



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

MARIANA LAGE DA SILVA

A influência dos materiais nas propriedades mecânicas do concreto de ultra alto desempenho (UHPC): uma revisão bibliográfica

Guaratinguetá
2024

MARIANA LAGE DA SILVA

A influência dos materiais nas propriedades mecânicas do concreto de ultra alto desempenho (UHPC): uma revisão bibliográfica

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lisiane Pereira Prado

Guaratinguetá
2024

S586i	<p>Silva, Mariana Lage da</p> <p>A Influência dos materiais nas propriedades mecânicas do concreto de ultra alto desempenho (UHPC): uma revisão bibliográfica / Mariana Lage da Silva - Guaratinguetá, 2024. 50 f : il. Bibliografia: f. 45-50</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.</p> <p>Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lisiane Pereira Prado</p> <p>1. Concreto de alta resistência. 2. Materiais compostos. 3. Resistência de materiais. I. Título.</p> <p>CDU 620.17</p>
-------	--

MARIANA LAGE DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADA EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



Prof.^a Dr.^a ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a Dr.^a LISIANE PEREIRA PRADO
Orientador(a)/FEG-UNESP



Prof. Dr. EMERSON FELIPE FELIX
FEG-UNESP



Prof. Dr. ALEX MICAEL DANTAS DE SOUZA
EESC-USP

Janeiro/2024

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo amor incondicional, apoio e compreensão em todos os momentos, em especial aos meus pais, Sônia e Wagner, que sempre acreditaram em mim.

Aos meus amigos que, apesar da distância, sempre estiveram ao meu lado, proporcionando apoio emocional e palavras de encorajamento que foram essenciais para superar os desafios encontrados durante esta jornada.

À professora Lisiane Pereira Prado, meu agradecimento especial, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, e por acreditar em mim e ter me dado suporte durante todo o período de realização do trabalho, pelas suas correções e incentivos.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (FEG-UNESP) pelo auxílio, suporte, paciência e conhecimentos transmitidos durante toda a minha jornada acadêmica.

RESUMO

O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um compósito cimentício que combina uma matriz de concreto de elevada resistência e reforço de fibras. Destacando-se por suas excelentes propriedades mecânicas e durabilidade, esse material tem sido amplamente reconhecido como uma escolha viável para projetos de engenharia de alta complexidade. Este trabalho (i) propõe a revisão da influência exercida pelos materiais constituintes sob as propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração a flexão e módulo de elasticidade do UHPC e (ii) a determinação de quantidades ótimas dos materiais constituintes a partir de análises estatísticas da base de dados desenvolvida. A busca de dados restringiu-se a artigos que produziram UHPC com fibras de aço retas sob teor de 2% em volume. A partir de análises gráficas da relação de materiais constituintes versus propriedades mecânicas, foram propostos modelos de misturas de UHPC, visando otimizar o desempenho do material para cada propriedade mecânica. Os resultados mostraram estar em conformidade com as especificações presentes na literatura, caracterizando-se pelo elevado consumo de cimento, presença significativa de materiais finos e baixa relação água/aglomerante. As divergências identificadas entre as misturas refletem como os materiais constituintes impactam de maneira singular cada propriedade mecânica do concreto. De modo geral, os materiais finos demonstraram desempenhar um papel significativo no aumento da resistência à compressão e da resistência à flexão do UHPC, enquanto a água e o superplastificante destacaram-se pela influência exercida na trabalhabilidade do material.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto de ultra alto desempenho; Materiais; Propriedades mecânicas; Análises estatísticas.

ABSTRACT

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a cementitious composite that combines a high-strength concrete matrix and fiber reinforcement. Standing out for its excellent mechanical properties and durability, this material has been widely recognized as a viable choice for highly complex engineering projects. This paper proposes (i) the review of the influence exerted by the constituent materials on the mechanical properties of compressive strength, flexural tensile strength, and elastic modulus of UHPC and (ii) the determination of optimal quantities of the constituent materials based on statistical analyses of the developed database. The data search was restricted to papers that produced UHPC with straight steel fibers at a content of 2% by volume. UHPC mixture models were proposed based on graphical analyses of the relationship of constituent materials versus mechanical properties, aiming to optimize the material's performance for each mechanical property. The results proved to be in accordance with the specifications present in the literature, characterized by high cement consumption, significant presence of fine materials, and low water-to-binder ratio. The divergences identified between the mixtures reflect how the constituent materials uniquely impact each mechanical property of the concrete. In general, fine materials were shown to play a significant role in increasing the compressive strength and flexural tensile strength of UHPC, while water and superplasticizers stood out for their influence on the material's workability.

KEYWORDS: Ultra-High-Performance Concrete; Materials; Mechanical properties; Statistical analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais granulares utilizados no UHPC e a dimensão média de suas partículas.	14
Figura 2 - Tipo de fibras de aço utilizadas no UHPC.....	15
Figura 3 - Curva tensão-deformação na compressão do UHPC e UHPFRC.....	16
Figura 4 - Atuação das fibras como pontes de transferência de tensões.	17
Figura 5 - Curva tensão-deformação na flexão do UHPC e UHPFRC.	17
Figura 6 - Relação entre cimento, sílica ativa e resistência à compressão.	20
Figura 7 - Relação entre materiais constituintes e resistência à compressão do UHPC.....	21
Figura 8 - Relação entre materiais constituintes e resistência à flexão do UHPC.....	22
Figura 9 - Relação entre materiais constituintes e módulo de elasticidade do UHPC.	22
Figura 10 - Relação entre o consumo de cimento e as propriedades mecânicas do UHPC.	23
Figura 11 – Tendência de distribuição do consumo de cimento em relação às propriedades mecânicas do UHPC.....	24
Figura 12 - Relação entre o consumo de agregado fino e as propriedades mecânicas do UHPC.	25
Figura 13 – Tendência de distribuição do consumo de agregado fino em relação às propriedades mecânicas do UHPC.	26
Figura 14 - Relação entre o consumo de sílica ativa e as propriedades mecânicas do UHPC.	26
Figura 15 – Tendência de distribuição do consumo de sílica ativa em relação às propriedades mecânicas do UHPC.	28
Figura 16 - Relação entre o consumo de pó de quartzo e as propriedades mecânicas do UHPC.	28
Figura 17 – Tendência de distribuição do consumo de pó de quartzo em relação às propriedades mecânicas do UHPC.	29
Figura 18 - Relação entre o consumo de resíduos e as propriedades mecânicas do UHPC.	30
Figura 19 – Tendência de distribuição do consumo de resíduos em relação às propriedades mecânicas do UHPC.....	31
Figura 20 - Relação entre o consumo de água e as propriedades mecânicas do UHPC.....	31
Figura 21 – Tendência de distribuição do consumo de água em relação às propriedades mecânicas do UHPC.....	33

