ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

# Obtenção de UHPC utilizando sílica e RBMG

## Production of UHPC with silica and MGW

**Priscila de Souza Maciel**
Universidade Federal de Alagoas/Instituto Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | priscila.maciel@ifal.edu.br
**Maria Luiza Malta da Rocha Silva**
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | maria.rocha@ctec.ufal.br
**Celiane Mendes da Silva**
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | celiane.silva@ctec.ufal.br
**Júlio César Martiniano Leite**
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | julio.leite@ctec.ufal.br
**Paulo Cesar Correia Gomes**
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | pgomes@ctec.ufal.br

**Resumo**

O concreto de ultra alto desempenho (ultra-high performance concrete - UHPC) é um concreto especial de alta durabilidade que se destaca por sua resistência à compressão superior a 120 MPa. Isso se deve à sua estrutura densa e baixa porosidade. O uso de sílica e fíler (Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito - RBMG) visa evitar lacunas entre as curvas granulométricas dos componentes, melhorando suas propriedades. Este trabalho estudou dosagens de UHPC, com variação da porcentagem de superplastificante e sílica e uso de RBMG, para atingir os parâmetros mínimos normativos de classificação do UHPC aos 56 dias. No estado fresco foi estudado o espalhamento, e no endurecido, a resistência à compressão e à tração na flexão. Conclui-se que o melhor desempenho foi do traço com 50% de RBMG, 20% de sílica e 1,5% de superplastificante, que exibiu valores mínimos de espalhamento, resistência à tração e à compressão aos 56 dias, atingindo 130 MPa à compressão aos 91 dias, notando-se o potencial do uso da sílica e do RBMG em UHPCs.

Palavras-chave: Concreto de ultra alto desempenho. Sílica ativa. RBMG. Aditivo superplastificante.

**Abstract**

*Ultra-high performance concrete (UHPC) is a special concrete known for its high durability, distinguished by its compressive strength exceeding 120 MPa. This is attributed to its dense structure and low porosity. The use of silica and filler (Marble and Granite Waste - MGW) aims to fill gaps between the particle size distributions of the components, thereby enhancing its*

Como citar:
MACIEL et al. Obtenção de UHPC utilizando sílica e RBMG. ENTAC2024. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

*properties. This study investigated UHPC mixtures, varying the percentage of superplasticizer and silica, and incorporating MGW to achieve the minimum regulatory parameters for UHPC classification at 56 days. In the fresh state, the spread was studied, while compressive and flexural tensile strengths were examined in the hardened state. It was concluded that the best performance was observed in the mixture with 50% MGW, 20% silica and 1.5% superplasticizer, exhibiting minimum spread, tensile strength and compression strength at 56 days, reaching 130 MPa compressive strength at 91 days, highlighting the potential of silica and MGW in UHPCs.*

*Keywords: Ultra-High Performance Concrete. Silica. MGW. Superplasticizer aditive.*

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de concretos de alto desempenho vem das limitações das misturas convencionais. O concreto de ultra alto desempenho (ultra high performance concrete – UHPC) é uma tecnologia que vem ganhando espaço no mercado devido a suas características aprimoradas. Destacam-se a elevada resistência à compressão, excelente durabilidade, trabalhabilidade adequada e boa resistência à tração [1].

As normas ASTM C 1856M – 17 (EUA) e NF P 18-710 (França) trazem os parâmetros para estabelecer o UHPC [2,3]. Apresentam resistência à compressão superior a 120 MPa, resistência à tração superior a 6 MPa com 28 dias de cura, mantendo boa trabalhabilidade, com espalhamento mínimo de 270mm. Ainda não há normas brasileiras específicas para o material. Para apresentar essas propriedades é fundamental que o UHPC possua baixo relação água/aglomerante (a/agl), elevado índice de superplastificante e utilização de misturadores de alta velocidade, além de matriz cimentícia densa [4,5].

A densidade do UHPC é possível devido à granulometria diversa apresentada em seus materiais de composição, composto usualmente por cimento Portland, sílica, areia fina, com diâmetro inferior a 600µm, dentre outros fílers, que promovem o efeito de empacotamento da mistura [6]. O empacotamento consiste na dosagem com redução dos índices de vazios. O processo promove menores impactos no efeito afastamento (loosening effect) que faz com que grãos de mesma dimensão se separem e formem espaços vazios indesejados [7].

Na dosagem do UHPC a relação a/agl é baixa, resultando em alta resistência à compressão. Entretanto a baixa quantidade de água faz com que o cimento não hidrate completamente e parte dele atuando como fíler [1]. A adição de sílica ativa, com elevado teor de óxido de silício (SiO2), promove a reação com hidróxido de cálcio (Ca(OH)2) na presença de água, formando silicatos de cálcio secundário (C-S-H). Assim, além de melhorar o empacotamento granular, há propriedades mecânicas do UHPC [1].

Também é possível utilizar o resíduo do beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e diversificar a granulometria do UHPC. Seu uso visa auxiliar no preenchimento de vazios na matriz do UHPC, aumentando a resistência, apresentando caráter sustentável, uma vez que é um resíduo que não possui destinação adequada [8,9].

Este trabalho tem o objetivo de estudar dosagens de UHPC com a adição de sílica e RBMG, assim como as metodologias de mistura, visando alcançar os parâmetros mínimos, à idade de 56 dias, que permitem a classificação do material obtido como UHPC: mínimo de 270mm de espalhamento para o ensaio em estado fresco, 6 MPa de resistência à tração na flexão e 120 MPa de resistência à compressão, para os ensaios no estado endurecido.

## MATERIAIS

Os componentes utilizados na produção do UHPC foram baseados na literatura. O cimento selecionado foi o CP-V – ARIMAX que tem alta resistência inicial, possuindo uma variação de diâmetro de 0,2µm até 60µm e sendo de fácil aquisição na região.

A areia utilizada foi obtida em depósito de materiais, sendo peneirada na primeira fase, na peneira de 2,36mm, e na fase final, a 600µm. Foi estudada quantidade de matéria orgânica, por comparação entre a solução ensaiada e a padrão[10], concluindo-se que a areia selecionada não possui presença significativa de matéria orgânica. O teor de material pulverulento foi de 5% [11], a densidade média em condição seca igual a 2,47g/cm³ e em condição saturado superfície seca 2,48g/cm³[12]. A absorção de água foi de 0,42% [12] e teor de argila e friáveis de 12,8% [13].

