

Aplicação do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) em sistema construtivo habitacional no Brasil

ROBERTO CHRIST – PROFESSOR-DOUTOR

FERNANDA PACHECO – PROFESSORA-MESTRE

BERNARDO TUTIKIAN – PROFESSOR-DOUTOR

UNISINOS – itt PERFORMANCE

PAULO HELENE – PROFESSOR-DOUTOR/DIRETOR

USP – PhD ENGENHARIA

I. INTRODUÇÃO

Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) é um compósito cimentício reforçado com fibras. Na sua composição não há a inserção de agregados graúdos, tendo apenas a introdução de agregados finos e fibras. A compatibilidade entre os constituintes é de fundamental importância e requer um estudo específico e alto controle no processo de produção.

O UHPC pode ser considerado uma evolução de três tipos de concreto, o concreto de alto desempenho (CAD), o

reforçado com fibras (CRF) e o autoadensável (CAA), como mostra a Figura 1 (TORREGROSA, 2013).

Algumas entidades apresentaram definições com relação ao UHPC. A Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) define o UHPC como sendo uma matriz cimentícia reforçada com fibras de aço, com resistência à compressão superior a 150 MPa aos 28 dias, podendo chegar à resistência de 250 MPa, possuindo elevada resistência à tração, superior a 8 MPa, e excelentes propriedades reológicas no seu estado fresco (AFGC, 2013).

Outra entidade, o *American Concrete Institute* (ACI), através do *Committee 239* (2013), define o UHPC como sendo um concreto que deve apresentar, no mínimo, a resistência à compressão de 150 MPa e um requisito de durabilidade específico para uma determinada situação, apresentando elevada ductilidade e resistência à tração, além da introdução de fibras no composto.

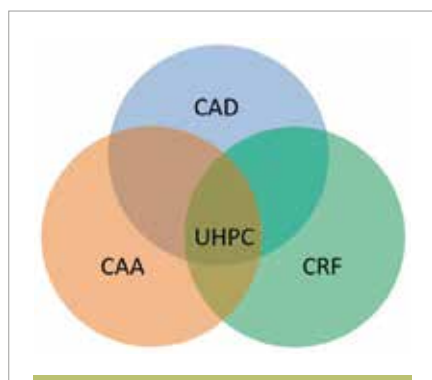
A produção do UHPC requer alguns cuidados, sendo a escolha correta dos materiais um deles. Os constituintes comumente presentes no UHPC são: cimento; areias muito finas; pozolanas,

como sílica ativa e cinza volante; aditivo superplastificante; fibras metálicas; e água (CHRIST; TUTIKIAN; PACHECO, 2011). O desenvolvimento de traços de UHPC foi estudado em diferentes países, porém nenhum desses estudos apresentou um método de dosagem científico para ser aplicado com diferentes materiais.

A proposição de um método de dosagem para a obtenção de uma mistura foi desenvolvida e é chamado de método UNISINOS (Christ, 2019). O método proposto apresenta uma maneira prática para se obter uma mistura, sendo que os materiais escolhidos são proporcionados de maneira em que a mistura apresente a maior compacidade possível. Este método foi utilizado em algumas aplicações do UHPC em sistemas construtivos e em elementos decorativos no Brasil. Neste artigo discorre-se sobre a utilização do método de dosagem UNISINOS (Christ, 2019) em um sistema construtivo de unidade habitacional isolada.

