

Técnica "concreto fresco 2D - CF2D" para fabricação digital de artefatos de concreto

"Concreto fresco 2D – CF2D" technique for digital manufacture of concrete artifacts

Ítalo Arruda de Carvalho
Universidade Federal do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, RJ | italo.carvalho@poli.ufrj.br

Oscar Aurelio Mendoza Reales
Universidade Federal do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, RJ | oscar@coc.ufrj.br

Romildo Dias Toledo Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, RJ | toledo@coc.ufrj.br

RESUMO

A necessidade de maior produtividade nas obras civis tem impulsionado a busca por avanços tecnológicos nos métodos construtivos. A automação da construção usando mecanismos auxiliados por computador, recentemente notabilizada por avanços na impressão 3D de concreto, é um campo promissor para a idealização de técnicas similares que o complementem. O objetivo deste trabalho é propor uma técnica para a usinagem de artefatos em qualquer formato bidimensional, por meio de cortes automatizados em uma placa de concreto no estado fresco. A metodologia proposta é a avaliação da relação entre a resistência ao cisalhamento do material fresco e a qualidade de corte por meio de uma análise da reologia do concreto no estágio inicial de cura. Resultados foram obtidos para o intervalo de valores de tensão de escoamento em que o corte deve ser feito e, em seguida, obteve-se uma janela ideal de tempo para o corte na dosagem adotada. Concluiu-se que a tecnologia proposta apresentou perspectivas positivas sobre sua viabilidade e continuidade de seu desenvolvimento.

Palavras-chave: Concreto Fresco 2D; Prototipagem; Fresagem; Concreto Digital; Corte em Concreto.

ABSTRACT

The need for greater productivity in civil works has driven the search for technological advances in construction methods. Automation of construction using computer-aided mechanisms, recently noted for advances in 3D concrete printing, is a promising field for the idealization of similar techniques that complement it. The goal of this work is to propose a technique for machining artifacts in any two-dimensional shape by means of automated cuts in a concrete slab in the fresh state. The methodology proposed is the evaluation of the relation between the shear strength of the fresh material and the cutting quality by means of an analysis of the rheology of concrete in the initial stage of curing. The results were obtained on the range of yield stress values at which the cut should be made, and then reached an ideal window of time for cutting with the dosage adopted. It was concluded that the proposed technology presented positive perspectives on its feasibility and the continuity of its development..

Keywords: 2D fresh concrete; Machining; Milling; Digital Concrete; Concrete Cutting.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem buscado por produtividade, através de tecnologia e métodos construtivos mais velozes, sendo estas duas das mais importantes alavancas de produtividade (FERREIRA; ZANCUL, 2014).

O setor vislumbra no desenvolvimento da construção digital em concreto inúmeras vantagens como: a liberdade de formatos, a eficiência no uso de matéria prima, maior velocidade de construção, redução de custos com fôrmas e ganhos em segurança dos trabalhadores (WANGLER et al., 2016).

Igualmente relevante é a pré-fabricação. A facilidade de montagem faz com sistemas pré-fabricados se apresentem mais produtivos, seguros e de melhor qualidade (SERRA; FERREIRA; PIGOZZO., 2005). Alguns materiais desta classe são chamados de artefatos de concreto.

Artefatos de concreto são peças pré-fabricadas com diversas aplicações em obras. São importantes pela sua adaptabilidade, pois a matéria-prima pode ganhar diferentes formas e volumes para obter blocos, telhas, objetos decorativos, peças de mobiliário urbano, etc., conforme a definição de cada obra (SEBRAE, 2016).

CARVALHO, I.A. de; REALES, O.A.M; TOLEDO FILHO, R.D.. Técnica "concreto fresco 2d - cf2d" para fabricação digital de artefatos de concreto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 2., 2019, Campinas, SP. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2019. Disponível em: https://antaceventos.net.br/index.php/sbtic/sbtic2019/paper/view/110

A execução desta gama de formatos esbarra na necessidade do uso de moldes ou formas, que podem tornar o processo custoso, inviabilizando a produção em pequena escala de um determinado elemento. O custo unitário de uma peça moldada torna-se cada vez maior em comparação ao de uma peça prototipada à medida em que o número total de peças produzidas é decrescido (LIM et al., 2012).