Figura 22 - Relação entre o consumo de superplastificante e as propriedades mecânicas do UHPC.	33
Figura 23 – Tendência de distribuição do consumo de superplastificante em relação às propriedades mecânicas do UHPC.	35
Figura 24 – Misturas de UHPC para a resistência à compressão.	37
Figura 25 - Valores de resistência à compressão das misturas de UHPC analisadas.	38
Figura 26 – Misturas de UHPC para a resistência à tração na flexão.	39
Figura 27 - Valores de resistência à tração na flexão das misturas de UHPC analisadas. ...	40
Figura 28 – Misturas de UHPC para o módulo de elasticidade.....	41
Figura 29 - Valores de resistência à tração na flexão das misturas de UHPC analisadas.	42
Figura 30 - Relação entre as propriedades mecânicas do UHPC.	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão aplicados durante a coleta de dados. 18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos concretos nos estudos selecionados.....	19
Tabela 2 - Misturas obtidas para o UHPC em função das propriedades mecânicas.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivos específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	COMPOSIÇÃO DO UHPC	13
2.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO	16
2.2.1	Comportamento na compressão	16
2.2.2	Comportamento na flexão	16
3	METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1	RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DOS MATERIAIS CONSITUENTES E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC	23
4.1.1	Influência do cimento na mistura do UHPC	23
4.1.2	Influência do agregado fino na mistura do UHPC	24
4.1.3	Influência da sílica ativa na mistura do UHPC	26
4.1.4	Influência do pó de quartzo na mistura do UHPC	28
4.1.5	Influência das adições minerais de resíduos na mistura do UHPC	29
4.1.6	Influência da água na mistura do UHPC	31
4.1.7	Influência do superplastificante na mistura do UHPC	33
4.2	PROPOSTA DE MISTURA DE UHPC.....	35
4.3	RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	36
4.3.1	Resistência à compressão	36
4.3.2	Resistência à tração na flexão	38
4.3.3	Módulo de elasticidade	40
4.4	RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC	42
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Desenvolvido com o intuito de superar as limitações do concreto convencional, o concreto de ultra alto desempenho (UHPC – em inglês, Ultra High Performance Concrete) tem sido cada vez mais utilizado em projetos de engenharia de alta complexidade que exigem melhores propriedades mecânicas e de durabilidade. Dentre esses pode-se citar a construção de pontes protendidas com seção transversal reduzida e grandes vãos (ORGASS et al., 2018; LOPEZ et al., 2014; HUI et al., 2016; ZHOU et al., 2018). O mesmo também tem sido aplicado como material de preenchimento na região da ligação de estruturas pré-moldadas de concreto no local de montagem da obra, desempenhando um papel significativo para alcançar o comportamento monolítico dos elementos (MOHAMAD et al., 2015). Além disso, as tecnologias existentes nas fabricas de concreto pré-moldado facilitam a produção e aplicação do UHPC como material de preenchimento em ligações sujeitas a solicitações elevadas (LIU et al., 2020).

O que difere o UHPC do concreto convencional é a sua elevada resistência mecânica, durabilidade, ductilidade e capacidade de adesão aos outros concretos. Essas características são alcançadas pela alta quantidade de cimento, adições minerais (sílica ativa, pó de quartzo ou filer quartzoso, cinza volante), agregado fino, baixa relação água/aglomerantes e elevando o consumo de superplastificantes (ZHANG et al., 2023; SHI et al., 2015; HUANG et al., 2020; WILLE; BOISVERT-COTULIO, 2015; TENG et al., 2019; AKEED et al., 2022; HASSAN et al., 2021; EMAD et al., 2022).

Dentre as adições minerais utilizadas na mistura do concreto de ultra desempenho, o pó de quartzo e a sílica ativa se destacam como componentes fundamentais para adquirir ganho de resistência e fluidez. Segundo Oliveira (2019), a adição de pó de quartzo visa otimizar a granulometria do UHPC, proporcionando uma distribuição uniforme entre os grãos de areia fina e cimento. Além disso, estudos de Ma e Schneider (2002) indicaram que é possível substituir até 30% do volume do cimento por pó de quartzo, sem que haja redução da resistência à compressão. Por sua vez, a incorporação da sílica ativa promove a formação de uma matriz cimentícia densa e pouco porosa, permitindo um melhor empacotamento das partículas e aumento do efeito plastificante, preenchendo os espaços vazios entre o cimento e o pó de quartzo que seriam ocupados pelas partículas de água, possibilitando que as mesmas se redistribuam por toda a estrutura do concreto, melhorando a fluidez, conforme proposto por Lin et al. (2019).

É também de grande importância determinar o teor ótimo de aditivo superplastificante, para que a relação água/aglomerante seja reduzida até o limite mínimo, melhorando as propriedades mecânicas do UHPC, além de garantir fluidez adequada à mistura (OLIVEIRA, 2019).

Esse conjunto de especificações resulta em um compósito cimentício cuja resistência à compressão mostra-se superior à 130 MPa (OLIVEIRA, 2019; GESOGLU et al., 2016; KANG et al., 2018; LI; RANGARAJU, 2016; MÁCA et al., 2013; MENG; KHAYAT, 2018; TAFRAOUI et al., 2016; WU et al., 2016; WU et al., 2019; YOU et al., 2023; YU et al., 2014; ZHONG et al., 2023), a resistência à flexão à 20 MPa (LI; RANGARAJU, 2016; MÁCA et al., 2013; MENG; KHAYAT, 2018; TAFRAOUI et al., 2016; WU et al., 2016; WU et al., 2019; YU et al., 2014; ZHONG et al., 2023; LI et al., 2015; WU et al., 2018; ZHANG et al., 2020) e o módulo de elasticidade à 30 GPa (OLIVEIRA, 2019; GESOGLU et al., 2016; MÁCA et al., 2013; YOU et al., 2023; LI et al., 2015; ZHANG et al., 2020; FENG et al., 2020; PONCETTI et al., 2023; REN et al., 2018; VALIKHANI et al., 2020).

O ganho elevado de resistência à compressão no concreto de ultra desempenho faz com que o material apresente um comportamento rígido, caracterizado por pequenas deformações em relação ao nível de resistência atingido. Para eliminar a ruptura explosiva e garantir maior ductilidade do UHPC recorre-se ao emprego de fibras com variados tamanhos e formatos (PRADO, 2022). Segundo Figueiredo (2011) e Braz e Nascimento (2015), as fibras agem como pontes de transferência de tensões, distribuindo as tensões nas fissuras e impedindo sua propagação, conferindo ao concreto maior capacidade de suportar tensões e deformações após atingir a resistência, evitando a ruptura frágil. Todavia, a resistência e a capacidade de deformação até a formação da primeira fissura não sofrem significativas alterações quando comparado ao concreto convencional, conforme relatado por Li e Fisher (2022).

Por conter uma grande quantidade de materiais na sua composição, estudos têm sido realizado em relação a proporção dos materiais envolventes na mistura do UHPC para alcançar o melhor custo-benefício (ALSAMAN et al., 2020; ABELLÁN-GARCÍA, 2022; AMIN et al., 2023; PARK et al., 2012; YU et al., 2014; VAN TUAN et al., 2011a; VAN TUAN et al., 2011b; CHRIST et al., 2022).

