D. Segundo Wangler et al. (2016), a tensão de escoamento varia de forma proporcional quando analisadas em relação a altura total das camadas e a altura de somente uma camada depositada. E ainda, os autores consideram que para um material cimentício ser considerado verticalizável para impressão 3D, a evolução da relação da tensão de escoamento inicial/final deve ocorrer dentro do intervalo de 25 a 150.

Para obtenção dos resultados finais relacionados a análise de tensão de escoamento, divide-se os valores referente a tensão de escoamento final, obtida aos 45 minutos, pelo valor da tensão inicial obtida aos 10 minutos, conforme equação (2) apresentada neste artigo.

Khalil et. al. (2017) produziu materiais cimentícios com 93% de cimento Portland, 7% de cimento sulfo-aluminoso de cálcio, areia, relação água/cimentícios de 0,35 e 0,2% de adição de aditivo superplastificantes e obteve uma relação entre tensão final e inicial de 35, ou seja, materiais cimentícios considerados aplicáveis a impressão 3D segundo os limites propostos por Wangler et. al. (2016).

Na Tabela 5 encontram-se os resultados da relação de tensão de escoamento inicial e final para cada material cimentício produzido com e sem substituição de (CV).

Materiais cimentícios	Relação tensão inicial / final de escoamento	Aditivo Superplastificante (%)	Tempo do ensaio (min).
mat_referência	9,13	0	45
mat_8CV	10	0,2	45
mat_10CV	8,25	0,1	45
mat_10CV	1,22	0,2	45
mat_15CV	13,80	0,1	45
mat_15CV	16,50	0	45

Tabela 5: Relação entre tensão final e inicial dos materiais com substituição de (CV). Fonte: Elaborado pelos autores.

O tempo em que foi atingida a maior tensão de escoamento para os materiais cimentícios com substituição de (CV), é de considerável importância para a definição do intervalo de deposição entre as camadas - ensaio de verticalidade. Em sua pesquisa, Khalil et. al. (2017), obteve a relação tensão inicial/final dos materiais cimentícios ensaiados referente a 35, aos 20 minutos, sendo que este resultado permaneceu constante até os 45 minutos, dessa forma, como não houve evolução da relação tensão inicial/final ao longo do tempo, os autores fixaram como o intervalo de deposição de camadas o tempo de 20 minutos.

Neste estudo, na Tabela 5 pode-se observar que aos 45 minutos a mat_15CV atingiu a maior relação tensão inicial/final que foi de 16,50. Dessa forma, para o resultado obtido no mat_15CV, é necessário um tempo de espera de 45 minutos para que uma camada seja depositada sobre a outra, pois somente após esse período é que as camadas inferiores apresentam um maior valor de tensão de escoamento e, portanto, maior resistência à deformações que iriam comprometer a estrutura vertical.

Ressalta-se que dentro dos conceitos de impressão 3D, o material ideal para essa tecnologia deve apresentar-se com elevada fluidez nos primeiros minutos, para que não ocorra o entupimento da tubulação de bombeamento. E nos minutos posteriores, deve apresentar uma maior evolução da tensão de escoamento para suportar a carga das demais camadas depositadas. A partir desses conceitos pode-se observar que o material cimentício com 15% de substituição de (CV) mostrou-se adequado para impressão 3D por ter apresentado evolução na tensão de escoamento.

Assim, através do ensaio de tensão de escoamento foi possível definir qual material cimentício é considerado promissor para ser submetido ao ensaio de extrudabilidade e verticalidade. Sendo estes o com 15% de substituição de (CV) sem aditivo superplastificante.

O ensaio de extrusão dos materiais foi realizado antes do ensaio de verticalidade. Tomou-se como referência o ensaio de extrusão realizado por Le et al. (2012), onde diferentes misturas contendo aglomerante, cinza volante, sílica ativa, areia e aditivo foram submetidas a ensaio de extrudabilidade e avaliadas através da análise de bloqueio ou fratura dos filamentos extrudados a partir de um bocal. Na Figura 4 pode se observar os materiais cimentícios sendo extrudados na pistola de silicone com abertura de 2 cm e a sobreposição de suas camadas.

A extrudabilidade, pode ser observada na Figura 5 correspondente ao material cimentício com 15% de substituição de (CV), onde verifica-se um filamento com continuidade e uma consistência adequada, não apresentando segregação, e nem um fluxo por peso próprio, ou seja, o material cimentício somente era capaz de sair da pistola com a aplicação de força, sendo este considerado promissor para o processo de extrusão, mesmo não tendo atingido o intervalo de tensão de escoamento proposto por Wangler et al. (2016).



Figura 4: Material cimentício com substituição de 15% de (CV) sem aditivo superplastificante. Fonte: Elaborados pelos autores.

