

Desenvolvimento de Método Experimental para Misturas Ideais e Ambientalmente Sustentável de Concreto de Ultra Alto Desempenho

Palavras-Chave: Concreto de Ultra Alto Desempenho; Emissão de CO_2 Equivalente, Avaliação dos Métodos

Autores

Angélica Guimarães dos Santos – Aluna de graduação em Engenharia Civil da Unicamp.

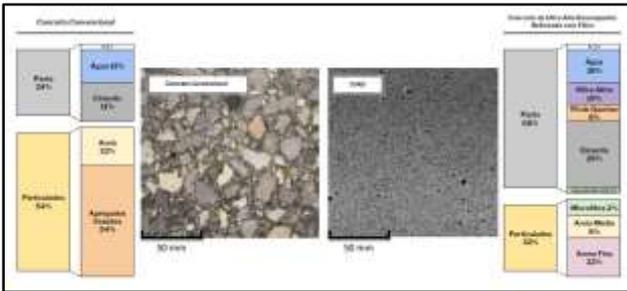
Profº Doutor Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol – Departamento de Estruturas da Unicamp.

EMBASAMENTO TEÓRICO:

Segundo levantamento do [Conselho Brasileiro de Construção Sustentável \(CBCS\)](#), o setor da construção civil é um dos principais responsáveis pelos impactos que ocorrem no ecossistema, consumindo, aproximadamente, 20% da água urbana, 75% de insumos e recursos naturais, além de produzir, anualmente, 80 milhões de toneladas de resíduos da construção. São por esses fatores que as construções de âmbito, público e privado, estão cada vez mais pressionados a tratar com prioridade o tema da sustentabilidade em sua cadeia produtiva. Uma construção sustentável pressupõe otimização dos materiais e uso de tecnologias, visando indicadores econômicos, técnicos e ambientais ^[01]. A indústria da construção, cada vez mais oferece soluções padronizadas que substituem os processos artesanais, agregando agilidade, economia, além de sustentabilidade aos edifícios. É exemplo, as estruturas pré-fabricadas de concreto, que consistem em elementos estruturais usuais como: pilares, vigas, lajes, etc., produzidos em variadas formas e dimensões, fabricadas, atualmente, com *Cimento Portland*, que substituem a alvenaria cerâmica, em obras executadas de estruturas convencionais. É dessa maneira que a construção industrializada pode assumir o papel como uma ferramenta de sustentabilidade, pois dedica-se a transformar o canteiro de obras e o processo da construção similar a uma linha de produção/montagem, similar ao que ocorre em outras indústrias, como a automobilística.

Nas últimas duas décadas, o Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD), cuja sigla em inglês, *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, passou por vários estágios de desenvolvimento até evoluir para um material atraente e capaz de uso comercial para construção de infraestruturas resilientes e duráveis (Castro, A., 2013). Foi somente nesse século, que o UHPC teve uma utilização mais assertiva e padronizada na construção civil, uma vez que foi possível a partir do desenvolvimento de superplastificantes e materiais cimentícios de granulometria fina ^[02]. O Concreto de Ultra Alto Desempenho é uma classe de compósitos, ou seja, combinação entre dois ou mais materiais cimentícios, cuja resistência à compressão (f_{ck}) e módulo de elasticidade (E) são muito elevados ao comparar com os Concretos Convencionais (CC). Demonstrado por Russell, H. G. e Graybeal (2013), ao usarem a mistura de UHPC para a construção da ponte: *Bourg-lès-Valence*, no sul de Lyon, França, na qual sua aplicação foi adotada devido à alta resistência à compressão e à tração, superiores à 150 MPa e 10 MPa, respectivamente ^[03]. Em seus estudos, compararam o arranjo estrutural do UHPC, em relação ao arranjo dos concretos convencionais, concluindo que a resistência do UHPC era de três a quatro vezes maior do que a resistência dos CC, isso porque, o arranjo das partículas para os Concretos de Ultra Alto Desempenho, com ou sem reforço de fibras, são mais homogêneos e compactos em relação aos Concretos Convencionais ^[03] (**Figura 01**).