O objetivo desta pesquisa é compreender a influência de cada material constituinte nas propriedades mecânicas do UHPC, propondo misturas adequadas para alcançar o máximo desempenho do material em termos de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Em seguida, pretende-se verificar a consistência dos resultados teóricos comparando-os com estudos experimentais disponíveis na literatura, identificando

eventuais divergências. Por fim, vale ressaltar que, embora as misturas elaboradas sejam formuladas a partir de análises exclusivamente teóricas, as mesmas poderão exercer um papel fundamental para auxiliar no estágio inicial do desenvolvimento de misturas mais alinhadas com as condições reais dos materiais.

1.1 OBJETIVOS

Averiguar os efeitos de cada material constituinte (cimento, agregado fino, sílica ativa, pó de quartzo, adições minerais, água e superplastificante) nas propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto de ultra alto desempenho (UHPC), através do estudo das misturas apresentadas na literatura.

1.1.1 Objetivos específicos

Analisar o impacto das variações nas proporções de cada material constituinte do UHPC nas propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

Desenvolver traços teóricos ideais para cada propriedade mecânica (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade) baseando-se nos melhores valores de resistência obtidos, visando otimizar o desempenho do UHPC.

Comparar os valores teóricos obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura, a fim de verificar a consistência dos resultados e identificar eventuais divergências.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

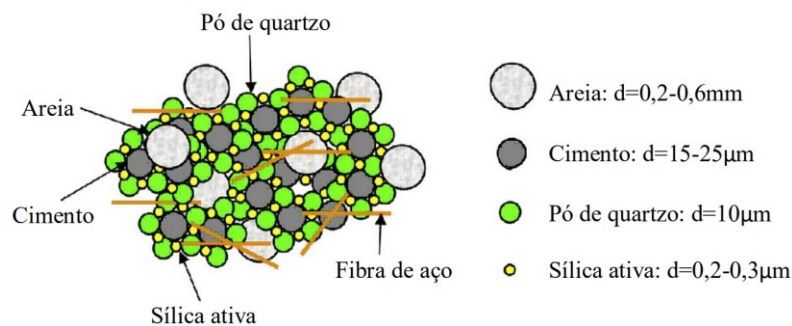
2.1 COMPOSIÇÃO DO UHPC

O desenvolvimento do UHPC teve início na década de 1990, com os pesquisadores François De Larrard, Thierry Sedran, Pierre Richard e Marcel Cheyrezy. Nas primeiras publicações referentes ao concreto de ultra desempenho, o termo “concreto de pós reativos” (*reactive powder concrete – CRP*) era comumente utilizado para descrever o material. Segundo Tutikian et al. (2022), a palavra “pós” referia-se à grande quantidade de materiais finos presentes na composição do UHPC, enquanto a palavra “reativos” destacava a reatividade desses pós com os compostos formados na hidratação do cimento, especialmente quando submetidos à aplicação de curas em elevadas temperaturas e pressões.

O UHPC é composto por materiais granulares ultrafinos, com diâmetro máximo inferior a 2mm, tais como cimento Portland, areia fina, sílica ativa e pó de quartzo, conforme

descrito por Oliveira (2019). Mehta e Monteiro (2008) relatam que materiais granulares com partículas maiores que 2mm, como o agregado graúdo, tendem a provocar heterogeneidade no concreto, causando fissuras na zona de transição na interface pasta/agregado e, conseqüentemente, reduzindo a resistência à compressão do material. Além dos materiais finos, é necessário incorporar à mistura aditivos superplastificantes para garantir uma relação água/aglomerante na ordem de 0,10 a 0,20 em massa, conforme recomendado por Tutikian et al. (2011). Na Figura 1 são ilustrados os materiais granulares geralmente utilizados no UHPC e as dimensões médias de suas partículas.

Figura 1 - Materiais granulares utilizados no UHPC e a dimensão média de suas partículas.



Fonte: Oliveira (2019).

Para a obter o UHPC, Richard e Cheyrezy (1995) definiram quatro princípios básicos, sendo eles:

- i. Aumento da homogeneidade pela eliminação do agregado graúdo;
- ii. Aumento da densidade de empacotamento pela otimização dos componentes do concreto e/ou aplicação de pressão no preparo;
- iii. Fortalecimento da microestrutura utilizando tratamento térmico durante a cura;
- iv. Aumento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço de pequenas dimensões.

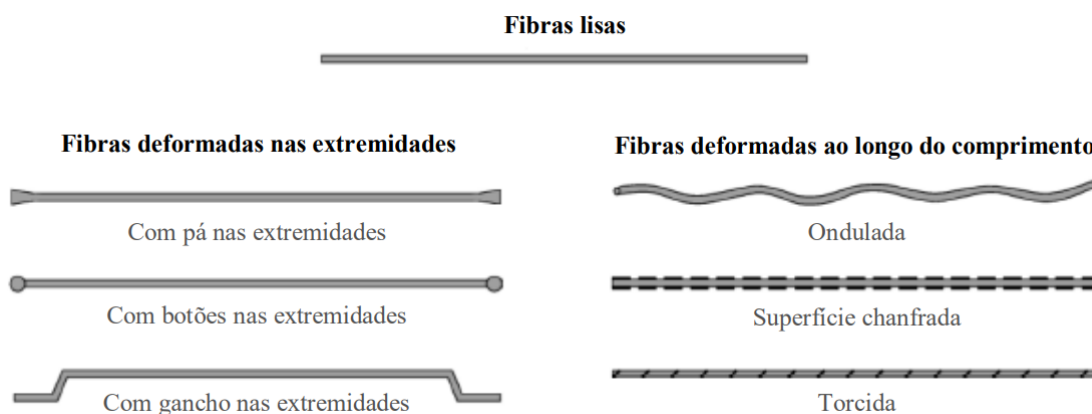
Dentre os princípios citados, a homogeneidade e a densidade de empacotamento podem ser consideradas atributos fundamentais do UHPC, devendo sempre ser empregados para esse tipo de concreto. Uma maneira eficaz de assegurar essas propriedades é através de uma dosagem fundamentada no conceito do empacotamento de partículas, que visa otimizar os componentes granulares do UHPC. Isso resulta em uma mistura de alta densidade, o que contribui para o aumento da resistência à compressão e durabilidade do material.

Apesar de potencializarem o desempenho do concreto, a pressão no preparo e o tratamento térmico empregado durante o processo de cura são opcionais e dependem do tipo de aplicação que o UHPC será submetido.

Os três primeiros princípios garantem a produção de um concreto de alta resistência à compressão e alta durabilidade, entretanto, com baixa ductilidade. Para minorar esse problema, recorre-se ao quarto princípio: a incorporação de fibras de aço. A adição de fibras de fibras também proporciona ao UHPC melhorias na resistência à tração e na resistência à flexão, conforme estudos de Richard e Cheyrezy (1995).

Apesar da variedade de fibras que podem ser incorporadas na composição do UHPC, conforme ilustrado na Figura 2, Oliveira (2019) relata que as mais comumente utilizadas são as fibras de aço lisas e curtas, com comprimento de 13mm e diâmetro de 0,2mm, revestidas de cobre.

Figura 2 - Tipo de fibras de aço utilizadas no UHPC.



Fonte: Oliveira (2019).

