

Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho

Review of particle packing and materials utilized to ultra-high-performance concrete development

Caroline Marção Wolf de Goes (1); Pablo Augusto Krahel (2); Luiz Carlos de Almeida (3); Leandro Mouta Trautwein (4)

(1) Engenheira Civil, Mestranda em Estruturas pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, caroline.mwgoes@gmail.com

(2) Engenheiro Civil, Pesquisador Pós Doutorado do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, pabloaugustokrahel@gmail.com

(3) (4) Engenheiro Civil, Professor Doutor do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, (3) almeida@fec.unicamp.br, (4) leandromt@fec.unicamp.br

Endereço para correspondência - Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas - São Paulo, CEP: 13083-889. Tel: (19) 98874-1812

Resumo

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é uma nova geração de material cimentício que possui alta resistência à compressão (superior a 120 MPa), alta ductilidade, tenacidade e durabilidade. Entretanto, ainda são necessárias que normas e recomendações sejam criadas, para que seja possível a construção de estruturas delgadas em CUAD. O objetivo do artigo é fazer uma revisão sobre o modelo de empacotamento de partículas, especificamente o modelo modificado de Andreasen e Andersen, utilizado para o desenvolvimento de CUAD. Porém, inicialmente, serão apresentadas as principais características dos materiais utilizados para produzir CUAD. A preocupação com o meio ambiente, devido a indústria de concreto ser uma das maiores emissoras de gás carbônico, traz ao CUAD a possibilidade de suplementar a composição ou substituir parte do cimento por materiais cimentícios, como metacaulim, ou por resíduos industriais, como sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno. Para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do CUAD é fundamental que seja utilizada técnica de empacotamento de partículas, e um dos modelos mais utilizados é o modelo modificado Andreasen e Andersen. O uso de adições minerais, permite produzir um CUAD mais sustentável e com a mesma eficiência. Além disso, a partir da técnica de empacotamento é possível reduzir o teor de aglomerantes e obter um CUAD com altas propriedades mecânicas.

Palavra-Chave: CUAD; resíduos, empacotamento de partículas; modelo modificado de Andreasen e Andersen; sustentabilidade

Abstract

Ultra-high performance concrete (UHPC) is a new generation of cementitious material that has high compressive strength (more than 120 MPa), high ductility, toughness and durability. However, it is necessary to develop standards and recommendations, to be possible the slender structures construction using UHPC. The aim of the article is to review the particle packing model, specifically the modified Andreasen and Andersen model, used to develop UHPC. However, firstly, the main characteristics of the materials used for the development of UHPC will be presented. The environment concern, due to the concrete industry being one of the largest emitters of carbon dioxide, gives UHPC the possibility to supplement or replace part of the cement with cementitious materials, as metakaolin, and industrial waste, as silica fume, fly ash, slag blast furnace. To develop the mechanical properties of UHPC, it is essential to use particle packing technique, and one of the most used models is the modified model of Andreasen and Andersen. The use of mineral additions, enables the development of more sustainable UHPC and with the same efficiency. Using the packing technique, it is possible to reduce the binder content and obtain UHPC with higher mechanical properties.

Keywords: UHPC; industrial waste; particle packing; modified Andreasen & Andersen model, sustainability

1 Introdução

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, pois é fácil de moldar, permite uma infinidade de formatos e possui alta resistência e durabilidade. Porém, ao ser submetido aos esforços de tração apresenta rápida propagação de fissuras e baixa deformabilidade. Além disso, sua produção e transporte, produzem um alto impacto ambiental devido a emissão de gás carbônico. Somente a produção de cimento emite 7% de todo CO₂ gerado no planeta (YU et al., 2017). Por isso, surgiram novos concretos.

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é um compósito cimentício com alta resistência à compressão, maior durabilidade, e ao ser reforçado com fibras (CUADRF) apresenta alta ductilidade e tenacidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Pode ser aplicado em reforço de estruturas, pontes e viadutos, elementos arquitetônicos, torres eólicas e para indústria de petróleo e gás. Além disso, devido a alta resistência mecânica, permite aos engenheiros projetar estruturas delgadas, com peso próprio reduzido, atendendo ao desempenho estrutural requerido. Entretanto, apesar do grande interesse da aplicação e de já estar sendo utilizado em diferentes países, como Canadá, EUA, Malásia e Coreia do Sul, a falta de normatização e o alto custo inicial são as principais limitações para o seu uso em larga escala (VOO; FOSTER; PEK, 2017).

A partir dos anos 1970, iniciou-se a produção de concreto de ultra-alta resistência, utilizando mistura à vácuo e cura térmica, com resistência à compressão de 510 MPa (ROY; GOUDA; BOBROWSKY, 1972). Nos anos 1980, foram desenvolvidos o Cimento Livre de Macro Defeitos (BIRCHALL, HOWARD E KENDALL, 1981) com o uso de polímeros para preencher os vazios e remover os defeitos da pasta de cimento, com 200 MPa de resistência à compressão; e o Cimento Denso com Partículas Ultra-Finas (BACHE, 1981) com a otimização dos vazios entre o cimento e partículas ultra-finas, com baixa relação água/cimento (a/c) e alto teor de superplastificantes, com 270 MPa de resistência à compressão. Porém, eram frágeis, e ao adicionar fibras, exibiam baixa fluidez. Finalmente, Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram o Concreto de Pós Reativos, aumentando a homogeneidade com a ausência de agregados graúdos; otimizando a distribuição do tamanho de partículas; aumentando a microestrutura com cura térmica; aumentando a ductilidade com adição de fibras de aço; e obtiveram resistência à compressão de 810 MPa. A partir dos anos 2000, foi denominado como CUAD e CUADRF, pois além da alta resistência à compressão deveria apresentar outras excelentes propriedades. Atualmente, estão sendo desenvolvidos CUAD mais sustentáveis, utilizando adições minerais, como cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno e fílers, reduzindo o teor de cimento, resultando na redução do valor do concreto e no impacto ambiental (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