Figura 01: Proporção Padrão de Misturas de Concreto.



Fonte: Própria do Autor, 2023

A composição mais comum do UHPC contém alto consumo de cimento, variando entre 700 kg/m^3 à 1050 kg/m^3 , além da produção estar associada a alta intensidade energética e emissões de gases do Efeito Estufa (EE) ^[04], colocando a indústria cimentícia como a segunda maior contribuinte, depois das usinas térmicas à carvão, de emissões de gás carbono (CO_2), que representa cerca de 7% das emissões globais dos gases de efeito estufa na atmosfera, de acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA), em 2018 ^[04].

Devido ao alto consumo de concreto, por todo o globo, pesquisadores vêm tentando reduzir a chamada “emissão” do concreto. Esse termo refere-se a todo o ciclo de produção do cimento e do concreto, incluindo indicadores como, extração de matéria-prima e produção de insumos e elementos estruturais, além das próprias fases da construção, representando o total de emissões dos gases de efeito estufa, expresso como CO_2 Emissões Equivalentes ^[04], isso porque, somente o concreto não é capaz de emitir dióxido de carbono ou outros gases causadores desse efeito. Uma solução usada para reduzir a pegada de carbono do concreto é reduzir a quantidade de *clínquer* usado no cimento, substituindo-o por insumos minerais com um fator de emissão significativamente baixo (Schmidt, 2014). A norma Europeia EN 197-1 indica os aditivos mais comuns usados como substitutos do *clínquer* no cimento, sendo eles: cinza volante moída e escória de alto forno granulada (GGBS). Devido suas origens de resíduos, ambos os aditivos citados, classificados como Materiais Cimentícios Suplementares (SCM), são amplamente utilizados para várias aplicações na engenharia civil, e são reconhecidas por seu potencial para a redução das emissões de CO_2 e consumo de energia associada à produção de concreto, além de suas propriedades

hidráulicas, que otimiza o fator água/cimento, permitindo melhor distribuição granulométrica dos particulados no traço do cimento ^[04].

Schmidt (2014) explica que, para a incorporação ideal dos SCM's na mistura do concreto seja eficiente, é preciso atentar-se à uma abordagem assertiva, a fim de otimizar a proporção da mistura de UHPC atendendo os princípios para alcançar alta resistência à compressão, sendo: (1) otimizar a granulometria total dos agregados, ou seja, compactar as partículas mais densas; (2) uso de aditivos e materiais de cimentação suplementares (SCM's) para redução da relação água/cimento e (3) retificação da microestrutura homogênea com uso máximo de Silicato de Cálcio Hidratado (CSH), já que a maior porcentagem da emissão de carbono do Cimento Portland advém do processo de calcinação do concreto. Contudo, adentrando no cenário da construção brasileira, a aplicação do Concreto de Ultra Alto Desempenho ainda é novidade e de uso exclusivo para pesquisas, já que a tecnologia desse cimento é inacessível à grande maioria das empresas de construção, devido às métodos de execução, que envolvem a cura do cimento e processos de empacotamento por meio de grandes pressão e altas temperaturas ^[02].

Conforme afirma Castro (2013), os princípios mencionados por Schmidt possuem algumas limitações para o cenário brasileiro, já vez que: (1) a distribuição granulométrica da mistura - pasta e agregados -, muitas vezes não é considerada; (2) a quantidade de materiais cimentícios é avaliada com base em tentativa e erro, ou até que se atinja a resistência à compressão desejada e (3) é difícil avaliar a contribuição dos particulados finos no método de empacotamento dos agregados.