Em relação à quantidade adicionada, grandes teores podem gerar um efeito negativo sobre a homogeneidade e trabalhabilidade da mistura de concreto, enquanto baixos teores podem ser insuficientes para provocar melhorias consideráveis no material. Sendo assim, Mehta e Monteiro (2008) definem que, para assegurar o comportamento dúctil ao UHPC e garantir um aumento considerável na resistência à tração e na resistência à flexão, a quantidade de fibras adicionadas à mistura do concreto deve ser de, aproximadamente, 2% em volume.

Além das excelentes propriedades mecânicas, a baixa porosidade apresentada pela microestrutura do UHPC auxilia na prevenção contra invasão de qualquer agente agressivo, fornecendo ao material um desempenho de alta durabilidade, o que proporciona maior vida útil com manutenção reduzida, conforme Brandão (2005).

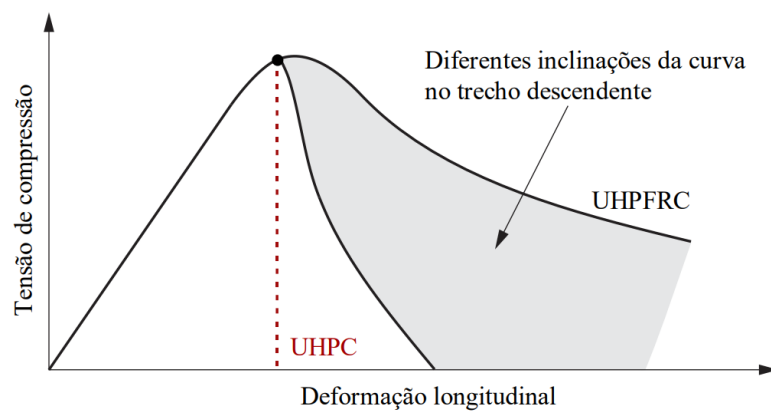
2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

2.2.1 Comportamento na compressão

A matriz densa do UHPC confere ao material uma alta resistência à compressão e maior rigidez (expressa em módulo de elasticidade). No entanto, estudos revelaram que o ganho elevado de resistência à compressão é acompanhado por um comportamento rígido, podendo ser observado na forma de uma falha brusca e explosiva (MA et al., 2004; FEHLING et al., 2014; HOANG; FEHLING, 2017).

Oliveira (2019) explica que a incorporação de fibras de aço à mistura do UHPC melhora consideravelmente o comportamento pós – pico na compressão, com o UHPFRC passando a exibir um comportamento dúctil, conforme mostrado na Figura 3. O trecho ascendente (pré – pico) da curva tensão – deformação não sofre alteração com a adição de fibras, entretanto, o trecho descendente (pós – pico) da curva pode apresentar diferentes inclinações, dependendo de fatores como quantidade, geometria e orientação das fibras, bem como a aderência das mesmas com a matriz cimentícia.

Figura 3 - Curva tensão-deformação na compressão do UHPC e UHPFRC.



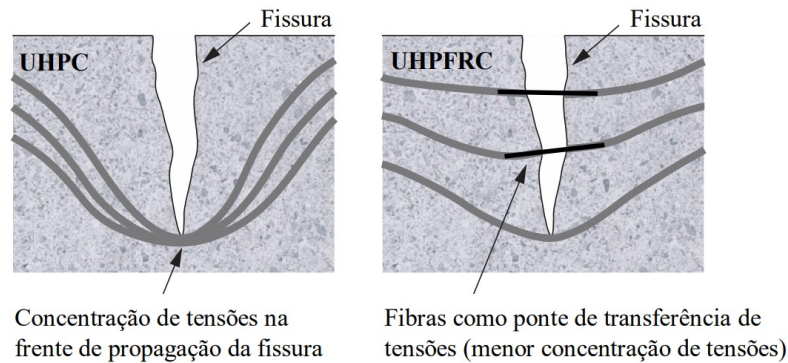
Fonte: Oliveira (2019).

2.2.2 Comportamento na flexão

De acordo com Oliveira (2019), o UHPC apresenta um comportamento rígido na flexão, o que dificulta medir o trecho descendente da curva tensão – deformação. A partir da incorporação de fibras de aço, o UHPFRC passa a exibir um comportamento dúctil. Até a primeira microfissura (abertura inferior à 0,05mm), a matriz resiste às tensões de flexão, apresentando um comportamento linear tanto para o UHPC quanto para o UHPFRC. Após a primeira microfissura, as fibras são ativadas e atuam como pontes de transferência de tensões,

redistribuindo as tensões nas regiões adjacentes à essa fissura e provocando múltiplas microfissuras na matriz, conforme exemplificado na Figura 4.

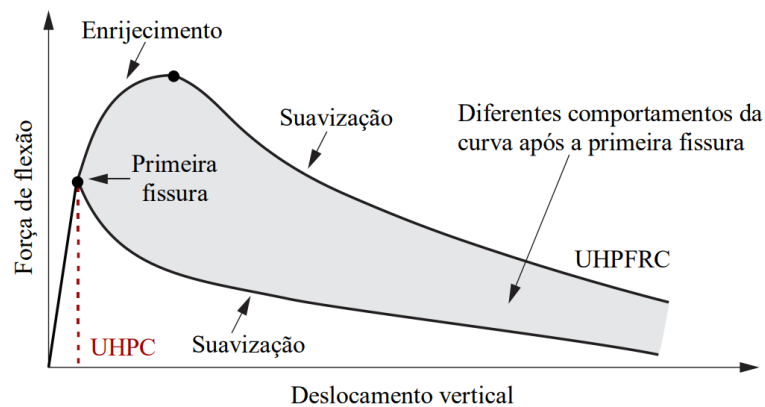
Figura 4 - Atuação das fibras como pontes de transferência de tensões.



Fonte: Oliveira (2019).

Esse fenômeno tende a dificultar a propagação das fissuras, proporcionando um aumento da tensão (comportamento de enrijecimento). Quando a tensão de flexão atinge seu valor máximo, ocorre a formação de uma microfissura (abertura entre 0,05 e 0,5mm) e inicia-se o arrancamento das fibras das fibras, ocasionando a queda da tensão (comportamento de suavização), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Curva tensão-deformação na flexão do UHPC e UHPFRC.



Fonte: Oliveira (2019).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica, foram consultadas plataformas eletrônicas comumente utilizadas em pesquisas acadêmicas, como Scopus e Science Direct, tanto na literatura nacional quanto internacional. Além disso, repositórios de universidades também foram utilizados.

A seleção de fontes de pesquisa foi orientada por palavras-chave específicas relacionadas ao tema da revisão, sendo elas:

- i. Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC);
- ii. Fibra de Aço;
- iii. Resistência à compressão;
- iv. Resistência à tração na flexão;
- v. Módulo de Elasticidade;
- vi. Proporção dos materiais.

A fim de possuir maior controle sobre os resultados e assegurar a seletividade de dados pertinentes à pesquisa, critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos, conforme mostrado na Tabela 1.

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão aplicados durante a coleta de dados.