Para a obter alta resistência e durabilidade, a dosagem do CUAD deve ser preparada para obter uma microestrutura homogênea com baixa porosidade utilizando empacotamento de partículas e redução dos diâmetros dos materiais (RICHARD; CHEYREZY, 1995). O objetivo deste artigo é apresentar uma revisão sobre técnicas de empacotamento de partículas na dosagem de CUAD, especialmente, o modelo modificado de Andreasen & Andersen. Porém, primeiramente, serão apresentadas as principais características dos materiais utilizados na composição do CUAD.

2 Materiais

O CUAD pode ser composto por cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia, superplastificantes e água. Para produzir o CUAD, a relação a/c é muito baixa quando comparada aos outros concretos, entre 0.14 e 0.20 (SHI et al., 2015). A Figura 1 compara os diâmetros e as áreas específicas superficiais das partículas de diversos materiais utilizados para produzir diferentes tipos de concreto. A Figura 2 apresenta a morfologia das partículas de alguns dos materiais utilizados na composição de CUAD.

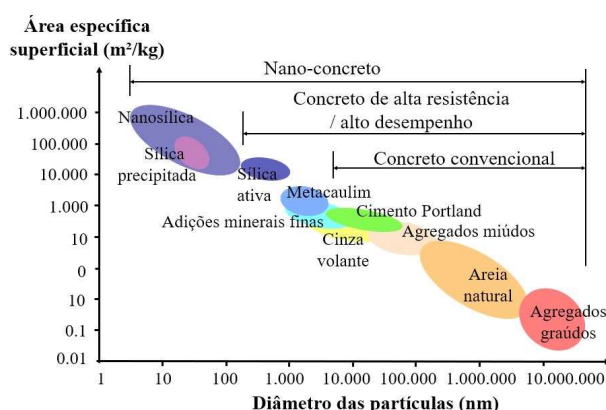


Figura 1: Diâmetro e área superficial específica de materiais utilizados para produzir diferentes concretos, (Adaptado de SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005)

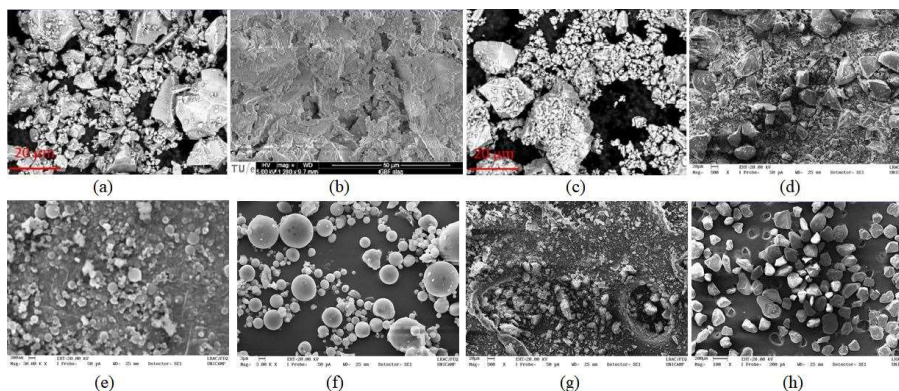


Figura 2: Morfologia das partículas de (a) Cimento (Adaptado de LI; YU; BROUWERS, 2018) (b) Escória de alto forno, (Adaptado de YU et al., 2017), (c) Pó de calcário, (Adaptado de LI; YU; BROUWERS, 2018) (d) Pó de quartzo, (e) Silica ativa, (f) Cinza volante e (g) Metacaulim (h) Areia fina, (Autores, 2019)

Normalmente, o teor de cimento para produzir CUAD, é alto, por isso, a substituição de parte do cimento por adições minerais tem sido realizada para que sejam reduzidos o custo e o impacto ambiental. As adições minerais exibem três efeitos ao mesmo tempo quando utilizadas em misturas binárias, ternárias e quartenárias na produção de concretos. O efeito físico (fíler) ocorre devido ao refinamento dos poros e do aumento da nucleação de produtos hidratados e do aumento da eficiência da relação a/c, resultando no aumento do empacotamento de partículas. Efeito químico refere-se à reação pozolânica, onde há o consumo de portlandita (hidróxido de cálcio na forma cristalina, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e formação de C-S-H adicional (DESCHNER et al., 2012). O efeito sinérgico é devido a combinação de

diferentes tipos de adições minerais, que resulta na melhora do desempenho do concreto em relação ao concreto sem adições (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003).