O RBMG utilizado foi adquirido mediante doação de empresa da região, sendo submetido a pré-secagem ao sol e, em seguida, apiloado manualmente e peneiramento a 600µm. A granulometria do material varia de 3,39µm a 69µm. Segundo fluorescência de raio-x o material utilizado é composto predominantemente por $SiO_2$(66,52%), $Al_2O_3$(13,05%), $Fe_2O_3$(8,01%), $K_2O$(7,06%) e CaO (4,06%).

A sílica ativa escolhida é proveniente da fabricação do ferro silício, possuindo como características alto valor de superfície específica, entre 15000m²/kg e 30000m²/kg, e grande quantidade de dióxido de silício, com valor mínimo de 85%. A granulometria da sílica variou de 28,36µm a 305,87µm.

Quanto ao superplastificante, inicialmente utilizou-se um superplastificante sintético a base de polímeros policarboxilato (SA). Porém, após a obtenção dos primeiros resultados, optou-se por um superplastificante a base de éter policarboxilato (SB). SB possui como características: densidade entre 1,067g/cm³ e 1,107g/cm³, teor de sólidos entre 28,5% e 31,5% e pH entre 5 e 7.

## MÉTODO

O estudo foi dividido em três fases (Fase I, Fase II e Fase III). As dosagens base estão apresentadas na Tabela 1 e as adições na Tabela 2. Na Fase I, optou-se por adição por substituição, enquanto nas Fases II e III por adição por adição, visando reduzir a/agl, para melhoria da resistência à compressão [14]. A sílica foi adicionada em relação ao cimento, o RBMG à areia e o superplastificante aos ligantes (cimento + sílica). Por exemplo, a composição RBMG30_S10_SA3.5_0.25 tem 30% de RBMG, 10% de sílica ativa, 3,5% de superplastificante tipo SA e relação a/agl de 0,25.

**Tabela 1: Dosagens base**

| Dosagem base - Fase I | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Cimento (kg/m³) | Sílica (kg/m³) | Areia (kg/m³) | RBMG (kg/m³) | sp (%) | a/agl |
| 384,92 | VA | 448,80 | VA | VA | VA |
| **Dosagem base - Fase II** | | | | | |
| Cimento (kg/m³) | Sílica (kg/m³) | Areia (kg/m³) | RBMG (kg/m³) | sp (%) | a/agl |
| 571,79 | VA | 686,14 | 343,07 | VA | VA |
| **Dosagem final - Fase III** | | | | | |
| Cimento (kg/m³) | Sílica (kg/m³) | Areia (kg/m³) | RBMG (kg/m³) | sp (%) | a/agl |
| 571,79 | 114,36 | 686,14 | 343,07 | 1,50 | 0,25 |

Anotação - VA: variável segundo Tabela 2

Fonte: os autores.

**Tabela 2: Dosagens produzidas de UHPC**

| Fase | Nomenclatura | % sp | Sílica | RBMG | a/agl |
|---|---|---|---|---|---|
| Fase I (Método de mistura 1) | RBMG30_SA0.5_0.3 | 0,50% | - | 30% | 0,3 |
| | RBMG30_SA0.62_0.3 | 0,62% | - | 30% | 0,3 |
| | RBMG30_SA1.0_0.3 | 1,00% | - | 30% | 0,3 |
| | S10_SA1.0_0.3 | 1,00% | 10% | - | 0,3 |
| | S15_SA0.62_0.3 | 0,62% | 15% | - | 0,3 |
| | S15_SA1.0_0.3 | 1,00% | 15% | - | 0,3 |
| | S20_SA1.0_0.3 | 1,00% | 20% | - | 0,3 |
| | RBMG30_S10_SA1.0_0.3 | 1,00% | 10% | 30% | 0,3 |
| | RBMG30_S15_SA1.0_0.3 | 1,00% | 15% | 30% | 0,3 |
| | RBMG30_S20_SA1.0_0.3 | 1,00% | 20% | 30% | 0,3 |
| | RBMG30_S10_SA3.0_0.25 | 3,00% | 10% | 30% | 0,25 |
| | RBMG30_S10_SA3.5_0.25 | 3,50% | 10% | 30% | 0,25 |
| | RBMG30_S10_SB3.0_0.25 | 3,00% | 10% | 30% | 0,25 |
| Fase II (Método de mistura 1) | RBMG50_S15_SB1.0_0.25 | 1,00% | 15% | 50% | 0,25 |
| | RBMG50_S15_SB1.5_0.25 | 1,50% | 15% | 50% | 0,25 |
| | RBMG50_S15_SB2.0_0.25 | 2,00% | 15% | 50% | 0,25 |
| | RBMG50_S20_SB1.0_0.25 | 1,00% | 20% | 50% | 0,25 |
| | RBMG50_S20_SB1.5_0.25 | 1,50% | 20% | 50% | 0,25 |
| | RBMG50_S20_SB2.0_0.25 | 2,00% | 20% | 50% | 0,25 |
| Fase III (Método de mistura 2) | RBMG50_S20_SB1.5_0.25 | 1,50% | 20% | 50% | 0,25 |

Fonte: os autores.

O Método de mistura 1 foi utilizado nas Fases I e II e é apresentado no Quadro 1.

**Quadro 1: Método de mistura 1 - Fases I e II de produção do UHPC**

| Método | Ação | Tempo(s) | Velocidade |
|---|---|---|---|
| Pasta (Misturador de baixa rotação) | Mistura inicial de 25% da água + ligantes | 60 | 1000rpm |
| | Pausa para limpeza | 30 | - |
| | Mistura dos componentes | 60 | 1000rpm |
| | Pausa para limpeza e adição de 25% de água + 50% do superplastificante | 30 | - |
| | Mistura de todos os componentes da pasta | 120 | 1000rpm |
| Argamassa (Argamassadeira) | Homogeneização agregados + água de absorção | 90 | 60rpm |
| | Mistura pasta + agregados | 60 | 135rpm |
| | Pausa para limpeza e adição de 50% do aditivo e restante da água | 30 | - |
| | Mistura dos componentes | 210 | 135rpm |
| | Pausa para limpeza | 30 | - |
| | Mistura dos componentes | 120 | 135rpm |

Fonte: os autores.