Em termos de verticalidade, o tempo de execução entre as camadas ocorreu conforme o período de tempo estabelecido no ensaio de tempo de início e fim de pega, sendo de 45 minutos para o material cimentício com substituição de (CV). Verifica-se dessa forma que o ensaio de tensão de escoamento e de início e fim de pega é de considerável importância por possibilitar o ensaio de verticalidade, pois, caso o tempo de espera seja superior ao tempo de início de pega, o processo de verticalidade será comprometido, visto que após o início da pega do material cimentício, ocorrerá o surgimento de película superficial prejudicando a aderência entre as camadas.

A deposição das camadas ocorreu de forma similar ao processo utilizado por Khalil et al. (2017), ou seja, através da pistola de silicone sem o auxílio de qualquer outro aparato. Na Figura 5 é possível observar que para o material cimentício com substituição de (CV) o processo de deposição das camadas ocorreu, qualitativamente, de forma adequada, pois a primeira camada não apresentou deformações excessivas, mantendo a sua geometria, mesmo suportando o seu peso próprio e o da camada superior, possibilitando, dessa forma a deposição de camadas sequenciais.



Figura 5: Ensaio de verticalização de compósito cimentício com 15% de substituição de (CV) sem aditivo superplastificante. Fonte: elaborado pelos autores.

Em se tratando da verticalização das camadas com substituição de (CV), o compósito cimentício possui uma aparência lisa e sem segregação.

3 Conclusões

Através deste estudo é possível concluir que com a substituição de (CV) em relação ao tempo de início da pega, todas as pastas tiveram o princípio do decaimento da penetração

aproximadamente no mesmo instante, entre 130 e 140 minutos, indicando desta forma, o momento em que as reações de hidratação se intensificaram na pasta.

A pasta p_15CV, apresentou um maior retardo no início de pega quando comparada as outras porcentagens, este fator é considerado interessante em se tratando de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D, isto porque promove maior tempo de execução sem que haja o comprometimento na ligação entre as camadas.

O material p_15CV sem aditivo obteve maior relação de tensão de escoamento quando comparada a p_15CV com aditivo, sendo os valores de 16,50 e 13,80, respectivamente. Isto demonstra que os aditivos podem alterar significativamente o ganho de tensão de escoamento em compósitos cimentícios aplicados a impressão 3D.

No que diz respeito a extrudabilidade e verticalidade, o material cimentício com substituição de 15% de (CV) se mostrou promissor para a aplicação em impressão 3D, isto porque o composto teve capacidade de fluxo contínuo sem obstrução ao longo do bocal e não apresentou segregação e exsudação, possibilitando a deposição de camadas.

A impressão 3D atrelada a introdução de substitutos do cimento, como a cinza volante, tem potencial para enfrentar um dos maiores desafios das construções em concreto que corresponde a desperdícios, geração de resíduos em canteiros de obras e produção global significativa de CO₂, além de permitir uma liberdade de geometria nova, possibilitando quantidades de materiais variados de acordo com cada local de obra, obtendo resultados mais eficientes e sustentáveis.

Referências

- Almaruzzaman, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, pp. 327-363, 2010.
- Bos, F.; et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 11, 2016.
- Dams, B.; Wu, Y.; Sheperd, P; Ball, R. J. Aerial additive building manufacturing of 3D printed cementitious structures. **In: 37th Cement and Concrete Science Conference**, University College London, 2018.
- Donatello, S.; Tyrer, M.; Cheeseman, C. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Journal of Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 121-127, 2010.
- Hemalatha, T.; Ramaswamy, Ananth. **A Review on Fly Ash Characteristics – Towards Promoting High Volume Utilization in Developing Sustainable Concrete**. *Journal of Cleaner Production*. v. 147, n. 1, p. 546-559, 2017.
- Intercement. Disponível em: <http://www.intercement.com/pt/#/home/>. Acesso em fev. 2020.
- Jianchao, Z.; et al. 3D printing cement based ink, and it's application within the construction industry. **In: MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2017.
- Khalil, N.; et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, 2017.
- Kondepudi, K.; Subramaniam, K. V. L. Formulation of álcali-activated fly ash-slag Binders for 3D concrete printing. **Cement and Concrete Composites**. v. 119. 2021.

Kreiger, M. A.; et al. The current state of 3d printing for use in construction. **In: The proceedings of the 2015 conference on autonomous and robotic construction of infrastructure**. Ames. Iowa. p. 149-158. 2015.

Le, T. T.; et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and structures**, v. 45, n. 8, p. 1221-1232, 2012.

Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; Flatt, R. J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. **In: Journal of Cement and Concrete Research**, 2009.

Ma, G., Wang, L. 3D Printing Key Technologies for Cementitious Materials. **China Building Materials Press**. 2020.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

Wangler, T.; Ena, L; Lex, R.; Norman, H.; Fabio, G.; Matthias K.; Mathias, B.; Benjamin, D.; Jonas, B.; Nicolas, R.; Robert, F. Digital Concrete : Opportunities and Challenges. **In: RILEM Technical Letters**, 2016.

Witzke, F. B. **Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Santa Catarina, 2018.

Wohlers, T. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Wohlers Associates. **Annual Worldwide Progress Report**, 2012.