2.1.1 Cimento Portland

É um dos materiais mais importantes na composição do CUAD influenciando a resistência, o calor de hidratação e a retração. Para reduzir a quantidade de água, a formação de etringita e o calor de hidratação do CUAD, o cimento deve ter baixo teor alcalino, uma finura (área superficial) entre baixa e média, e baixo teor de aluminato tricálcico (C_3A) (TALEBINEJAD et al., 2004). A Tabela 1 lista os principais tipos de cimentos utilizados no CUAD, os teores dos componentes determinantes da reologia do cimento. A Figura 2a apresenta a morfologia do cimento.

Tabela 1: Principais cimentos utilizadas na composição de CUAD

Cimento	% C_3S	% C_2S	% C_3A	% C_4AF	Referência
CPV ARI	52.24	15.07	1.89	8.52	Livi; Repette (2019)
CEM I 52.5	67.8	16.6	4	7.2	Abdulkareem et al., (2018)
ASTM Type I	74	-	< 5	-	Wille; Kim; Naaman, (2011)
ASTM Type II/V	59	17	4	15	Wille; Boisvert-Cotulio (2015) ¹
ASTM Type III	65.23	7.33	8.85	8.4	Meng; Valipour; Khayat (2017)

¹Cimento denominado C8 no artigo

2.1.2 Escória de alto forno

Subproduto da produção de ferro-gusa e suas características cimentícias vem dos fundentes adicionados à mistura (KELES, 2011). Suas partículas são irregulares (Figura 2b). Sua adição ao concreto pode reduzir em até 5% a emissão de CO_2 gerados durante a produção do cimento, além disso, é um material de baixo custo, pode elevar a resistência mecânica e a durabilidade em ambientes agressivos, e possui baixo calor de hidratação (KELES, 2011), retardando a hidratação do cimento.

2.1.3 Sílica ativa

É um subproduto da fabricação de ferro-silício. Suas partículas são captadas em filtro-manga, por onde passam os gases gerados durante a queima. É composta, basicamente, por óxido de silício (SiO_2). Suas partículas são esféricas (Figura 2e) e com diâmetros entre 0.2 e 0.5 μm e suas funções na mistura de CUAD são (SHIN ET AL., 2019) efeito de microfíler, preenchendo os vazios entre a água e o cimento no estado fresco, e no estado endurecido, preenchem os vazios gerados pelos hidratados, aumentando a resistência e durabilidade do concreto; reatividade pozolânica, correspondem a reação entre os componentes da sílica e $Ca(OH)_2$, produzindo C-S-H; matriz densificada, pois sua adição reduz os poros finos; e redução da viscosidade, pois não possui C_3A .

2.1.4 Cinza volante

É um subproduto da queima do carvão mineral utilizado em termoelétricas. Os gases da queima do carvão passam por um filtro-manga, onde suas partículas são captadas. A fluidez do concreto pode ser aumentada com a adição de cinza volante, devido a lubrificação causada com o formato esférico de suas partículas (Figura 2f). Além disso, esse material desacelera a reação de hidratação, possibilitando a redução da fissuração térmica interna do concreto (DESCHNER et al., 2012), sendo ótima para o CUAD, pois este concreto possui maior calor de hidratação comparado ao concreto convencional.

2.1.5 Metacaulim

Além do problema ambiental com o cimento, a sílica ativa também vem apresentando dificuldades, pois é um material instável, por ser um resíduo, não é possível ter controle sobre suas propriedades; a sua disponibilidade está reduzindo, e possui alto custo e coloração escura (TAFRAOUI et al., 2009). Por isso, tem sido substituída por metacaulim. Material produzido a partir da queima de caulim, mineral abundante no planeta, o que possibilita obter as propriedades desejadas com um processo controlado; além disso, possui baixo custo e coloração branca (vantagem estética). Suas partículas são irregulares (Figura 2g). Este material apresenta desempenho semelhante ao da sílica, na composição do CUAD (TAFRAOUI et al., 2009), (SONG et al., 2018).

2.1.6 Agregados miúdos e graúdos

Na produção de CUAD, o agregado deve ter alta resistência mecânica, distribuição bem graduada do tamanho das partículas e isento de qualquer contaminante para que não afete a hidratação, a resistência, a densidade e a porosidade do concreto (MISHRA; SINGH, 2019). Para a composição do CUAD, os agregados miúdos são mais utilizados, como areia de quartzo (Figura 2h) com diâmetro entre 150 a 600 μm (SHI et al., 2015). Entretanto, para reduzir o custo da produção do CUAD, os agregados graúdos também estão sendo empregados, porém, devem ter diâmetro inferior a 10 mm e resistência superior a matriz do CUAD (SHIN ET AL., 2019).

2.1.7 Fílers

Como o teor de cimento pode ser grande e a relação a/c é muita baixa na composição de CUAD, nem todos os grãos do cimento são hidratados, por isso, o uso de fíler (materiais mais baratos sem atividade pozolânica), como pó de calcário e pó de quartzo, é benéfica, pois aumentam a eficiência do cimento. Além disso, ao substituírem parte do cimento podem melhorar a trabalhabilidade e aumentar a eficiência das fibras de aço e do aglomerante na composição de CUADRF (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a). As partículas de pó de calcário e de pó de quartzo são irregulares (Figura 2c e 2d).