O processo de mistura do Método 2 foi adotado na Fase III. As especificações do método estão no Quadro 2. Os equipamentos utilizados são apresentados na Figura 1.

**Quadro 2: Método de mistura 2 - Fase III de produção do UHPC**

| Método | Ação | Tempo (s) | Velocidade |
|---|---|---|---|
| Pasta (Misturador de alta rotação) | Apenas os ligantes | 30 | 2000rpm |
| | Mistura inicial de 50% da água + 50% do superplastificante +ligantes | 180 | 2000rpm |
| | Pausas para limpeza | 30 | 2000rpm |
| Argamassa (Argamassadeira) | Homogeneização agregados + água de absorção | 60 | 60rpm |
| | Mistura inicial pasta + agregados | 60 | 60rpm |
| | Mistura pasta + agregados | 60 | 135rpm |
| | Pausa para limpeza e adição de 50% do superplastificante e restante da água | 30 | - |
| | Mistura dos componentes | 390 | 135rpm |

Fonte: os autores.

**Figura 1: Equipamento para mistura do UHPC**



Nota: Misturador de baixa rotação Método de mistura 1 (à esquerda). Misturador de alta rotação Método de mistura 2 (ao centro). Argamassadeira (à direita). Fonte: os autores.

Para a análise no estado fresco, foi medido o abatimento [15] usando uma mesa de consistência. O material foi inserido em três camadas com 15, 10 e 5 golpes em um cone de 130 ± 2 mm na base menor, 200 ± 2 mm de altura e na base maior. Após remover o cone, aplicaram-se 30 quedas em 30 segundos e mediram-se três diâmetros em pontos distintos (Figura 2).

**Figura 2: Teste de consistência**



Nota: Inserção do UHPC (à esquerda). Espalhamento antes da aplicação dos golpes (ao centro). Espalhamento após golpes (à direita). Fonte: os autores.

Nas Fases I e II, usaram-se formas prismáticas de 40x40x160 mm para análise da resistência à tração na flexão e compressão. Na Fase III, além das formas prismáticas, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm para ensaio de compressão, devido à alta variação nos valores das metades provenientes do ensaio de tração na flexão.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, utilizou-se a prensa Shimadzu (10 toneladas) a 50N/s, pelo método de 3 pontos [16]. Nas Fases I e II, as metades resultantes eram levadas à prensa Amsler (50 toneladas) para rompimento à compressão a 500N/s. Na Fase III, o ensaio foi realizado da mesma forma, porém com exemplares cilíndricos [16].

Moldou-se um corpo de prova prismático por idade nas Fases I e II, e três prismáticos e três cilíndricos na Fase III. Os concretos foram desmoldados após 24 horas e curados em solução de água e cal. As idades de estudo foram: 7, 14 e 28 dias na Fase I; 7, 28 e 56 dias na Fase II; e 28, 56 e 91 dias na Fase III.

## RESULTADOS

Inicialmente serão discutidos os resultados da adição por substituição de RBMG. O aumento de SA melhorou o espalhamento. Porém, apenas a dosagem RBMG30_SA1.0_0.3 apresentou resultado acima de 270mm (Tabela 3).

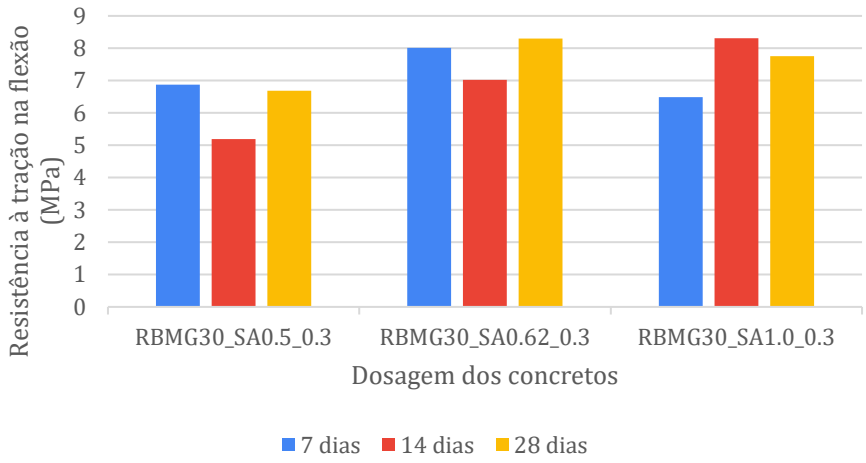
**Tabela 3: Dados obtidos para espalhamento das dosagens contendo RBMG – Fase I**

| Nomenclatura | Espalhamento médio (mm) |
|---|---|
| RBMG30_SA0.5_0.3 | 172,5 |
| RBMG30_SA0.62_0.3 | 240,0 |
| RBMG30_SA1.0_0.3 | 308,0 |

Fonte: os autores.

Para todas as dosagens com RBMG estudadas, a resistência à tração na flexão atingiu o valor mínimo (Figura 3), exceto para RBMG30_SA0.5_0.3 aos 14 dias. As dosagens com 0,62% e 1% de superplastificante mostraram maiores valores de resistência, mas o ganho não foi consistente com o aumento da idade dos corpos de prova. As incoerências podem ser devido a falhas na moldagem ou no ensaio.

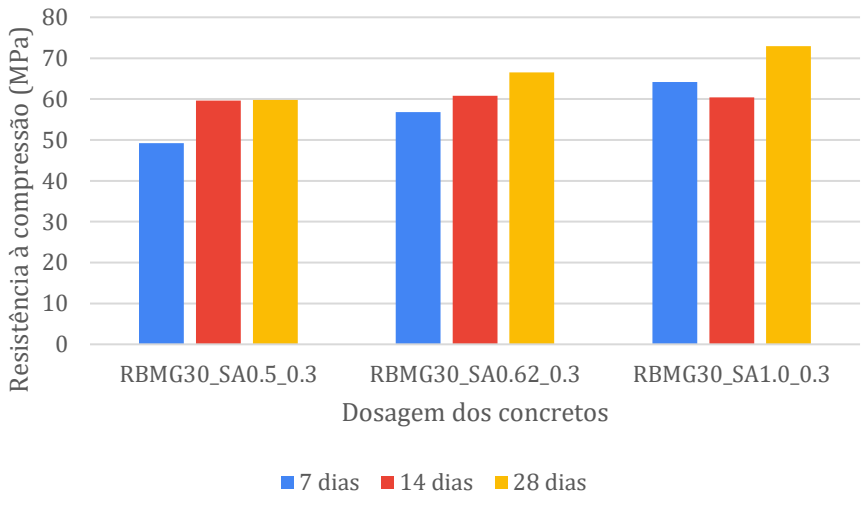
**Figura 3: Resistência à tração na flexão – RBMG – Fase I**




Fonte: os autores.

