

Impacto da variação do consumo de ligante no potencial de extrusão de composições cimentícias

Impact of the variation of the binder consumption on the potential extrusion of cementitious compositions

Heitor Montefusco Bernardo, Ricardo Bonfiglioli Junqueira Andrade, Roberto Cesar de Oliveira Romano, Rafael Giuliano Pileggi.

Departamento de Engenharia de Construção Civil / Escola Politécnica / Universidade de São Paulo

* heitorbernardo@live.com

RESUMO

Atualmente a indústria da construção civil é responsável por cerca de 40 a 75% da extração dos recursos naturais para matéria prima em produtos do setor. Além desse alto consumo, estima-se que a geração de resíduos da construção civil seja cerca de 20 a 80% (m/m) do ambiente construído. Dentro deste contexto o processo de manufatura aditiva pode ser ideal para as próximas gerações, atendendo grande parte dos requisitos de qualidade e ambientais, reduzindo o consumo dos recursos naturais e a geração de resíduos e aumentando a ergonomia no setor, além de possibilitar a produção de componentes com geometrias complexas sem a utilização de moldes. Neste trabalho, o potencial de extrusão de composições desenvolvidas com diferentes consumos de cimento foram avaliadas a partir dos métodos Benbow e Bridgwater e squeeze flow e os resultados indicam que a redução no consumo de cimento e o tipo de método de extrusão, induziram os materiais a separação de fases, dificultando o processo de deposição das camadas.

Palavras-chave: Extrusão, manufatura aditiva, cimento, ecoeficiência

ABSTRACT

Currently, the construction industry is responsible for about 40 to 75% of the extraction of natural resources for raw material in products of the sector. In addition to this high consumption, it is estimated that the generation of construction waste is about 20 to 80% (m/m) of the built environment. Within this context, the additive manufacturing process may be ideal for the next generations, meeting a great part of the quality and environmental requirements, reducing the consumption of natural resources and the generation of waste and increasing the ergonomics in the sector, besides enabling the production of components with complex geometries without the use of molds. In this work, the extrusion potential of compositions developed with different cement consumptions was evaluated from the Benbow and Bridgwater and squeeze flow methods and the results indicate that the reduction in cement consumption and the kind of extrusion method induced the materials to the phase separation, complicating the deposition process of the layers.

Keywords: Extrusion, additive manufacturing, cement, ecoefficiency

INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial das Nações Unidas haverá um aumento populacional de cerca de 30% nas próximas décadas, intensificando principalmente a demanda por moradia e infraestrutura^[1]. Por isso, a busca por soluções tecnológicas, econômicas e ambientais nos próximos anos será primordial.

A construção civil, por si só, é responsável por cerca de 40 a 75% da extração de recursos naturais, um indicativo de alto consumo e baixa otimização dos insumos consumidos, carregando consigo a geração de resíduos, onde representam, em média, de 20 a 80% (m/m) do total do ambiente construído^[2].

Os impactos gerados ao meio ambiente, não estão apenas direcionados para os processos construtivos, estão ligados também a produção da matéria prima. A indústria de cimento atualmente representa cerca de 8% das emissões globais de CO₂, porcentagem que tende a aumentar nas próximas décadas no caso de serem mantidas as práticas atualmente aplicadas de consumo de cimento nas composições e produção do ligante^[3].

Por isso, uma das alternativas que mais corresponde às projeções futuras dentro dos processos construtivos é a utilização da manufatura aditiva, pois pode ser responsável pela racionalização dos recursos naturais, menor geração de resíduo, baixos índices de acidentes de trabalho, maiores controles tecnológicos e econômicos^[5 6 7].

No entanto, embora tal processo seja inovador a sua aplicação não é trivial, e um dos problemas em potencial, além da disseminação cultural da técnica, é o alto consumo de cimento em comparação com composições convencionais^[8].

Sendo assim, o desenvolvimento de composições cimentícias extrudáveis e com baixo consumo de cimento é de grande relevância prática, econômica e social e merece ser investigada.-

MATERIAIS

Cimento Portland do tipo CPV e filler calcário de origem dolomítica foram os materiais utilizados no trabalho. Aditivos dispersante (Melflux F2651), retentor de água com moléculas a base de éter de celulose (Celulósico Tylose MH 10012) e incorporador de ar (Tylovis - LS) com moléculas de lauril sulfato de sódio foram utilizados para adequação das propriedades reológicas.

