

Método de dosagem UNISINOS para UHPC

ROBERTO CHRIST, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972> – rchrist@unisinos.br;
BERNARDO TUTIKIAN, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1319-0547>, Profs. Drs., UNISINOS

PAULO HELENE – ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6442-7693>, DR. PROF., PhD ENGENHARIA

R E S U M O

O desempenho do concreto de ultra alto desempenho (UHPC) já foi evidenciado e as primeiras aplicações já possuem mais de 25 anos. Uma das lacunas com relação a este composto é a determinação de traços com diferentes materiais disponíveis localmente. Para sanar esta lacuna, foi desenvolvido um méto-

do de dosagem de UHPC. O método é baseado em etapas, nas quais se determinam os quantitativos dos constituintes e, posteriormente, ocorre a validação, através da mistura. O método de dosagem é simples, experimental e permite o uso de materiais locais. Apenas deve-se obter informações sobre os materiais, como a curva granulométrica.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC), DOSAGEM, COMPACIDADE, RESISTÊNCIA MECÂNICA, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

UHPC apresenta elevadas resistências à compressão e à tração, um comportamento dúctil e elevada durabilidade. Em sua composição, apresenta baixo consumo de água, porém, excelente fluidez, devido à utilização de aditivos superplastificantes e um excelente empacotamento granular. Ainda, os materiais constituintes do UHPC têm o diâmetro menor do que 3 mm, não há agregados graúdos.

As propriedades do UHPC são as mesmas encontradas no CAD/HPC (*high performance concrete*) no CRF/FRC (*fibre-reinforced concrete*) e no CAA/SCC (*self compacting concrete*), porém, simultaneamente. Pode-se afirmar que o UHPC é uma mescla destes três tipos de concreto, como se observa na Figura 1.

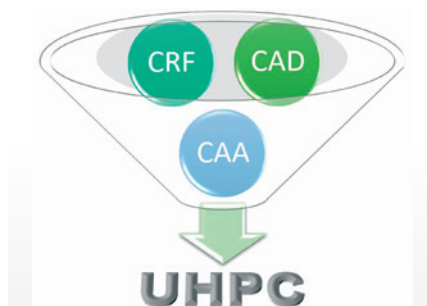
Segundo normas e documentos técnicos em diferentes países, o UHPC é um concreto que apresenta elevada resistência mecânica, elevada durabilidade e uma capacidade de suporte de carga após fissuração (AFNOR, 2016; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017; CHRIST, 2019). Não há consenso entre os parâmetros de resistência, e diferentes normas apresentam

limites de resistência à compressão mínima de 100 a 150 MPa (PERRY e PARSEKIAN, 2019). O início da utilização do UHPC na construção civil teve início no ano de 1997, com a construção de uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá. Naquele momento, o material era chamado de concreto de pós reativos (Reactive Powder Concrete - RPC), com resistência à compressão de 200 MPa (CHRIST, 2019). Já na década de 90 o UHPC estava sendo aplicado em projetos de infraestrutura em diferentes