A resistência à compressão de todas as dosagens ficou bem abaixo do mínimo normativo (120 Mpa). Os valores mais altos foram observados nas dosagens com 0,62% e 1% de superplastificante (Figura 4). Portanto, para adições com sílica, não se usou a dosagem de 0,5% de superplastificante.

**Figura 4: Resistência à compressão - RBMG - Fase I**




Fonte: os autores.

Todas as dosagens apenas com sílica como adição mostraram espalhamento superior ao normativo (Tabela 4). A sílica proporciona maior fluidez ao material, mesmo com a mesma quantidade de superplastificante, devido à combinação dos policarboxilatos do superplastificante com a sílica, que favorece a dispersão da sílica e reduz a segregação dos componentes [17].

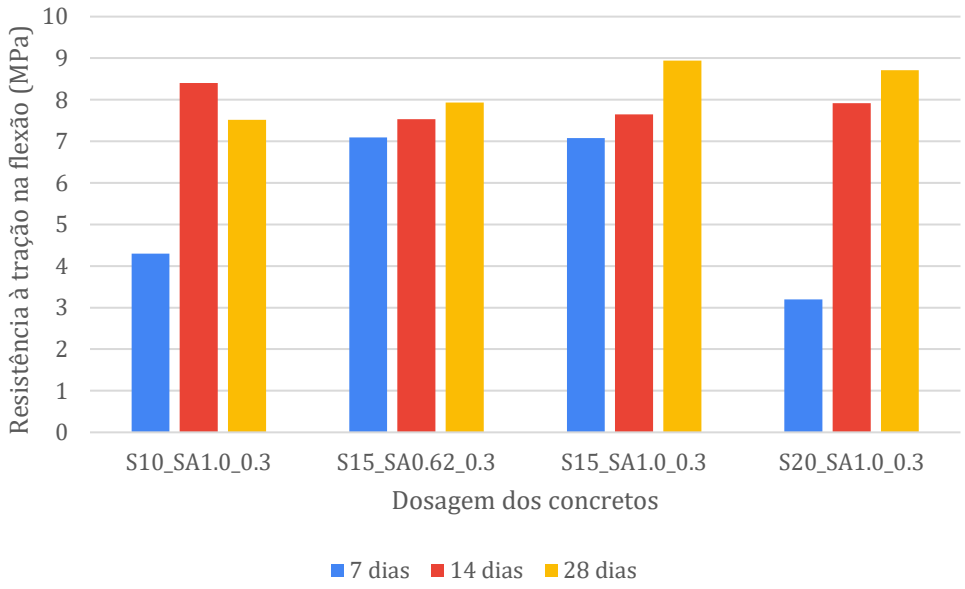
**Tabela 4: Dados obtidos para espalhamento das dosagens contendo sílica - Fase I**

| Nomenclatura | Espalhamento médio (mm) |
|---|---|
| S10_SA1.0_0.3 | 313,0 |
| S15_SA0.62_0.3 | 352,0 |
| S15_SA1.0_0.3 | 348,0 |
| S20_SA1.0_0.3 | 345,0 |

Fonte: os autores.

Quanto a resistência à tração na flexão, apenas os valores para a idade de 7 dias das dosagens S10_SA1.0_0.3 e S20_SA1.0_0.3 ficaram aquém do mínimo desejado (Figura 5). Os valores obtidos foram semelhantes às composições apenas com RBMG.

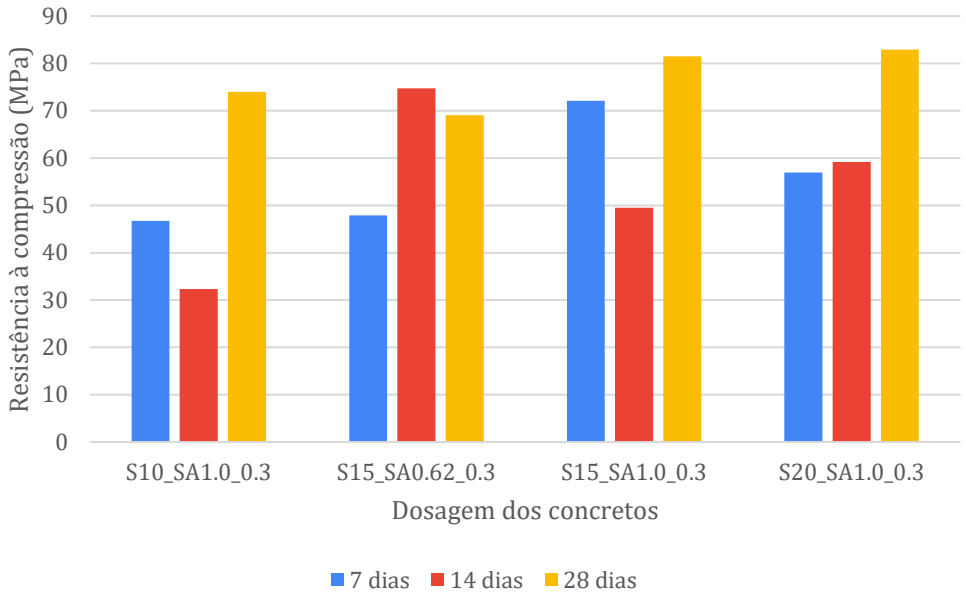
**Figura 5: Resistência à tração na flexão - Sílica - Fase I**




Fonte: os autores.

Observa-se a melhoria dos resultados à compressão (Figura 6), quando comparado a dosagem apenas com RBMG, entretanto os valores ainda não atingem o mínimo para a classificação como UHPC. Destaca-se a dosagem S20_SA1.0_0.3 que apresentou aumento em todas as idades, atingindo, aos 56 dias, cerca de 83 MPa.

**Figura 6: Resistência à compressão - Sílica - Fase I**




Fonte: os autores.