EXPERIMENTAL

Caracterização das matérias primas

Distribuição granulométrica a laser: a distribuição de tamanho das partículas mais finas (cimento e filler) foi determinada em um granulômetro a laser Helos (Sympatec) com faixa de detecção 0,1 a 350 micra.

Densidade real: realizada em um equipamento Multipycnometer, da marca Quantachrome MVP 5DC após secagem das matérias primas em estufa por 24 horas a 60°C.

Área superficial específica: Determinada pelo método BET^[9], em um equipamento Belsorp Max, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60°C e pressão de 10⁻² kPa por 24 horas no equipamento Belprep vac-II para retirada da umidade e de outros gases adsorvidos.

Os resultados de tamanho de partícula são apresentados conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os resultados de densidade real, área superficial específica e os diâmetros característicos das matérias primas.

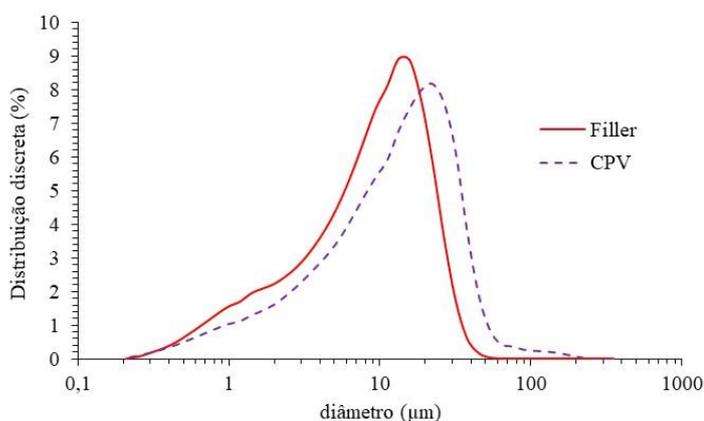


Figura 1. Distribuição granulométrica do filler e cimento utilizado no trabalho.

Tabela 1 Caracterização física das materiais primas utilizadas.

Características	Filler	CPV
Densidade real (g/cm ³)	2,70	3,30
ASE (m ² /g)	1,10	1,30
D ₁₀ (µm)	1,70	2,10
D ₅₀ (µm)	10,1	14,2
D ₉₀ (µm)	23,7	36,6

Observa-se que a distribuição de tamanho de partículas é similar porém, os valores de densidade e área superficial específica são distintos, podendo impactar diretamente nas propriedades do estado fresco e endurecido das composições.

Formulação das composições cimentícias

Na Tabela 2 são descritas as composições avaliadas. Manteve-se constante a quantidade de água de amassamento, variando apenas o consumo de cimento das composições avaliadas.

Tabela 2 Composições avaliadas, em kg/m³.

Referência	Proporção cimento:filler_a/s*	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de filler (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)
100C	100:0_0,21	600	-	400
80C20F	80:20_0,21	470	139	391
60C40F	60:40_0,21	345	273	383
50C50F	50:50_0,21	284	337	379

* Proporção em massa, entre cimento e filler, e relação água/sólidos nas composições

Como as matérias primas apresentam diferentes densidades, conforme apresentado mais adiante na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os consumos de água apresentados na última coluna são distintos por serem produzidas peças com diferentes volumes. No entanto, a relação água/sólidos em massa, foi mantida constante para todos os sistemas apresentados.

Mistura

A mistura foi realizada em uma argamassadeira planetária Hobart, modelo N50. O pó seco foi homogeneizado em um saco plástico e colocado no recipiente do equipamento. Ligou-se o equipamento em sua velocidade mais baixa e adicionou-se toda água com vazão controlada de 17 g/s, mantendo-se na rotação por 150 segundos. O produto obtido foi utilizado nas avaliações apresentadas na sequência.