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Artigo de pesquisa experimental	Artigo analítico ou investigação numérica
Propriedades mecânicas de compressão, flexão, módulo de elasticidade	Outros tipos de propriedades mecânicas (cisalhamento, fadiga, impacto)
Cura úmida	Cura térmica
Idade de ruptura dos corpos de prova igual a 28 dias	Idade de ruptura dos corpos de prova diferente de 28 dias
Reforço com fibras de aço	Reforço com fibras de materiais diferentes de aço
Fibra com comprimento entre 13 e 20mm	Fibra com comprimento inferior à 13mm ou comprimento superior à 20mm
Fibra reta	Fibra diferente de reta (corrugada, com ancoragem nas extremidades)
Teor de fibras igual à 2%	Teor de fibras diferente de 2%
Consumo de materiais expresso em massa por volume (kg/m ³)	Consumo de materiais expresso em traço unitário

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram selecionados 21 trabalhos para integrar a revisão bibliográfica, dos quais extraiu-se informações acerca dos materiais constituintes do UHPC e resultados experimentais das propriedades mecânicas. Os materiais constituintes do UHPC nos estudos foram agrupados em: cimento, agregado fino, sílica, pó de quartzo, adições minerais de

resíduos (cinzas volantes, GGSB), água e superplastificante. Quanto às propriedades mecânicas, as informações extraídas foram: resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos concretos nos estudos selecionados.

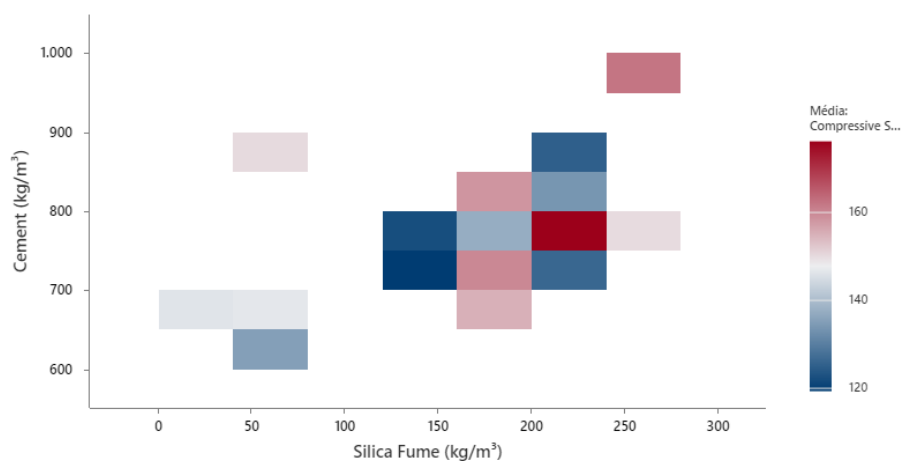
Referência	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Feng et al. (2020)	127,61	-	49,70
Gesoglu et al. (2016)	162,00	10,15	45,00
Jiang et al. (2020)	121,20	-	-
Kang et al. (2018)	167,00	-	-
	159,00	-	-
	160,00	-	-
	158,00	-	-
	155,00	-	-
Li et al. (2015)	128,90	30,00	51,50
Li e Rangaraju (2016)	158,20	32,10	-
Máca et al. (2013)	151,70	29,70	47,50
Meng e Khayat (2018)	153,00	21,30	-
Oliveira (2019)	145,70	15,60	46,22
Poncetti et al. (2023)	102,00	-	41,85
Prado (2022)	128,60	-	-
Ren et al. (2018)	119,20	17,00	42,00
Tafraoui et al. (2016)	155,00	29,00	-
	146,00	30,00	-
Valikhani et al. (2020)	126,00	-	52,00
Wu et al. (2016)	149,84	27,80	-
Wu et al. (2018)	-	37,90	-
Wu et al. (2019)	142,20	39,70	-
You et al. (2023)	130,13	17,69	43,13
Yu et al. (2014)	150,00	28,00	-
	135,00	21,00	-
	140,00	28,00	-
Zhang et al. (2020)	120,40	22,60	44,80
	123,60	22,50	45,70
Zhong et al. (2023)	176,00	32,00	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos artigos consultados, extraíram-se informações referentes ao consumo dos materiais constituintes e às propriedades mecânicas do UHPC, que foram posteriormente submetidas a três análises. Na primeira análise, optou-se pela criação de gráficos de dispersão que representaram as relações entre o consumo de cada componente e as propriedades mecânicas do concreto de ultra desempenho. Para a segunda análise, foram criados gráficos de Boxplot, que ofereceram uma visão detalhada acerca das tendências médias e variações

no consumo dos materiais constituintes do UHPC. A terceira análise foi desenvolvida com o software MINITAB e consistiu na criação de gráficos de dispersão em blocos que relacionaram as proporções de dois materiais constituintes com uma propriedade mecânica do UHPC, conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Relação entre cimento, sílica ativa e resistência à compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses gráficos de dispersão em blocos forneceram uma representação visual das interações entre os componentes do UHPC e o grau de associação dos mesmos com uma propriedade mecânica específica.

A partir dos gráficos obtidos no MINITAB, foram selecionados os resultados mais favoráveis para a propriedade mecânica em questão, juntamente com as proporções dos materiais associadas a esses valores ótimos. De modo a assegurar a consistência dos resultados finais e garantir um padrão de desempenho confiável, os valores selecionados deveriam apresentar frequência superior à 1. Esses resultados foram então dispostos em planilhas, sendo separados por propriedade mecânica e combinações de materiais. Em seguida, foi estabelecido que, para as propostas de misturas teóricas, o valor do consumo de cada material seria determinado a partir da moda entre os dados dispostos nas planilhas. Baseando-se nos dados de resistência associados aos consumos referentes à moda, um valor médio correspondente à propriedade mecânica em análise foi calculado para cada componente do UHPC. Essa metodologia foi adotada para análises referentes às propriedades de resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

A Figuras 7 exemplifica o procedimento descrito anteriormente, ilustrando a relação entre os materiais constituintes do UHPC e sua associação com resistência à compressão.

Figura 7 - Relação entre materiais constituintes e resistência à compressão do UHPC.

