

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Eduarda Franke Melchiors

**MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO AUTONIVELANTES**

Santa Maria, RS  
2023

Eduarda Franke Melchiors

**MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO AUTONIVELANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Erich David Rodríguez Martínez

Santa Maria, RS  
2023

**EDUARDA FRANKE MELCHORS**

**MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO AUTONIVELANTES**

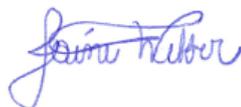
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para  
obtenção do grau de **Engenheira Civil**.

Aprovada em 03 de fevereiro de 2023.



---

**Dr. Erich David Rodríguez Martínez**  
(Presidente/Orientador)



---

**Dra. Jaíne Webber (IHR)**



---

**Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais que me apoiaram incondicionalmente em minha jornada, que mesmo longe se fizeram presentes e me deram condições de chegar até aqui. Ao meu pai, meu muito obrigada pela paciência e serenidade, por ser meu porto seguro e a voz na razão nos momentos de ansiedade. À minha mãe, a gratidão pelo carinho e cuidado, pelas palavras de incentivo e pelo colo. Ao meu irmão, por ser meu parceiro há 19 anos, me motivando nem que seja pela irritação e deboche. À Mell, que fingiu não me reconhecer nos primeiros meses quando voltava de Santa Maria, mas foi uma companheira fiel no REDE e sempre me deu o amor que só um cachorrinho pode dar. Aos meus avós, tios, tias e primos, que torceram e rezaram (aqui principalmente a minha vó) por mim.

Agradeço aos Amigos Siameses, Canes, Maria, Felipe, Lucas, 12 anos, Laura e Gabriela, por terem me acolhido no grupo e desde então terem sido meus parceiros de todos os dias nessa caminhada, por terem compartilhado comigo as preocupações, trabalhos, provas, bizus, mates, tererês, memes, risadas, festas e viagens... São amizades como a de vocês que fazem a jornada valer a pena. Em breve seremos 8 engenheiros e mesmo não estando todos os dias juntos torço muito pelo sucesso de vocês e espero que se sintam realizados naquilo que fazem.

Aos petianos, minha gratidão pela aposta no potencial da menina calada do segundo semestre da graduação, os dois anos que permaneci no grupo foram essenciais para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. Convivi com pessoas extraordinárias que me fizeram ver o tipo de estudante que gostaria de ser. Um agradecimento especial aos meus amigos Justen, Canzi, Leo, Kakau, Jaque e Paloma, que como meus “veteranos” foram mentores diretos de minha trajetória acadêmica, me inspirando, orientando e incentivando. Confio demais na capacidade de vocês e sei que vão brilhar, não importa onde!

Agradeço a todos os *minions* do GEMASC (em especial a minha dupla infalível, Marcelo e Dani, que tanto me ajudaram ao longo de 2022) pela amizade e companheirismo, pelos momentos de trabalho duro, mas também de risos e descontração, por todos os ensinamentos e trocas. Fico muito feliz de acompanhar o crescimento deste grupo e espero que ele continue evoluindo cada vez mais!

À Tuani, Emilia e Kiara, minha gratidão pela amizade e companheirismo, por todos os ensinamentos e conselhos. Vocês me inspiram e me motivam, é uma grande

honra trabalhar com pessoas como vocês, espero que possamos continuar pesquisando e comemorando o fim de ensaios e publicações de artigos juntas no contêiner.

Aos colegas do IHR, muito obrigada pela oportunidade, pela recepção em Caxias do Sul, paciência, compreensão e incentivo. Aos amigos do vôlei, UFSMers perdidos em Caxias, Ju, Bruno, Rafa, João, Gi, Alan, Gustavo, Ivoti, Damasceno, Karol, Rodrigo e Marcello, obrigada por terem feito com que a cidade tivesse logo cara de lar, por terem tornado a experiência mais leve e feliz.

Agradeço ao Professor Erich por todos os desafios, incentivos e oportunidades, pela compreensão e amizade, por compartilhar tanto conhecimento, primeiro em sala de aula, depois como voluntária no laboratório e finalmente como bolsista. Obrigada por fazer parte da minha jornada, não tenho palavras para agradecer sua contribuição e importância em minha formação profissional e também pessoal. Obrigada também ao professor Paulo pela colaboração e orientação nos ensaios deste TCC, pela disponibilidade em sanar dúvidas e por dividir suas experiências. São professores como Erich e Paulo que motivam os alunos e os inspiram a sonhar mais alto.

Agradeço a todos os demais professores da graduação pelos ensinamentos repassados.

Agradeço ao CNPq, pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), no qual fui bolsista por mais de dois anos.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de cursar engenharia civil de forma gratuita, por fornecer os conhecimentos necessários para exercer a profissão com a qual sonhei, por ampliar meus horizontes diante de novas perspectivas e vivências, sou eternamente grata.

'Cause, baby, I could build a castle  
Out of all the bricks they threw at me  
And every day is like a battle  
But every night with us is like a dream

**Taylor Swift**

## RESUMO

### MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO AUTONIVELANTES

AUTORA: Eduarda Franke Melchiors

ORIENTADOR: Erich David Rodríguez Martínez

Os concretos de alto e ultra-alto desempenho (CAD e CUAD, respectivamente), são compósitos cimentícios que apresentam características superiores às dos concretos tradicionais, como a maior durabilidade e trabalhabilidade, além das propriedades mecânicas melhoradas. Para obter esse elevado desempenho busca-se a homogeneidade do material compósito e um empacotamento de partículas mais denso, por meio da escolha das matérias-primas e de seu adequado proporcionamento. Apesar das propriedades superiores, sua aplicação em grande escala é limitada pela ausência de um método de dosagem simples e amplamente aceito. Existem inúmeras teorias e modelos de empacotamento que visam obter elevada compacidade, entretanto eles desconsideram a morfologia e interações entre as partículas. Tendo em vista essas limitações, o presente trabalho propõe um método empírico para dosagem de CADs e CUADs autonivelantes, produzidos a partir de Cimento Portland. As etapas sugerem a otimização da proporção entre os ligantes, seguida pela determinação do teor de saturação do aditivo e, determinação do teor de agregado para diferentes relações água/aglomerante, a fim de atingir um espalhamento entre 320-360 mm. Este método permitiu produzir concretos com características autonivelantes, com resistências à compressão na faixa de 80-100 MPa aos 3 e 28 dias. Entretanto, para este método de dosagem, com baixas relações água/aglomerante e teores de agregado muito diferentes entre si, a Lei de Abrams não se aplica.

**Palavras-chave:** Concreto de alto-desempenho; Concreto de ultra-alto desempenho; Empacotamento; Resistência à compressão; Trabalhabilidade.

## ABSTRACT

### MIX DESIGN FOR HIGH- AND ULTRA-HIGH-PERFORMANCE SELF-LEVELING CONCRETES

AUTHOR: Eduarda Franke Melchiors  
ADVISOR: Erich David Rodríguez Martínez

High and ultra-high performance concretes (HPC and UHPC, respectively) are cementitious composites that have superior characteristics to those of traditional concretes, such as greater durability and workability, in addition to improved mechanical properties. To obtain this high performance, the homogeneity of the composite material and a denser particle packing are sought, through the choice of raw materials and their adequate supply. Despite superior properties, its large-scale application is limited by the absence of a simple and widely accepted dosing method. There are numerous theories and packing models that aim to obtain high compactness, however they disregard the morphology and allow between particles. In view of these restrictions, the present work proposes an empirical method for dosage of self-levelling HPCs and UHPCs, produced from Portland cement. The steps suggest optimizing the ratio between the binders, followed by engineering the saturation content of the additive and, developing the aggregate content for different water/binder ratios, in order to achieve a spread between 320-360 mm. This method tolerates producing concretes with self-leveling characteristics, with resistances in the range of 80-100 MPa at 3 and 28 days. However, for this dosage method, with low water/binder ratios and very different aggregate contents, Abrams' Law does not apply.

**Keywords:** High-performance concrete; Ultra-high performance concrete; Packaging; Compressive strength; Workability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma do Método de Aïtcin .....	22
Figura 2.2 - Curvas ideais dos modelos de Fuller/Thompson, Andreasen/Andersen e Funk/Dinger.....	27
Figura 3.1 - Distribuições granulométricas dos ligantes cimento Portland (CP V ARI) e sílica ativa (SA) .....	31
Figura 3.2 - Distribuição granulométrica da areia.....	33
Figura 3.3 - Esquema do método de dosagem proposto. ....	34
Figura 4.1 – Resultados de espalhamento para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa .....	40
Figura 4.2 - Registro fotográfico do espalhamento dos sistemas.....	41
Figura 4.3 – Resultados de resistência à compressão e teor de ar incorporado para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa .....	42
Figura 4.4 – Resultados de resistência potencial para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa .....	43
Figura 4.5 – Resultados de diâmetro de espalhamento e teor de ar incorporado para formulações com diferentes teores de aditivo superplastificante .....	44
Figura 4.6 - Registro fotográfico do espalhamento de formulações com diferentes teores de aditivo superplastificante .....	45
Figura 4.7 – Resultados de diâmetro de espalhamento para formulações com diferentes relações a/ag e areia/ag .....	46
Figura 4.8 – Registro fotográfico do espalhamento para formulações com diferentes relações a/ag e areia/ag.....	47
Figura 4.9 – Relação a/ag x teor de areia para atingir a consistência alvo (diâmetro de espalhamento).....	47
Figura 4.10 – Resultados de resistência à compressão e teor de ar incorporado para formulações com diferentes relações a/ag e areia/ag .....	49
Figura 4.11 – Ajustes dos resultados de resistência à compressão em função da relação a/ag para: .....	51
Figura 4.12 – Ajuste dos dados de teor de agregado versus relação a/ag em relação à Lei de Lyse .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades físicas dos materiais ligantes.....	32
Tabela 3.2 – Composição das argamassas para determinação da composição do ligante (dosagem por fração em peso).....	35
Tabela 3.3 – Composição das pastas para determinação do teor de saturação do aditivo (fração em massa) .....	36
Tabela 3.4 – Composição das argamassas para determinação da água aglomerante e teor de agregados (fração em massa) .....	37
Tabela 4.1 – Resultados de resistência à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa.....	42
Tabela A.0.1 – Composição mineralógica do cimento usado, XRD-Rietveld QPA.....	55

## LISTA DE SIGLAS

<b>a/ag</b>	Relação água/aglomerante, onde água corresponde a água livre mais a água contida no aditivo. Aglomerante corresponde ao cimento Portland e a sílica ativa
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>CAD</b>	Concreto de alto desempenho
<b>CFPT</b>	<i>Cumulative percent finer than</i>
<b>CPR</b>	Concreto de pós reativos
<b>CPV ARI</b>	Cimento Portland de alta resistência inicial
<b>CUAD</b>	Concreto de ultra-alto desempenho
<b>C.V.</b>	Coeficiente de variação
<b>IBRACON</b>	Instituto Brasileiro do Concreto
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>MPT</b>	<i>Maximum paste thickness</i> , máxima espessura de pasta
<b>NBR</b>	Norma brasileira registrada
<b>SA</b>	Sílica ativa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO .....	18
2.2	MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAD .....	21
2.2.1	<b>Método de Aïtcin.....</b>	<b>21</b>
2.2.2	<b>Método de O’Reilly .....</b>	<b>23</b>
2.2.3	<b>Métodos de O’Reilly e IBRACON empregados de forma conjunta ....</b>	<b>24</b>
2.3	MÉTODOS DE DOSAGEM DO CUAD.....	24
2.3.1	<b>Empacotamento de Partículas .....</b>	<b>25</b>
2.3.1.1	Limitações dos modelos de empacotamento .....	28
2.4	CONCRETOS AUTONIVELANTES DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO.....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1	MATERIAIS.....	30
3.1.1	<b>Cimento .....</b>	<b>30</b>
3.1.2	<b>Sílica ativa .....</b>	<b>31</b>
3.1.3	<b>Areia de quartzo .....</b>	<b>32</b>
3.1.4	<b>Aditivo superplastificante.....</b>	<b>33</b>
3.2	MÉTODO DE DOSAGEM .....	33
3.2.1	<b>Determinação da composição do ligante.....</b>	<b>34</b>
3.2.2	<b>Determinação do teor de saturação do aditivo.....</b>	<b>35</b>

<b>3.2.3</b>	<b>Determinação da relação água aglomerante e teor de agregados.....</b>	<b>36</b>
3.3	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	37
3.4	PROCEDIMENTO DE CURA .....	38
3.5	MÉTODOS DE TESTE .....	38
<b>3.5.1</b>	<b>Estado Fresco.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Estado Endurecido .....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO LIGANTE .....	40
4.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SATURAÇÃO DO ADITIVO.....	44
4.3	DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE E TEOR DE AGREGADOS .....	45
4.4	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ÓTIMA – SÍNTESE DO MÉTODO DE DOSAGEM .....	49
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>53</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
<b>ANEXO A 55</b>		
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é um aprimoramento do concreto de alto desempenho (CAD) com propriedades superiores tanto no estado fresco, quanto no endurecido, sendo algumas delas a elevada trabalhabilidade e resistência mecânica, maior durabilidade e resistência a agentes agressivos quando comparados a concretos convencionais (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019). O fator chave na produção desses materiais é melhorar as propriedades micro e macro dos constituintes, para atingir homogeneidade mecânica e um empacotamento de partículas mais denso (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016).

Para alcançar essas propriedades, o proporcionamento do concreto demanda o uso de agregados de menor tamanho, sendo comum a eliminação dos agregados graúdos, assim como maior fator de empacotamento, onde, ao mesmo tempo, se aumenta o teor de aglomerante, de micro *fillers* e de materiais cimentícios suplementares. O ajuste das características e dosagem destes materiais têm importância tanto na melhora das propriedades reológicas quanto das mecânicas. A incorporação de aditivos superplastificantes é essencial para reduzir suas tensões de escoamento e viscosidade, sem promover processos de segregação e exsudação, mesmo com baixas relações água/aglomerante (GHAFARI et al., 2016; SHI; MO, 2008).