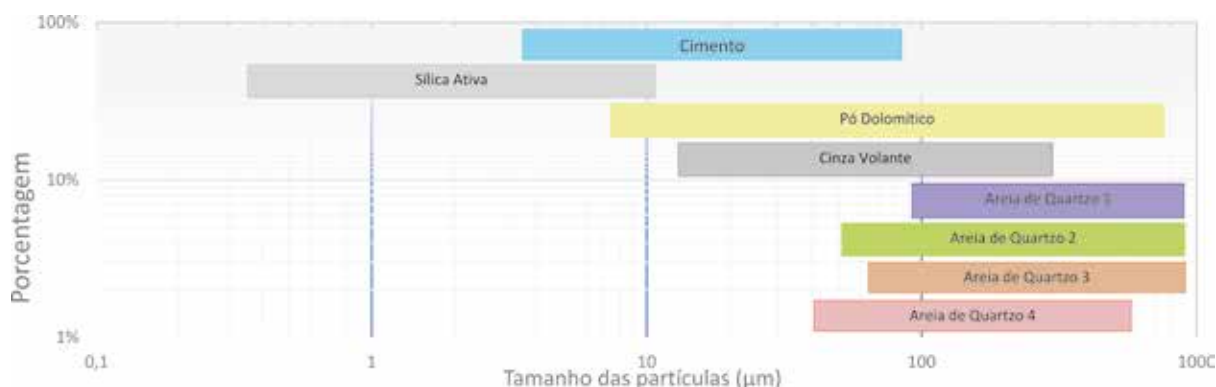
2. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM

O método de dosagem UNISINOS se baseia em obter uma mistura com



► **Figura 1**
Junção dos três tipos de concreto que correspondem ao UHPC

Fonte: Torregrosa (2013, p. 37)



► **Figura 2**

Variação granulométrica de diferentes materiais disponíveis no Brasil para utilização em UHPC

Fonte: Christ (2019, p. 28)

menor índice de vazios possível, ou seja, obter a máxima compacidade da mistura. Para o desenvolvimento de uma mistura de UHPC é preciso ter materiais de diferentes faixas granulométricas, e, para isso, a escolha dos materiais que serão utilizados depende da distribuição granulométrica de cada um.

O método proposto permite a estimativa do custo do UHPC através do valor de cada material. Diferentemente dos demais concretos, o insumo que mais repercute no custo do UHPC não é o cimento, e sim o custo de outros componentes especiais, como a sílica ativa e o aditivo superplastificante, que são utilizados em elevadas quantidades.

A Figura 2 apresenta diferentes materiais que podem ser utilizados e disponíveis no Brasil.

Ao analisar as diferentes opções, observa-se que existem materiais com faixas granulométricas similares, porém, que podem ter distribuição granulométrica variada. A sobreposição entre as faixas granulométricas gera uma compacidade menor, o que deve ser evitado.

O método de dosagem proposto UNISINOS (Christ, 2019) utiliza como base o método de empacotamento criado por Funk e Dinger em 1980, conhecido como equação de Andreasen e Andersen modificada.

Para que se obtenha a proporção ideal dos constituintes é determinado o Índice

de Desvio do Empacotamento (IDE) da mistura, em relação ao empacotamento ideal encontrado com a equação proposta por Funk e Dinger (equação 1). O IDE da mistura é a variação entre a curva de empacotamento, referente à soma de todos os diâmetros de cada parte da faixa granulométrica dos materiais (equação 2), e a curva granulométrica obtida através da equação 1 proposta por Funk e Dinger.

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

Sendo que:

PAD – Porcentagem acumulada de cada diâmetro;

D^q – Diâmetro avaliado;

D_{min}^q – Diâmetro mínimo;

D_{max}^q – Diâmetro máximo.

$$\frac{PAD}{100} = \sum (Q * D_{retido}) \quad 2$$

Sendo que:

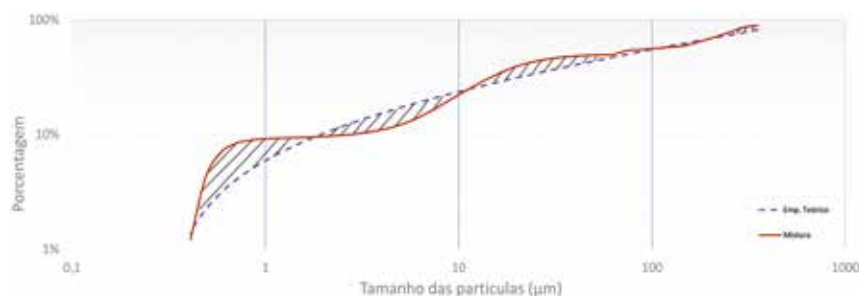
PAD – Porcentagem acumulada de cada diâmetro;

Q – Porcentagem de cada material na mistura;

D_{retido} – Porcentagem retida do determinado diâmetro.