Extrusão em equipamento de rosca infinita: O método mais indicado para os materiais cimentícios são as extrusões por rosca, pois tal método possibilita a produção acelerada, sem interrupções e com grande aumento na produtividade, diferente do método por pistão, onde é necessário pequenas paradas para a alimentação da camisa extrusora. Segundo referências internacionais, o método de extrusão a rosca é referenciada na maior parte dos trabalhos de manufatura aditiva ^[10], pois, além de otimizar os processos produtivos, auxilia na mistura pelo intenso cisalhamento ocorrido antes de passar pelo bocal de extrusão, reduzindo os defeitos na deposição das camadas. Para este trabalho utilizou-se um equipamento da marca G.Paniz (EMF 10) com bocal de extrusão de 5mm de diâmetro por 10-mm de altura conforme ilustrado na Figura 2. Para análises comparativas entre os processos, foi coletada uma amostra do fio extrudado, a qual foi fotografada após o endurecimento.

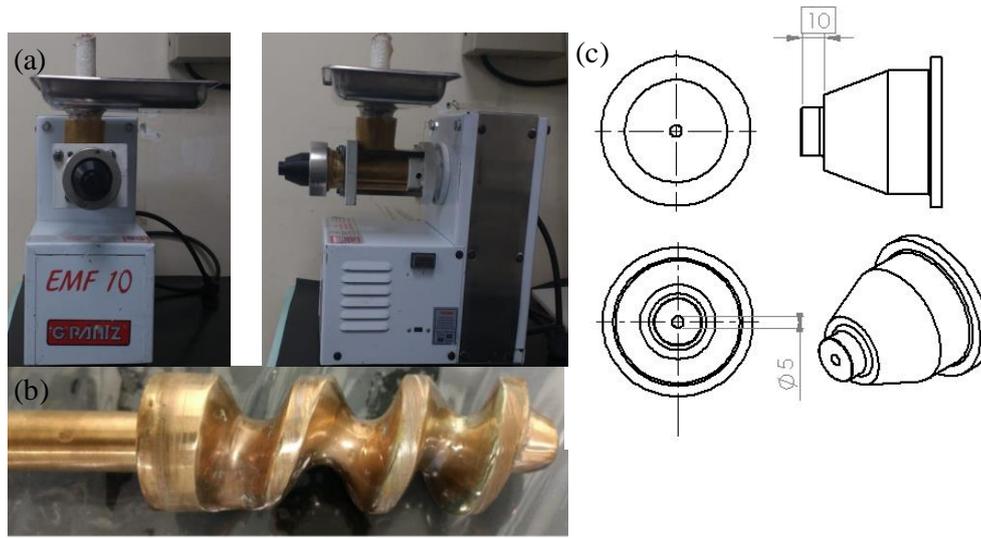


Figura 2 .Ilustração do equipamento extrusor de rosca infinita. Em (a) é ilustrado o equipamento marca G-PANIZ modelo EMF -10 e em (b) é apresentado a rosca de bronze onde é acoplada ao motor e em (c) é apresentado as dimensões do bocal de extrusão

Benbow e Bridgwater: Realizou-se o ensaio de Benbow e Bridgwater em uma prensa Instron 5569 com célula de carga de 50 kN conforme descrita na Figura 3. O controle de deslocamento foi realizado por velocidade e fixada em 1mm/s. Preencheu-se o porta-amostra em formato de cilindro com 500g do material e adensou-se mantendo obter a homogeneidade no sistema, após tais procedimentos, posicionou-se o cilindro e o pistão e iniciou-se o teste. Durante a avaliação retirava-se uma alíquota do material extrudado para as análise fotográfica do fio.