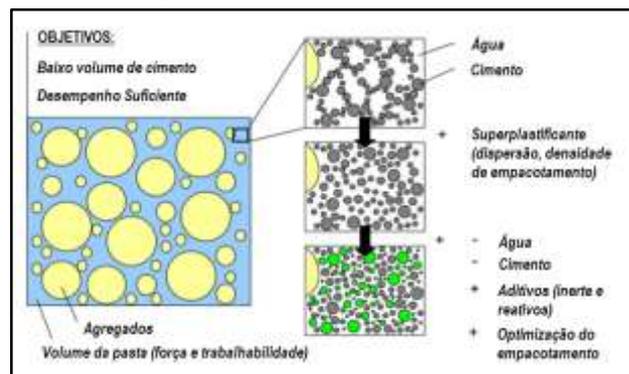
Portanto, aplicar os princípios mencionados acima ainda é impossibilitada, pois existem lacunas quanto à determinação do traço utilizando métodos de dosagem eficiente e de fácil acesso, isso porque os poucos trabalhos desenvolvidos, com relação a misturas de UHPC ^{[03][05]}, não apresentam uma forma de realizar o traço com diferentes proporções de particulados e granulometrias, sem haver perdas consideráveis de resistência e trabalhabilidade.

METODOLOGIA:

Conforme as Áreas de Tecnologias Prioritárias, descrita pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC, a área mais aderente dessa pesquisa está inserida em Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável, pois busca desenvolver um método experimental e quantitativo para determinar a dosagem ideal dos constituintes de um traço de Concreto de Ultra Alto Desempenho, com ou sem adições de microfibras sintéticas e metálicas, priorizando o consumo reduzido de cimento-clínquer por uso de materiais de cimentação suplementares, como: sílica ativa, escória de alto forno granulada, metacaulim, além de aditivos. A pesquisa apresenta um método sistemático próprio, com base nas literaturas de, Goes (2021) e Granato (2020), com intuito de desenvolver uma rotina capaz de gerar proporções (traços) de misturas de CUAD e CUADRF, usando minerais e insumos de fácil acesso no mercado brasileiro, que possibilite analisar, em conjunto, fatores como: custo benefício, resistência à compressão e à tração, trabalhabilidade, e também, estimar uma porcentagem das emissões de CO_2 equivalente do concreto.

As propriedades do CUAD vêm da mistura de seus agregados, que por sua vez, são todos minerais de granulação muito fina, garantindo para a mistura, uma maior compactação da sua matriz. Entende-se que o arranjo granular de uma mistura depende das proporções de cada constituinte, que por sua vez dependem da granulometria de cada material. A fim de atingir uma homogeneidade entre todos os agregados da mistura, o método de empacotamento de partículas se faz necessário, já que visa obter uma proporção correta, e gradações adequadas, para que os vazios sejam preenchidos com partículas cada vez menores, diminuindo a necessidade de consumo de cimento (Andreasen e Andersen, 1930). Assim, com a diminuição considerável da porosidade na matriz, e a alta compacidade da mistura, o CUAD apresenta elevada durabilidade e ganha de resistência, pois agentes agressivos como, água ou químicos, não penetram com facilidade os poros, pouco existentes na mistura - **Figura 02**.

Figura 02: Otimização do método de Empacotamento de Partículas para a Mistura de UHPC [08].



Fonte: Própria do Autor, 2023

No desenvolvimento do traço de CUAD, foi utilizado, como base, o traço proposto por Granato (2020), obtido a partir do estudo de algoritmos de empacotamento e otimização de partículas usando o *Método Modificado de Andreasen e Andersen*. Em seus trabalhos, Andreasen e Andersen (1930), determinou que o arranjo das partículas podem ser descrito pelo produto dos tamanhos dos grãos particulados, no qual o empacotamento máximo ocorreria a partir de uma condição de similaridade entre duas partículas de tamanhos diferentes, cuja fração aumenta em progressão geométrica (**Equação 01**). Para a pesquisa, o desenvolvimento do algoritmo foi feito com base no *Método Modificado de Andreasen e Andersen*, proposto por Funk e Dinger (1994), que, com simulações computacionais, demonstraram a influência do valor do coeficiente de distribuição n no empacotamento das partículas - considerando agora n , as granulometrias dos agregados miúdos (**Equação 01**). Verificaram que, o valor de n , para o máximo empacotamento, ocorre nos concretos de alto desempenho, quando este assume $n = 0,37$.

Equação 01: Expressão proposta por Andreasen e Andersen (1930), à esquerda, e por Funk e Dinger (1994), à direita.