Prototipagem rápida entende-se por meios automatizados de se modelar peças. No âmbito do concreto, o método por adição de material tem se desenvolvido. A construção civil tem alcançado resultados no desenvolvimento de técnicas de prototipagem rápida aditiva, tendo surgido ultimamente vários grupos de pesquisa, sobretudo em impressão 3D, os quais têm desenvolvido aplicações em escala real (WOLFS; SALET, 2015).

No entanto, quanto ao método de prototipagem rápida subtrativa (usinagem), onde o modelo final é obtido através da remoção de material a partir de um bloco, aplicações com concreto não se apresentam usuais até o presente momento (CARVALHO, 2018). A prototipagem rápida subtrativa é também chamada fabricação digital (CELANI; PUPO, 2002).

Assim, a indústria de artefatos de concreto carece de um meio tecnicamente viável para fabricação digital. O objetivo deste trabalho é propor uma inovação que possibilite a fabricação digital de placas de concreto no estado fresco, e mostrar a sua viabilidade através de uma prova de conceito.

2 TECNOLOGIA PROPOSTA: CONCRETO FRESCO 2D (CF2D)

A inédita técnica proposta por este trabalho para fabricação digital em concreto fresco, denominada “concreto fresco 2D” (CF2D), trata-se de um processo de usinagem automatizada de elementos bidimensionais, mediante comando numérico computadorizado (CNC), que utiliza concreto em seu estado fresco como matéria prima. Trata-se de uma aplicação da tecnologia de corte CNC ao concreto fresco, o que até o presente momento não consta na literatura.

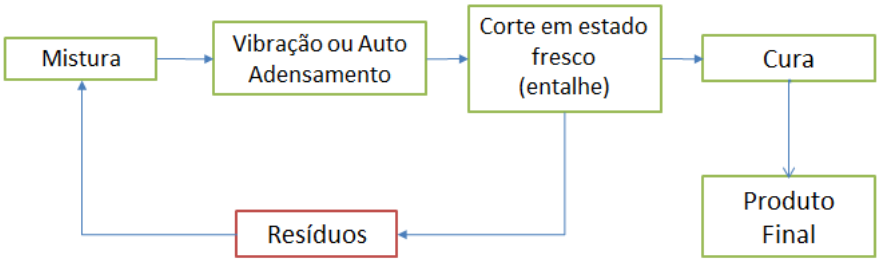
Entende-se que a partir de uma placa de concreto se pode utilizar uma máquina para elaborar diferentes peças de duas dimensões que, ao serem unidas, têm o potencial de formar um elemento tridimensional. Desta forma, o trabalho poderá ser realizado sobre uma placa inicialmente moldada, mas com os produtos (peças individuais) obtidos sem necessidade de nenhum molde adicional.

A sua utilização é prevista em estruturas e/ou artefatos constituídos por uma ou mais peças complementares entre si, feitas de concreto, em três etapas. A primeira etapa é a concepção e modelagem das peças em conformidade com a aplicação e encaixe. A segunda etapa é a materialização, ou seja, o corte dos elementos 2D a partir de uma placa inicial. A terceira e última etapa, consiste em unir, após secagem, cada peça (elemento 2D) às demais segundo os encaixes e plano de montagem ora idealizados no modelo inicial, obtendo-se uma estrutura tridimensional conforme concepção inicial.

Para a etapa de materialização, foco deste trabalho, apresenta-se pela Figura 1 o fluxograma idealizado para o procedimento. Misturam-se os materiais constituintes do concreto em dosagem adequada, partindo-se para o seu lançamento e adensamento no molde em forma de placa. Aplica-se nesta placa o corte das peças, e as mesmas são encaminhadas à cura em ambiente controlado para, finalmente, obter o produto final, que são peças componentes de futura montagem.

Estando o concreto em seu estado fresco, os resíduos de material (concreto) ainda trabalhável, retalhos do procedimento de corte na placa original, podem ser reaproveitados para moldagem de uma segunda placa para receber novo corte CNC. Para isto é necessário conhecer uma janela de tempo na qual o material permanece apto a ser submetido ao corte, a ser calculada no âmbito da pesquisa.