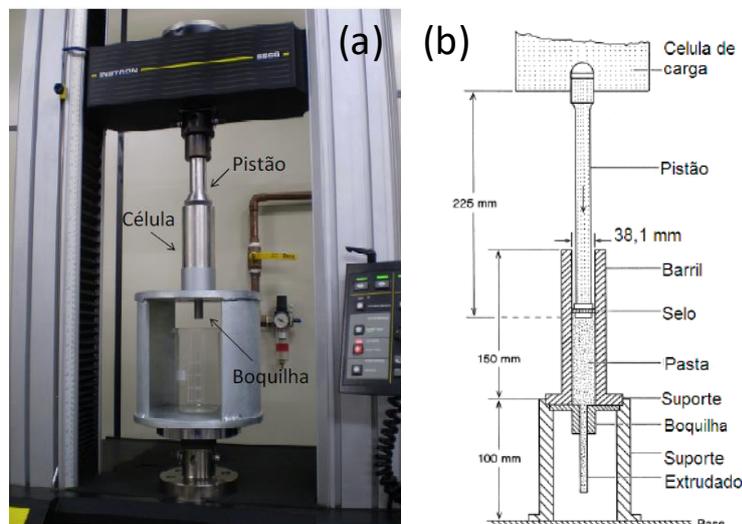


Figura 3. Ilustração do método *Benbow e Bridgwater*. Em (a) é apresentado o aparato montado conforme apresentado por Dias^[11]. Em (b) é apresentado o desenho esquemático do método, conforme ilustrado por Soto^[12]

Squeeze flow teste: Os ensaios foram realizados em uma prensa Instron 3345 com controle de deslocamento do pistão em 3 velocidades (0,1; 1 e 3mm/s), com punção de 2 polegadas. A moldagem foi realizada em moldes com dimensões de 101 mm de diâmetro x 20 mm de altura e manteve-se o aparato para contenção do material, conforme ilustrado na Figura 4.

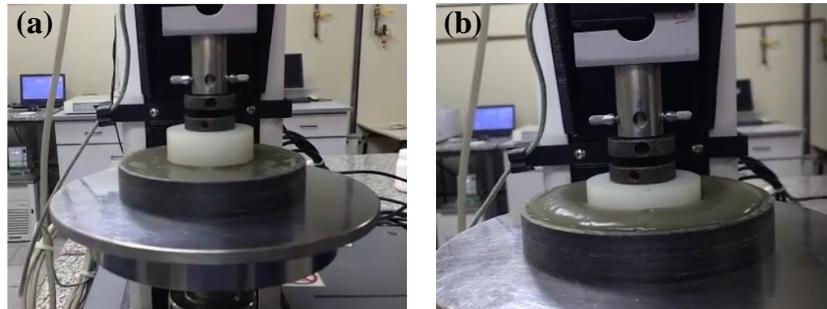


Figura 4. Ilustração a amostra utilizada no ensaio squeeze flow. Em (a) é mostrado o aparato no início do ensaio e em (b) após a aplicação da carga compressiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise visual do fio extrudado no equipamento de rosca infinita

Os resultados obtidos na extrusão de rosca infinita são apresentados na Figura 5, sendo possível detectar visualmente que a diminuição no consumo de cimento resultou em consideráveis alterações na qualidade do produto endurecido.

Quando maior a quantidade de filler, mais fluido o produto passante pelo bocal da extrusora. No entanto, foi observado que dentro do canhão de extrusão parte do produto remanescente permanecia mais seco, indicando que houve considerável separação de fases durante o processo.

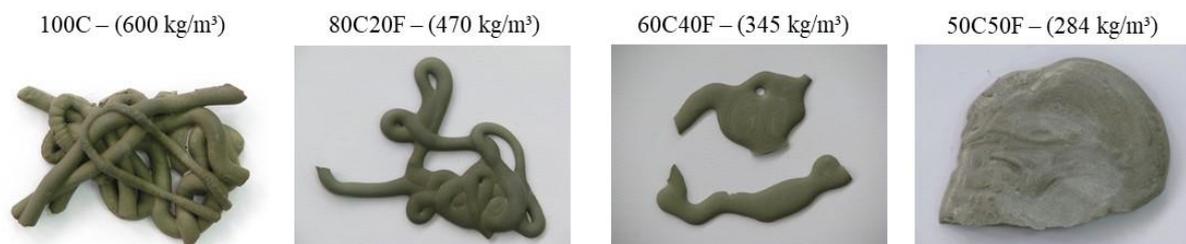


Figura 5 Ilustração dos fios extrudados pelo método de rosca contínua.

A separação de fases do material ocorreu com tamanha intensidade no sistema com menor teor de cimento, gerando considerável pressão interna, a ponto de romper o bocal extrusor, conforme apresentado na Figura 6. É importante salientar o efeito, pois são condições efetivas de campo carregar consigo transtornos na produção.