	CIMENTO kg/m ³	AGREGADO FINO kg/m ³	SÍLICA ATIVA kg/m ³	PÓ DE QUARTZO kg/m ³	ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	ÁGUA kg/m ³	SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³
CIMENTO kg/m ³	725 725 147,17 MPa	850 725 159,80 MPa	180 725 159,80 MPa	25 775 151,48 MPa	50 675 147,50 MPa	190 725 159,80 MPa	5 725 159,80 MPa
AGREGADO FINO kg/m ³	725 850 159,80 MPa	1150 1150 163,85 MPa	220 1150 163,85 MPa	25 1150 163,85 MPa	50 1150 163,85 MPa	190 850 149,00 MPa	5 1250 158,20 MPa
SÍLICA ATIVA kg/m ³	725 180 159,80 MPa	1150 220 163,85 MPa	260 260 155,92 MPa	25 260 155,92 MPa	25 260 155,92 MPa	190 180 158,89 MPa	5 180 159,53 MPa
PÓ DE QUARTZO kg/m ³	775 25 151,48 MPa	1150 25 163,85 MPa	260 25 155,92 MPa	25 25 142,14 MPa	250 25 145,00 MPa	170 25 150,77 MPa	45 25 149,68 MPa
ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	675 50 147,50 MPa	1150 50 163,85 MPa	260 50 155,92 MPa	25 250 145,00 MPa	350 350 156,50 MPa	190 150 152,50 MPa	45 50 150,93 MPa
ÁGUA kg/m ³	725 190 159,80 MPa	850 190 149,00 MPa	180 190 158,89 MPa	25 170 150,77 MPa	190 150 152,50 MPa	190 190 146,43 MPa	5 190 159,53 MPa
SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³	725 5 159,80 MPa	1250 5 158,20 MPa	180 5 159,53 MPa	25 45 149,68 MPa	50 45 150,93 MPa	190 5 159,53 MPa	5 5 154,06 MPa
VALOR ÓTIMO	725 kg/m ³ 157,14 MPa	1150 kg/m ³ 163,85 MPa	180 kg/m ³ 159,41 MPa	25 kg/m ³ 151,26 MPa	50 kg/m ³ 154,55 MPa	190 kg/m ³ 154,36 MPa	5 kg/m ³ 158,22 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores ótimos obtidos para a resistência à compressão de cada material constituinte, uma nova resistência média foi calculada. Essa nova média de resistência teve como finalidade determinar o valor ótimo da propriedade mecânica para a mistura de uma maneira global, considerando a contribuição de todos os materiais envolvidos. Essa abordagem permitiu definir um valor representativo da propriedade mecânica para a mistura como um todo, ao passo em que as características individuais de cada componente também fossem levadas em consideração.

As Figuras 8 e 9 mostram o processo detalhado anteriormente, ilustrando a relação entre os componentes do UHPC e a associação dos mesmos com as propriedades mecânicas de resistência à flexão e módulo de elasticidade, respectivamente.

Figura 8 - Relação entre materiais constituintes e resistência à flexão do UHPC.

	CIMENTO kg/m ³	AGREGADO FINO kg/m ³	SÍLICA ATIVA kg/m ³	PÓ DE QUARTZO kg/m ³	ADIÇÕES MIENRAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	ÁGUA kg/m ³	SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³
CIMENTO kg/m ³	825 825 30,90 MPa	950 875 31,76 MPa	225 875 31,76 MPa	25 875 35,20 MPa	50 825 30,90 MPa	185 675 29,50 MPa	45 875 32,95 MPa
AGREGADO FINO kg/m ³	875 950 31,76 MPa	1150 1150 30,85 MPa	225 950 31,76 MPa	25 950 32,97 MPa	25 950 31,76 MPa	185 1050 29,50 MPa	25 1050 28,93 MPa
SÍLICA ATIVA kg/m ³	875 225 31,76 MPa	950 225 31,76 MPa	225 225 155,92 MPa	25 175 30,55 MPa	25 225 27,86 MPa	175 225 23,69 MPa	45 225 25,92 MPa
PÓ DE QUARTZO kg/m ³	875 25 35,20 MPa	950 25 32,97 MPa	175 25 30,55 MPa	25 25 27,36 MPa	25 25 29,59 MPa	195 25 35,90 MPa	25 25 27,16 MPa
ADIÇÕES MIENRAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	825 25 30,90 MPa	950 25 31,76 MPa	225 25 27,86 MPa	25 25 29,59 MPa	25 25 27,30 MPa	195 25 35,90 MPa	25 25 29,60 MPa
ÁGUA kg/m ³	675 185 29,50 MPa	1050 185 29,50 MPa	225 175 23,69 MPa	25 195 35,90 MPa	25 195 35,90 MPa	195 195 35,90 MPa	25 185 27,22 MPa
SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³	875 25 32,95 MPa	1050 25 28,93 MPa	225 45 25,92 MPa	25 25 27,16 MPa	25 25 29,60 MPa	185 25 27,22 MPa	25 25 25,84 MPa
VALOR ÓTIMO	875 kg/m ³ 32,92 MPa	950 kg/m ³ 32,06 MPa	225 kg/m ³ 28,14 MPa	25 kg/m ³ 31,25 MPa	25 kg/m ³ 30,42 MPa	185 kg/m ³ 28,74 MPa	25 kg/m ³ 25,75 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Relação entre materiais constituintes e módulo de elasticidade do UHPC.

	CIMENTO kg/m ³	AGREGADO FINO kg/m ³	SÍLICA ATIVA kg/m ³	PÓ DE QUARTZO kg/m ³	ADIÇÕES MIENRAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	ÁGUA kg/m ³	SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³
CIMENTO kg/m ³	825 825 48,60 MPa	1050 825 49,70 MPa	210 825 48,60 MPa	50 825 48,60 MPa	10 825 48,60 MPa	190 775 45,25 MPa	25 775 45,25 MPa
AGREGADO FINO kg/m ³	825 1050 49,70 MPa	1250 1250 47,00 MPa	210 1050 45,78 MPa	50 1250 47,00 MPa	10 1050 45,78 MPa	190 1050 45,78 MPa	35 1050 45,78 MPa
SÍLICA ATIVA kg/m ³	825 210 48,60 MPa	1050 210 45,78 MPa	230 230 48,50 MPa	50 230 48,50 MPa	10 230 48,50 MPa	190 210 45,78 MPa	35 210 45,78 MPa
PÓ DE QUARTZO kg/m ³	825 50 48,60 MPa	1250 50 47,00 MPa	230 50 48,50 MPa	50 50 46,34 MPa	10 25 47,21 MPa	190 50 45,78 MPa	35 50 47,85 MPa
ADIÇÕES MIENRAIS DE RESÍDUOS kg/m ³	825 10 48,60 MPa	1050 10 45,78 MPa	230 10 48,50 MPa	25 10 47,21 MPa	10 10 46,49 MPa	190 10 45,78 MPa	35 10 47,85 MPa
ÁGUA kg/m ³	775 190 45,25 MPa	1050 190 45,78 MPa	210 190 45,78 MPa	50 190 45,78 MPa	10 190 45,78 MPa	190 190 45,51 MPa	35 190 45,78 MPa
SUPERPLASTIFICANTE kg/m ³	775 25 45,25 MPa	1050 35 45,78 MPa	210 35 45,78 MPa	50 35 47,85 MPa	10 35 47,85 MPa	190 35 45,78 MPa	35 35 47,85 MPa
VALOR ÓTIMO	825 kg/m ³ 48,82 MPa	1050 kg/m ³ 46,56 MPa	210 kg/m ³ 46,48 MPa	50 kg/m ³ 47,33 MPa	10 kg/m ³ 47,17 MPa	190 kg/m ³ 45,66 MPa	35 kg/m ³ 46,81 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