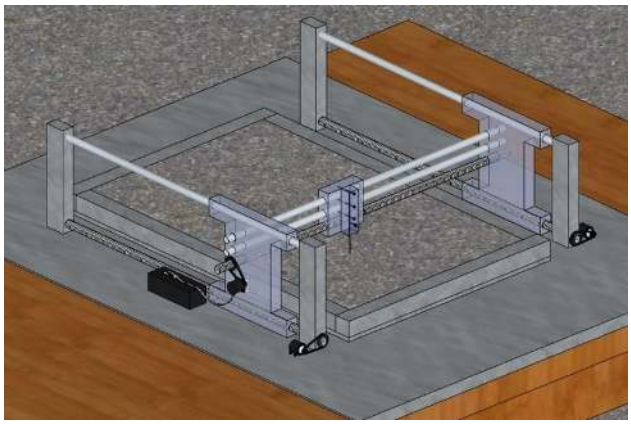
Figura 1: Fluxograma do procedimento de corte em uma placa de concreto fresco através da tecnologia CF2D



Fonte: Os autores.

Para aplicação desta técnica, faz-se o uso de uma máquina CNC com dois eixos. A Figura 2 apresenta uma ilustração da máquina. Um carrinho com a ferramenta de corte, uma haste fina de seção circular, se movimenta em uma direção, enquanto as laterais se movimentam na direção perpendicular. A sincronia entre estes movimentos, comandada por computador, define o formato a ser transmitido para o concreto fresco.

Figura 2: Ilustração da máquina CF2D



Fonte: Os autores

3 PROVA DE CONCEITO DA TECNOLOGIA

3.1 Método

Realizou-se uma pesquisa experimental com um concreto de alta resistência dosado, misturado e submetido a diferentes tempos de repouso (0, 15, 30, 45 e 60 minutos) com o objetivo de medir seu limite de escoamento ("τ" _0) após cada tempo e determinar sua velocidade de ganho de "τ" _0. Foi utilizado um reômetro Brookfield, modelo DV-III Ultra, equipado com uma palheta tipo Vane. O "τ" _0 de cada ensaio foi obtido a partir da tensão cisalhante máxima suportada pelo concreto durante o processo de cisalhamento.

Considera-se que a reologia adequada para o corte em estado fresco será atingida com o processo de ganho de "τ" _0do concreto no tempo, caracterizada pelo instante em que o concreto possa ser cortado e manter-se autoportante. Este conceito foi utilizado para determinar uma janela de tempo adequada para o inicio e fim do processo de corte. Esta janela foi denominada “janela de corte”.

Buscou-se estabelecer esta janela a partir dos dados obtidos sobre "τ" _0 comparados aos resultados qualitativos a respeito do corte na massa de concreto. As amostras de cada tempo de repouso foram cortadas superficialmente com auxílio de uma espátula, qualificando-se todas as amostras pela qualidade de corte apresentada segundo a nomenclatura: “Corte ruim”, quando se fecha, total ou parcialmente, imediatamente após o procedimento. “Corte bom”, quando permanece aberto após o procedimento. “Corte ineficiente”, quando ocorre a resistência ao corte no material, ou seja, o ponto onde há uma dificuldade, mesmo que pequena, de efetuar o movimento manual com a espátula.

3.2 Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais para produção do concreto: (i) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI); (ii) Areia natural de quartzo; (iii) Sílica Ativa; (iv) Sílica 325#; (v) Cinza Volante; (vi) Aditivo superplastificante (Glênium 51); (vii) Modificador de viscosidade (Rheomac UW 410 – BASF); (viii) Água.

3.3 Dosagem do concreto

Como dosagens de referência, optou-se pelo concreto de altíssima resistência estudado por (FORMAGINI, 2005) e pelo concreto similar produzido por (RAMBO, 2012). Ambos foram obtidos pelo método de dosagem científica. Modificações foram adotadas para os fins do CF2D, como a retirada de agregados graúdos e fibras que impeçam o corte. O Quadro 1 mostra a dosagem adotada.