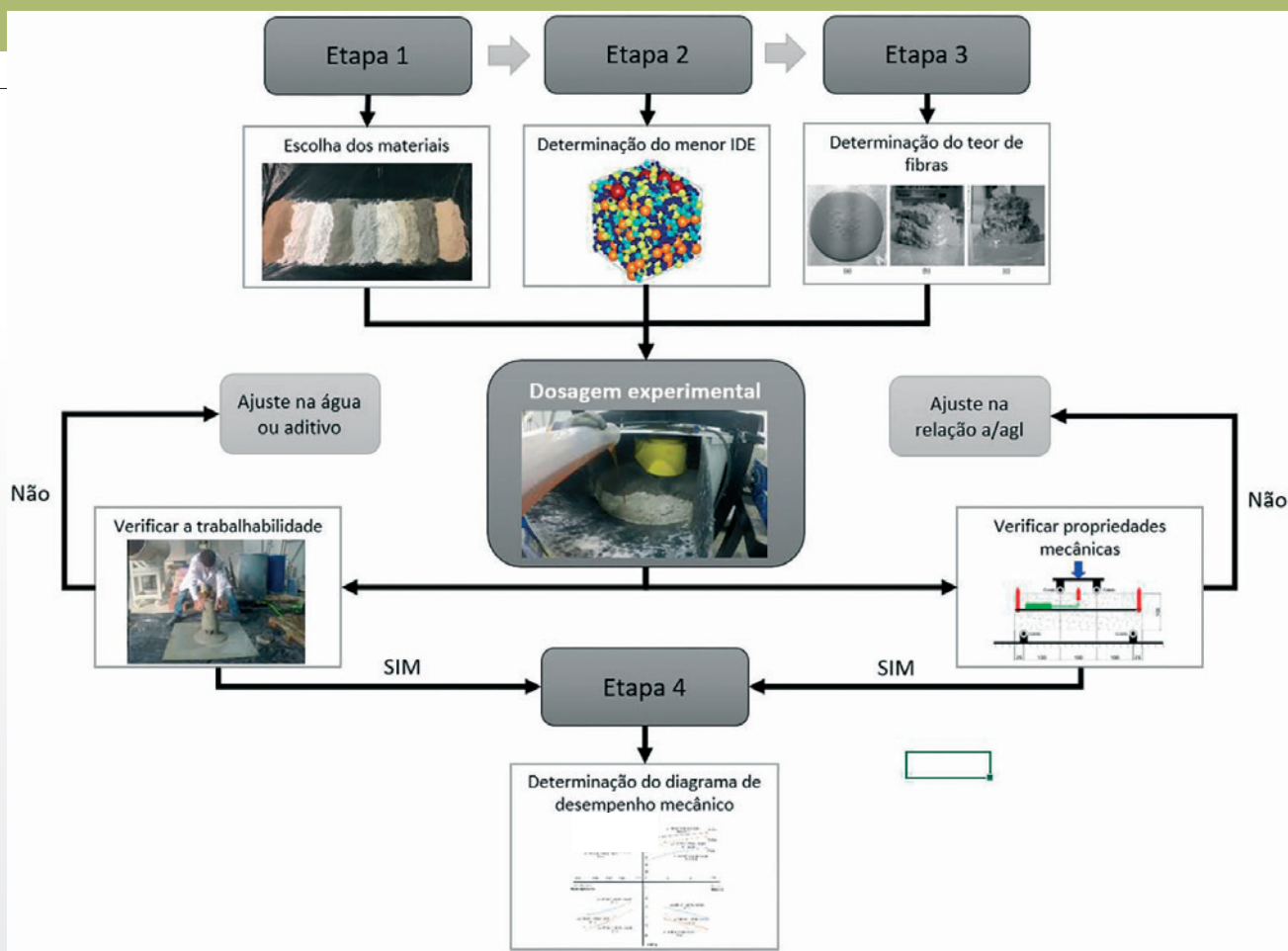
países, porém o conhecimento referente ao material durante o uso era pouco conhecido, não se tinha normas ou métodos para a sua avaliação e execução de misturas (PERRY, 2015).

O uso do UHPC em diferentes áreas da engenharia fez com que a comunidade técnica se mobilizasse e normas técnicas foram desenvolvidas, além de documentos com especificações, recomendações e métodos de projeto referente ao UHPC. Atualmente, tem-se a ASTM C1856/1856M – 17 “*Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*”; a NF P 18-710: *Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)*; e a NF P 18-470: *UHPFRC: specification, performance, production and conformity*, essas duas da Associação Francesa de Engenharia (AFGC).

O uso do UHPC é muitas vezes restringido pelo seu elevado custo, se comparado com outros concretos especiais. Porém é importante frisar que o elevado custo é majoritariamente devido às fibras de aço utilizadas na mistura (CHRIST; TUTIKIAN; PACHECO, 2011). A comparação do custo com os demais concretos deve ser feita não apenas pelo



► **Figura 1**
Combinações das propriedades dos diferentes
Fonte: Christ; Tutikian; Helene, 2022



► **Figura 2**
Fluxograma das etapas do método de dosagem

concreto, mas também pelo reforço, deve ser comparado o custo total da estrutura e não apenas do concreto em si.