Para obtenção de uma composição com boa capacidade de extrudabilidade é primordial que as características reológicas sejam adequadas ao tipo de equipamento, ou seja, pode ocorrer de um produto extrudado de forma inadequada em equipamento de rosca infinita ser extrudado corretamente em outros tipos de máquina. Por isso, a avaliação do perfil de carga durante a extrusão e a quantificação da separação de fases durante o processo é de grande valia.



Figura 6 Bocal de extrusão rompido devido a intensa separação de fases ocorridas no método de extrusão por rosca contínua EMF-10.

Avaliação da carga de extrusão pelo método Benbow e Bridgwater

O método de Benbow e Bridgwater foi desenvolvido a fim de avaliar as propriedades reológicas de massas extrudáveis. Pelo fato dos materiais extrudáveis possuírem características plásticas, alguns parâmetros reológicos como tensão de escoamento são fatores preponderantes para o desenvolvimento dos produtos.

Na Figura 7 é apresentado um perfil de curva esperado para a obtenção de uma massa extrudada de boa qualidade. O perfil da curva de extrusão, é caracterizado por um aumento de pressão inicial em baixos deslocamentos, referindo-se ao contato inicial do pistão com a amostra. Após o contato inicial, inicia-se o fluxo, reduzindo a área de contato e o atrito da pasta com o cilindro representada pelo trecho de X a Y (denominada de zona estável de extrusão). A partir do ponto Y, observa-se o aumento intenso da carga de extrusão com pequenos deslocamentos, fenômeno descrito como *strain hardening*.

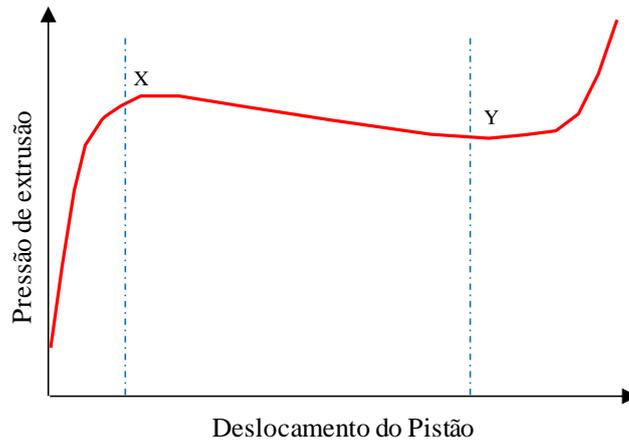


Figura 7 Curva característica do ensaio de Benbow e Bridgwater adaptado de [14]

Nos resultados apresentados na Figura 8, é possível observar que na composição com o maior teor de ligante obtém-se o platô (X-Y) durante maior deslocamento. Segundo Chen et al [14], quanto maiores os deslocamento no platô, menores serão as cargas de atrito entre a pasta e o cilindro. No entanto, notou-se que a medida em que se aumentava o consumo de filler calcário, reduzia-se o platô, indicando o efeito inverso provocado pela separação de fases já observada na avaliação do fio extrudado pelo método de rosca infinita.