A elevada resistência mecânica, aliada a baixa permeabilidade e alta durabilidade, permitem o dimensionamento de peças mais esbeltas, com o consumo de um menor volume de concreto, promovendo a diminuição do peso da estrutura, aumento da área e vida útil da edificação (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Os pontos negativos estão relacionados ao elevado controle tecnológico, alto consumo de cimento, sílica ativa e superplastificantes, ocasionando aumento no custo e um potencial impacto ambiental (YU et al., 2017). Entretanto, CAD e CUAD têm menor consumo de cimento por MPa, podendo, por este aspecto, ser considerados mais ecoeficientes que os concretos convencionais (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019).

Pesquisas recentes têm preenchido lacunas de conhecimento, permitindo o desenvolvimento de CADs e CUADs inovadores, com o aproveitamento de resíduos e subprodutos de processos industriais, ou agregados alternativos, que resultam em um menor custo inicial (DE MATOS et al., 2020; HE; DU; CHEN, 2018; KIM; KOH;

PYO, 2016; YANG et al., 2009). Contudo, as aplicações do material ainda são bastante limitadas, seja pela falta de experiência dos empreiteiros ou pela ausência de um método de dosagem simples e amplamente aceito.

Alguns métodos de dosagem empregados são baseados na otimização da distribuição de tamanho de partículas para incrementar o grau de compacidade e densidade, como o de Mehta-Aïtcin (1990), De Larrard (1990), Torrales Carbonari (1996) e O'Reilly (1998). Aïtcin (2000) e Nawy (1996) basearam seus métodos no critério de volume absoluto. O desenvolvimento desses métodos levou a proposição de curvas granulométricas ajustadas e otimizadas, modelos de empacotamento de partículas, modelos de elementos discretos e ensaios de empacotamento por via úmida.

As teorias de empacotamento possuem limitações por considerar as partículas esféricas e de um único tamanho, desconsiderando a morfologia, que impacta de forma significativa a trabalhabilidade, distribuição de tamanho de partículas, estabilidade, reologia e propriedades mecânicas de suspensões cimentícias (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018). As abordagens de máximo empacotamento teórico dos materiais desconsideram as interações de superfície entre as partículas (ROUSSEL et al., 2010; WONG; KWAN, 2008). Já a máxima densidade dos materiais secos desconsidera a formação de um filme de água adsorvido em torno das partículas (LI; KWAN, 2013).

Sendo claro o potencial de uso deste material na indústria da construção civil, seja pelo desempenho superior, durabilidade ou versatilidade, identifica-se a necessidade de um método de dosagem de concretos de alto e ultra-alto desempenho autonivelantes, a base de Cimento Portland, que leve em consideração as características das partículas, o que o presente trabalho pretende explorar através de uma metodologia empírica.

Uma das principais vantagens do uso de um método empírico para dosagem de concretos, em detrimento de um teórico, é a eliminação de ensaios específicos de caracterização, que possuem uma disponibilidade mais limitada, e se tornam inviáveis na prática da construção civil. A indústria da construção trabalha com um enorme volume de matérias-primas, com grande variabilidade, o que inviabiliza um controle tecnológico mais adequado. Um método de dosagem cuja otimização é baseada em espalhamento e resistência mecânica seria mais facilmente aplicado à realidade.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Propor e executar um método de dosagem de concretos de alto e ultra-alto desempenho autonivelantes, que, pondere, as características das partículas, otimizando empacotamento e trabalhabilidade.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir CADs e CUADs autonivelantes com espalhamento entre 320 e 360 mm;
- Otimizar o empacotamento por meio de ajustes empíricos na formulação;
- Ajustar as proporções dos materiais para produzir concretos com resistências à compressão de pelo menos 60 MPa já nas primeiras idades.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos:

O INTRODUÇÃO apresenta uma contextualização do tema, apresentando a justificativa da proposta de desenvolvimento de um novo método de dosagem para concretos de alto e ultra-alto desempenho, indicando os objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, que proporciona uma visão dos conceitos fundamentais acerca do CAD e CUAD, bem como os aspectos relativos aos métodos de dosagem existentes, com enfoque no empacotamento de partículas e as limitações dos modelos existentes.

No Capítulo 3 consta a descrição e caracterização dos materiais utilizados na formulação dos sistemas cimentícios, bem como as etapas da proposta de dosagem, com a apresentação das metodologias de mistura e dos ensaios aplicados para caracterização do comportamento dos materiais em estado fresco e endurecido.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados para a determinação da composição otimizada de cada etapa proposta.

Por fim, no Capítulo 5 estão sintetizadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETOS DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Os concretos de alto e ultra-alto desempenho (CAD e CUAD, respectivamente), são compósitos cimentícios que apresentam durabilidade e propriedades mecânicas melhoradas, geralmente com resistência à compressão superior a 60 e 120 MPa aos 28 dias, respectivamente (ROBERTI et al., 2021). Muitas vezes, assume-se que CAD e CUAD são sinônimos de concreto de alta resistência, mas isso não é válido em todos os casos (MEHTA; AÏTCIN, 1990). Além da elevada resistência mecânica, esses tipos de concretos apresentam boa resistência ao ataque de agentes agressivos, como íons cloreto, sulfatos e ao processo de carbonatação (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019).

A definição aprovada pelo *American Concrete Institute* (1998) conceitua o CAD como um concreto que atende a uma combinação especial de requisitos de desempenho e uniformidade que não podem ser alcançados rotineiramente usando os constituintes convencionais e práticas usuais de mistura, lançamento e cura. Dentre as características que podem ser consideradas críticas para aplicações particulares estão a trabalhabilidade, compactação sem segregação, propriedades mecânicas, permeabilidade, densidade, calor de hidratação, rigidez, estabilidade volumétrica, durabilidade em ambientes agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 2005).

A diminuição da porosidade, através da modificação da estrutura dos poros, é o princípio básico empregado para atingir os parâmetros do CAD. Para diminuir a porosidade pode-se recorrer ao uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, que permitem a diminuição da relação água/aglomerante (a/ag). Também é recomendada a otimização da granulometria dos agregados para aumentar o esqueleto inerte e obter maior compacidade, utilizando agregados graúdos de menor diâmetro máximo e adequada composição granulométrica de agregados finos. Além do uso de adições minerais para o refinamento dos poros, assim como uma densificação da zona de transição (interface entre o agregado e a pasta de cimento hidratada). O resultado combinado dessas ações pode ser percebido pela obtenção de uma microestrutura com poros de menor tamanho, através da diminuição da interconexão, por meio da maior oposição à passagem dos fluidos e devido a maior fixação de agentes dissolvidos pelo aumento das forças de superfície. A consequência

disso, é o aumento da densificação, da resistência mecânica, da durabilidade, e, assim, do desempenho do concreto (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O CUAD é um aprimoramento do CAD. Nele, a melhora das propriedades mecânicas, da trabalhabilidade e da durabilidade permanecem como os fatores mais importantes na produção. O desempenho geral do CUAD depende de diversos fatores: porcentagem ótima de cada material constituinte e empacotamento da composição. É comum a ausência de agregados graúdos, pois estes enfraquecem a zona de transição entre pasta e agregado, e pela possível presença de microfissuras provenientes do processo de britagem. O CUAD utiliza uma baixa relação  $a/ag$  (em torno de 0,25), uma proporção ótima entre cimento e materiais cimentícios suplementares, uma gradação adequada da areia, incorporação ou não de fibras como reforço, tipo e teor de aditivos (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; ULLAH et al., 2022).

Dentre os materiais cimentícios de alto desempenho desenvolvidos por pesquisadores destacam-se, para os fins desse trabalho, o estudo sobre Concreto de Pós Reativos (CPR) apresentado por Richard e Cheyrezy (1995) e o estudo sobre concretos de ultra-alto desempenho de De Larrard e Sedran (1994).

O programa de pesquisa do CPR (RICHARD; CHEYREZY, 1995) foi conduzido tendo como referência os seguintes princípios:

- Aumentar a homogeneidade pela eliminação de agregados graúdos;
- Aprimorar a densidade de compactação pela otimização da distribuição de tamanho de partículas (empacotamento), minimizando a quantidade de água necessária para dar fluidez ao concreto;
- Melhorar a microestrutura pelo tratamento térmico pós cura, que promove a hidratação e aceleração das reações pozolânicas;
- Manter os procedimentos de mistura e moldagem os mais próximos possíveis das práticas existentes.

A aplicação dos três primeiros princípios tende a produzir uma matriz com elevada resistência à compressão, mas com a ductibilidade semelhante à de argamassas convencionais, enquanto a inclusão de fibras melhora a resistência à tração e torna possível atingir o nível requerido de ductibilidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995). A composição do CPR é caracterizada pela alta quantidade de aglomerantes, alto teor de cimento, baixas relações água/cimento, uso de sílica ativa, pó de quartzo, superplastificantes e fibras metálicas. O CPR foi exemplificado com

duas composições por Richard e Cheyrezy (1995): o CPR 200 e o CPR 800. A resistência mecânica à compressão do CPR 200 varia de 170 a 230 MPa, sem tratamento térmico e com tratamento térmico respectivamente. O tratamento térmico consiste em submeter as amostras a 90 °C durante dois dias. Já o CPR 800 necessita de tratamento térmico a temperaturas próximas a 250 °C e aplicação de pressão antes e durante a pega, para chegar a resistências entre 490 e 680 MPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Já De Larrard e Sedran (1994) introduziram o termo concreto de ultra-alto desempenho, que atualmente é a denominação mais aceita. Em seu trabalho revisitaram o conceito de alta densidade de empacotamento como chave para a obter um material cimentício de ultra-alto desempenho. Os autores propuseram um novo modelo de empacotamento, derivado das equações de Mooney (1951), o modelo de suspensão sólida. O modelo visa aumentar o empacotamento dos materiais secos, possibilitando a diminuição da porosidade inicial da pasta e a espessura máxima de pasta, do inglês *Maximum Paste Thickness* (MPT), onde esse parâmetro representa a distância média entre dois agregados. Para minimizar a MPT, é preferível o uso de agregados de menor diâmetro, como uma areia com distribuição granulométrica uniforme. É por isso que, geralmente, um concreto de ultra-alto desempenho é, na prática, uma argamassa de ultra-alto desempenho. A composição otimizada apresentou 164,9 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, sem tratamento térmico e 235,8 MPa aos 7 dias após 2 dias de tratamento térmico a 90 °C (DE LARRARD; SEDRAN, 1994).

Obras com elementos em CUAD, em especial com CPR, tem ganhado espaço cada vez maior, com exemplos de aplicações na França, Japão, Alemanha, Suíça, Estados Unidos, Canadá e muitos outros países. Uma das primeiras estruturas de grande porte construída foi a passarela de Sherbrooke em Quebec, no Canadá, em 1997. A estrutura é composta por seis peças pré-fabricadas de CPR com 10 m de comprimento, compondo o arco de 60 m de vão. A utilização do CPR viabiliza uma estrutura com grande esbeltez, apesar das dimensões o elemento é relativamente leve devido às espessuras reduzidas. Outros exemplos de obras executados em CPR são a passarela Seonyu, em Seoul, na Coreia do Sul (2002), com 120 m de vão livre e com tabuleiro com apenas 3 cm de espessura, e o Posto de Pedágio do Viaduto de Milau, na França (2005), com 98 m de comprimento e 28 de largura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Outras aplicações de CUAD são a execução de pilares, treliças e passarelas, como no Museu das civilizações Europeias e Mediterrâneas, na França, nas conexões entre fundação e estrutura, em elementos estruturais pré-moldados, na reabilitação de estruturas de concreto, como em pontes, barreiras e pilares degradados.

O CUAD possui um potencial latente a ser explorado. Mesmo existindo alguns exemplos de destaque no cenário atual, ainda necessita de pesquisas mais aprofundadas e aplicações práticas, para assegurar o domínio completo do material.

## 2.2 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAD

Dentre os métodos empregados para dosagem de CAD temos o de Mehta-Aïtcin (1990), o de De Larrard (1990), Torrales Carbonari (1996) e O'Reilly (1998), que são baseados na otimização do esqueleto granular, preenchendo com cimento ou pasta os vazios restantes. Já o de Aïtcin (2000) e Nawy (1996) são baseados no critério de volume absoluto, onde determina-se a quantidade de agregado graúdo, cimento, água e, o necessário para completar um metro cúbico, é preenchido com areia.

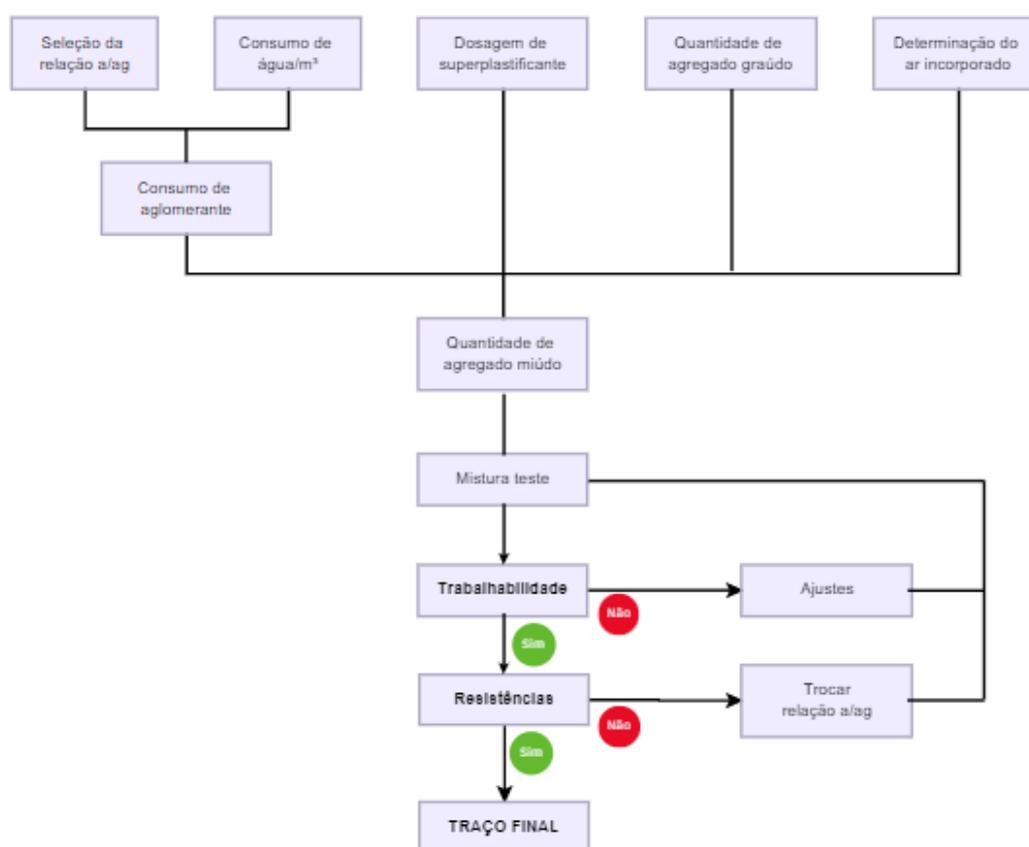
### 2.2.1 Método de Aïtcin

O Método de Aïtcin (2000) é uma combinação de resultados empíricos com cálculos matemáticos, o que o torna relativamente simples, apesar de não existir uma garantia da obtenção das propriedades com exatidão. O fluxograma do método está representado na Figura 2.1

O primeiro passo consiste na determinação da relação  $a/ag$  necessária para alcançar a resistência à compressão especificada, seguido pela determinação do consumo de água da mistura. Para esses passos o autor propõe uma curva teórica que correlaciona a relação  $a/ag$  com a resistência à compressão aos 28 dias e um quadro que correlaciona a dosagem de água com o ponto de saturação do aditivo. O terceiro passo é a determinação do teor de saturação do aditivo, seguido pela determinação da quantidade de agregado graúdo, baseada apenas no formato das partículas. O quinto passo é a verificação do teor de ar incorporado na mistura, o valor ideal de partida seria 1,5 %. Com os materiais calculados, encontra-se a quantidade de agregado miúdo necessária para completar 1 m<sup>3</sup>.