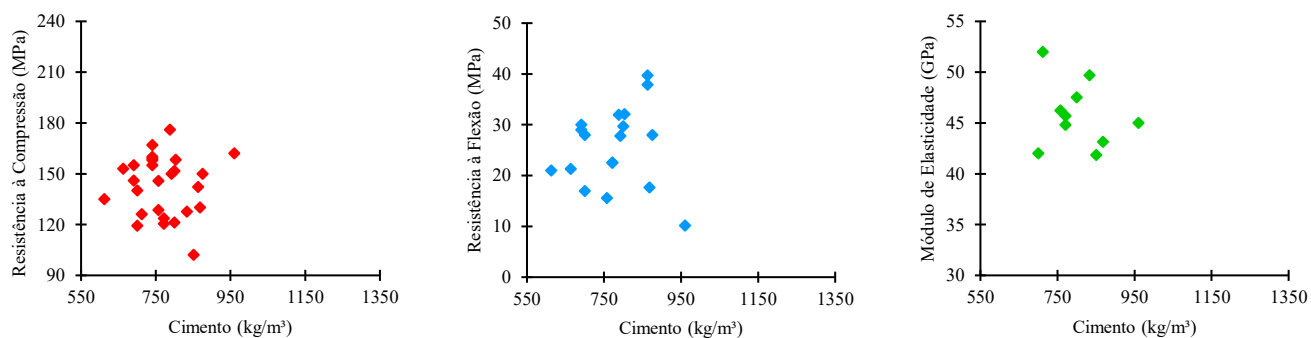
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DOS MATERIAIS CONSITUENTES E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC

4.1.1 Influência do cimento na mistura do UHPC

A Figura 10 ilustra a relação entre a quantidade de cimento utilizada nas misturas de UHPC dos estudos consultados e as respectivas propriedades mecânicas obtidas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o consumo de cimento tende a convergir entre 550 e 950 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão variou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 10 - Relação entre o consumo de cimento e as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11 são apresentadas as tendências de distribuição do consumo de cimento nas misturas de UHPC dos trabalhos examinados referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

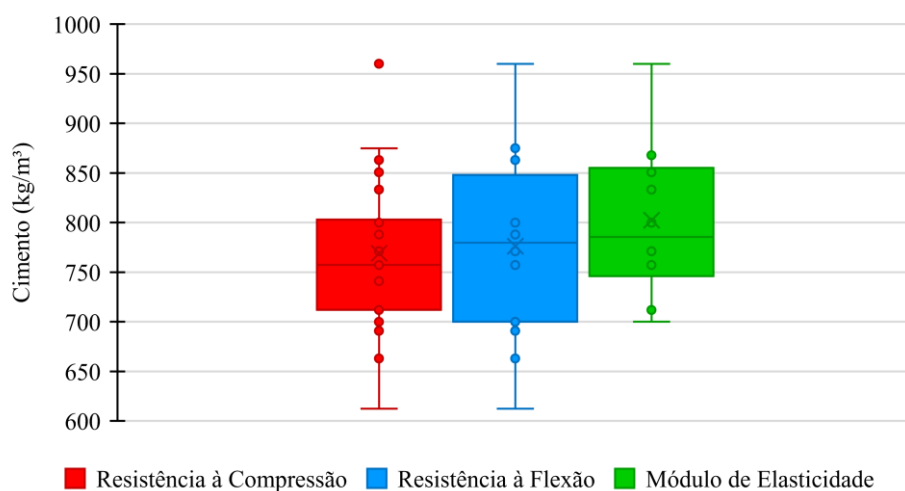
Para a resistência à compressão, a tendência média da quantidade de cimento entre as misturas de concreto foi de 757 kg/m³, menor valor registrado entre as propriedades analisadas. Isso mostra que o teor de cimento exerce uma influência significativa na resistência à compressão do UHPC, não necessitando de um consumo excessivo do material para alcançar resultados satisfatórios. Outro ponto de destaque é a amplitude reduzida da caixa, indicando maior uniformidade entre as quantidades de cimento utilizadas nas misturas, o que sugere uma padronização rigorosa na proporção desse material na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

No caso da resistência à flexão, a tendência média do consumo de cimento entre as misturas de concreto foi de 780 kg/m³, valor intermediário entre as propriedades estudadas. Isso revela que a resistência à flexão não é influenciada de maneira tão relevante pelo teor de

cimento quanto a resistência à compressão, exigindo uma quantidade maior do material para apresentar uma performance satisfatória. Além disso, a amplitude mediana exibida pela caixa propõe uma uniformidade moderada entre as proporções de cimento empregadas nas misturas, demonstrando uma padronização levemente rigorosa no consumo desse componente na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Referente ao módulo de elasticidade, a tendência média da proporção de cimento entre as misturas de concreto foi de 786 kg/m³, valor mais alto registrado entre as propriedades examinadas. Isso estabelece que o teor de cimento não influencia de modo expressivo no módulo de elasticidade do UHPC, sendo necessário um consumo considerável do material para obter resultados satisfatórios. Enfatiza-se também a elevada amplitude da caixa, representando uma maior dispersão entre quantidades de cimento incorporadas nas misturas, o que indica uma padronização mais flexível na proporção desse constituinte no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 11 – Tendência de distribuição do consumo de cimento em relação às propriedades mecânicas do UHPC.

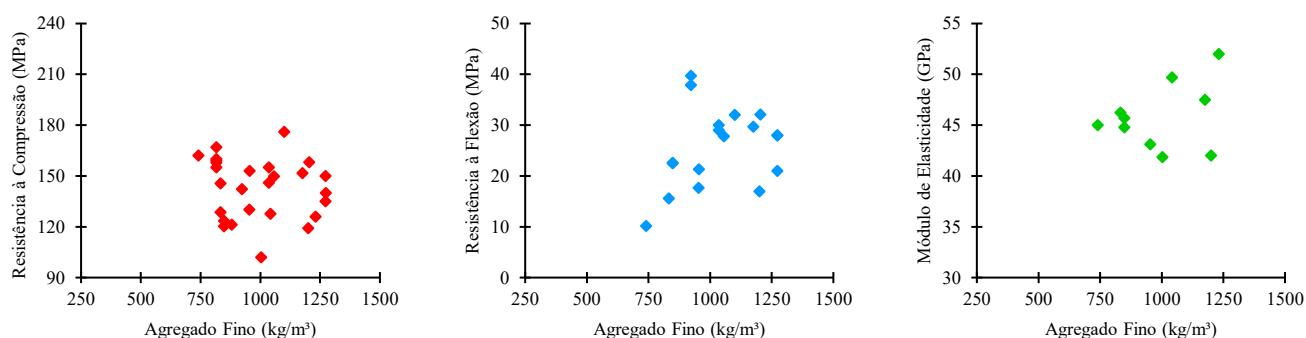


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Influência do agregado fino na mistura do UHPC

A Figura 12 evidencia a relação entre a quantidade de agregado fino utilizada nas misturas de UHPC das pesquisas examinadas e as propriedades mecânicas correspondentes. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o consumo de agregado fino tende a convergir entre 750 e 1250 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão oscilou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 12 - Relação entre o consumo de agregado fino e as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13 são mostradas as tendências de distribuição do consumo de agregado fino nas misturas de UHPC das pesquisas analisadas referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