Quatdro 1: Dosagem do concreto estudado

Materiais	Fração Volumétrica	Massa (kg/m³)
Areia natural – tamanho máximo 4,75mm	0,5116	1188,1
Sílica 325	0,0222	59,5
Cimento CP-V ARI	0,1571	500,0
Cinza Volante (POZO FLY)	0,0607	142,8
Sílica Ativa (SILMIX)	0,0168	38,2
Superplastificante (Glênium 51) - Sólidos	0,0018	1,9
Modificador de viscosidade (Rheomac UW 410 - BASF)	0,0002	0,3
Água	0,2298	230,1
SOMA	1,0000	2160,9
Parâmetros de dosagem	Valor	
Percentual de superplastificante (%SP)	0,4	
Relação água/cimento (A/C)	0,46	
Relação água/materiais cimentícios (A/MC)	0,34	
Tensão média de ruptura (fc) aos 28 dias	60,99 MPa	
Módulo de elasticidade (E) aos 28 dias	31,68 GPa	

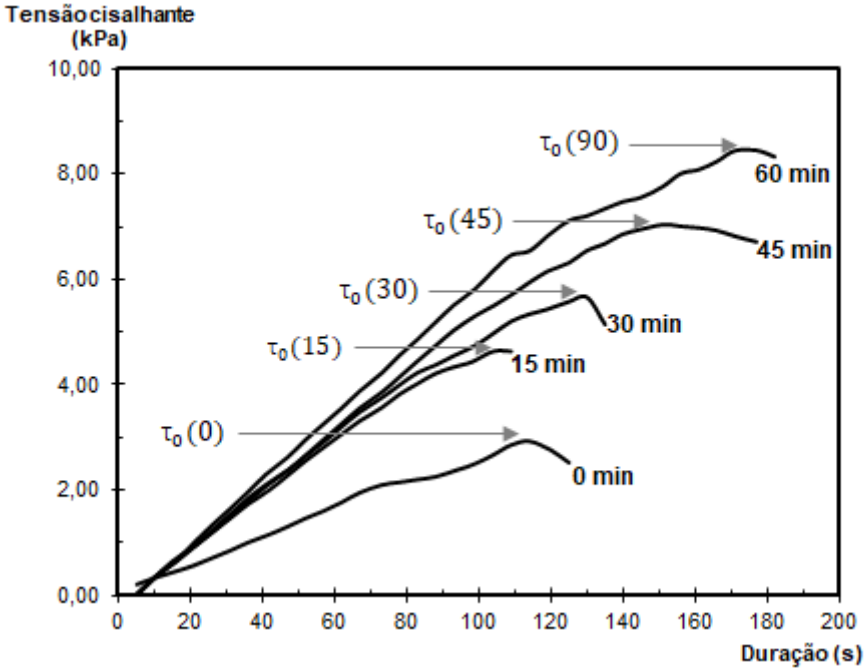
Fonte: Os autores.

3.4 Resultados do limite de escoamento (τ_0)

A tensão de escoamento mostra-se um dado de extrema relevância para o presente estudo, já que a tecnologia CF2D utiliza-se do concreto nos seus primeiros instantes de repouso, ou seja, o estado fresco.

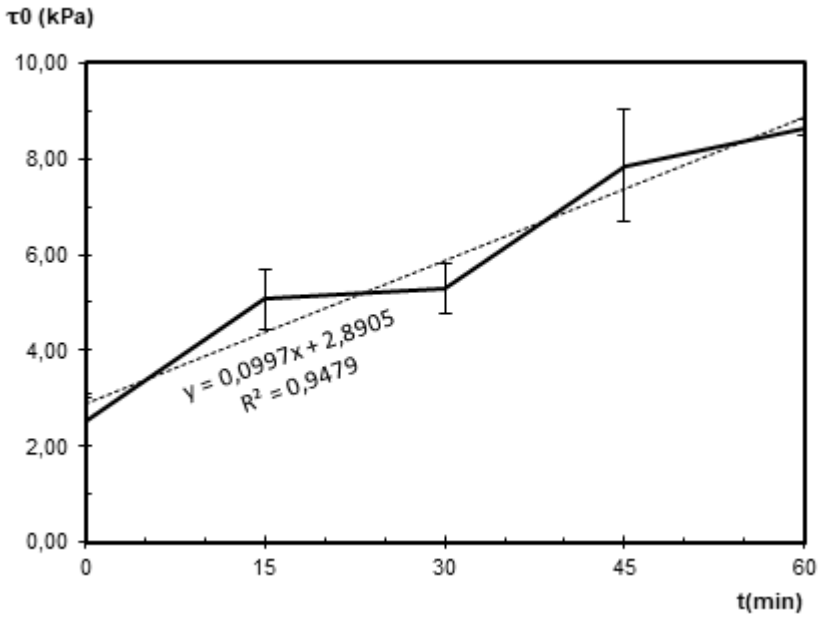
O Gráfico 1 apresenta a curva de cada amostra, com o seu repouso descrito e a indicação gráfica de τ_0, que é o ponto de inflexão e/ou valor máximo da curva. No Gráfico 2, traçou-se uma curva característica do τ_0 em função do tempo de repouso. Por meio de uma análise gráfica realizada com o auxílio do *Microsoft Excel*, ajustou-se uma equação linear do tipo $\tau = at + b$ aos dados obtidos experimentalmente, onde *"t"* corresponde ao tempo de repouso, "*a"* à velocidade de ganho de τ_0 e "*b*" ao limite de escoamento em $t = 0$.