Com essas informações é possível executar um traço experimental para verificar inicialmente a trabalhabilidade do concreto, caso não atenda aos requisitos especificados devem ser executados ajustes na dosagem de água e de aditivo. Seguido de nova mistura experimental, é realizado teste de resistência à compressão de corpos de prova nas idades previamente estabelecidas, para análise das propriedades mecânicas. Se os resultados forem satisfatórios, obtém-se o traço definitivo, caso contrário, é necessária uma nova rodada de ajustes.

Figura 2.1 - Fluxograma do Método de Aïtcin



Fonte: Elaboração Própria, adaptado de Aïtcin (2000).

Pode-se perceber que os parâmetros de dosagem do método são abrangentes e empíricos, baseados em experiências anteriores do autor. As propriedades visadas dificilmente serão obtidas em uma primeira tentativa, pode-se demorar um longo período para obter os valores especificados.

### 2.2.2 Método de O'Reilly

O'Reilly (1998) propôs um método de dosagem que pode ser dividido em duas partes: a primeira para determinar a relação ótima entre os agregados graúdos e miúdos e a segunda para determinação dos demais constituintes do CAD.

No processo experimental proposto por O'Reilly (1998), a forma dos agregados, e não a granulometria, é vista como fator preponderante na determinação da proporção entre os agregados. A porcentagem de vazios e a área superficial específica mínima da mistura de agregados indicarão a composição ótima, na qual, teoricamente, o consumo de pasta será menor.

Na prática, para encontrar esses valores deve-se testar diversas porcentagens entre dois componentes e, para cada uma das misturas, determinar a massa unitária compactada ( $\rho_{AB}$ ). A massa unitária é a massa da mistura compactada, com vazios, dividida pelo volume do recipiente.

Deve-se ter a informação da massa específica de cada um dos componentes, para o cálculo da massa específica das misturas dos agregados, conforme a Equação (1). Esse cálculo é necessário para a determinação dos vazios da mistura e independe da massa unitária.

$$d_{AB} = \frac{(d_A \times A) + (d_B \times B)}{100} \quad (1)$$

Onde:

$d_{AB}$ : massa específica da mistura dos agregados;

$d_A$ : massa específica da areia;

A: porcentagem de areia na mistura;

$d_B$ : massa específica do agregado graúdo (brita);

B: porcentagem de brita na mistura.

Com as massas específica e unitária compactada da mistura já determinadas, pode-se calcular a porcentagem de volume de vazios para cada uma das composições, através da equação (2). Ressalta-se que, nem sempre a mistura com maior massa específica será a com o menor índice de vazios.

$$E_V = \frac{d_{AB} - \rho_{AB}}{d_{AB}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$E_V$ : porcentagem de vazios da mistura;

$d_{AB}$ : massa específica da mistura dos agregados;

$\rho_{AB}$ : massa unitária da mistura.

Na determinação dos outros componentes do CAD, o consumo de água e cimento é obtido baseado na experiência prévia do executante da dosagem. Pode-se proceder para mistura de um traço experimental e a partir daí o método torna-se empírico.

### 2.2.3 Métodos de O'Reilly e IBRACON empregados de forma conjunta

Tutikian (2007) propôs o uso combinado da primeira parte do Método de O'Reilly (1998) para determinar o empacotamento dos agregados, com a posterior elaboração dos traços e diagramas de dosagem característicos do Método IBRACON. O objetivo do autor foi propor um método para dosagem de concretos autoadensáveis, mas os mesmos princípios podem ser empregados para um CAD com trabalhabilidade convencional.

Com o esqueleto granular definido, executam-se pelo menos três traços, o rico, o intermediário e o pobre. Quando se comparam as quantidades relativas de agregados em relação à quantidade de cimento, o traço rico é aquele que, comparativamente, possui menor massa de agregados (1:3,5). No pobre ocorre o contrário (1:6,5), e o intermediário é a base para a dosagem (1:5). Nesse método, a proporção entre os agregados, determinada na etapa anterior, é constante e não o teor de argamassa. A moldagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios de compressão nas idades determinadas permite calcular as equações de comportamento, os coeficientes de correlação e a definição dos diagramas de dosagem e desempenho.

## 2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CUAD

O conceito básico para a produção do CUAD é a homogeneidade e a compacidade granular. A homogeneidade pode ser atingida pela eliminação do agregado graúdo, restando o agregado miúdo, eventuais *fillers* e adições minerais,

aditivos químicos e água. Através da compactação entre todos os sólidos do material é que se obtém a compactação granular (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Levando em consideração esse conceito, muitos pesquisadores optam por testar modelos e algoritmos de empacotamento dos componentes, tanto para influenciar o comportamento de fluxo das pastas frescas como suas propriedades mecânicas (ARORA et al., 2018; YU et al., 2017; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015).

### **2.3.1 Empacotamento de Partículas**

O empacotamento de partículas é um tema de interesse em várias áreas técnicas. A habilidade de controlar o comportamento das suspensões e corpos em formação depende do controle tanto da física quanto da química entre partículas. Ambas devem ser controladas para atingir as propriedades desejadas. A distribuição do tamanho de partículas em um corpo ou suspensão vai controlar a capacidade do sistema para empacotar. Por sua vez, a distribuição do tamanho de partículas em um sistema e a homogeneidade da mistura dependem do número de partículas de cada componente do sistema, da distribuição uniforme de partículas de cada componente através do compacto e do contato entre as partículas (FUNK; DINGER, 1994).

A ideia principal das pesquisas sobre empacotamento de partículas era prever o modo como o sistema de partículas iria empacotar. O objetivo era desenvolver algoritmos para calcular a densidade de empacotamento e porosidade para qualquer distribuição de partículas, determinando como o empacotamento e suas propriedades iriam afetar as operações que utilizam sistemas particulados e fluidos (DINGER; FUNK, 1997).

Para De Larrard e Sedran (1994), uma elevada densidade de empacotamento é a chave para a obtenção de um material cimentício de ultra-alto desempenho. Isso se deve à redução de vazios, aumento da densidade, redução do conteúdo de cimento e uma melhora nas propriedades reológicas do concreto (MANE; CHAPHALKAR; PATIL, 2022). Ao longo dos anos, muitas teorias de empacotamento e modelos foram desenvolvidos visando esses objetivos, podendo destacar:

- Curvas granulométricas otimizadas. Os materiais são combinados de modo que a distribuição granulométrica resultante da mistura seja a mais próxima possível de uma curva ótima, como a do modelo de Andreasen e Andersen (1930);

- Modelos de empacotamento de partículas. Alguns modelos calculam de forma analítica o empacotamento da mistura, baseados na geometria dos grupos de partícula, como o modelo de suspensão sólida (SSM) de De Larrard e Sedran (1994);
- Modelos de elementos discretos. Nessa categoria se inserem os modelos gerados por computador, em que uma dada distribuição de tamanhos de partículas gera uma estrutura de partículas virtual;
- Ensaio de empacotamento via úmida. Abordagem proposta por Wong e Kwan (2008), onde a máxima concentração de sólidos ocorre quando as partículas sólidas atingem a densidade máxima de empacotamento.

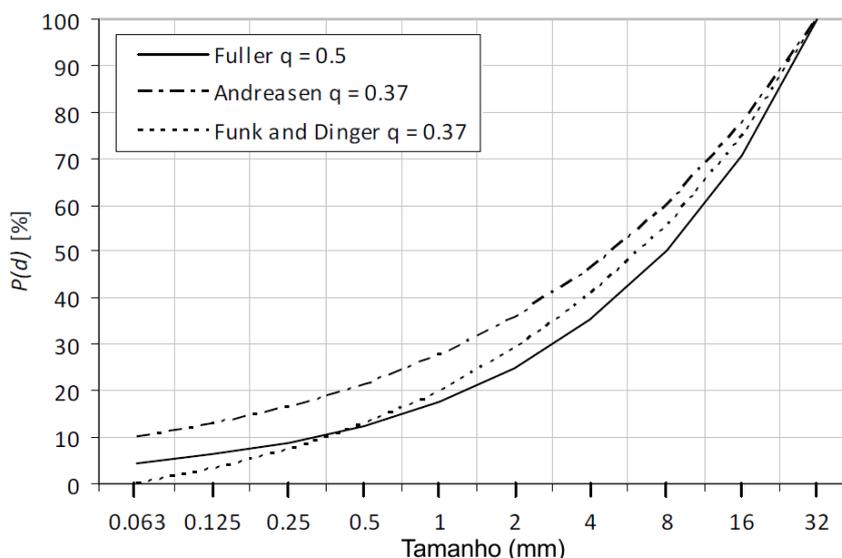
A técnica das curvas granulométricas otimizadas, por envolver um procedimento relativamente simples, é uma das mais empregadas para aumentar o empacotamento das partículas.

Fuller e Thompson (1907), em estudos sobre dosagem do concreto, propuseram uma curva ideal, que, se seguida, resultaria na máxima densidade teórica que faria do concreto uma mistura densa. A equação proposta usa o expoente “q” em sua formulação. O módulo de distribuição “q” é a proporção de agregado para a pasta cimentícia. As resistências mecânicas, em geral, crescem exponencialmente quando o módulo de distribuição é reduzido. Mas, conforme os agregados vão ficando mais finos, a demanda de água aumenta. Então a pasta requer que o empacotamento das partículas aumente.

Andreasen e Andersen (1930) propuseram uma equação que resultaria numa melhoria na curva de Fuller e Thompson (1907). A principal limitação dos modelos de Fuller e de Andreasen e Andersen é considerar que o menor tamanho de partícula usado na mistura é infinitamente pequeno.

Para Funk e Dinger (1994), toda distribuição de tamanho real deve ter um limite inferior finito. Seu modelo de distribuição de tamanho de partícula leva em consideração não apenas a maior partícula, mas também, a menor. A curva que Funk e Dinger desenvolveram é conhecida como a curva modificada de Andreasen e Andersen (MAA), pois advém de uma melhoria desse modelo. Neste, os autores usaram 0,37 como módulo de distribuição. As diferenças entre as curvas advindas dos 3 modelos podem ser observadas na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Curvas ideais dos modelos de Fuller/Thompson, Andreasen/Andersen e Funk/Dinger



Fonte: Fennis (2011).

Como as únicas informações necessárias para utilizar o modelo MAA são as distribuições de tamanho das partículas, ele acaba sendo bastante utilizado no dimensionamento de CUAD. A equação (3) demonstra a curva alvo do modelo MAA, onde são necessários apenas três parâmetros de entrada.

$$P_t = \frac{d^q - d_{\text{mín}}^q}{d_{\text{máx}}^q - d_{\text{mín}}^q} \quad (3)$$

Onde:

$P_t$ : fração de sólidos total menor que  $d$ ;

$d$ : tamanho de partícula;

$d_{\text{mín}}$ : menor tamanho de partícula;

$d_{\text{máx}}$ : maior tamanho de partícula;

$q$ : módulo de distribuição.

Estudos posteriores mostram que mudanças no valor do módulo de distribuição “ $q$ ” interferem na interação entre as partículas. Menores valores de “ $q$ ” correspondem a um aumento na proporção de materiais finos na mistura. Se  $q < 0,30$ , a mistura apresenta boa fluidez, o que favorece a produção de materiais bem compactados. Se o valor é ainda menor ( $q < 0,25$ ) é possível produzir concretos autoadensáveis (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O modelo modificado de Andreasen e Andersen atua como uma função alvo para a otimização da mistura composta pelos materiais granulares. A proporção de cada material na mistura é alterada até um ajuste ótimo entre a curva alvo e a curva granulométrica acumulada. Esse ajuste pode ser verificado pelo método dos mínimos quadrados, como apresentado na equação (4). Quando a diferença entre a curva alvo e da mistura composta, expressa pela soma dos quadrados dos residuais, em tamanhos de partícula definidos, é minimizada, a composição obtida corresponde à mistura ótima (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018). Ou seja, quanto menor o RSS, mais a curva granulométrica acumulada da mistura, se aproxima da curva alvo.

$$RSS = \sum_{i=1}^n (P_{mix} (D_i^{i+1} - P_{targ} (D_i^{i+1})))^2 \quad (4)$$

Onde:

$RSS$ : soma dos quadrados dos residuais (*residual sum of squares*);

$P_{mix}$ : quantidade acumulada passante da mistura;

$P_{targ}$ : quantidade acumulada passante conforme  $Pt$  alvo (*target*).

### 2.3.1.1 Limitações dos modelos de empacotamento

A maioria dos modelos de empacotamento de partículas considera as partículas esféricas e de um único tamanho. Essas suposições limitam a aplicação dos modelos de empacotamento em agregados mais realistas, como os utilizados no concreto. A morfologia do agregado é um parâmetro crucial que influencia significativamente a trabalhabilidade, estabilidade, reologia e propriedades mecânicas de suspensões cimentícias (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018).