2.1.8 Aditivos

Uma das dificuldades no desenvolvimento do CUAD é a baixa fluidez e habilidade passante, por isso, utilizam-se modificadores de viscosidade e/ou superplastificantes. O uso de

modificadores de viscosidade, possibilita o controle das propriedades reológicas do CUAD e obtenção da viscosidade plástica ideal para garantir a distribuição das fibras e obter um aumento da resistência à flexão (MENG; KHAYAT, 2017). O uso de superplastificante, reduz a quantidade de água no concreto, sem alterar a consistência da mistura e melhora a fluidez do concreto. Para a produção de CUAD, o superplastificante policarboxilato é de maior eficiência, sendo que aqueles à base de metacrilato tem maior interação com o cimento, enquanto, aqueles à base de éter alílico tem maior interação com sílica ativa (SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012).

2.1.9 Fibras

O tipo de fibra mais utilizado na produção de CUAD são fibras de aço, pois possuem alta resistência à tração, mas, fibras sintéticas também são utilizadas. São utilizadas para reduzir fragilidade (aumentando a ductilidade), aumentar as propriedades mecânicas, a resistência a formação e propagação de fissuras e a resistência ao impacto. A Figura 3 ilustra a curva tensão-deformação de tração do CUADRF. Na fase I, o material se comporta de maneira elástica. No ponto A, as fibras começam a agir para conter o aparecimento de fissuras, permitindo que o concreto tenha um comportamento de endurecimento, possibilitando o aparecimento de múltiplas fissuras pequenas (fase II). No ponto B, as fibras não possuem resistência suficiente e se rompem, ocorrendo a ruptura do concreto, entretanto, continuam agindo, possibilitando que o concreto tenha um comportamento mais dúctil após a ruptura (fase III) (WILLE; KIM; NAAMAN, 2011).

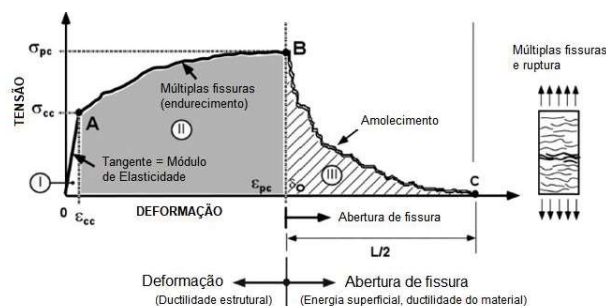


Figura 3: Curva típica tensão-deformação de tração do CUADRF, (Adaptada de NAAMAN, 2003)

3 Empacotamento de partículas

O empacotamento de partículas é definido como a seleção adequada da proporção e dos tamanhos dos materiais, para que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores (MCGEARY, 1961). Com essa técnica, reduz-se a porosidade e a quantidade de água necessária para preencher os vazios da mistura, resultando em uma microestrutura densa e homogênea e redução do teor de aglomerantes (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b), e melhora as propriedades mecânicas do concreto (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). Além disso, reduz-se o número de ensaios experimentais para determinação das proporções ideais dos materiais (RAGALWAR et al., 2020).

Existem dois casos de empacotamento, um denominado monodisperso referente a um sistema composto por grãos esféricos de tamanho uniforme em estado de empacotamento aberto (Figura 4a); e outro denominado polidisperso, constituído por uma distribuição

gradual do tamanho dos grãos, onde os grãos menores preenchem os vazios entre os grãos maiores em uma sucessão ideal, conduzindo a densidade máxima (Figura 4b) (FUNK; DINGER, 1994). A Figura 4c e Figura 4d apresentam sistemas onde estão faltando partículas pequenas e maiores, respectivamente, e a Figura 4e apresenta um sistema onde a segunda maior partícula é maior do que o vazio entre as maiores partículas, resultando no menor empacotamento. Portanto, tanto o tamanho das partículas quanto a proporção dos materiais são importantes para a eficiência do empacotamento.

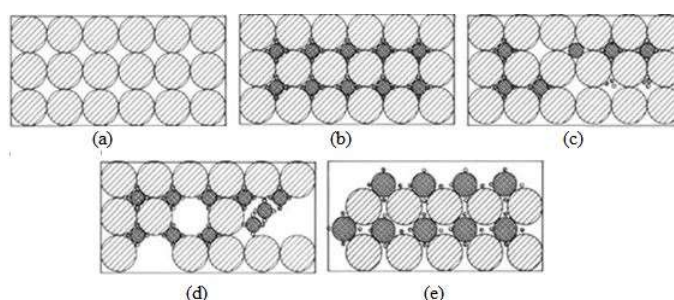


Figura 4: Efeito da quantidade e do tamanho de partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) sistema polidisperso; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) partículas maiores; (e) distribuição incompatível de tamanhos de partículas (Adaptado de ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993)

O concreto é composto por materiais com diferentes morfologias (esférica, irregular ou lamelar). Quanto mais esféricas forem as partículas dos materiais, maior será o empacotamento, pois, partículas não esféricas provocam maior atrito entre as suas superfícies (LOPES, 2019). A granulometria das partículas pode ocasionar dois efeitos em uma mistura (Figura 5). O efeito parede ocorre quando a mistura é composta por dois materiais com diâmetros das partículas muito diferentes, fazendo com que a superfície de contato das partículas maiores funcionem como um plano quando em contato com as partículas menores, aumentando os vazios entre as regiões próximas à superfície das partículas maiores. O efeito de afastamento ocorre quando as partículas finas inseridas em uma composição não são grandes o suficientes para preencher os vazios entre as partículas de diâmetros maiores, resultando no aumento de vazios da mistura (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