Ao criar as curvas de empacotamento ideal e a curva de empacotamento da mistura temos como determinar o índice de desvio do empacotamento (IDE), que nada mais é do que a parte hachurada identificada na Figura 3. Se este índice for zero, por exemplo, significa que as porcentagens de cada diâmetro das partículas da mistura geram o empacotamento perfeito entre elas.

Para a determinação do IDE são elaborados os gráficos de empacotamento, com o auxílio de ferramentas do Excel que realizam testes de



► **Figura 3**

Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento da mistura

Fonte: Christ (2019, p. 83)



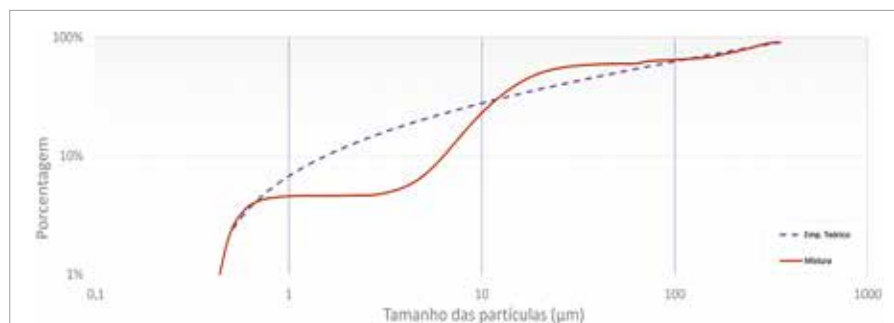


Figura 4
Curvas de empacotamento ideal e com IDE de 335 para o desenvolvimento do UHPC
Fonte: O autor

hipóteses, utilizando as equações 1 e 2 apresentadas. Assim, é possível obter as melhores porcentagens de cada material e obter as melhores proporções na mistura.

A curva de empacotamento é alterada à medida que as porcentagens dos materiais que a compõem são alteradas. Assim, criando-se uma lógica entre as porcentagens de cada material de maneira que o IDE seja o mais próximo possível de zero, se obtém a melhor proporção dos materiais e, consequentemente, o melhor empacotamento.

Em seguida, define-se a quantidade de fibras a ser inserida na mistura. Utiliza-se a equação adaptada de Martinie, Rossi e Roussel (2010) para a determinação do teor máximo de fibras. O teor de fibras máximo a ser empregado no UHPC, sem que haja a perda da trabalhabilidade, é determinado pela equação 3.

$$T_{fibras} = \frac{400}{r} * \left(1 - \frac{M_{unitária}}{M_{específica}} \right) \quad 3$$

Sendo que:

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

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

$M_{unitária}$ – Massa unitária da areia;

$M_{específica}$ – Massa específica da areia.

Com as quantidades de cada material, definidas através da determinação do menor IDE possível com os compostos disponíveis, e com a quantidade máxima de fibras a ser inserida na mistura é necessário encontrar, experimentalmente, o teor mínimo de água a ser empregado na mistura e o teor máximo de aditivo superplastificante. A relação água/aglomerante máxima deve ficar próximo a 0,21 e o teor máximo de aditivo superplastificante deve ser de, aproximadamente, 3,5% em relação ao aglomerante.

Desta maneira, é possível se obter a proporção dos materiais e desenvolver uma mistura com elevada compacidade e com o melhor desempenho mecânico, sem perder a trabalhabilidade.

Tabela 1 – Quantitativos de materiais utilizados no traço

Materiais	Traço unitário
Cimento	1
Sílica ativa	0,1
Areia	0,57
Fibra de vidro AR	0,02*
Superplastificante	0,035**
Água	0,21**

* em relação ao volume de material;

** em relação ao aglomerante.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO EM EMPRESAS

O método de dosagem UNISINOS (Christ, 2019) foi aplicado na empresa New House, localizada na cidade de São Paulo, que desenvolveu um sistema construtivo de casas pré-fabricadas. Trata-se de uma casa composta por uma estrutura metálica interna (frame) e revestida com painéis tipo sanduíche, sem juntas, de UHPC, com espessura de 10 mm, preenchidos com um material termorrígido para melhorar desempenho térmico e acústico da edificação.