As abordagens de máximo empacotamento teórico dos materiais também desconsideram as interações de superfície entre as partículas. As pastas de cimento frescas podem ser vistas como suspensões de partículas de diferentes tamanhos em uma fase fluida contínua, e essa ampla polidispersão implica em várias interações. Partículas maiores, em geral os agregados, são governadas pelo contato e forças gravitacionais, enquanto as forças de superfície se tornam mais significativas a medida que o tamanho de partícula diminui, o que significa que são relevantes no Cimento Portland e nas adições minerais. Os métodos de empacotamento secos tendem a superestimar o conteúdo de vazios e subestimar a densidade de

empacotamento das partículas finas (ROUSSEL et al., 2010; WONG; KWAN, 2008). Ainda, a ocorrência de forças de atração e repulsão entre as partículas não é levada em consideração no empacotamento teórico.

Outra forma de dosagem é a densidade máxima dos materiais secos, essa abordagem desconsidera a formação de um filme de água adsorvido em torno das partículas, que é significativo nas partículas finas, que possuem elevada área superficial específica (LI; KWAN, 2013).

## 2.4 CONCRETOS AUTONIVELANTES DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Concretos autonivelantes são concretos fluidos que podem se espalhar e consolidar com seu próprio peso, enquanto passam entre obstáculos, sem apresentar segregação ou exsudação (VAN DER VURST et al., 2017). O concreto autonivelante não necessita do nivelamento de sua superfície, por ser muito mais fluido do que o concreto convencional, ele se acomoda nivelado, facilitando o trabalho na construção civil.

Como vantagens existe a otimização da mão-de-obra, por dispensar do uso de vibradores, espalhadores e niveladores, há a redução do número de pessoas envolvidas em sua aplicação. Maior agilidade na execução da obra, pelo espalhamento espontâneo. Eliminação de ruídos, pela dispensa do uso de vibradores. Redução dos custos de aplicação por metro cúbico de concreto e final da obra, em comparação ao sistema de concretagem convencional. Garantia de bom acabamento em concreto aparente. Facilidade de bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais. Aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões.

Do ponto de vista da trabalhabilidade, não há uma definição que classifique um concreto como CAD ou CUAD, mas muitos concretos autonivelantes atendem a esse requisito para a maioria das aplicações (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; OKAMURA; OUCHI, 1996).

Para obter concretos cuja trabalhabilidade possa ser considerada autonivelante, esse trabalho propõe um método de dosagem prático para otimizar o proporcionamento entre os constituintes, ajustando o empacotamento das partículas, necessário para desempenho mecânico de CAD e CUAD, com a manutenção da fluidez.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo, inicialmente serão apresentados os materiais empregados e suas respectivas caracterizações, bem como a metodologia desenvolvida para dosagem de CAD e CUAD, o método utilizado na preparação de misturas e amostras. Por fim, serão detalhados os ensaios usados para caracterização das amostras produzidas. Cabe destacar que o trabalho desenvolvido pela autora, em termos de materiais e metodologia empregada, está inserido em uma série de trabalhos colaborativos realizados pelos membros do Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis na Construção (GEMASC). De tal forma, combinando os resultados obtidos nos diversos trabalhos, o grupo visa promover avanços no desenvolvimento de concretos de alta e ultra-alta resistência, com uma proposta de método para dosagem.

#### **3.1 MATERIAIS**

##### **3.1.1 Cimento**

Foi usado um cimento Portland de alta resistência inicial, comercialmente disponível como CP V – ARI (Itambé, Belo Horizonte, Brasil). Esse cimento foi escolhido pelo elevado teor de clínquer em comparação com os cimentos convencionais, e, pela elevada finura, já que um cimento finamente moído pode melhorar as propriedades do concreto nas idades iniciais, pelo aumento da reatividade.

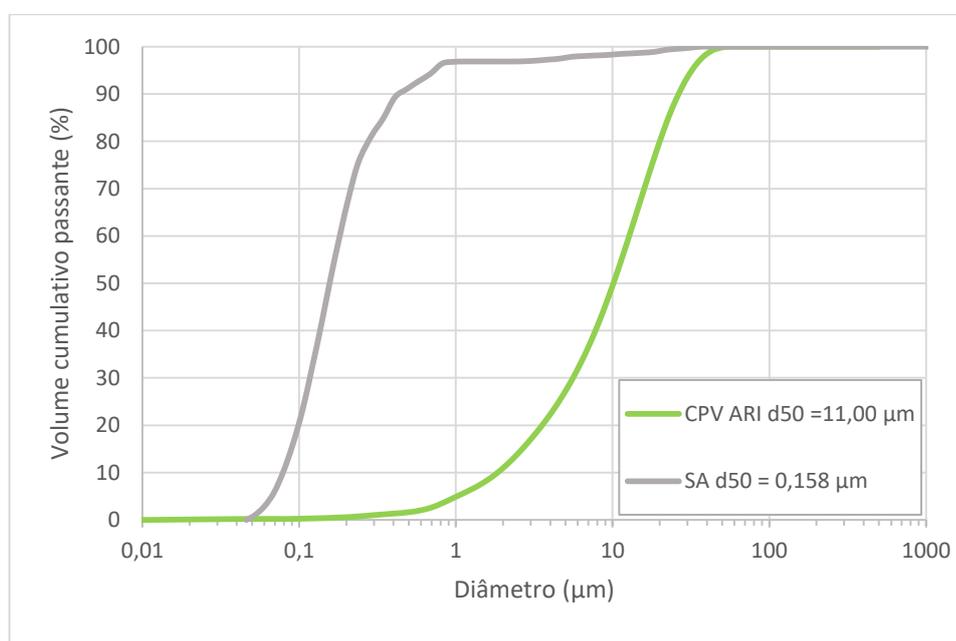
A Figura 3.1 mostra a distribuição de tamanho de partícula dos materiais em pó avaliados por meio de difração à laser, com medições efetuadas em álcool isopropílico (analisador de tamanho de partículas Cilas, modelo Cilas 1180 Liquid – Laboratório Químico FRAS-LE). A Tabela 3.1 mostra as características químicas e físicas da fração aglomerante, determinadas por espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). A análise de BET foi efetuada em um equipamento NOVA touch 2LX, com medições em nitrogênio e 0,3092 gramas de material. A densidade foi determinada segundo ensaio descrito na NBR 6474 NM 23:2000. Na Tabela A.0.1 em anexo a composição mineralógica determinada por meio de difração de raios X (Difratômetro Xpert MPD – LDRX UFSC).

### 3.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa é um material usualmente empregado nas formulações de CUAD (DE MATOS et al., 2020; LI; YU; BROUWERS, 2018; SONG et al., 2018; WU; SHI; KHAYAT, 2019). Além disso, em concretos autonivelantes, usualmente é necessário um alto teor de finos para atingir certa estabilidade (coesão), onde os materiais cimentícios suplementares podem suprir parte dessa demanda por finos (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019).

A sílica ativa (SA) utilizada foi a 971U (Elkem, Oslo, Noruega). As características físicas e químicas da SA são apresentadas na Tabela 3.1. A análise de BET foi efetuada em um equipamento NOVA touch 2LX, com medições em nitrogênio e 0,0487 gramas de material. A densidade foi determinada segundo ensaio descrito na NBR 6474 NM 23:2000. A distribuição granulométrica também é ilustrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Distribuições granulométricas dos ligantes cimento Portland (CP V ARI) e sílica ativa (SA)



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades físicas dos materiais ligantes

Propriedade	Cimento Portland	Sílica Ativa
Composição química		
SiO <sub>2</sub> (%m)	16,9	93,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%m)	3,6	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%m)	2,6	0,4
CaO (%m)	68,4	0,3
K <sub>2</sub> O (%m)	1,1	0,8
Na <sub>2</sub> O (%m)	0,1	1,8
MgO (%m)	2,4	2,0
SO <sub>3</sub> (%m)	4,4	0,1
TiO <sub>2</sub> (%m)	0,3	< 0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%m)	0,2	< 0,1
Perda ao fogo (950 °C) (%m)	3,46	2,79
Propriedades físicas		
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) (NBR 6474 NM 23:2000)	3.080	2.220
BET SSA* (m <sup>2</sup> /g)	2,6	19,3

\*SSA: *specific surface area* (área superficial específica).

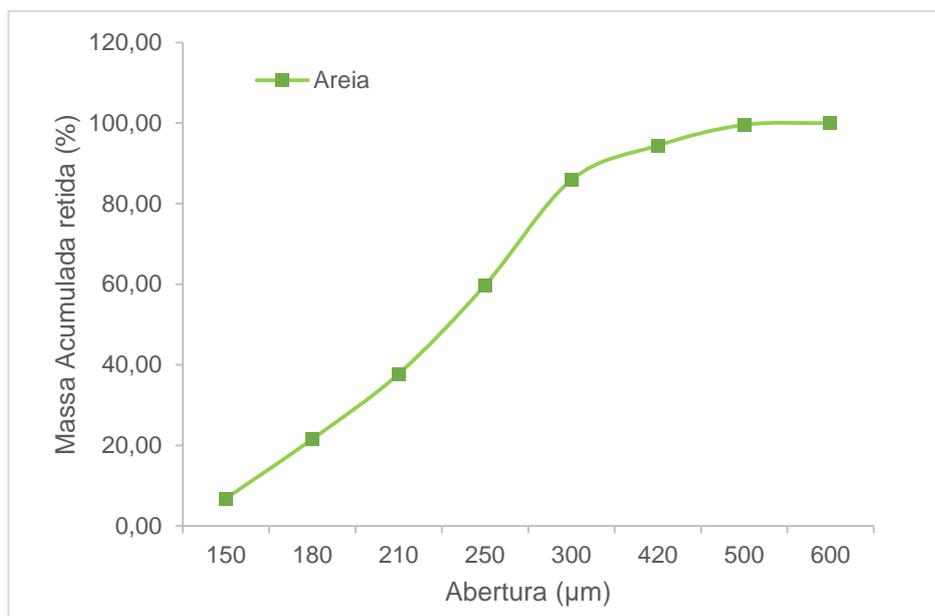
Fonte: Elaboração Própria.

### 3.1.3 Areia de quartzo

Como agregado fino, foi empregada uma areia de natureza quartzosa, com massa específica de 2.640 kg/m<sup>3</sup>, determinada segundo ensaio previsto pela NBR NM 52 – ABNT – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

A areia foi lavada e seca em 100 °C até atingir massa constante. A fração selecionada consiste na fração passante na peneira com abertura 600 µm e retida na peneira com abertura 150 µm. A distribuição granulométrica detalhada foi obtida pelo método descrito na NBR NM 248 - ABNT – Composição granulométrica dos agregados, adicionalmente utilizando as peneiras de abertura 180, 210, 250, 420 e 500 µm. O resultado pode ser verificado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Distribuição granulométrica da areia



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.1.4 Aditivo superplastificante

Foi empregado o aditivo superplastificante comercial, a base de policarboxilato, ADVA 458 UHPC (Grace Chemical Products Applied Technologies), com massa específica de  $1.100 \text{ kg/m}^3$  e 47,23 m% de fração sólida, determinados segundo orientações da NBR 11768-3 (Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 3: Ensaio de caracterização).

## 3.2 MÉTODO DE DOSAGEM

Levando em consideração as limitações dos modelos de empacotamento expostos no item 2.3.1.1, este trabalho propôs a determinação por meio de processos empíricos do empacotamento granular úmido, fundamentado nas características de fluxo e no desempenho mecânico. Esse processo prático permite a definição da composição de concretos de alto e ultra-alto desempenho autonivelantes, levando em consideração as interações de superfície entre as partículas e a adsorção de água.

A metodologia empírica proposta está esquematizada na Figura 3.3. Cada etapa categorizada no método de dosagem será melhor descrita nos subitens seguintes.

Figura 3.3 - Esquema do método de dosagem proposto.



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2.1 Determinação da composição do ligante

Foi determinada a proporção ótima sílica ativa/cimento pela produção de uma argamassa de referência baseada em testes preliminares executados pela autora. A proporção de mistura segue os seguintes parâmetros (em base de peso): razão a/ag de 0,18, relação agregado fino/aglomerante de 1/1 para a referência (sem sílica ativa), e teor de aditivo de 2,00 % em relação ao peso de aglomerante. A relação a/ag de 0,18 foi obtida para a mistura de referência que apresentou desempenho de CUAD e foi mantida para as outras misturas com o mesmo teor de superplastificante, de modo que, a trabalhabilidade sofreu mudanças devido aos diferentes teores de SA incorporados.

Então, a sílica ativa foi incorporada em substituição ao cimento, em massa, nas proporções de 5, 8, 10, 15 e 20 %. Esses teores foram baseados em informações prévias da literatura que incorporam sílica ativa em materiais a base de cimento (MEGAT JOHARI et al., 2011; SADRMOHTAZI; TAJASOSI; TAHMOURESI, 2018; SUN; BENNETT; VISINTIN, 2022). A composição detalhada das argamassas produzidas está apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição das argamassas para determinação da composição do ligante (dosagem por fração em peso)

Material/ Mistura	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Água	SP
0% SA	1,00	-	1,00	0,18	0,02
5% SA	0,95	0,05	1,00	0,18	0,02
8% SA	0,92	0,08	1,00	0,18	0,02
10% SA	0,90	0,10	1,00	0,18	0,02
15% SA	0,85	0,15	1,00	0,18	0,02
20% SA	0,80	0,20	1,00	0,18	0,02

Fonte: Elaboração Própria.

Nessa etapa a proporção sílica ativa/cimento variou visando obter argamassas com desempenho de CAD e CUAD. Foram executados testes no estado fresco e endurecido.

### 3.2.2 Determinação do teor de saturação do aditivo

O teor ótimo do aditivo superplastificante foi determinado pela produção de pastas cimentícias, cuja formulação foi obtida da etapa 3.2.1 (Determinação da composição do ligante). A relação  $a/ag$ , obtida dos ensaios preliminares com argamassas com desempenho de CUAD, foi mantida em 0,18. O fabricante recomenda dosagens de aditivo que variam de 0,4 até 1,5 %m, porém neste trabalho optou-se por extrapolar intervalos maiores, testando dosagens entre 0 e 3 %m. Alguns autores, em estudos sobre saturação do aditivo, chegaram a avaliar dosagens com até 5 %m de aditivo (ABDULKAREEM et al., 2018). A composição detalhada das pastas está apresentada na Tabela 3.3. A determinação do teor ótimo de aditivo realizou ensaios apenas no estado fresco.