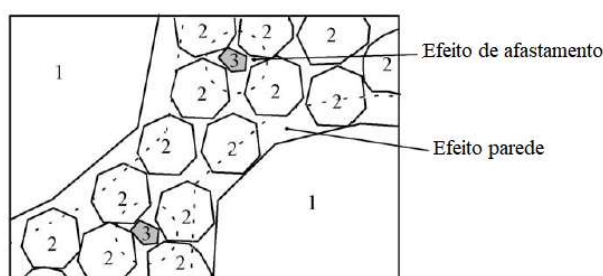


Figura 5: Efeito parede e efeito de afastamento, (DE LARRARD; SEDRAN, 2002)

As partículas muito finas tendem a se aglomerar, aumentando o diâmetro efetivo da composição, reduzindo o número de partículas, aumentando a porosidade e reduzindo o empacotamento. As partículas finas possuem forte atração de Van der Waals, pois são numerosas e estão mais próximas uma das outras (FUNK; DINGER, 1994). Por isso, a

dispersão de partículas deve ser feita de maneira apropriada, como por exemplo, misturar os materiais secos antes da adição de água e superplastificantes na produção de concreto. O máximo empacotamento é obtido com a mínima porosidade, sendo que o grau de hidratação será menor (LOPES, 2019). Por isso, a porosidade interna das partículas podem modificar a densidade do material, sendo que ela pode ser densa, fechada ou aberta. O máximo empacotamento é obtido com partículas densas, porém, não são as mais comuns. Já as partículas com porosidade fechadas são semelhantes às densas. As partículas com porosidade interna aberta, por absorverem mais líquidos, ocasionam um empacotamento inferior aos outros tipos de porosidade.

O modo de inserção dos materiais pode influenciar no empacotamento. Por isso, deve ser feito com uma técnica de compactação, para que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelos grãos menores. Uma das técnicas de compactação do concreto é a vibração (LOPES, 2019).

Alguns modelos de empacotamento de partículas têm sido utilizados para otimização do CUAD, como Modelo de Empacotamento Compressível (ARORA et al., 2018), Modelo de Suspensão Sólida (DE LARRARD; SEDRAN, 1994). Porém, esses modelos calculam o empacotamento da mistura com partículas de apenas um tamanho para realizar a previsão do empacotamento da mistura com partículas de vários tamanhos (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). E o modelo modificado de Andreasen e Andersen (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b) tem sido mais utilizado, sendo que ele considera que em um sistema existe diferentes tamanhos de partículas para um mesmo material.

3.1 Modelos de empacotamento

Existem dois tipos de modelos, discretos e contínuos. O objetivo deste trabalho é discutir o modelo contínuo modificado de Andreasen e Andersen que é o mais utilizado na otimização de CUAD, por isso, será feita uma breve descrição sobre os modelos discretos.

3.1.1 Modelos discretos

A primeira publicação sobre empacotamento de partículas para concreto foi feita por Feret em 1892 (DE LARRARD; SEDRAN, 1994), onde foi apresentado que o empacotamento dos agregados afetavam as propriedades do concreto e máxima resistência à compressão seria obtida a partir da minimização da porosidade entre os grãos dos materiais constituintes do concreto (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). Em 1928, Furnas desenvolveu um modelo em que o máximo empacotamento de partículas ocorreria em composições binárias, com partículas monodispersas. Entretanto, a produção de um sistema com esse tipo de partícula é muito difícil de ser obtida (FUNK; DINGER, 1994). Alguns anos depois, Furnas (1931) aperfeiçoou a sua teoria anterior e apresentou que o máximo empacotamento ocorreria com três ou mais tamanhos de partículas discretas presentes em um mistura, que a densidade dependeria das quantidades e tamanhos de partículas presentes na composição e poderia ser expresso pela Equação 1.

$$CPFT = 100 \left(\frac{r^{\log D} - r^{\log D_s}}{r^{\log D_L} - r^{\log D_s}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (µm); D_S é o diâmetro da menor partícula; D_L é o diâmetro da maior partícula do conjunto (µm); r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas. Para Furnas (1931), para que um concreto apresentasse a melhor combinação de resistência, durabilidade e economia, os materiais deveriam ser selecionados de modo a preencher o máximo de vazio possível, por isso, estendeu a sua solução discreta de multicomponentes para distribuição contínua.

3.1.2 Modelos contínuos

O modelo contínuo considera que em um sistema de distribuição de partículas possa existir todos os tamanhos de partículas possíveis para um mesmo material, ou seja, sistema polidisperso (FUNK; DINGER, 1994). Fuller e Thompson (1907) propuseram um modelo contínuo de empacotamento de partículas, no qual o máximo empacotamento, conhecido como curva ideal de “Fuller”, poderia ser calculada conforme Equação 2.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n \quad \text{Equação 2}$$

Onde, CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (µm); D_{máx} é o diâmetro da maior partícula (µm); n é o coeficiente de distribuição. Para o máximo empacotamento, Fuller e Thompson, inicialmente, definiram que n deveria ser igual a 0.50, e posteriormente, alteraram para 0.45 (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

A partir dos trabalhos de Furnas e Fuller, Andreasen (1930) desenvolveram um modelo, denominado Andreasen & Andersen (A&A), porém, ele é considerado como uma teoria semi-empírica, pois o máximo empacotamento ocorreria a partir de uma condição de similaridade entre duas partículas de tamanhos bem diferentes, e poderia ser calculado pela Equação 3.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 3}$$

Onde, CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (µm); D_L é o diâmetro da maior partícula (µm); q é o coeficiente de distribuição. O máximo empacotamento seria obtido para q entre 0.33 e 0.50.