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^n \quad \left| \quad P(D) = \frac{D^n - D_{min}^n}{D_{max}^n - D_{min}^n}$$

Portanto, o método testado com base no *Método Modificado de Andreasen e Andersen* [09], possibilitou executar o algoritmo para otimização de traços CUAD, buscando verificar a homogeneidade da matriz.

O algoritmo visa atender três critérios: função objetivo; variáveis e restrições do problema. O *Método Modificado de Andreasen e Andersen* [09], satisfaz a função objetivo, ou seja, empacotamento ótimo. As variáveis são valores que o algoritmo ajusta a fim de minimizar ou maximizar a função objetivo. Uma vez que o método considera apenas a dimensão dos particulados, quando se trata de uma mistura de concreto, é preciso considerar algumas limitações. Dessa forma, outros parâmetros precisam ser considerados para refletir as limitações práticas e físicas do problema, para conhecer suas condições de contorno, como: condição de não negatividade e restrições de volume. Implementado no *Microsoft Excel*, por meio da função *Solver*, a otimização é realizada minimizando a diferença entre a curva da mistura (gerada pelo próprio algoritmo) e a curva alvo (determinada no método de preenchimento ideal) por mínimos quadrados, que advém da literatura pelo *Método Modificado de Andreasen e Andersen* [09]. No algoritmo, é possível verificar uma correlação entre as curvas, analisando o coeficiente R^2 , com intuito de verificar a qualidade do ajuste das curvas teórica e ótima. Por fim, para a composição da curva $P_{mix}(D_i)$, ou seja, para a curva de cada material, é preciso computar a contribuição de cada um desses materiais sólidos secos, para gerar a curva ótima da mistura. Nessa determinação, deve ser considerado o módulo de distribuição, que matematicamente favorece uma determinada fração do tamanho das partículas. Dessa forma, o algoritmo de otimização do traço realiza uma minimização dos desvios entre a distribuição de tamanho dos grãos da mistura de interesse, uma vez que esta acessa a informação dos pesos específicos dos materiais particulados e líquidos, e com base na relação cimento-material, que é pré-determinada, o algoritmo determina a proporção ótima para a mistura, promovendo uma distribuição alvo resolvida por mínimos quadrados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Uma vez definida a curva de empacotamento ótima, para compor os dados de análise, foram realizados ensaios em condição de laboratório, no *Departamento de Estruturas*, no qual, o traço

original, desenvolvido por Granato (2020), foi comparado com outros dois traços que obtiveram o melhor ajuste das curvas, sendo, respectivamente, com uso dos agregados: sílica ativa e metacaulim. A caracterização do *Concreto de Ultra Alto Desempenho*, com e sem *Reforço de Fibras*, foi determinada por (1) ensaios de resistência à compressão, através da compressão diametral, para determinar o módulo de elasticidade e a ruptura do concreto; (2) ensaio da trabalhabilidade, através do *slump-flow*, para verificar a fluidez, (3) além do tempo de pega, pelo uso do aparelho de Vicat, a fim de definir a cura do concreto em diferentes idades, sendo elas: 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Todos os ensaios foram feitos com corpos de prova cilíndricos, de diâmetro 50 mm e altura 100 mm, e cúbicos, de dimensão 50 x 50 x 50 mm, realizados em estado fresco e endurecido, em vigência com as normas brasileiras, ABNT NBR 5738:2015 e ABNT NBR 5739:2018. As proporções do traço de CUAD, obtida pelo algoritmo, estão apresentadas na **Tabela 01**, bem como as médias obtidas para a resistência à compressão, ou seja, a ruptura do corpo de prova, apresentadas nas **Tabela 1.a; 1.b e 1.c**. Os dados correspondem ao conjunto de 6 (seis) corpos de prova, tanto cilíndricos, quanto cúbicos. A fim de comparação, resistência obtida por Granato (2020) atingiu, aproximadamente, uma média de 130 MPa e módulo de elasticidade de 40 GPa.

Tabela 01: Traço de CUAD/CUADRF a partir do empacotamento ótimo.