Após análise das adições individualmente, foram estudadas as adições conjuntas. Nas três primeiras dosagens, variou-se a sílica e manteve-se a porcentagem de superplastificante, obtendo espalhamento acima do mínimo esperado. Em seguida, trabalhou-se com 10% de sílica e variação de superplastificante, reduzindo a relação a/agl para melhorar a resistência à compressão. Essa alteração não melhorou o espalhamento e os corpos de prova não atingiram rigidez suficiente para desmoldagem após 24 horas, necessitando até 72 horas. Optou-se pela dosagem com SB (RBMG30_S10_SB3.0_0.25), que não alcançou o espalhamento desejado (Tabela 5), mas permitiu desmoldagem em 24 horas.

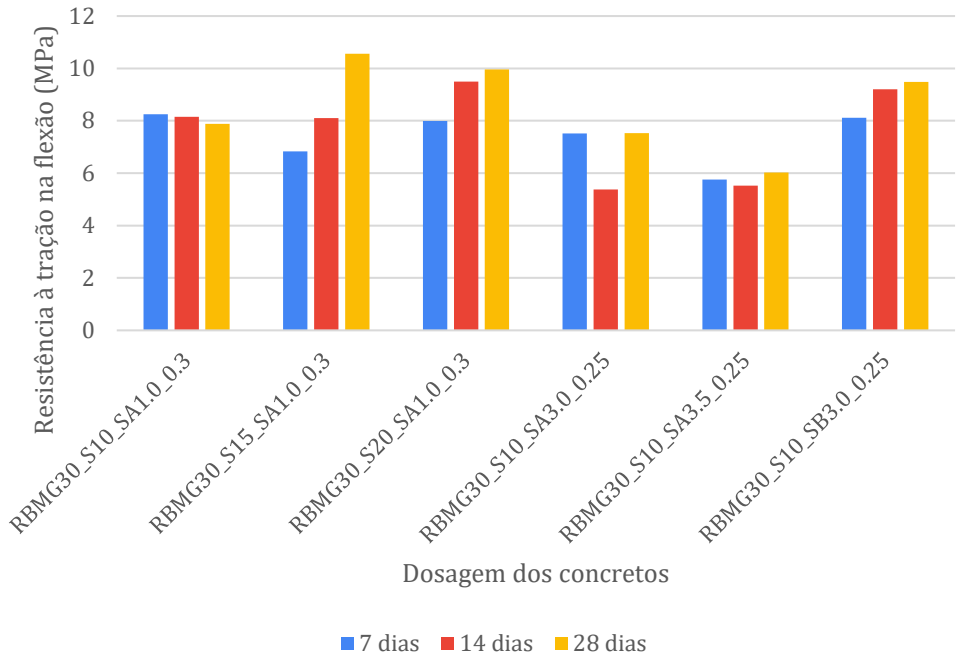
**Tabela 5: Dados obtidos para espalhamento das dosagens contendo sílica + RBMG - Fase I**

| Nomenclatura | Espalhamento Médio (mm) |
|---|---|
| RBMG30_S10_SA1.0_0.3 | 317,0 |
| RBMG30_S15_SA1.0_0.3 | 302,0 |
| RBMG30_S20_SA1.0_0.3 | 300,0 |
| RBMG30_S10_SA3.0_0.25 | 235,0 |
| RBMG30_S10_SA3.5_0.25 | 223,3 |
| RBMG30_S10_SB3.0_0.25 | 220,0 |

Fonte: os autores.

As primeiras dosagens mostraram resistência à tração na flexão acima do mínimo desejado, mas o aumento de superplastificante reduziu os valores. Com a troca do superplastificante, os resultados melhoraram, ficando acima de 6 MPa em todas as idades (Figura 7). Isso se deve ao tipo e quantidade de superplastificante, que pode retardar a hidratação por: (i) adsorção nas partículas de cimento, restringindo o contato com a água; (ii) dispersão do cimento, reduzindo a taxa de hidratação inicial; (iii) reação química com os produtos de hidratação; e (iv) formação de complexos com íons de cálcio.

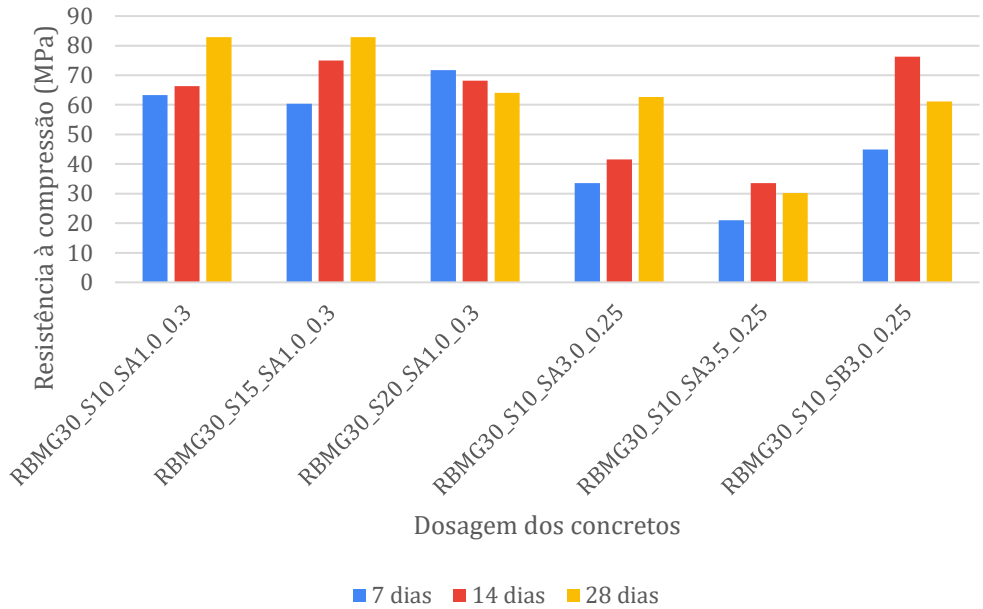
**Figura 7: Resistência à tração na flexão - RBMG + Sílica - Fase I**




Fonte: os autores.

Os resultados iniciais de resistência à compressão mostraram aumento com 10% e 15% de sílica, mas diminuição com 20%. No entanto, a dosagem com 20% apresentou a maior resistência aos 7 dias (72 MPa), e será estudada mais a fundo. As dosagens com alto teor de superplastificante SA tiveram queda significativa (Figura 8). A troca do superplastificante resultou em uma melhora notável na resistência, indicando o potencial dessa mudança, pois a natureza química do SB, à base de éter policarboxilato, pode favorecer a hidratação do cimento.