Ambos os modelos apresentados anteriormente não consideravam as partículas mínimas no cálculo do empacotamento, o que não remete com a realidade, pois em uma mistura existe um tamanho mínimo finito que, também, afeta o empacotamento (FUNK; DINGER, 1994). Por isso, em 1980, Funk e Dinger desenvolveram o modelo modificado de Andreasen & Andersen (A&A), baseando-se nos modelos de Furnas e de Andresen e Andersen, incluindo o fator de proporcionalidade que não existia na equação de Furnas e o tamanho da menor partícula que não era considerado na equação de Andreasen e Andersen, portanto, o empacotamento de partículas pode ser obtido através da Equação 4 (FUNK; DINGER, 1994).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (μm); $D_{\min}$ é o diâmetro da menor partícula; $D_{\max}$ é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); q é o coeficiente de distribuição. Ainda em 1980, Funk e Dinger utilizaram simulações computacionais para demonstrar a influência do valor do coeficiente de distribuição no empacotamento, e verificaram que o máximo empacotamento ocorreria para q igual a 0.37 (FUNK; DINGER, 1994).

3.1.2.1 Coeficiente de distribuição (q)

O coeficiente de distribuição influencia no empacotamento, pois determina a proporção entre partículas finas e graúdas de uma mistura (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a) (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). A Figura 6a ilustra a influência do valor de q na obtenção da curva do modelo modificado de A&A, onde foram utilizadas as granulometrias de cimento, de areia fina, de sílica ativa e de pó de quartzo em uma suposta composição de CUAD. Observa-se que quanto menor o valor de q, maior é a proporção de partículas finas, comprovando o que foi apresentado da literatura. A Figura 6b compara as representações gráficas, em escala logarítmica, dos modelos de Fuller e Thompson, A&A e o modelo modificado de A&A. Para isso, o valor de q foi escolhido conforme definido pelos pesquisadores. Observa-se que para o modelo modificado de A&A são obtidas curvas que se aproximam dos diâmetros muito pequenos, enquanto para os modelos de Fuller e A&A, são obtidas retas de inclinação q, comprovando a condição de similaridade e além disso, verifica-se a incoerência dos modelos, a ausência de um limite mínimo para o tamanho de partículas (FUNK; DINGER, 1994).

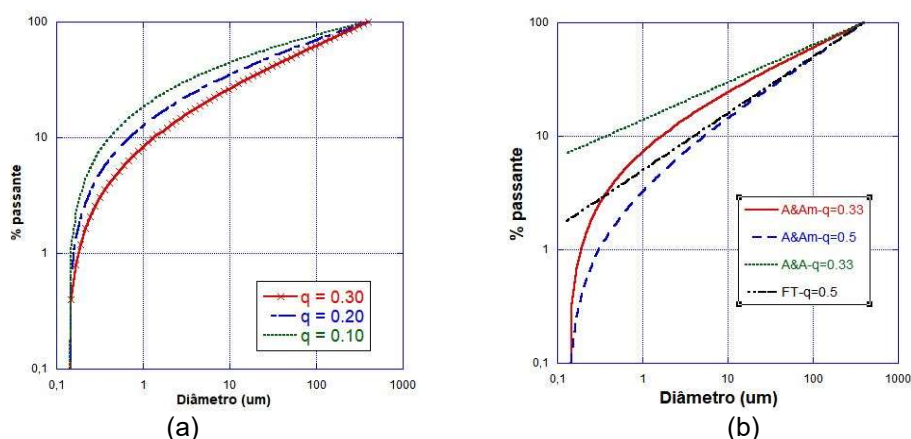


Figura 6: (a) Influência do coeficiente q no modelo modificado A&A, (b) Comparação entre os modelos de Fuller e Thompson, A&A, e o modelo modificado de A&A, (Autores, 2020)

3.2 Dosagem de concreto através do modelo modificado de A&A

As proporções dos materiais serão determinadas a partir da obtenção da curva do modelo modificado de A&A, sendo esta curva considerada a ser atingida, e a curva da mistura será

calculada através de uma otimização de algoritmos baseada no método dos mínimos quadrados, conforme a Equação 5. As proporções dos componentes do concreto serão ajustadas até que a curva da mistura se sobreponha a curva ideal do modelo.

$$P_{mist} = \sum_{i=1}^n v_i PSD_i \quad \text{Equação 5}$$

Onde P_{mist} é a somatória da distribuição de partículas de todos os componentes do concreto, n é o número de componentes, v é a proporção (ou volume) do material, PSD é a distribuição do tamanho de partícula do componente. Quando a diferença entre a curva da mistura e a curva ideal, expressa pela Equação 6, for a menor possível, então, essa será considerada a melhor mistura para a composição do concreto (HÜSKEN, 2010).

$$S = \sum_{j=1}^m (P_{mist}(D_j) - P_{ideal}(D_j))^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde, S é a somatória dos quadrados dos resíduos; D diâmetro da partícula; P_{mist} é a curva referente a combinação dos materiais do concreto; e P_{ideal} é a curva referente ao modelo modificado A&A. Para o cálculo da mistura do concreto, se faz necessário o uso de restrições nas proporções dos materiais, para que não seja obtido um proporcionamento irreal dos materiais (RAGALWAR ET AL., 2020).