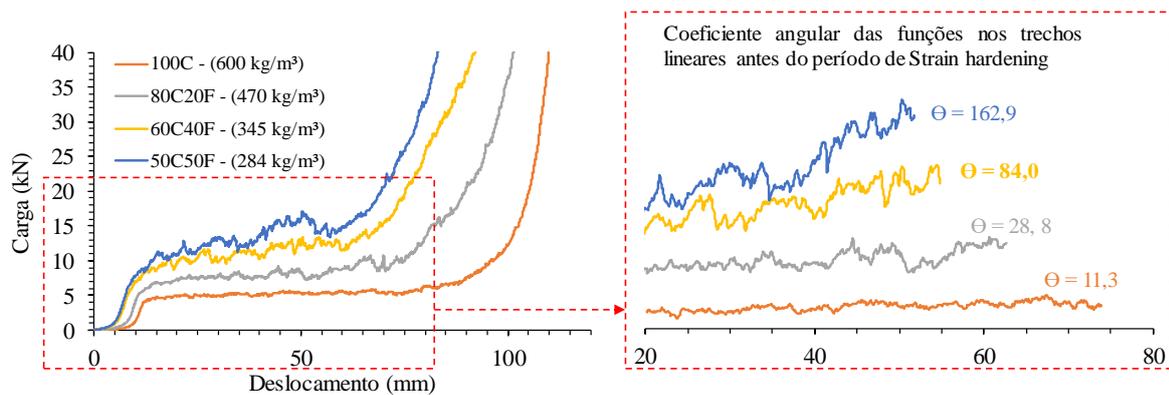


Figura 8 curva do característica, carga versus deslocamento, retirada pelo ensaio de Benbow e Bridgwater. Depois se traçou as linhas de tendência para obter os valores do coeficiente angular de cada reta.

Na Figura 9 (a) apresentou-se os coeficientes angulares em função do consumo de cimento: o aumento do coeficiente angular indica dificuldades operacionais durante o processo de extrusão, pois há indicativo, a partir do método Benbow e Bridgwater, de que está ocorrendo separação de fases, conforme ilustrado na Figura 9 (b)

Cardoso [15] explica que o surgimento da separação de fases não está somente vinculado a velocidade de deslocamento do material, está associado também as características físicas da mistura, como a viscosidade do sistema e com a redução do consumo de cimento, pela substituição por filler calcário, houve diminuição na viscosidade do produto extrudado.

O comportamento ideal para extrusão requer características no estado fresco próximas a curva $100C - (600 \text{ kg/m}^3)$, onde são possíveis realizações de extrusões mais estáveis em baixas cargas compressivas, porém, tal composição não é aplicável, por efeitos de técnicos, econômicos e ambientais.

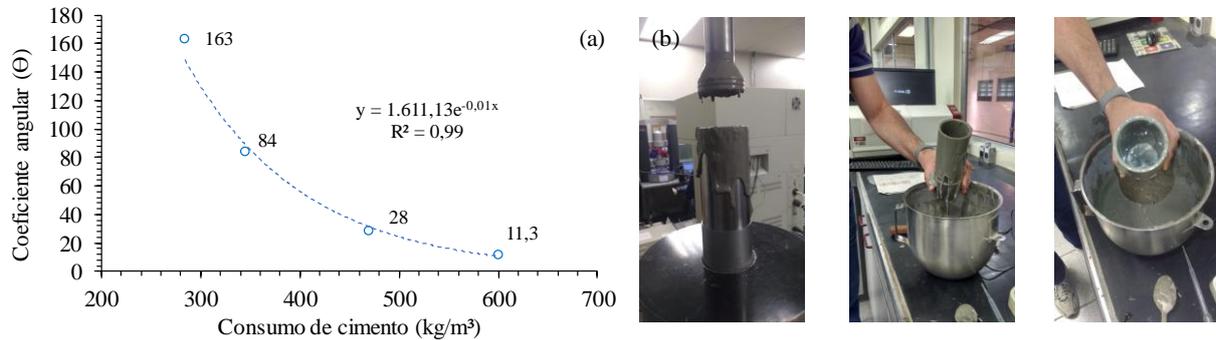


Figura 9. Em (a) é apresentado o coeficiente angular das curvas características do ensaio de *Benbow e Bridgwater* em (b) é apresentada a imagem da composição com consumo de 284 kg/m^3 de ligante após o teste, com características visuais de separação de fases.

Na Figura 10 são apresentados, para finalidade de ilustração, os fios extrudados de ambos os métodos, notando-se que o processo de extrusão também interfere diretamente nas propriedades reológicas do fio: a extrusão por rosca proporcionou fios com baixa tensão de escoamento, diferente do processo por pistão, onde os fios foram obtidos com alta tensão de escoamento e com boa resolução do fio, diminuindo os riscos de defeitos no processo de deposição e adesão das camadas subsequentes “*layer by layer*”.