**Figura 8: Resistência à compressão - RBMG + Sílica - Fase I**




Fonte: os autores.

Após a fase I, optou-se pelo superplastificante SB variando entre 1%, 1,5% e 2%, com adição de 15% e 20% de sílica ativa para alcançar relação a/agl de 0,25. Aumentou-se também a porcentagem de RBMG, visando prover mais fíler para a mistura. A granulometria da areia foi ajustada para 600µm, e o tempo de cura foi modificado. A escolha da dosagem com 15% de sílica foi baseada na evolução consistente da resistência à compressão com a idade, enquanto 20% foi investigado devido aos resultados promissores aos 7 dias.

Todas as dosagens com 15% de sílica apresentaram valores de espalhamento abaixo do desejado, mesmo com melhoria observada com aumento do superplastificante, sem alcançar a classificação como UHPC. Nas dosagens com 20% de sílica, observou-se aumento do espalhamento com 1,5% e 2% de superplastificante, atingindo o mínimo esperado (Tabela 6).

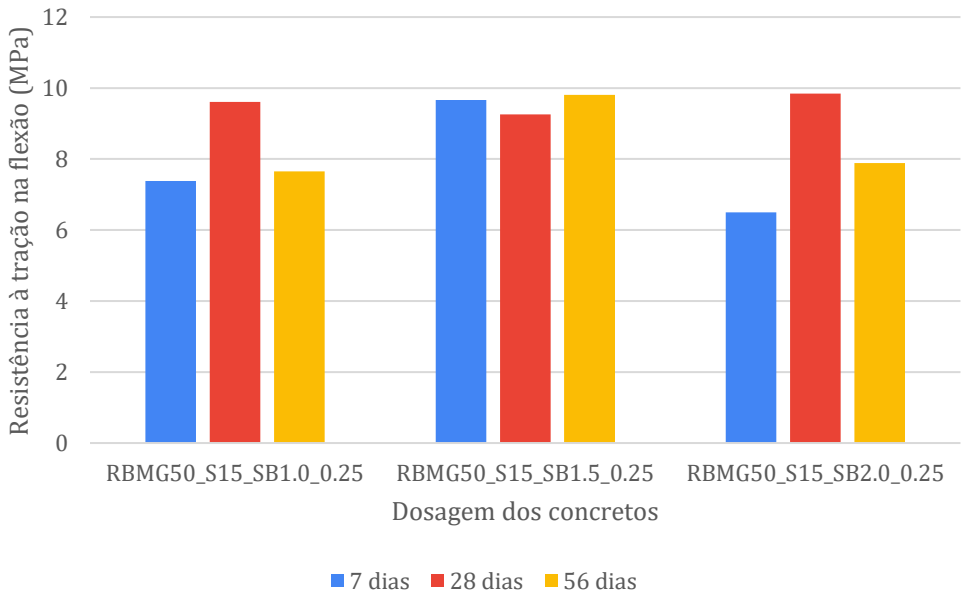
**Tabela 6: Dados obtidos para espalhamento das dosagens contendo sílica + RBMG - Fase II**

| Nomenclatura | Espalhamento Médio (mm) |
|---|---|
| RBMG50_S15_SB1.0_0.25 | 189,0 |
| RBMG50_S15_SB1.5_0.25 | 233,3 |
| RBMG50_S15_SB2.0_0.25 | 240,0 |
| RBMG50_S20_SB1.0_0.25 | 236,2 |
| RBMG50_S20_SB1.5_0.25 | 284,3 |
| RBMG50_S20_SB2.0_0.25 | 271,8 |

Fonte: os autores.

Para os resultados da resistência a tração na flexão com 15% de sílica observou-se que todos obtiveram a resistência mínima estipulada (Figura 9). Entretanto, ainda se observa quedas de resistência com o aumento da idade. Essa variação pode estar ligada ao procedimento de ensaio utilizado.

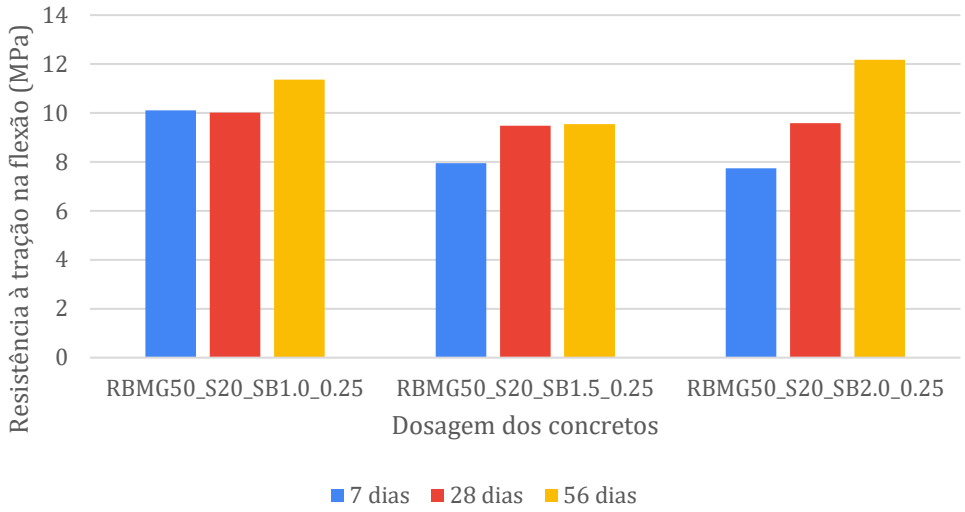
**Figura 9: Resistência à tração na flexão - RBMG + Sílica 15 - Fase II**




Fonte: os autores.

Já as dosagens contendo 20% de sílica apresentaram resultados superiores ao obtidos para 15%. Além disso, nota-se aumento das resistências em idades avançadas. Todos os valores obtidos ficaram acima dos 6 MPa (Figura 10).