Métodos para se obter a proporção ideal do UHPC com diferentes materiais foram desenvolvidos e são apresentados em diferentes pesquisas. Em praticamente todos estes trabalhos o traço é obtido através de uma mistura com elevado consumo de cimento, baixo consumo de água, adições de materiais muito finos e um elevado consumo de superplastificantes (ARORA *et al.*, 2018). No entanto, o UHPC é constituído por materiais finos, sem agregados graúdos, e não há a necessidade de se ter elevados consumos de cimento ou de aglomerantes (YUNSHENG *et al.*, 2008).

Portanto, visando contribuir com o desenvolvimento e aplicabilidade do UHPC na construção civil, se apresenta um método de dosagem deste tipo de concreto, com qualquer material disponível e sem a necessidade de se ter

elevados consumos de cimento e fibras, buscando a viabilidade econômica desta tecnologia. O método é baseado no empacotamento das partículas, e é relativamente prático e simples de se reproduzir.

2. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM

O método de dosagem proposto tem como premissa desenvolver uma mistura de diferentes constituintes, não tendo limitação de quantidades e nem de origem geológica, de maneira que a mistura apresente o menor índice de vazios e, consequentemente, o maior empacotamento das partículas. Com base nisso, o método é dividido em quatro etapas, sendo que em cada uma delas um parâmetro é obtido. A Figura 2 apresenta o fluxograma do método com cada uma das etapas.

Para melhor entendimento do método, cada uma das etapas foi descrita a seguir.

2.1 Etapa 1 – Escolha dos materiais

Nesta etapa, é realizada a escolha dos materiais, balizada pelos materiais disponíveis na região, uma vez que o transporte dos materiais acaba encarecendo o custo do concreto. Deve-se buscar por materiais com distribuição granulométrica contínua e diâmetros de grãos inferiores a 3 mm. Importante analisar a faixa granulométrica e a origem pétreia de cada material. A Figura 3 apresenta alguns materiais disponíveis no Brasil e que podem ser utilizados para a produção do UHPC, com sua respectiva distribuição granulométrica.

Com o ensaio de granulometria de cada material, é possível realizar a análise dos melhores materiais a serem utilizados. Por exemplo, as duas areias mostradas apresentam a mesma faixa granulométrica, porém a areia 1 apresenta uma distribuição mais contínua, logo esta deve ser o

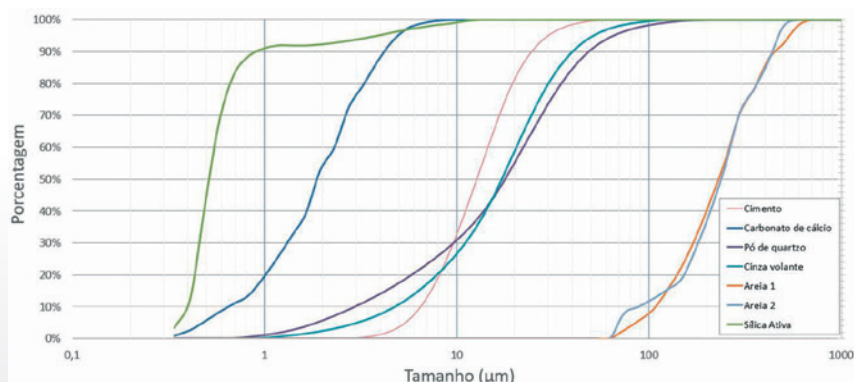


Figura 3
Distribuição granulométrica de alguns materiais

material a ser utilizado. O cimento, o pó de quartzo e a cinza volante apresentam mesma faixa granulométrica e não melhorarão o empacotamento da mistura. Porém, também deve-se considerar uma quantidade mínima de aglomerantes devido às propriedades mecânicas e a durabilidade.