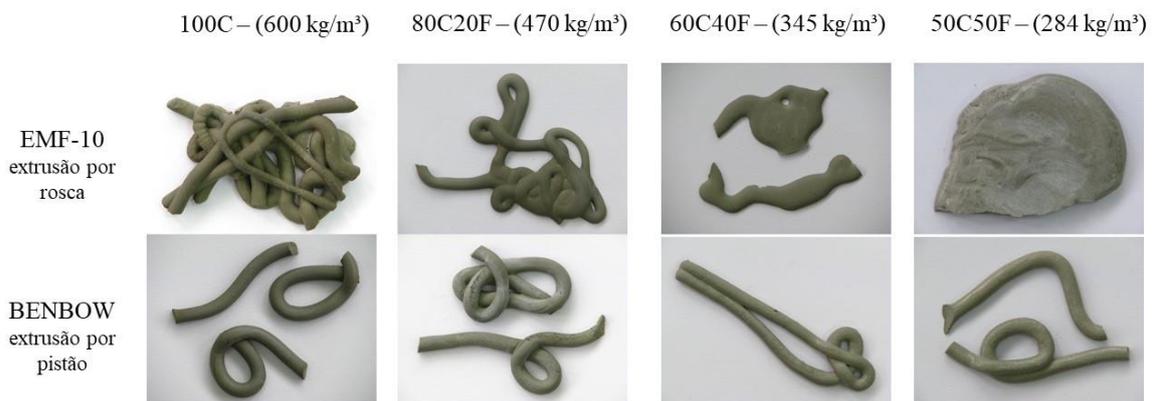


Figura 10 Análise comparativa dos fios extrudados em diferentes processos de extrusão, pelo método de rosca contínua EMF-10 e pelo método de pistão, por *Benbow e Bridgwater*

O método squeeze flow foi utilizado a fim de detectar na mistura o efeito da separação de fases, seja pelo efeito da velocidade de deslocamento ou pelas características intrínsecas da composição e os resultados na Figura 11.

Independente da composição, a maior susceptibilidade a separação de fases ocorre quando o ensaio é realizado sob baixas velocidades de deslocamento no método squeeze flow,

conforme descrito por -Cardoso^[15]. No entanto, as características intrínsecas do material como viscosidade do meio líquido, teor de sólidos e aditivos podem afetar essa pré-disposição.

Para a composição 100C - (600 kg/m³), obteve-se em baixos deslocamentos comportamento pseudoplástico, que se caracteriza pela diminuição da viscosidade com o aumento da taxa, diferente da composição 50C50F (284 kg/m³), onde o comportamento foi do tipo dilatante, onde o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de recobrir e preencher os vazios, aumentando a resistência ao cisalhamento. Desta forma, a aplicação do pressão resulta em fluxo heterogêneo do material dentro do equipamento e intensifica a separação de fases.

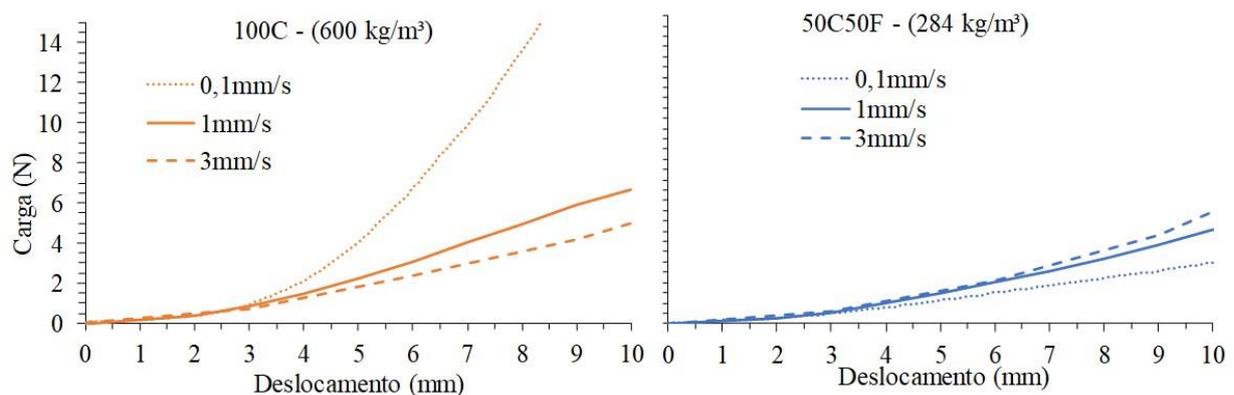


Figura 11. Espalhamento pelo método squeeze flow

CONCLUSÕES

Constatou-se que para o sucesso do processo de extrusão em materiais cimentícios, deve-se levar em consideração a compatibilização de equipamento com a composição, pois, para as mesmas formulações, notou-se diferença na conformação do fio extrudado por rosca infinita ou pistão.