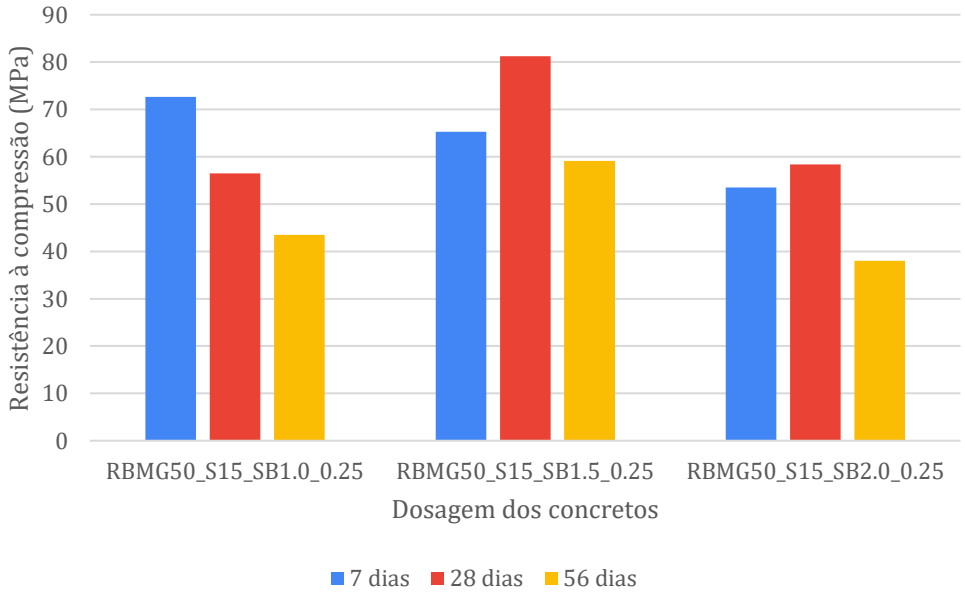
**Figura 10: Resistência à tração na flexão - RBMG + Sílica 20 - Fase II**




Fonte: os autores.

Quanto a resistência à compressão, para 15% de sílica, observa-se comportamento semelhante à tração, com grande variação de resistências em idades mais avançadas. Acrescenta-se que os valores ficaram inferiores ao mínimo normativo, como visto na Figura 11.

**Figura 11: Resistência à compressão - RBMG + Sílica 15 - Fase II**

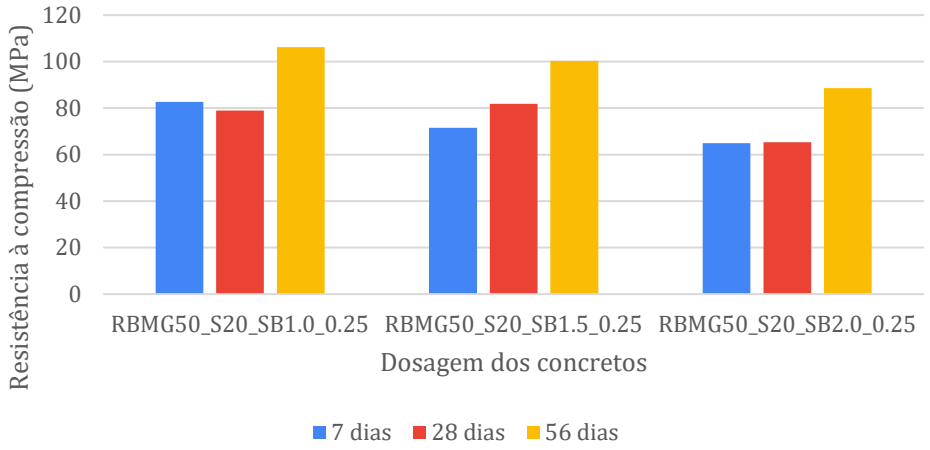



Fonte: os autores.

Dentre as dosagens com 20% de sílica, a que contém 1,5% de superplastificante foi a que apresentou melhores resultados à compressão, aumentando a resistência com a evolução das idades, chegando a 100 MPa aos 56 dias, sendo escolhida como a

dosagem final. As demais dosagens, conforme apresentado na Figura 12, mostraram inconsistências nos valores obtidos em relação à idade.

**Figura 12: Resistência à compressão - RBMG + Sílica 20 - Fase II**

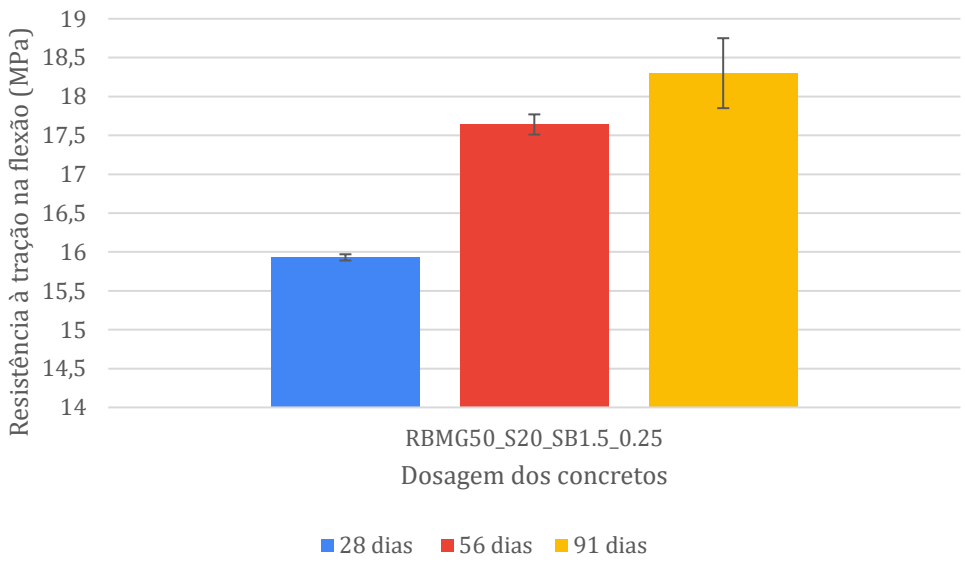



Fonte: os autores.

Assim, a dosagem RBMG50_S20_SB1.5_0.25 foi escolhida para a Fase III devido a: (i) alto espalhamento de 284,3mm, superior ao mínimo desejado de 270mm; (ii) resistência mínima para tração na flexão em todas as idades; e (iii) consistência na resistência à compressão, alcançando 100 MPa aos 56 dias, conforme mostrado anteriormente. A fim de aprimorar essa dosagem, ajustes foram feitos no processo de produção da argamassa conforme o Quadro 2, mostrado anteriormente, e no tempo de cura (28, 56 e 91 dias).