Tabela 3.3 – Composição das pastas para determinação do teor de saturação do aditivo (fração em massa)

Material/ Mistura	Cimento	Sílica Ativa	Água	SP
0% SP	0,92	0,08	0,18	-
0,5% SP	0,92	0,08	0,18	0,005
1,0% SP	0,92	0,08	0,18	0,010
1,5% SP	0,92	0,08	0,18	0,015
2,0% SP	0,92	0,08	0,18	0,020
2,5% SP	0,92	0,08	0,18	0,025
3,0% SP	0,92	0,08	0,18	0,030

Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2.3 Determinação da relação água aglomerante e teor de agregados

Na última etapa do método de dosagem proposto, com a composição otimizada do ligante e usando o teor de saturação do aditivo, determinado no item 3.2.2, foram testadas argamassas com a relação a/ag de 0,18, 0,20, 0,23, 0,25, 0,28 e 0,30.

Esses teores foram estabelecidos tendo como base outros trabalhos. Alguns deles avaliaram composições de CUAD com relações a/ag de 0,18, 0,20 e 0,22 (SADRMOMTAZI; TAJASOSI; TAHMOURES, 2018). Outros trabalharam com relações a/ag ainda menores: 0,15, 0,17 e 0,19 (SUN; BENNETT; VISINTIN, 2022), todavia, existem trabalhos com relações a/ag de até 0,3 (ROBERTI et al., 2021). É importante ressaltar que na dosagem de concretos autonivelantes são registrados valores a/ag de até 0,48 (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019).

A relação areia/cimento foi ajustada para cada relação a/ag, de modo a apresentar a consistência de uma argamassa autonivelante. Algumas formulações de CUAD fixaram o *mini-slump flow* (isto é, o espalhamento obtido na mesa de consistência) entre 240 e 250 mm (WU; SHI; KHAYAT, 2019). Outros pesquisadores definiram que o espalhamento deveria ser maior que 260 mm (ROBERTI et al., 2021), reportando valores da ordem de 330 mm (LI; YU; BROUWERS, 2018; SONG et al., 2018). Deste modo, para a obtenção de concretos de alto e ultra-alto desempenho autonivelantes, fixou-se que o espalhamento no ensaio de mesa de consistência sem

quedas, deveria estar entre 320 e 360 mm. As composições finais, já ajustadas para esse espalhamento, são demonstradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Composição das argamassas para determinação da água aglomerante e teor de agregados (fração em massa)

Material/ Mistura	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Água	SP
<b>0,18</b>	0,92	0,08	-	0,18	0,015
<b>0,20</b>	0,92	0,08	0,40	0,20	0,015
<b>0,23</b>	0,92	0,08	0,90	0,23	0,015
<b>0,25</b>	0,92	0,08	1,10	0,25	0,015
<b>0,28</b>	0,92	0,08	1,40	0,28	0,015
<b>0,30</b>	0,92	0,08	1,60	0,30	0,015

Fonte: Elaboração Própria.

### 3.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Nas etapas 3.2.1 e 3.2.2 as amostras foram preparadas em bateladas de 1000 ml, e na etapa 3.2.3, pela necessidade de maior volume de material, em lotes de 1300 ml. As misturas foram realizadas em uma argamassadeira planetária com capacidade de 5 L e 285 rpm. O procedimento de mistura é descrito a seguir: (i) os materiais secos (exceto a sílica ativa) foram previamente homogeneizados; (ii) a argamassadeira foi ligada, a água e o superplastificante (previamente misturados) foram gradualmente adicionados até 1 minuto; (iii) a sílica ativa foi gradualmente adicionada ao longo de 3 min; (iv) a argamassa foi misturada até 10 min.

Imediatamente após a mistura, foram realizados os ensaios no estado fresco e a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão. Para a etapa 3.2.1, foram moldados corpos de prova cúbicos de 50 mm. O corpo de prova foi preenchido em 3 camadas, com a aplicação de 30 golpes por camada. Já na etapa 3.2.3, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, estes também preenchidos em 3 camadas, com 30 golpes em cada, para adensamento e remoção de eventuais vazios.

### 3.4 PROCEDIMENTO DE CURA

Após a moldagem, os corpos de prova foram protegidos com material plástico para evitar a troca de umidade com o ambiente e mantidos em uma sala com temperatura constante (23 °C). Após 24 horas, foram desmoldados e colocados na cura térmica submersa a 90 °C por 48 h. Ao final, os corpos de prova foram resfriados naturalmente. O procedimento de cura foi adaptado do trabalho de De Larrard e Sedran (1994), entretanto, a etapa intermediária onde os corpos de prova foram mantidos na temperatura ambiente por 72 h antes de serem submetidos a cura térmica foi excluída em virtude da necessidade de obtenção de elevadas resistências já aos três dias.

### 3.5 MÉTODOS DE TESTE

#### 3.5.1 Estado Fresco

Logo após o término da mistura foram realizados o ensaio de mesa de consistência, adaptado da ABNT NBR 13276 (2005) e as medições para determinação do teor de ar incorporado ABNT NBR 13278 (2005). Nas etapas 3.2.1 e 3.2.2, o molde de tronco cônico empregado no ensaio da mesa de consistência possuía as dimensões reduzidas (diâmetro inferior × diâmetro superior × altura = 71 × 61 × 41 mm), visando a economia de material. O cone foi preenchido em 3 camadas, a primeira recebe 15 golpes, a segunda 10 e a terceira 5. Então o cone foi imediatamente removido, e o espalhamento foi medido após 10 quedas da mesa. A medida do espalhamento da amostra é obtida pela média de duas aferições perpendiculares.

As etapas 3.2.1 e 3.2.2 foram apenas para investigação comparativa, pois buscaram determinar a composição ótima do ligante e o teor de saturação do aditivo, respectivamente. As características autonivelantes não foram exploradas.

A etapa 3.2.3 usou um molde de tronco cônico com as dimensões padrão determinadas na ABNT NBR 13276 (2005) para o ensaio de espalhamento (diâmetro inferior × diâmetro superior × altura: 125 × 80 × 65 mm). O procedimento para preenchimento e obtenção da medida de espalhamento foi o mesmo das etapas anteriores, entretanto não foram efetuadas quedas na mesa.

O teor de ar incorporado foi determinado segundo a ABNT NBR 13278 (2005), dado pela diferença de um pela razão entre densidade teórica e densidade real, e foi executado nas três etapas de dosagem.

### **3.5.2 Estado Endurecido**

Os corpos de prova moldados na etapa 3.2.1, por se tratarem de materiais muito reativos (Cimento CPV ARI e sílica ativa), foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos três dias, sendo ensaiados seis corpos de prova para cada composição. Tendo como vantagem a rapidez na determinação da composição ótima do ligante. O equipamento usado foi uma máquina universal de ensaios Instron modelo HDX (Brasil), com capacidade máxima de 150 toneladas, célula de carga S de 5 toneladas força, e taxa de carregamento de 0,05 mm/s.

Já, os corpos de prova moldados na etapa 3.2.3 foram retificados para garantir um bom acabamento, já que em corpos de prova cilíndricos o carregamento é feito na mesma direção da moldagem. Foram ensaiados três corpos de prova para cada composição e idade, tomando-se a média dos dois maiores valores. Também se usou a taxa de carregamento de 0,05 mm/s.

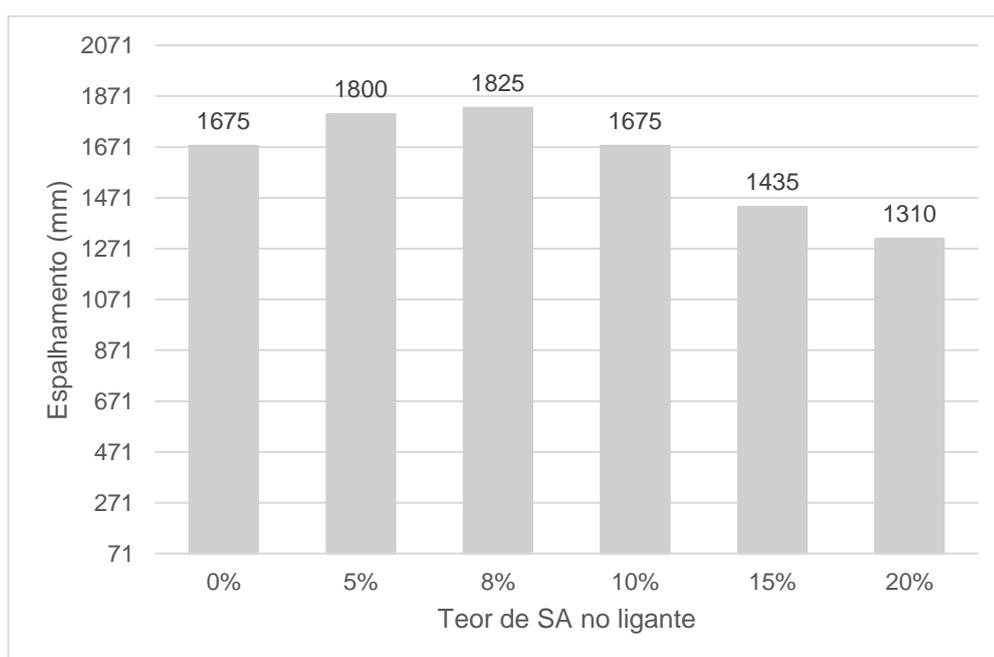
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As etapas detalhadas no Capítulo 3 foram executadas, as argamassas e pastas resultantes de cada uma das etapas foram submetidas aos ensaios de caracterização também detalhados no Capítulo 3. Desse modo, nesta seção os resultados serão apresentados e discutidos.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO LIGANTE

A Figura 4.1 ilustra os resultados do ensaio de mesa de consistência, indicando o diâmetro de espalhamento apresentado para cada um dos teores de substituição de cimento por sílica ativa (SA).

Figura 4.1 – Resultados de espalhamento para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa

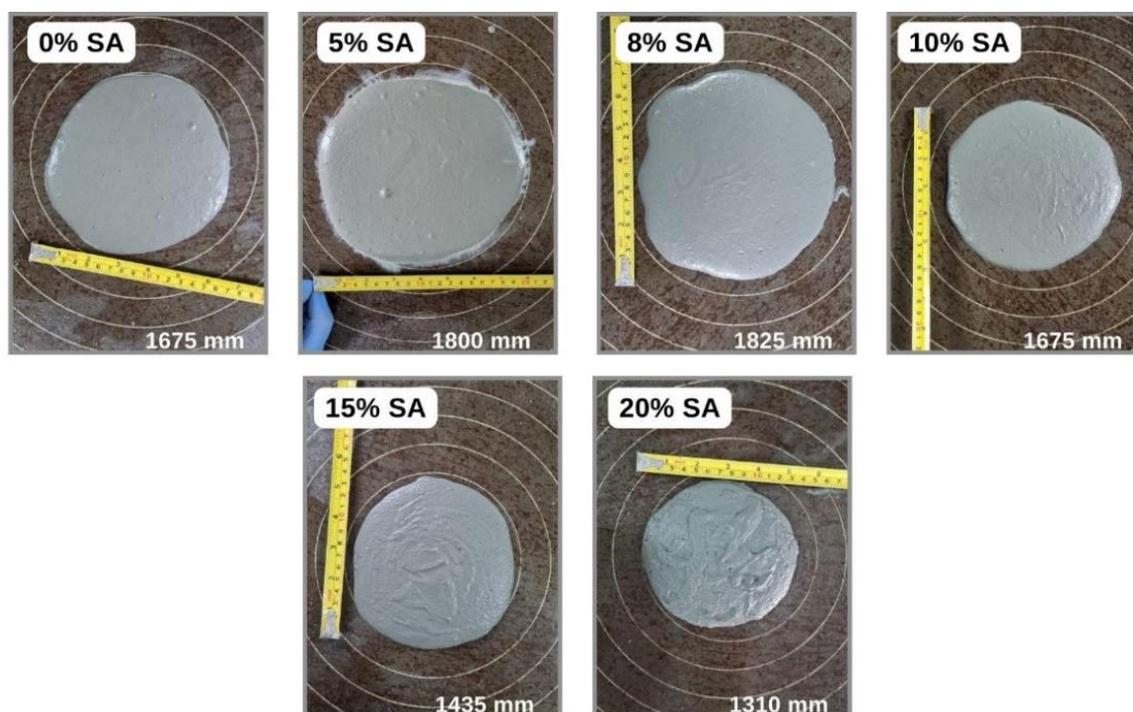


Fonte: Elaboração Própria.

Uma vez que a proporção entre os volumes de ligante, água, superplastificante e agregados foi mantida constante, o maior espalhamento apresenta a melhor fluidez, e por consequência, o melhor empacotamento, resultando na combinação ótima dos ligantes. Assim, a substituição de 8 %m de SA demonstrou-se como teor ótimo do ponto de vista do estado fresco, resultando na combinação ótima dos ligantes.

Os registros fotográficos do espalhamento podem ser observados na Figura 4.2, para uma avaliação visual da fluidez das misturas.

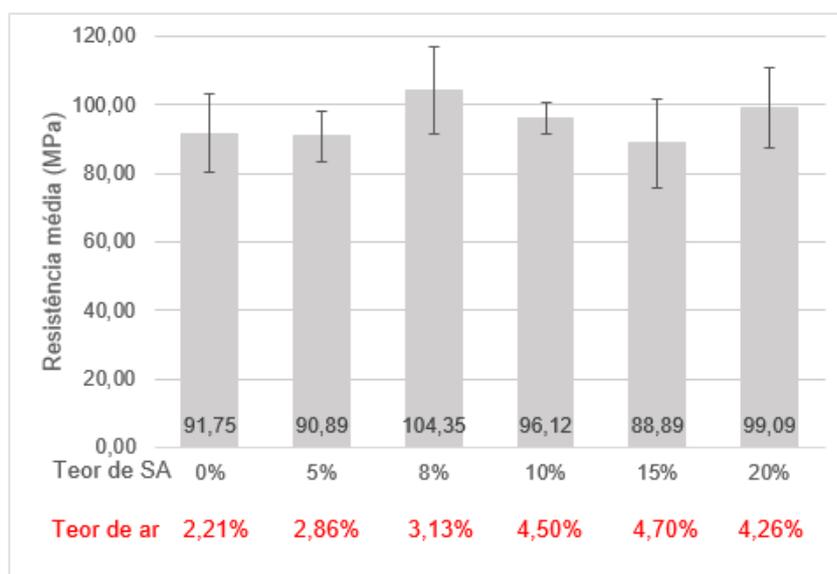
Figura 4.2 - Registro fotográfico do espalhamento dos sistemas



Fonte: Elaboração Própria.