Para o desenvolvimento do traço buscou-se a utilização de materiais de fácil acesso no Brasil e que pudessem viabilizar a aplicação deste concreto nas unidades habitacionais. Devido a questões de logística e custo, a empresa optou por utilizar a fibra de vidro AR no lugar das fibras metálicas. O traço



Figura 5
Aplicação do UHPC para a produção das placas

desenvolvido gerou um IDE de 335, sendo que é possível perceber que há uma sobreposição de partículas no diâmetro próximo do 30 μm e houve falta de grãos com diâmetros próximos a 3 μm , o que provocou um aumento do IDE. A Figura 4 mostra o IDE ideal e o IDE335 obtido.

Os materiais utilizados neste traço foram o cimento Portland CPV – ARI, sílica ativa não densificada, areia quartzosa utilizada no processo de fundição de aço e fibras de vidro AR. O traço desenvolvido, seguindo o método apresentado, é mostrado na Tabela 1.

A produção das placas foi realizada em mesa vibratória de 3 metros de comprimento e 4 metros de largura. A mistura foi realizada em misturador planetário e a sua aplicação foi feita através de caixa aérea, como pode ser evidenciado na Figura 5.

Após a aplicação, o UHPC foi mantido em condições de temperatura e umidade controlada, com 35°C e 80% respectivamente. As placas foram sacadas com 8 horas de cura e aplicadas no frame metálico para a produção do sistema de vedação vertical. A Figura 6 mostra o processo de retirada das placas após o processo de cura, utilizando saque com ventosas.

As propriedades mecânicas do UHPC nas idades iniciais e em 28 dias são apresentadas na Tabela 2.

A unidade habitacional confeccionada com o UHPC apresenta adequadas resistência mecânica e durabilidade, além



► **Figura 6**
Processo de içamento e retirada das placas das formas

► **Tabela 2 – Propriedades mecânicas do UHPC desenvolvido**

Idade	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
8 horas	18	2,8
24 horas	41	6,3
28 dias	132	24



► **Figura 7**
Unidade habitacional confeccionada com UHPC pela empresa New House

de excelente acabamento, como pode ser verificado na Figura 7, que apresenta uma vista geral da edificação produzida.

4. CONCLUSÃO

A aplicação do UHPC na construção civil pode vir a ser muito vasta, sendo sua elevada propriedade mecânica e potencial durabilidade as principais causas da sua viabilidade técnica. O

custo do UHPC, se comparado com outros tipos de concreto, é consideravelmente superior. Porém, ao se considerar os benefícios mecânicos e de durabilidade nas aplicações, a tecnologia pode se tornar uma opção viável. O método de dosagem proposto por Christ (2019) se mostrou eficaz para determinar os quantitativos dos materiais de uma mistura de UHPC. ➡

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI COMMITTEE 239. ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2012 ACI Fall Convention. In: 2013, Toronto, Ontario, Canada. Anais... Toronto, Ontario, Canada
- [2] AFGC. Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances - recommandations. In: (Edition Révisée, Ed.) 2013, France. Anais... France
- [3] CHIST, Roberto. Preposição de um método de dosagem para concreto de ultra alto desempenho (UHPC). Tese de doutorado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.
- [4] CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo F.; PACHECO, Fernanda. Estudo comparativo entre concretos de alto desempenho e compósitos cimentícios avançados. Concreto e Construção - IBRACON, São Paulo, p. 72–76, 2011.
- [5] MARTINIE, Laetitia; ROSSI, Pierre; ROUSSEL, Nicolas. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 2, p. 226–234, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>>
- [6] TORREGROSA, Esteban Camacho. Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Dosage, 2013.