Para o espalhamento, a dosagem alcançou 284mm, acima dos 270mm desejados. Na análise de resistência à tração na flexão, a dosagem superou o mínimo de 6 MPa em todas as idades, com destaque para 18,3 MPa aos 91 dias (Figura 13). A evolução das resistências também foi consistente com o aumento das idades.

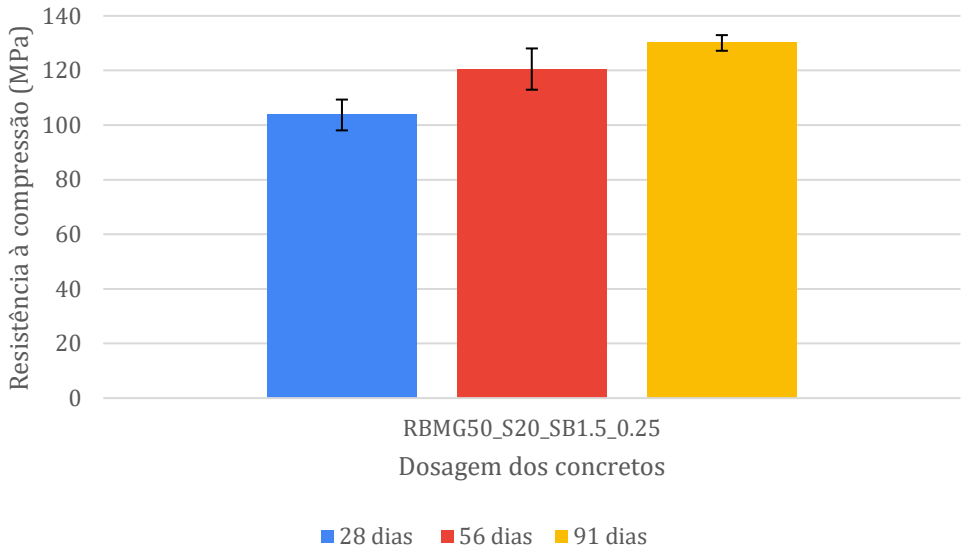
**Figura 13: Resistência à tração na flexão - RBMG + Sílica - Fase III**




Fonte: os autores.

Por fim, quanto a resistência a compressão, para 28 dias obteve-se resistência de 103,7 MPa. Aos 56 dias já foi possível obter valor superior ao mínimo normativo, sendo a resistência de 120,5 MPa. Aos 91 dias, o material atingiu 130 MPa (Figura 14). Logo, obteve-se os três parâmetros para a classificação do material como UHPC.

**Figura 14: Resistência à compressão - RBMG + Sílica - Fase III**




Fonte: os autores.

## CONCLUSÕES

Este estudo proporcionou uma análise abrangente da dosagem do UHPC por meio da investigação do comportamento no estado fresco e das propriedades mecânicas no estado endurecido na presença da sílica e RBMG. Analisou-se também a influência dos tempos de cura, dos tipos e porcentagem de superplastificante e métodos de produção. Sendo assim, é possível observar a influência dos materiais constituintes na obtenção das características desejadas do UHPC. Ambas as adições melhoraram o empacotamento da matriz, aumentando a trabalhabilidade e a resistência do UHPC, principalmente em idades mais avançadas, mostrando o potencial para aplicações na construção civil.

## REFERÊNCIAS


[1] CHRIST, R.; TUTIAKIAN B.; HELENE P., **Concreto de ultra alto desempenho: UHPC - Fundamentos, propriedades e dosagem**, 1ª ed. São Paulo, 2022.

[2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C1856/1856M-17**. Standart Practice for Fabrication and Testing Specimens of Ultra High Performance Concrete, Philadelphia, United States, 2017.

[3] ASSOCIAÇÃO FRANCESA DE ENGENHARIA. F P 18-710 – **Design of concrete structures: specific rules fos Ultra-High Fibre- Reinforced Concret**e (UHPFRC). 2016.

[4] PERRY, V. H.; AMERICA,N. What Really is Ultra-High Performance Concrete? Towards a Global Definition, In: THE 2nd CONFERENCE ON ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE, MATERIALS AND STRUCTURES – UHPFRC, 2018, Fuzhou. **Proceedings [...]** Fuzhou, China, 2018.

[5] LI, J.; WU, Z.; SHI, C.; YUAN, Q.; ZHANG, Z. Durability of ultra-high performance concrete – A review, **Construction and Building Materials**, vol. 255. Elsevier Ltd, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119296.

[6] CORRÊA, J. A.; PIMENTEL, L. L., Aplicação da dosagem por empacotamento de partículas no UHPC com cinzas de casca de arroz, In: BRAZILIAN TECHNOLOGY SYMPOSIUM, 2021, Campinas. **Proceedings [...]** Campinas: Universidade PUC, 2021.

[7] LARRARD, F. ; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, **Cement and Concrete Research**, vol. 24, no. 6, pp. 997–1009, 1994, DOI: 10.1016/0008-8846(94)90022-1.

[8] ALMADA, B. S.; DOS SANTOS, W. J.; SOUZA, S. R., Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios, **Ambiente Construído**, vol. 22, no. 4, pp. 7–22, 2022, DOI: 10.1590/s1678-86212022000400624.

[9] GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769–781, 2016.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 49**. Agregado miúdo. Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

[14] KHAN, A.; HAQ, M.; NAQVI, T. Towards Enhancing Properties of Concrete Mixed with Silica. In: Saha, S., Sajith, A.S., Sahoo, D.R., Sarkar, P. (eds) **Recent Advances in Materials, Mechanics and Structures.** Lecture Notes in Civil Engineering, vol 269. Springer, Singapore. 2023. DOI:10.1007/978-981-19-3371-4_59.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**. Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2017.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

[17] LI, Z.; ZHOU, T.; LIU, H.; JIN, Y.; PANG, Y.; LOU, H.; YANG, D.; XUEQING, Q. Study on the dispersion performance and mechanism of polycarboxylate superplasticizer by the long side-chain dicarboxyl terminated. **Journal of Applied Polymer Science.** 2023. DOI: 140. 10.1002/app.53931.