2.2 Etapa 2 – Determinação do Índice de Desvio do Empacotamento (IDE)

Nesta etapa, se obtêm os quantitativos dos constituintes secos presentes na mistura, exceto as fibras. A partir da granulometria dos materiais, o empacotamento da mistura é definido, e deve ser comparado com o empacotamento teórico proposto por Funk e Dinger (1980), de acordo com o tamanho

máximo e mínimo dos materiais a serem utilizados. A Equação 1 determina o empacotamento perfeito (de Funk e Dinger, 1980) e a Equação 2 o empacotamento da mistura.

$$[1] \quad \frac{PAD}{100\%} = \frac{D_{max}^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q}$$

Em que:

PAD = percentual acumulado do diâmetro avaliado;

D = diâmetro a ser avaliado, em mm;

D_{max} = diâmetro da maior partícula, em mm;

D_{min} = diâmetro da menor partícula, em mm;

q = coeficiente de distribuição.

$$[2] \quad \frac{PAM}{100} = \sum (Q \cdot D_{retido})$$

Sendo que:

PAM – percentagem acumulada da mistura;

Q – percentagem de cada material na mistura;

D_{retido} – percentagem retida de determinado diâmetro.

Assim, se obtêm as curvas do empacotamento perfeito teórico e do empacotamento da mistura, como se observa na Figura 4.

O melhor empacotamento é obtido quando a curva do empacotamento da mistura for mais próximo possível do empacotamento teórico. Se mudarmos os quantitativos de um material, automaticamente altera o empacotamento da mistura. A área entre as curvas é definida como o Índice de Desvio de Empacotamento (IDE). E, quanto menor o IDE, melhor é, pois o empacotamento será melhor. A Equação 3 é utilizada para o cálculo do IDE.

$$[3] \quad IDE = \sum_{j=1}^m |PA_{ideal} - PA_{Mistura}|$$

Sendo que:

IDE – Índice de Desvio do Empacotamento;

PA_{ideal} – percentagem acumulada de cada diâmetro do empacotamento ideal;

$PA_{Mistura}$ – percentagem acumulada de cada diâmetro da mistura.

Para que a proporção ideal dos materiais possa ser determinada, pode ser utilizado um programa de cálculo numérico, como o Excel®. Assim, é possível realizar uma interação entre as proporções dos constituintes de maneira que o menor IDE seja encontrado.

2.3 Etapa 3 – Determinação do teor máximo de fibras

Nesta etapa, é determinado o teor máximo de fibras a ser incorporado na mistura de maneira que a trabalhabilidade não seja comprometida. Este percentual em relação ao volume de concreto é obtido através da Equação 4, que leva em consideração informações específicas da fibra, tais como: forma (relação entre o comprimento e o diâmetro) e o volume de materiais inertes, como areia e a fração de empacotamento da areia. O volume de areia é obtido na etapa 2 e a fração

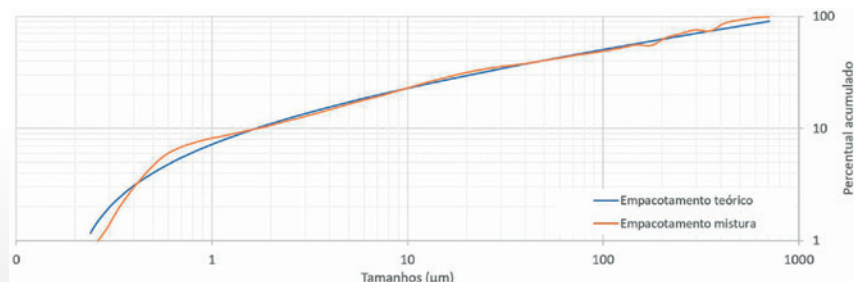


Figura 4
Curva do empacotamento teórico e do empacotamento da mistura

de empacotamento é obtido através da razão entre a massa específica e a massa unitária da areia.

Sendo que:

T_{fibras} – Teor máximo de fibras (%) a ser inserido na mistura;

r – Fator de forma da fibra (comprimento/espessura);

$\emptyset_s$ – Volume de areia da mistura;

$\emptyset_m$ – Fração de empacotamento da areia.

A equação apresentada foi desenvolvida pelos pesquisadores Martinie, Rossi e Roussel (2010), e o percentual encontrado no cálculo é o máximo de fibras que pode ser inserido sem que a trabalhabilidade da mistura seja afetada.