Gráfico 1: Curvas obtidas do reômetro para cada tempo de repouso



Fonte: Os autores.

Gráfico 2: Curva característica de τ_0 em função do tempo de repouso da mistura



Fonte: Os autores.

3.5 3.5 Resultados do cálculo da janela de corte

Todas as amostras foram qualificadas segundo a nomenclatura estabelecida no método: “Corte ruim”, (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**3(a)); “Corte bom” (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b)); “Corte ineficiente”, quando ocorria a resistência ao corte no material.

Figura 3: Aspecto característico do corte. (a) "Corte ruim". (b) "Corte bom"



(a) (b)

Fonte: Os autores.

A partir da qualificação das amostras e o cruzamento de dados sobre o τ_0, identificaram-se os valores de τ_0 diante dos quais foi possível obter a qualificação de “corte bom” (τ_0>5,7kPa) e “corte ineficiente” (τ_0>8,8kPa).

Desta forma, com um tratamento algébrico simples chegou-se a uma expressão para a janela de corte em tempo: a expressão (1) contém a demonstração da equação genérica obtida a partir da evidencia da variável “tempo” (t). As expressões (2) e (3) apresentam as equações para obtenção dos tempos inicial (t_0) e final (t_f) em função das tensões de escoamento (τ) do material:

$$\tau = at + b \Rightarrow t = \frac{\tau - b}{a} \quad (1)$$

$$t_0 = \frac{\tau - b}{a}, t \geq 0 \quad (2)$$

$$t_f = \frac{\tau - b}{a}, t > 0 \quad (3)$$

Assim é possível, substituindo valores, obter a janela de tempo ideal para o corte, que é o intervalo compreendido entre 28 e 59 minutos de tempo de repouso do concreto.

4 CONCLUSÕES

O estudo pôde demonstrar a possibilidade de execução de um corte no concreto em estado fresco, de forma a manter um formato desejável no material, estabelecendo uma dosagem e uma janela de tempo tal que a tecnologia idealizada se apresenta factível. A caraterização reológica mostrou-se uma ferramenta adequada para a definição da janela de corte do concreto em estado fresco, permitindo através de um tratamento matemático simples a obtenção dos principais parâmetros operacionais do processo. As informações contidas neste estudo podem fornecer subsídios técnicos consistentes para aplicações presentes e estudos futuros sobre o Concreto Fresco 2D, considerando que a tecnologia proposta é passível de continuidade em seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CNPq através da Chamada Universal MCTIC/CNPq nº 28/2018.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, I.A. Desenvolvimento da técnica “concreto fresco 2D – CF2D” para fabricação digital de artefatos de concreto. Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

CELANI, M. G. C.; PUPO, R. T. Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil. Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo, v. 8, 2002.

FERREIRA, A. V.; ZANCUL, E. Estudo sobre produtividade na construção civil: desafios e tendências no Brasil. São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. 2014.

FORMAGINI, S. Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

LIM, S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction, v. 21, p. 262–268, 2012.

RAMBO, D. A. S. Concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço híbridas: aspectos materiais e estruturais. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. RJ, Brasil, 2012.

SEBRAE. Artefatos de concreto - Panorama e características do mercado nacional. p. 1–5, 2016. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br>. Acessado em: 17 de janeiro de 2018.

SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. D. A.; PIGOZZO, B. Evolução dos Pré-fabricados de Concreto. 1o Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado, n. 1, p. 10, 2005.

WANGLER, T. et al. Digital concrete: opportunities and challenges. RILEM Technical Letters, v. 1, p. 67-75, 2016.

WOLFS, R.; SALET, T. A. M. 3D printing of concrete structures. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, 2015.