-Observou-se também que deve-se considerar o efeito da separação de fases durante o processo, que ocorreram em ambos os equipamentos, porém com maior intensidade na extrusão por rosca.

Os parâmetros estimados pela curva do ensaio de Benbow e Bridgwater indicaram que quanto menores as cargas em maiores deslocamentos durante o trecho plástico, a probabilidade de obtenção do fio com adequadas características reológicas será maior e utilizando-se o ensaio de squeeze flow foi possível concluir que a menor viscosidade provocada pela diminuição do consumo de cimento resultou na separação de fases durante o processo e redução do potencial extrusão das composições.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Projeto 2014/50948-3 – INCT CEMtec – Tecnologias Cimentícias Ecoeficientes Avançadas) e a Alcoa Foundation pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] “ONU Brasil,” *ONU Brasil*, 2018. [Online]. Available: <https://nacoesunidas.org/>. [Accessed: 06-Nov-2018].
- [2] V. M. John, “Materiais de Construção e o Meio Ambiente,” in *Materiais de Construção Civil e Princípio da Ciência e Engenharia de Materiais*, 1st ed., vol. 1, São Paulo: Geraldo Cechella Isaia, 2007.
- [3] B. L. Damineli and V. M. John, “Developing low CO₂ concretes: is clinker replacement sufficient,” presented at the 13th NOCMAT The need of cement use efficiency improvement, China, 2011.
- [4] H. V. Damme, “Concrete material science: Past, present, and future innovations,” *Cement and Concrete Research*, 2018.
- [5] R. . Buswell, W. . Leal de Silva, S. . Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cement and Concrete Research*, 2018.
- [6] N. Roussel, “Rheological requirements for printable concretes - IN PRESS,” *Cement and Concrete Research*, 2018.
- [7] D. P. Bentz, S. Z. Jones, I. R. Bentz, and M. A. Peltz, “Towards the formulation of robust and sustainable cementitious binders for 3-D additive construction by extrusion,” *Construction and Building Materials*, vol. 175, 2018.
- [8] Y. Chen, S. C. Figueiredo, Ç. Yalçinkaya, O. Çopuroğlu, F. Veer, and E. Schlangen, “The Effect of Viscosity-Modifying Admixture on the Extrudability of Limestone and Calcined Clay-Based Cementitious Material for Extrusion-Based 3D Concrete Printing,” *Materials*, vol. 12, 2019.
- [9] S. Mantellato, M. Palacios, and R. J. Flatt, “Reliable specific surface area measurements on anhydrous cements,” *Cement and Concrete Research*, vol. 67, pp. 286–291, Jan-2015.
- [10] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, “Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing,” *Construction and Building Materials*, pp. 613–627, 2018.
- [11] C. M. R. Dias, “Fibrocimentos com gradação funcional,” Tese, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2011.
- [12] Y. J. M. Soto, “Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão,” UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2010.
- [13] V. M. John, B. L. Damineli, M. Quattrone, and R. G. Pileggi, “Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential,” *Cement and Concrete Research*, 27-Mar-2018.
- [14] Y. Chen, J. L. Struble, and G. H. Paulino, “Using Rheology to Achieve Co-Extrusion of Cement-Based Materials with Graded Cellular Structures,” *Applied Ceramic Technology*, vol. 1, 2008.
- [15] F. A. Cardoso, V. M. John, R. G. Pileggi, and P. F. G. Banfill, “Rheological behavior of mortars: comparison between rotational and squeeze-flow techniques,” presented at the 25th ConferencRheology of Building Materials, Alemanha, 2016.
- [16] F. A. Cardoso, “Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico,” Tese, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2009.