2.4 Etapa 4 – Montagem do diagrama de dosagem

Esta é a última etapa do método. Com base nas etapas anteriores, são determinadas as quantidades de todos os constituintes secos da mistura, faltando definir as quantidades de água e aditivo. A quantidade de água deve ser a menor possível, sendo que se sugere que a relação água/aglomerante fique entre 0,17 e 0,23.

Caberá ao profissional que está realizando a dosagem definir a relação a/agl inicial. Recomenda-se iniciar com a relação a/agl em 0,19. Da mesma forma, o teor de

aditivo não deve superar 4% em relação à massa do aglomerante. Então, esses parâmetros são definidos experimentalmente em uma dosagem de ajuste.

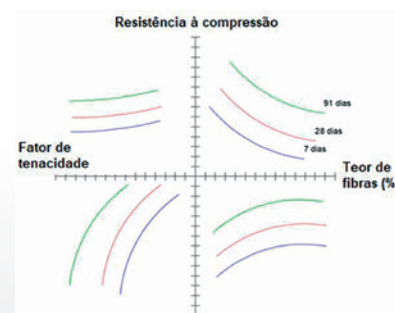
Após a dosagem de ajuste, deve ser realizada uma mistura com diferentes quantidades de fibras, não superando o teor máximo determinado na etapa 3, para que sejam feitos os ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão, tração na flexão e tenacidade. Como isso, é possível criar o diagrama de desempenho. O diagrama proposto neste método tem em seus quadrantes a seguinte relação:

- ▶ Primeiro quadrante – resistência à compressão (f_c) e teor de fibras (T_f);
- ▶ Segundo quadrante – teor de fibras (T_f) e resistência à tração ($f_{ct,f}$);
- ▶ Terceiro quadrante – resistência à tração ($f_{ct,f}$) e o fator de tenacidade (f_t);
- ▶ Quarto quadrante – resistência à flexão equivalente e a resistência à compressão (f_c).

A Figura 5 ilustra um diagrama de desempenho de uma mistura.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de dosagem Unisinos apresentado neste artigo foi desenvolvido com base em mais de 10 anos de estudos e aplicações em empresas de pré-fabricados. A validação do método



▶ **Figura 5**
Exemplo de diagrama de desempenho de uma mistura

foi desenvolvida em diferentes trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e tese de doutorado, além de trabalhos em campo. O método apresentado é de fácil aplicação, porém requer ensaios preliminares nos materiais constituintes, e a utilização de ferramentas computacionais de fácil acesso.

Este método está detalhado na tese de doutorado de Roberto Christ, disponível na base de dados do IBRACON, e no livro dos autores desse artigo – Concreto de Ultra Alto Desempenho, Fundamentos, Propriedades e Aplicações.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFNOR. NF P18-470 - Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity Association Française de Normalisation, 2016.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1856/C1856M-17, Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete. ASTM International, 2017.
- [3] ARORA, A. *et al.* Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, v. 103, n. October 2017, p. 179–190, 2018.
- [4] CHRIST, R. PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC). Tese de doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2019.
- [5] CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO – UHPC: Fundamentos, propriedades e dosagem. Editora LEUD, São Paulo, 2022.
- [6] CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F.; PACHECO, F. Estudo comparativo entre concretos de alto desempenho e compósitos cimentícios avançados. *Concreto e Construção - IBRACON*, p. 72–76, 2011.
- [7] MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 2, p. 226–234, 2010.
- [8] PERRY, V. H. CASE STUDIES ON INNOVATIVE APPLICATIONS AND CHALLENGES OF INTRODUCING BREAK-THROUGH TECHNOLOGIES (UHPC) IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. ACF Symposium on UHPC, Kolkata, Índia, 2015.
- [9] PERRY, V. M. F.; PARSEKIAN, A. G. Nova Fronteira para o Concreto. *Revista Estrutura*, p. 25–33, 2019.
- [10] YUNSHENG, Z. *et al.* Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 9, p. 831–838, 2008.