Além da técnica de empacotamento, a análise da distribuição granulométrica retida em relação ao diâmetro da peneira de todos os materiais é interessante e pode ser considerada como uma pré-verificação para otimização do CUAD. Pois, permite verificar se a distribuição da composição do concreto está em equilíbrio, isto é, se a granulometria da mistura está abrangendo todo o espaço entre os diâmetros mínimo e máximo da composição, sendo possível verificar possíveis ausências em determinados diâmetros. A Figura 7 ilustra a distribuição da granulometria retida dos materiais utilizados para produzir CUAD e CUADRF com resistência à compressão de 135 MPa (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c), verifica-se que seleção dos materiais apresenta uma distribuição equilibrada.

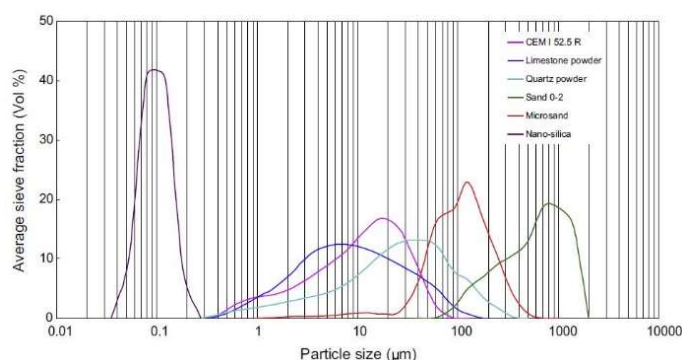


Figura 7: Curvas granulométricas da porcentagem retida dos materiais utilizados na composição de CUAD e CUADRF desenvolvidos por (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c)

Ragalwar et al. (2020) encontraram na literatura valores de q entre 0.15 a 0.25 na produção de CUAD. A Tabela 2 lista diferentes valores de q e a resistência à compressão obtida para CUAD. Li; Yu; Brouwers (2018), inicialmente, utilizaram q igual a 0.22, porém, recomendam q igual 0.19 para obtenção de CUAD composto com agregados graúdos.

Tabela 2: Pesquisas que se basearam no modelo modificado de A&A, (Autores, 2020)

Referência	Traço	q	Resistência à Compressão (MPa)
Li; Yu; Brouwers (2018)*	-	0.22	110 a 142
Yu et al. (2014)	-	0.23	70 a 115
Yu; Spiesz; Brouwers (2014b)	-		142
Yu; Spiesz; Brouwers (2014c)	-		100 a 140
Yu et al. (2016)	-		135
Yu; Spiesz; Brouwers (2014a)	-		91 a 142
Yu; Spiesz; Brouwers (2016)	-		102 a 118
Yu et al. (2017)	-		150 a 155
Song et al. (2018)	-		120 a 160
Kumar et al. (2020)	-	0.10 a 0.20	120 a 160
*CUAD com agregados graúdos			

Ragalwar et al. (2020), ao produzirem CUAD, verificaram que o coeficiente q influencia na trabalhabilidade, na resistência à compressão, na resistência à fratura (tenacidade) e na viscosidade. Os autores observaram a redução da trabalhabilidade e da resistência à compressão com o aumento do valor de q ; o aumento no valor de q reduz a quantidade da pasta cimentícia, reduzindo o teor de água da mistura e resultando no aumento da viscosidade; e o aumento da tenacidade com o aumento no valor de q , pois a relação agregado/pasta é maior e com isso as fissuras se propagam de maneira tortuosa. Por isso, recomendam que o valor de q deve ser escolhido baseado nos materiais que irão compor o CUAD para que sejam obtidos os parâmetros reológicos e as propriedades mecânicas desejados. Kumar et al. (2020) analisaram o efeito do tamanho máximo do agregado ($D_{\text{máx}}$) e do coeficiente q em relação a fluidez, porcentagem de ar incorporado e resistência à compressão em CUAD, variando $D_{\text{máx}}$ entre 0.72 e 3.28 mm e q entre 0.10 e 0.25. Verificaram que a fluidez diminuiu com o aumento do $D_{\text{máx}}$, especialmente, para q igual a 0.15. O ar incorporado aumenta com o aumento do $D_{\text{máx}}$. Para $D_{\text{máx}} \leq 2$ mm, o valor de q não influencia no ar incorporado, porém, para $D_{\text{máx}} > 2$ mm, o aumento de q , aumenta o ar incorporado e reduz o empacotamento. A resistência à compressão reduz com o aumento de $D_{\text{máx}}$ e q . Para os autores, os valores ideais de $D_{\text{máx}}$ e q foram 0.70 mm e 0.16, respectivamente, produzindo um CUAD com 140 MPa de resistência à compressão, 250 mm de abatimento e 3% de ar incorporado.

Utilizando o modelo modificado de A&A para obter uma microestrutura densa e com o uso de adições minerais, permitiu a diversos pesquisadores produzirem CUADRF mais sustentáveis, reduzindo o teor de aglomerantes, em torno de 650 kg/m³, obtendo até 150 MPa de resistência à compressão e acima de 30 MPa de resistência à flexão (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b). Porém, destaca-se o trabalho de Yu, Spiesz e Brouwers (2014c), pois, produziram um CUADRF com um teor de

aglomerantes ainda menor, aproximadamente, 440 kg/m³, obtendo 135 MPa e 25 MPa, de resistências à compressão e à flexão, respectivamente, sendo este um dos menores teores de aglomerantes utilizado na composição de CUAD.