Materiais	Proporção de Materiais em Relação ao Cimento	Massa Específica (Kg/m ³)
Cimento Portland (CP-V)	1,00	3150
Sílica Ativa/Metacaulim	0,24	2200
Areia Fina (Peneirada)	1,17	2717
Pó de Quartzo	0,16	2766
Superplastificante	0,06	1050
Água (f/w)	0,22	1000
Microfibras Metálicas	0,13	2526

Tabela 1.a: Ensaio de compressão com idade de 7 dias, usado o traço proposto na *Tabela 01*.

Corpos de Prova: Cilíndrico	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	98,55
Com Fibras a/c = 0,20	98,75
Corpos de Prova: Cúbicos	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	105,0
Com Fibras a/c = 0,20	97,55

Tabela 1.b: Ensaio de compressão com idade de 14 dias, usado o traço proposto na Tabela 01.

Corpos de Prova: Cilindrico	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	108,3
Com Fibras a/c = 0,20	108,65
Corpos de Prova: Cúbicos	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	108,05
Com Fibras a/c = 0,20	106,5

Tabela 1.c: Ensaio de compressão com idade de 28 dias, usado o traço proposto na Tabela 01.

Corpos de Prova: Cilindrico	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	110,1
Com Fibras a/c = 0,20	108,05
Corpos de Prova: Cúbicos	Média das Resistências (MPa)
Com Fibras a/c = 0,22	109,3
Com Fibras a/c = 0,20	100,4

Os resultados apresentados acima mostram um ganho de resistência com aumento do tempo de cura. Para todas as idades ensaiadas, a média das resistências foram inferiores à resistência do traço original, evidenciando a necessidade de otimizar o empacotamento ótimo, para o traço sugerido.

CONCLUSÕES:

A pesquisa propôs otimizar a elaboração de uma série de dosagens para o traço de CUAD através de parâmetros informativos dos particulados finos, como: peso específico (kg/m^3) e volume dos sólidos (m^3) e líquidos, a fim de obter uma melhor resistência à compressão e à tração do composto, buscando homogeneizar, ao máximo, as proporções dos materiais na mistura. Para isso, trabalhou-se com minerais e insumos de diferentes distribuições granulométricas, com a finalidade de ensaiar, em condições laboratoriais, o empacotamento ótimo das partículas. A pesquisa utiliza de materiais disponíveis no mercado brasileiro, com o intuito de auxiliar e incentivar a aplicação desse concreto na infraestrutura do país, e também, busca contribuir para o desenvolvimento de estudos, metodologias e recomendações, uma vez que não há normas

técnicas que orientem especificamente, sobre a elaboração do CUAD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[01] Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Cidades e Comunidades Sustentáveis**. ISO TC 268, 2020.

[02] Castro, A. L. **Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas pré-moldadas**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa, Projeto e Produção em concreto pré moldado. Anais, 2013.

[03] Russell, H. G.; Graybeal, B. A. **Ultra-High Performance Concrete: a state of the art report for the bridge community**. United States, 2013.

[04] International Energy Agency. **Cement Technology Roadmap, Carbon Emissions Reductions Up to 2050**. 2018.

[05] Schmidt, M.; Fehling, E. **Ultra-High-Performance Concrete: research, development and application in Europe**. Special Publication, 2014.

[06] Goes, C. M. W. **Dosagem através do empacotamento de partículas e avaliação do comportamento mecânico de concreto de ultra-alto desempenho híbrido**, 2021. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, São Paulo.

[07] Granato, E. C. **Reforço de vigas de concreto armado utilizando concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras**, 2020. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, São Paulo.

[08] Andreasen, A. H. M. **Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)**. Kolloid-Zeitschrift, v.50, 1930.

[09] Funk, J. E.; Dinger, D. R. **"Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions"**. New York: Springer US, 1994.

[10] ABNT NBR 5738. **Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova**. Rio de Janeiro, 2015.

[11] ABNT NBR 5739. **Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos e Cúbicos**. Rio de Janeiro, 2018.

[12] BS EN 197-1. **Cement Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements**, 2011.