Adicionalmente, o ensaio de resistência à compressão aos 3 dias foi realizado para verificar o impacto desse melhor empacotamento e maior fluidez nas propriedades mecânicas. A resistência à compressão média obtida para cada composição está representada na Figura 4.3, juntamente com o desvio padrão (barra de erros) e os resultados de teor de ar incorporado.

Figura 4.3 – Resultados de resistência à compressão e teor de ar incorporado para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa



Fonte: Elaboração Própria.

A composição com 8 % de SA em substituição ao cimento, além de ser a formulação com maior espalhamento, foi a que apresentou a maior resistência à compressão. Entretanto, pode-se avaliar na Tabela 4.1, que as substituições testadas possuíram um elevado coeficiente de variação (C.V.), inclusive maior do que 10 %. Os C.V.s usuais para materiais de construção são menores que 10 % (HELLMANN et al., 2023). Esta elevada dispersão é, em parte, inerente aos CAD e CUAD, onde uma presença de falhas/vazios tem um impacto elevado no desempenho mecânico e ao número reduzido de amostras.

Tabela 4.1 – Resultados de resistência à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa

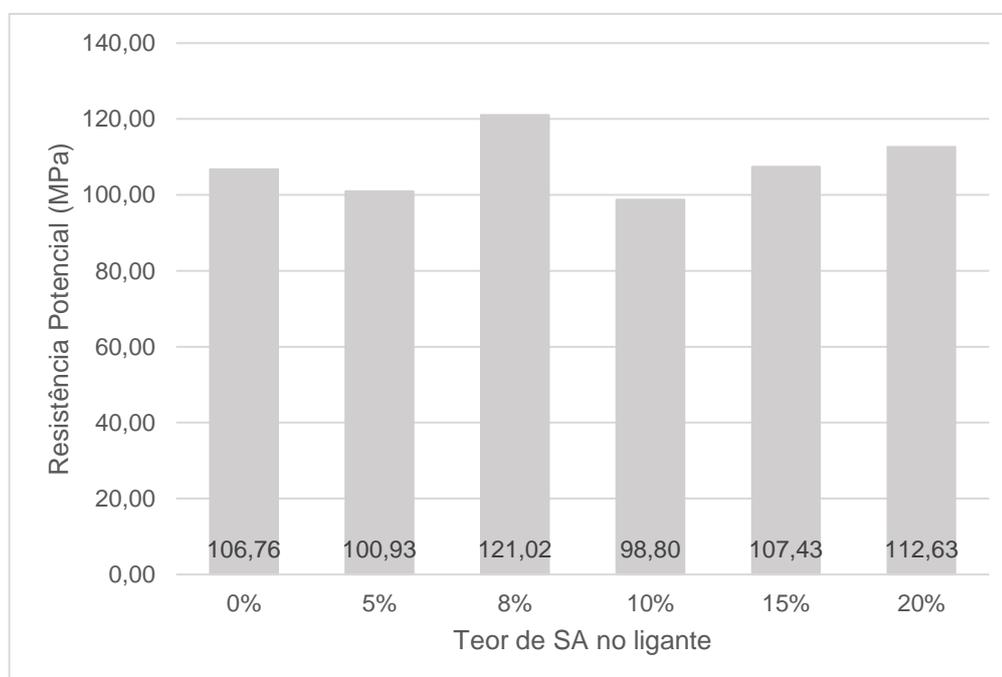
Teor	0% SA	5% SA	8% SA	10% SA	15% SA	20% SA
R média (MPa)	91,75	90,89	104,35	96,12	88,89	99,09
D.P. (MPa)	11,38	7,47	12,62	4,74	12,94	11,74
C.V.	12%	8%	18%	5%	15%	12%

Fonte: Elaboração Própria.

Diante disso, principalmente quando trata-se de resultados de CAD e CUAD, alguns autores, como Christ (2019), adotam o conceito de resistência potencial, já que inúmeros fatores como geometria, erros usuais de ensaio, falhas de acabamento (tanto superficial quanto de adensamento), podem fazer com que ocorra uma diminuição da resistência à compressão. As máximas resistências à compressão (resistência potencial) apresentadas pelas formulações podem ser observadas na Figura 4.4. Avaliando esse parâmetro, mais uma vez o melhor desempenho foi aquele apresentado pela composição com 8 %m de sílica ativa, que já acumula as características de maior espalhamento e maior resistência média à compressão.

Como destacado por Johari (2011), o uso da sílica ativa, dentro nos níveis ideais de substituição, tende a melhorar a trabalhabilidade dos concretos, além de aumentar a resistência à compressão em todas as idades. Assim os resultados avaliados apontaram a composição com 8 % de substituição de cimento por sílica ativa como a composição otimizada do ligante.

Figura 4.4 – Resultados de resistência potencial para formulações com diferentes teores de substituição de cimento por sílica ativa

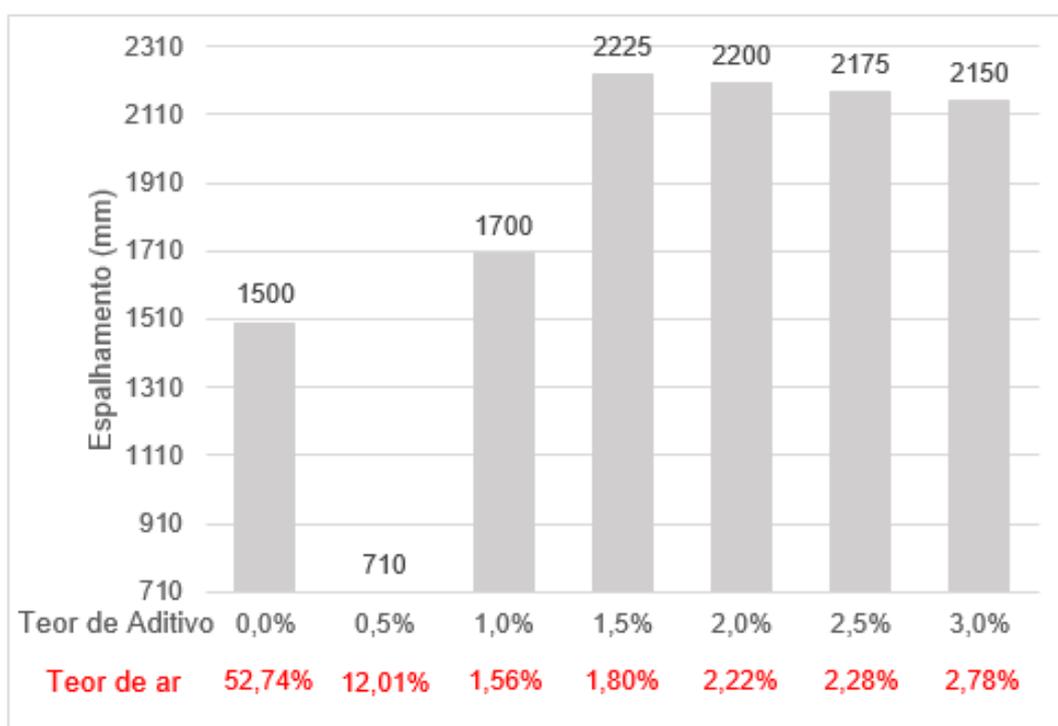


Fonte: Elaboração Própria.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SATURAÇÃO DO ADITIVO

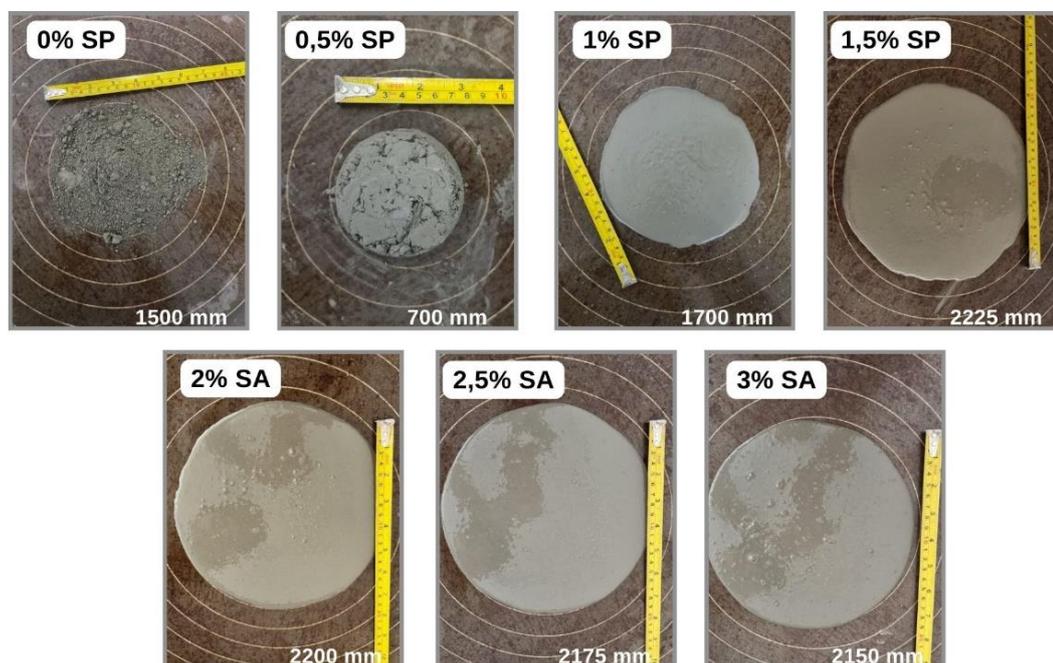
Para determinar o teor de saturação do aditivo, deve ser analisada a trabalhabilidade, através do diâmetro da amostra no ensaio de mesa de espalhamento. A Figura 4.5 apresenta esses resultados, bem como o do teor de ar incorporado. A Figura 4.6 permite a avaliação visual da estabilidade das misturas com diferentes teores de aditivo superplastificante (SP).

Figura 4.5 – Resultados de diâmetro de espalhamento e teor de ar incorporado para formulações com diferentes teores de aditivo superplastificante



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.6 - Registro fotográfico do espalhamento de formulações com diferentes teores de aditivo superplastificante



Fonte: Elaboração Própria.

A formulação sem a adição de superplastificante (0,0% SP), como pode ser verificado na Figura 4.6, colapsou devido à falta de coesão entre as partículas, enquanto o teor de 0,5 % de superplastificante não foi suficiente para dar fluidez a mistura.

Pode-se ver que a partir de 1,5 % de dosagem de superplastificante não houve um aumento na trabalhabilidade da pasta de cimento, mesmo com o aumento da dosagem. Adicionalmente, o teor de 1,5 % de aditivo resultou no segundo menor valor de ar incorporado, o que refletiria num melhor desempenho mecânico. Isso confirma a escolha de 1,5 % de aditivo como teor ótimo para a composição otimizada. Nas formulações com maiores teores de superplastificante foi possível identificar exsudação.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE E TEOR DE AGREGADOS

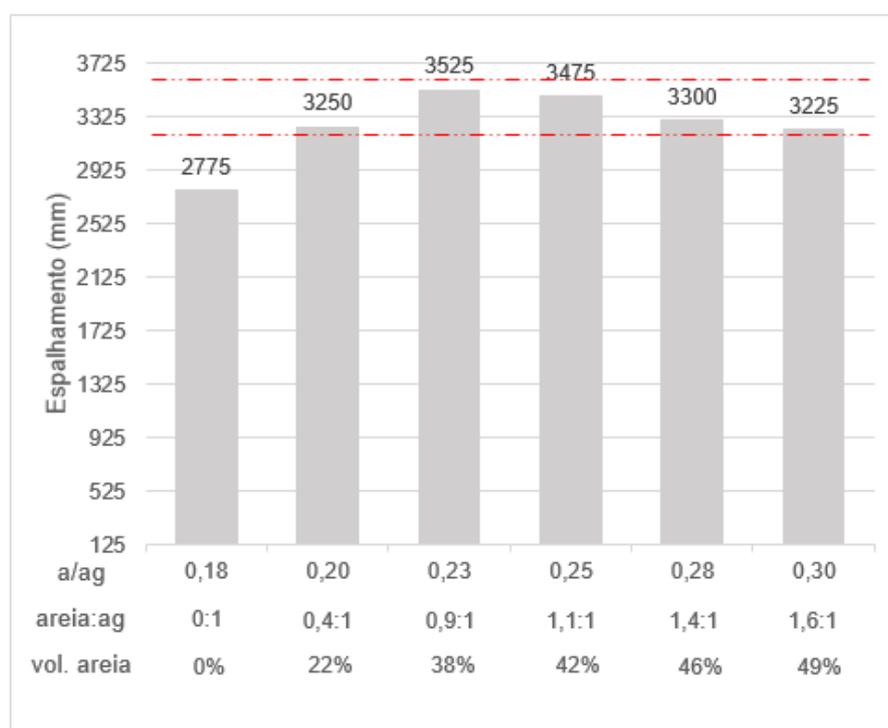
A Figura 4.7 e a Figura 4.8 apresentam os resultados de espalhamento das misturas em função da relação água/aglomerante ( $a/ag$ ) e relação areia/aglomerante,

enquanto a Figura 4.9 apresenta o teor de areia (relação areia/aglomerante) e a relação água/aglomerante empregadas em cada uma das misturas para atingir a faixa de espalhamento desejada (320-360 mm).

Apesar da composição com relação a/ag 0,18 ter a proporção de cimento/sílica ativa e teor de aditivo otimizados, esta não atingiu a faixa de espalhamento desejada mesmo sem a incorporação de areia. Assim, para este conjunto de materiais, não foi possível produzir misturas autonivelantes com relação a/ag igual a 0,18 ou inferior.