4 Conclusões

Com a revisão e análises realizadas sobre os materiais empregados em Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) e o empacotamento de partículas para sua dosagem, conclui-se que:

- O emprego de adições minerais, como sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, pó de calcário e de quartzo, como substituição parcial do cimento, permite a produção de CUAD mais sustentáveis.
- As características dos materiais (formato, tamanho da partícula, componentes químicos, densidade, porosidade) e a interação entre si, influenciam no empacotamento de partículas, por isso, a importância de se estudar as características dos materiais individualmente para a composição de CUAD.
- A partir do estudo apresentado, verifica-se que o valor do coeficiente de distribuição (q) influencia na quantidade de partículas menores e maiores de uma mistura. Valores de q mais altos exigem uma maior proporção de materiais maiores, enquanto, valores menores, requerem mais materiais menores. Portanto, na elaboração de uma dosagem de concreto, é necessário que este parâmetro seja estudado para que sejam obtidos os parâmetros desejados com relação à reologia (trabalhabilidade e viscosidade) e às propriedades mecânicas (resistência à compressão e tenacidade).
- O interesse da utilização do modelo modificado de Andreasen e Andersen para a composição de CUAD, se deve ao fato desse modelo incluir os diâmetros mínimos e máximos existentes em uma composição, sendo mais condizente com a realidade de uma mistura. Além disso, com base na revisão apresentada, verifica-se que com o uso desse modelo, é possível desenvolver CUAD/CUADRF com um baixo teor de aglomerantes, como por exemplo, 440 kg/m³, resultando na redução tanto do custo da produção do concreto quanto do impacto ambiental.

5 Referências

- ABDULKAREEM, O. M. et al. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235–246, 28 fev. 2018.
- ANDREASEN, A. H. M. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.
- ARORA, A. et al. **First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete**. Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. **Anais...Leeds**: 2018
- AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018.

BACHE, H. H. **Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based Materials. the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete**, 1981.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K. Flexural strength and porosity of cements. **Nature**, v. 289, n. 5796, p. 388–390, 1981.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.

DESCHNER, F. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 10, p. 1389–1400, 2012.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The Laws of Proportioning Concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. LIX, n. 2, p. 67–143, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. New York: Springer US, 1994.

FURNAS, C. C. Grading Aggregates: I—Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 23, n. 9, p. 1052–1058, 1931.

HÜSKEN, G. **A Multifunctional design approach for sustainable concrete with application to concrete mass products**. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for each-moist concrete : A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1246–1259, 2008.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 69–76, 2003.

KELES, K. C. **Influência da basicidade da escória de alto-forno como adição ao concreto**. Dissertação: mestrado. Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

KUMAR, D. et al. **Influence of maximum aggregate size and distribution modulus on UHPC matrix properties Influence of maximum aggregate size and distribution modulus on UHPC matrix properties**. 5th International Symposium: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. **Anais...Kassel, Germany: 2020**

KUMAR, S. V.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning : A review. **The Indian Concrete Journal**, n. September 2003, 2003.

LI, P. P.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 649–659, 2018.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Pastas de ultra-alto desempenho submetidas a cura sob pressão. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 83–98, set. 2019.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Dissertação: Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

MCGEARY, R. K. Mechanical Packing of Spherical Particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n. 10, p. 513–522, 1961.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 107, p. 26–34, 2017.

MENG, W.; VALIPOUR, M.; KHAYAT, K. H. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, p. 50–29, 2017.

MISHRA, O.; SINGH, S. P. **An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete** *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* Taylor & Francis, , 2019.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 241–252, 2003.

RAGALWAR, K. et al. Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117423, 2020.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

ROY, D. M.; GOUDA, G. R.; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 3, p. 349–366, 1972.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. **MRS Bulletin**, v. 18, n. 3, p. 45–49, 1993.

SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2012.

SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete : Part I . Raw materials and mixture design. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, v. 101, p. 741–751, 2015.

SHIN, H. O. et al. Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4182–4197, 2019.

SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. How nanotechnology can change the concrete world.

American Ceramic Society Bulletin, v. 84, n. 10, p. 14–18, 2005.

SONG, Q. et al. A novel Self-Compacting Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (SCUHPFRC) derived from compounded high-active powders. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 883–893, 2018.

TAFRAOUI, A. et al. Metakaolin in the formulation of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 669–674, 2009.

TALEBINEJAD, I. et al. **Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete. **Anais...**Kassel, Germany: 2004

VOO, Y. L.; FOSTER, S.; PEK, L. G. **Ultra-High Performance Concrete – Technology for Present and Future**. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium. **Anais...**Springer International Publishing., 2017

WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 33–43, 2015.

WILLE, K.; KIM, D. J.; NAAMAN, A. E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. **Materials and Structures**, v. 44, n. 3, p. 583–598, 2011.

YU, R. et al. A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA). **Construction and Building Materials**, v. 60, p. 98–110, 2014.

YU, R. et al. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 203–215, 2016.

YU, R. et al. Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 220–233, 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 158–171, 2014a.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014b.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 140–150, 2014c.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 109–122, 2016.