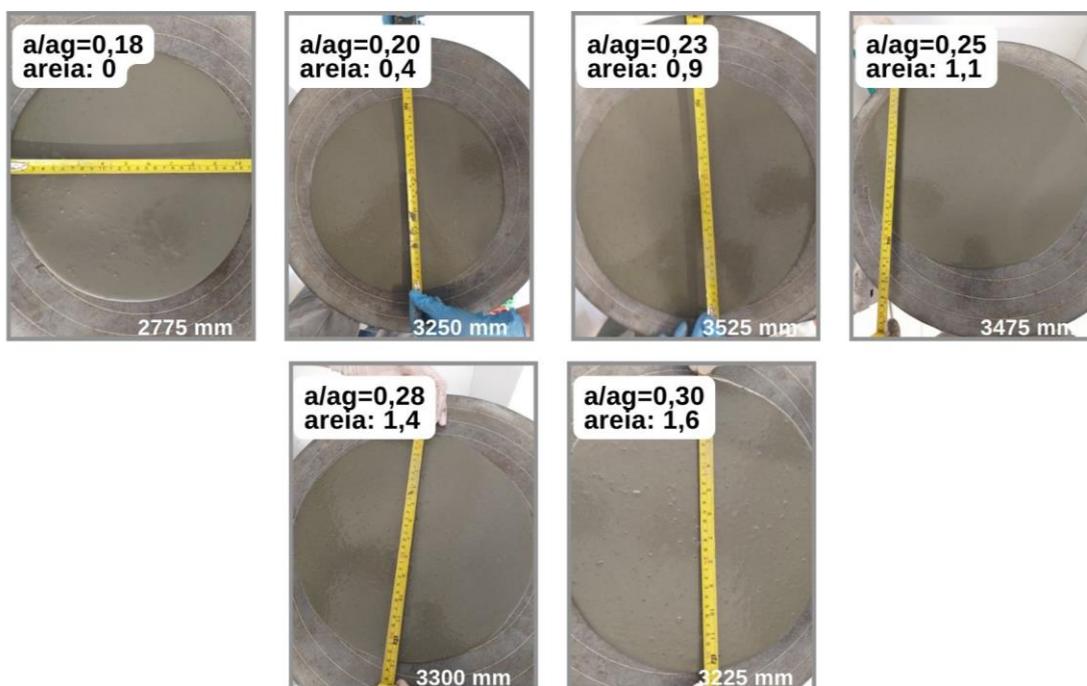
Referente à relação a/ag vs. teor de areia, nota-se que foi possível incorporar uma maior quantidade de agregado (areia) à medida que a relação a/ag aumentou. Uma maior relação a/ag resulta em uma maior quantidade de água disponível para lubrificar a mistura e, conseqüentemente, leva à uma maior fluidez. Contudo, a adição de maiores tores de agregado resulta no aumento da área superficial de partículas, as quais irão adsorver parte da água e conseqüentemente reduzir a fluidez. Assim, o efeito negativo na fluidez causado pela adição de maiores teores de areia é compensado pelo efeito positivo causado pela maior relação a/ag, possibilitando manter um mesmo espalhamento para as amostras (dentro do intervalo estabelecido).

Figura 4.7 – Resultados de diâmetro de espalhamento para formulações com diferentes relações a/ag e areia/ag



Fonte: Elaboração Própria.

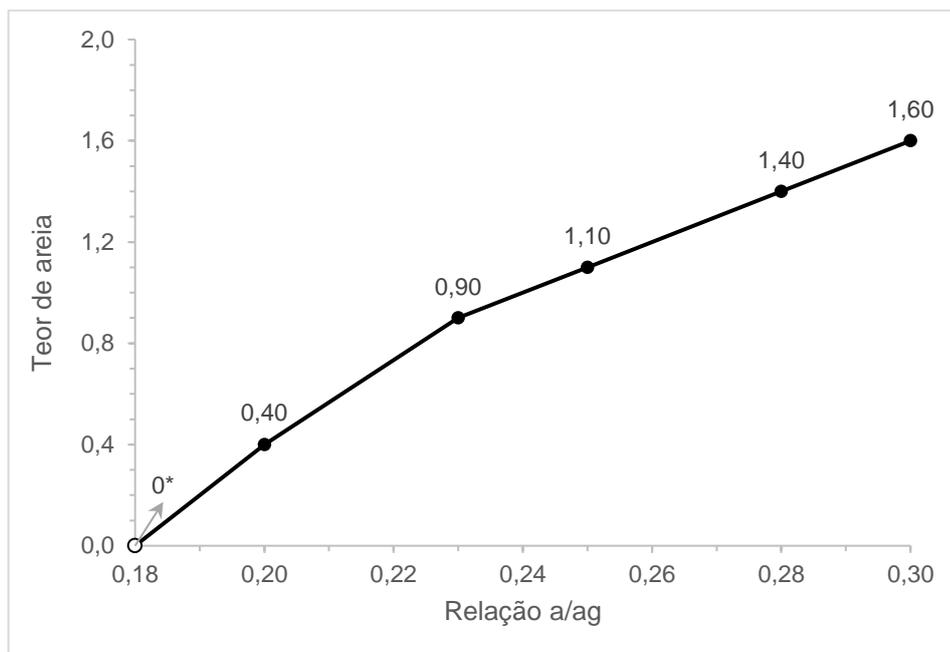
Figura 4.8 – Registro fotográfico do espalhamento para formulações com diferentes relações  $a/ag$  e areia/ $ag$



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.9 – Relação  $a/ag$  x teor de areia para atingir a consistência alvo (diâmetro de espalhamento).

Obs.: \* mistura não é autonivelante



Fonte: Elaboração Própria.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 3 e aos 28 dias, para avaliar o impacto das variações na relação água/aglomerante no desenvolvimento das resistências. A Figura 4.10 ilustra os resultados de resistência à compressão média e desvio padrão (barras de erro), juntamente com o teor de ar incorporado, para as duas idades avaliadas. O número de amostras não permitiu fazer uma análise estatística confiável, porém pode-se discutir a tendência dos comportamentos tendo como base os valores médios e a dispersão dos resultados.

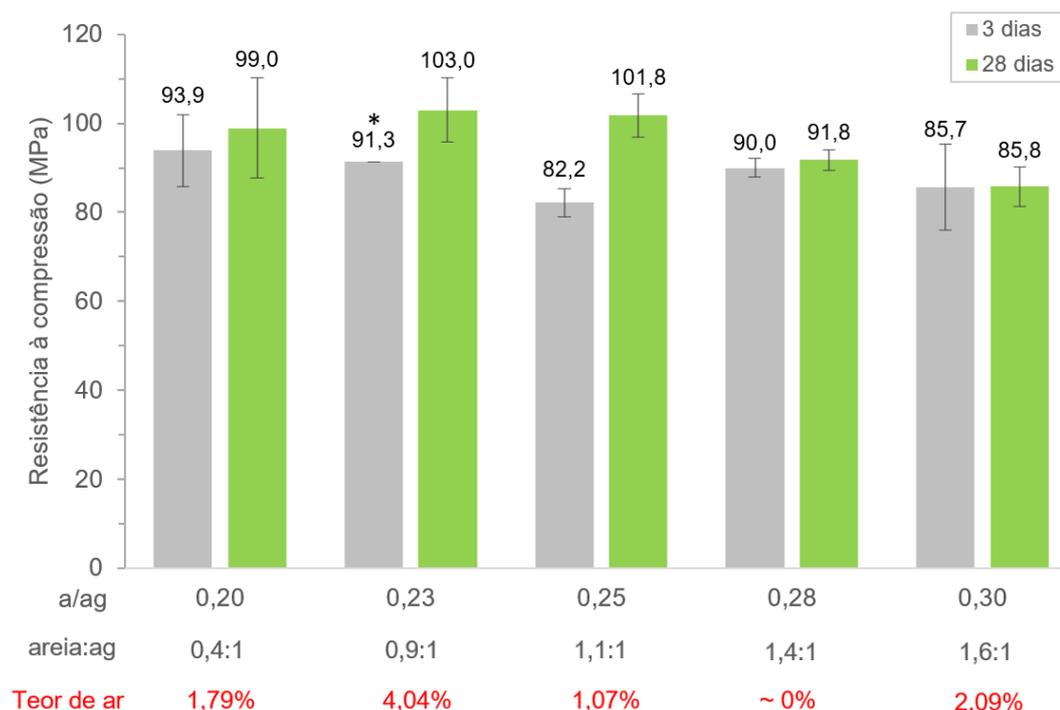
As formulações com relação a/ag 0,20 e 0,23 apresentaram as maiores resistências à compressão aos 3 dias, como esperado. Já aos 28 dias, as formulações com relação a/ag 0,20, 0,23 e 0,25 apresentaram resistências à compressão equivalentes, e maiores que aquelas com relação a/ag 0,28 e 0,30.

Nota-se que, no geral, não houve aumentos significativos de resistência à compressão dos 3 para os 28 dias; as exceções foram as composições com relação a/ag 0,23 (com o valor correspondente à apenas um corpo de prova para os 3 dias de idade) e 0,25. Isso pode ser explicado pela baixa disponibilidade de água dos concretos, fazendo com que nem todas as partículas de aglomerante sejam envolvidas pela água, impedindo o aumento dos produtos de hidratação, o que leva a manutenção dos valores de resistência à compressão. Adicionalmente, salienta-se que foi empregado um cimento de alta resistência inicial, sendo esperado que a maior parte do processo de hidratação ocorra já nos primeiros dias.

Por fim, quanto ao teor de ar incorporado, foram observados valores na faixa de 1 a 4 %, compatíveis com os teores de 2 a 6 % reportados por Roberti *et al.* (2021) para CADs e CUADs com relações a/ag de 0,20-0,30. A exceção foi a mistura com relação a/ag 0,28 que apresentou um valor de ar incorporado praticamente nulo; isso pode justificar uma maior resistência deste concreto aos 3 dias em comparação com à composição com relação a/ag 0,25, e equivalente às composições com relações a/ag 0,20 e 0,23.

Figura 4.10 – Resultados de resistência à compressão e teor de ar incorporado para formulações com diferentes relações a/ag e areia/ag

\* corresponde ao valor de apenas um corpo de prova.



Fonte: Elaboração Própria.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ÓTIMA – SÍNTESE DO MÉTODO DE DOSAGEM

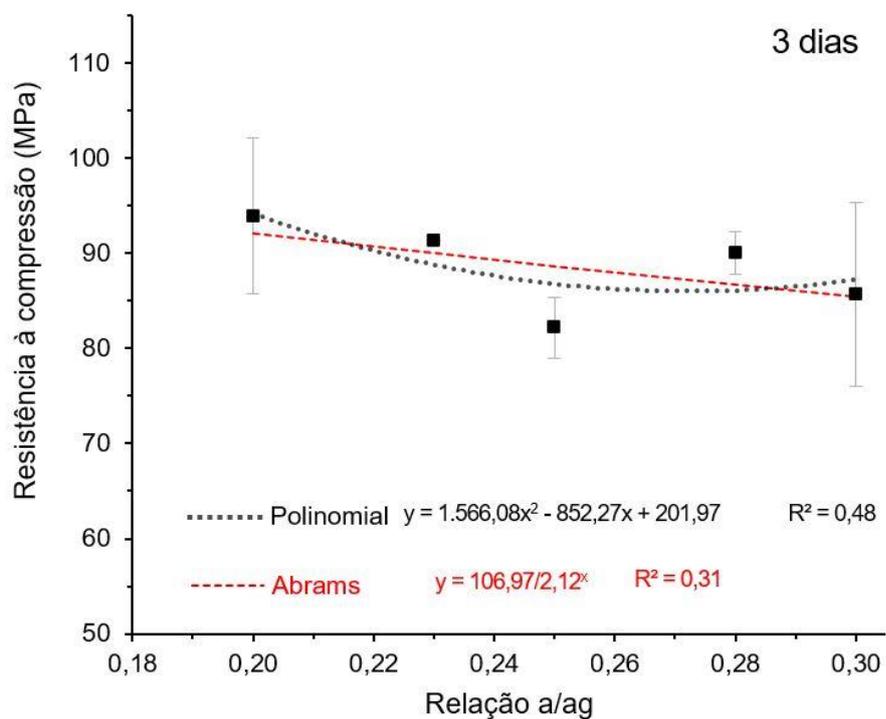
Com base na metodologia elaborada e nos resultados obtidos com as matérias-primas disponíveis, pode-se traçar uma síntese do método de dosagem proposto: o teor ótimo de sílica ativa foi 8 %, em substituição em massa de cimento; o teor de saturação do aditivo superplastificante foi 1,5 %, em relação à massa de aglomerantes. Estabelecidos esses teores, podem ser produzidos concretos de características autonivelantes com relações a/ag a partir de 0,20, desde que ajustados os teores de agregado, partindo da proporção areia/ag de 0,4. Entretanto, através deste método, não foi possível produzir concretos autonivelantes com resistências superiores a ~100 MPa aos 28 dias.

Inicialmente, buscou-se correlacionar os dados do método de dosagem proposto com o diagrama de dosagem dos concretos convencionais de cimento Portland, como pode ser verificado na Figura 4.11. A Lei de Abrams correlaciona a resistência à

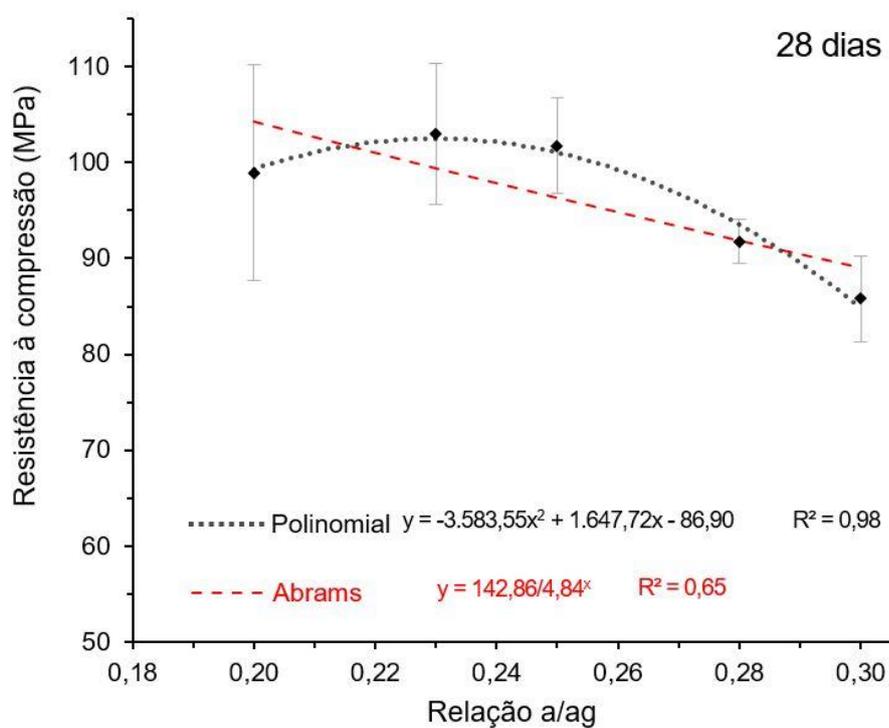
compressão com a relação água/cimento. Dentro do campo dos concretos convencionais, a resistência física do concreto endurecido varia na razão inversa da relação a/c. O gráfico a/ag *versus* resistência à compressão não se ajustou bem pela Lei de Abrams para ambas as idades, como verificado na Figura 4.11, com coeficientes de correlação  $R^2$  de 0,31-0,65. Por sua vez, um ajuste polinomial (de segundo grau) resultou em melhores correlações. Salienta-se que polinômios de graus superiores não levaram a coeficientes de correlação significativamente melhores, optando-se assim pelo polinômio de segundo grau.

Dessa forma, constatou-se que, para a abordagem proposta neste método, com relações a/ag mais baixas e teores de agregado diferentes, a Lei de Abrams não se mostrou adequada para ajustar os dados de resistência à compressão vs relação a/ag. Por mais que a relação a/ag seja um fator impactante na resistência a compressão, quando há uma grande diferença nos teores de agregado entre as amostras avaliadas, outros fatores também impactam no desenvolvimento das propriedades mecânicas. Como a zona de transição, que representa um ponto de fraqueza, que cresce à medida que se aumenta o teor de agregado. O espalhamento, mesmo que limitado a um intervalo, apresenta diferenças de trabalhabilidade, que podem contribuir para a não conformidade com a Lei de Abrams.

Figura 4.11 – Ajustes dos resultados de resistência à compressão em função da relação a/ag para:



(a) 3 dias

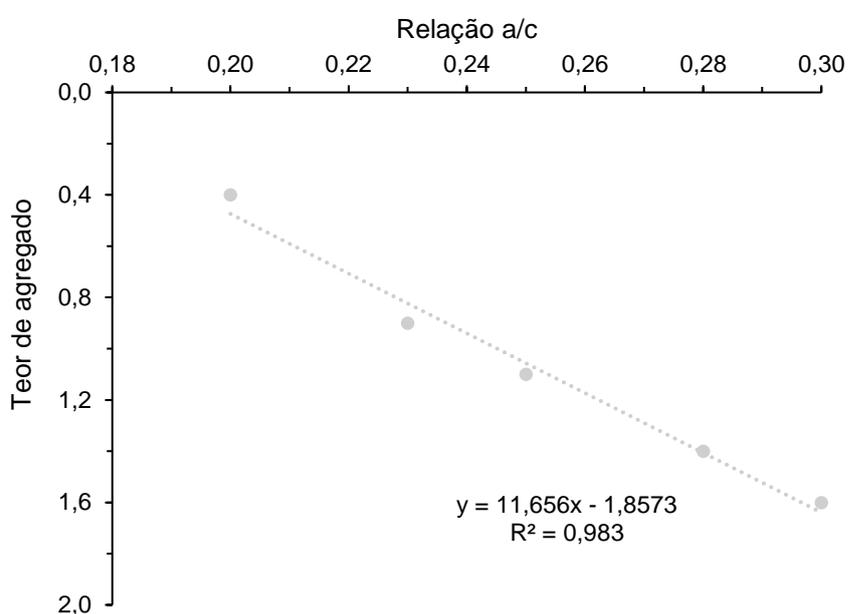


(b) 28 dias

Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, a Figura 4.12 apresenta a correlação entre a relação a/ag e o teor de agregado (m). A existência de uma correlação linear entre as variáveis, com  $R^2$  de 0,98, demonstra que a Lei de Lyse tem uma aproximação satisfatória e pode ser empregada também para CADs e CUADs autonivelantes. Isso significa que, para o conjunto de materiais empregado, a faixa de consistência depende da relação água/materiais secos.

Figura 4.12 – Ajuste dos dados de teor de agregado versus relação a/ag em relação à Lei de Lyse



Fonte: Elaboração Própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concretos de alto e ultra-alto desempenho (CAD e CUAD, respectivamente) são compósitos cimentícios que devem apresentar, além de resistência mecânica e durabilidade elevadas, características adequadas no estado fresco. Este trabalho propôs um método de dosagem de CAD e CUAD autonivelantes, a partir de Cimento Portland, baseado em conceitos de empacotamento úmido e ensaios empíricos. Esta abordagem permite considerar – de forma empírica – fatores como a forma irregular e a polidispersão do tamanho de partículas, e a presença de interações superficiais entre partículas, que são difíceis de implementar com precisão em métodos teóricos existentes na literatura.

O método proposto foi dividido em 4 etapas: (i) determinação da composição do ligante, onde a proporção (em massa) entre cimento e sílica ativa foi otimizada em termos de fluidez e resistência mecânica; (ii) determinação do teor de saturação do aditivo, onde o teor de aditivo foi definido já para o sistema cimento + sílica ativa otimizado em (i); (iii) Determinação da relação água/aglomerante (a/ag) e teor de agregado, onde a quantidade de agregado foi determinada para cada relação a/ag, a fim de atingir uma consistência pré-definida; e (iv) determinação da composição ótima, em função dos resultados obtidos em (i)-(iii).

Com o conjunto de materiais utilizado, este método permitiu produzir concretos autonivelantes (com espalhamentos de 320-360 mm na mesa de consistência sem a aplicação de golpes), com resistências à compressão na faixa de 80-100 MPa aos 3 e 28 dias. A mistura otimizada para estas características foi composta por 8 % de sílica ativa em substituição ao Cimento Portland (em massa) e 1,5 % de aditivo superplastificante, em relação à massa de aglomerantes. A partir de relações a/ag de 0,20 e uma proporção areia/ag de 0,4 é possível produzir concretos com características autonivelantes.

Destacando-se a composição com relação a/ag de 0,23 e proporção areia/ag de 0,9, que dentre as formulações testadas apresenta o maior espalhamento e bom desempenho mecânico desde as idades iniciais, atingindo 103 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Ressalta-se que a Lei de Abrams não se mostrou adequada para ajustar os dados de resistência à compressão vs relação a/ag para CADs/CUADs

autonivelantes, indicando a necessidade de desenvolvimento métodos específicos de dosagem para estes tipos de concreto.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista lacunas não avaliadas no âmbito deste trabalho e sabendo-se da importância do desenvolvimento de métodos de dosagem confiáveis para potencializar aplicação em grande escala de CAD e CUAD, ficam como sugestões:

- Avaliar outros agregados, com diferente origem e morfologia, e comparar seu impacto na trabalhabilidade e resistência mecânica;
- Otimizar o empacotamento por meio do uso de agregados finos de mais de uma granulometria, testando diferentes proporções entre os agregados;
- Avaliar o desempenho mecânico em idades mais avançadas;
- Avaliar a influência das condições de cura no desenvolvimento da resistência mecânica;
- Avaliar a porosidade e retração dos concretos desenvolvidos a partir da composição ótima;
- Avaliar o efeito de utilizar partículas de reforço de diferente natureza/origem, assim como cimentos customizados com melhor desempenho mecânico (diferentes teores de clínquer, de fases e finura);
- Comparar as resistências atingidas através de um método teórico com o procedimento empírico proposto neste trabalho;
- Empregar o método de dosagem para atingir desempenho mecânico de um CUAD, adotando menor espalhamento.

## ANEXO A

Tabela A.0.1 – Composição mineralógica do cimento usado, XRD-Rietveld QPA.

Fase	Código ICSD	Conteúdo (m.%)
C <sub>3</sub> S-M3	94742	33,62
C <sub>3</sub> S-M1	*	13,13
C <sub>2</sub> S- $\alpha'$ H	81097	0,22
$\beta$ -C <sub>2</sub> S	81096	8,34
C <sub>3</sub> A-cúbico	1841	2,50
C <sub>3</sub> A-ortorrômbico	1880	0,34
C <sub>4</sub> AF	9197	6,45
Aftalita	26014	0,45
Langbeinita	40989	0,31
Singenita	157072	1,79
Periclásio	9863	0,84
Portlandita	15471	1,46
Cal	75786	0,77
Gipsita	151692	3,09
Bassanita	69060	0,33
Calcita	73446	4,93
Dolomita	10404	0,56
Quartzo	174	0,28
Etringita	155395	-
ACn **	-	20,60
Rwp (%)	-	5,14

\* Não disponível no ICSD; estrutura de [DE NOIRFONTAINE, 2012]. \*\* ACn: amorfo e cristalino não quantificado, determinado pelo método padrão externo.

Fonte: (DE MATOS et al., 2022).

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 271–295, 2016.
- ABDULKAREEM, O. M. et al. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235–246, 2018.
- AİTCIN, P.C. Binders for durable and sustainable concrete. Abingdon: Taylor & Francis, **Modern Concrete Technology**, v. 16, 2008.
- AİTCIN, P.C. Concreto de alto desempenho. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000.
- ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Colloid & Polymer Science**, [s.l.], v. 50, n° 3, p. 217–228, 1930.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Composição granulométrica dos agregados**. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-3: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Defines High-Performance Concrete**. Henry G. Russell, 1999.
- 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.
- CHRIST, R. **PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC)**. [s.l.] Universidade do Vale do Rio dos

Sinos - UNISINOS, 2019.

CONSTRUCAOCIVILPET. Concreto de ultra-alto-desempenho. Disponível em: <<https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/2012/11/21/concreto-de-ultra-alto-desempenho/>>.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Review: Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil (Review: Concepts of particle dispe. **Cerâmica**, v. 55, n. March 2009, p. 18–32, 2009.

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. A method for proportioning high-strength concrete mixtures. **Cement, Concrete and Aggregates**, v.12, p. 47-52, 1990.

DE MATOS, P. et al. Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Fresh Performance of 3D-Printed Cementitious Materials. **Materials**, v. 15, n. 11, p. 1–18, 2022.

DE MATOS, P. R. et al. Eco-friendly ultra-high performance cement pastes produced with quarry wastes as alternative fillers. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122308, 2020.

DE MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941–955, 2019.

DE NOIRFONTAINE, M. N.; COURTIAL, M.; DUNSTETTER, F.; GASECKI, G.; SIGNES-FREHEL, M. Tricalcium silicate Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> superstructure analysis: a route towards the structure of the *M*<sub>1</sub> polymorph, vol. 227, no. 2, pp. 102-112, 2012.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle-packing phenomena and their application in materials processing. **MRS Bulletin**, v. 22, n. 12, p. 19–23, 1997.

FENNIS-HUIJBEN, S. A. A. M. Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization. **Pasaia**, [s.l.], nº January 2010, p. 20110, 2011.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. **ASCE J. Transport**, [s.l.], v. 59, p. 67–143, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. [s.l.] Springer US, 1994.

GHAFAARI, E. et al. Effect of supplementary cementitious materials on autogenous

- shrinkage of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 43–48, 2016.
- HE, Z. HAI; DU, S. GUI; CHEN, D. Microstructure of ultra high performance concrete containing lithium slag. **Journal of Hazardous Materials**, v. 353, n. November 2017, p. 35–43, 2018.
- HELLMANN, S. et al. Journal Pre-proof. 2023.
- KIM, H.; KOH, T.; PYO, S. Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 153–160, 2016.
- LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 33–42, 2013.
- 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.
- MANE, R.; CHAPHALKAR, N.; PATIL, S. Use of Modified Andreassen Curve in Optimizing Mixes. **Trends in Sciences**, v. 19, n. 14, p. 1–14, 2022.
- MEGAT JOHARI, M. A. et al. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2639–2648, 2011.
- MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. **Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 10 fev. 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. [s.l: s.n.].
- MEHTA, P. K.; AİTCIN, J.-C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement & Concrete Aggregates**, Philadelphia: American Society for Testing Materials, p. 70-78, winter 1990.
- MOONEY M., The Viscosity of Concentrated Suspensions of Spherical Particles. **Journal of Colloids**, Vol.6, p. 162, 1951.
- NAWY, E. G. Fundamentals of high strength high performance concrete. London: **Longman Group Limited**, p. 340, 1996.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting high performance concrete. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, v. 6, n. 4, p. 269–270, 1996.

- O'REILLY, V. Método de dosagem de concreto de elevado desempenho. São Paulo: PINI, 1998.
- RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.
- ROBERTI, F. et al. High- and ultra-high-performance concrete produced with sulfate-resisting cement and steel microfiber: Autogenous shrinkage, fresh-state, mechanical properties and microstructure characterization. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121092, 2021.
- ROUSSEL, N. et al. Steady state flow of cement suspensions : A micromechanical state of the art. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 77–84, 2010.
- SADRMOMTAZI, A.; TAJASOSI, S.; TAHMOURESI, B. Effect of materials proportion on rheology and mechanical strength and microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1103–1112, 2018.
- SHI, C.; MO, Y. L. **High-Performance Construction Materials**. [s.l: s.n.].
- SONG, Q. et al. Optimization of fibre orientation and distribution for a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Experiments and mechanism analysis. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 8–19, 2018.
- SUN, M.; BENNETT, T.; VISINTIN, P. Plastic and early-age shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): Experimental study of the effect of water to binder ratios, silica fume dosages under controlled curing conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. December 2021, p. e00948, 2022.
- TORRALES CARBONARI, B. M. Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones. Barcelona, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, p. 174, 1996.
- TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. [s.l: s.n.].
- TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- ULLAH, R. et al. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. **Materials**, v. 15, n. 12, p. 1–27, 2022.
- VAN DER VURST, F. et al. Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 190–201, 2017.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials : part 1 — measurement using a wet packing method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, p. 689–701, 2008.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, n. March, p. 107021, 2019.

YANG, S. L. et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2291–2298, 2009.

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, 20 set. 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015.