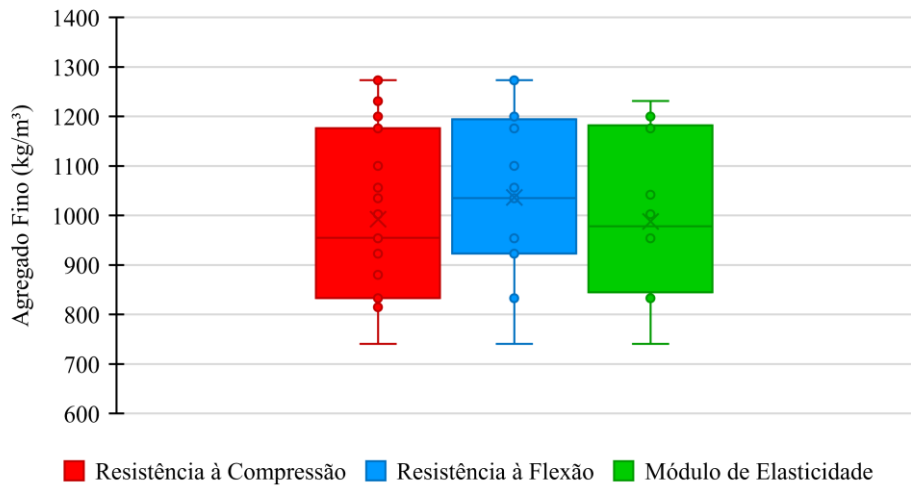
Em relação à resistência à compressão, a tendência média da quantidade de agregado fino entre as misturas de concreto foi de 955 kg/m³, valor mais baixo registrado entre as propriedades analisadas. Isso evidencia que o teor de agregado fino influencia de modo significativo na flexão do UHPC ocorre de maneira relevante, não exigindo um consumo exorbitante do material para que uma performance satisfatória seja atingida. Entretanto, nota-se uma alta amplitude da caixa, o que indica uma maior variabilidade entre as proporções de agregado fino utilizadas nas misturas, sugerindo uma padronização mais flexível na quantidade desse componente na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

Referente à resistência à flexão, a tendência média do consumo de agregado fino entre as misturas de concreto foi de 1035 kg/m³, maior valor registrado entre as propriedades estudadas. Isso mostra que o teor de agregado fino não possui uma influência relevante na resistência à flexão do UHPC, sendo necessária uma proporção considerável do material para alcançar resultados satisfatórios. Apesar disso, a caixa possui uma amplitude reduzida, revelando uma alta uniformidade entre as quantidades de agregado fino empregadas nas misturas, o que representa uma padronização rigorosa no consumo desse constituinte na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Para o módulo de elasticidade, a tendência média da proporção de agregado fino entre as misturas de concreto foi de 978 kg/m³, valor intermediário registrado entre as propriedades examinadas. Isso demonstra que a influência exercida pelo agregado fino no módulo de

elasticidade do UHPC não ocorre de maneira tão notória quanto na resistência à compressão, exigindo uma quantidade elevada do material para possuir uma performance satisfatória. Contudo, nota-se uma amplitude mediana para a caixa, o que sugere uma uniformidade moderada entre as proporções de agregado fino incorporadas nas misturas, estabelecendo uma padronização levemente rigorosa no consumo desse material no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 13 – Tendência de distribuição do consumo de agregado fino em relação às propriedades mecânicas do UHPC.

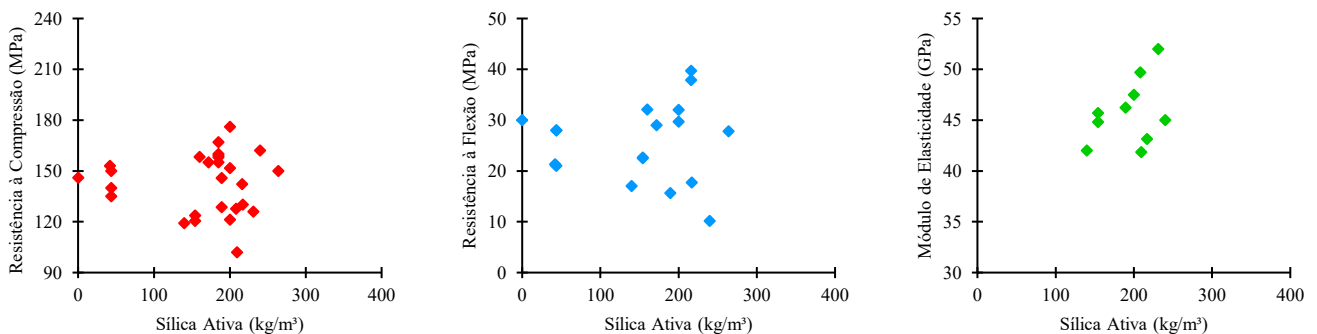


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Influência da sílica ativa na mistura do UHPC

A Figura 14 destaca a relação entre a quantidade de sílica ativa utilizada nas misturas de UHPC dos trabalhos analisados e as respectivas propriedades mecânicas obtidas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o consumo de sílica ativa tende a convergir entre 100 e 300 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão variou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 14 - Relação entre o consumo de sílica ativa e as propriedades mecânicas do UHPC.



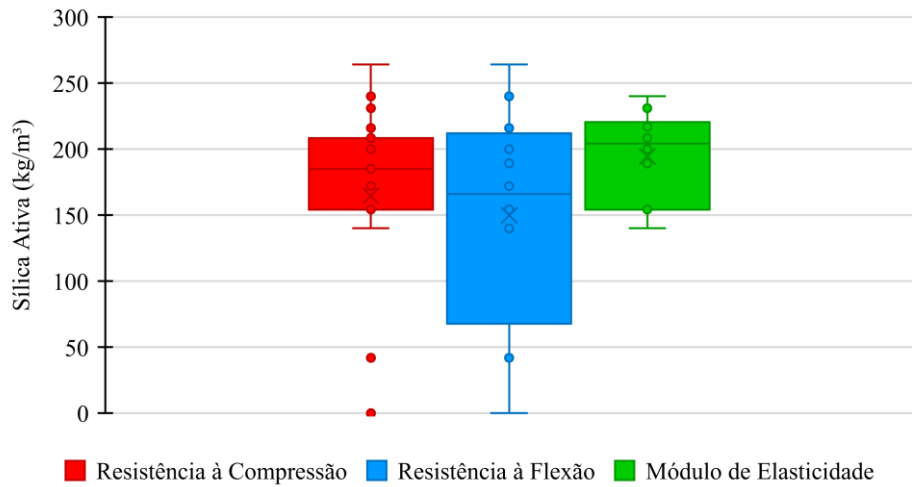
Na Figura 15 são ilustradas as tendências de distribuição do consumo de sílica ativa nas misturas de UHPC dos estudos consultados referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

No caso da resistência à compressão, a tendência média da quantidade de sílica ativa entre as misturas de concreto foi de 185 kg/m³, valor intermediário registrado entre as propriedades analisadas. Isso sugere que a influência do teor de sílica ativa sobre a resistência à compressão do UHPC ocorre de maneira moderadamente expressiva, necessitando de um consumo maior do material para obter resultados satisfatórios. Além disso, a caixa mostra uma baixa amplitude, representando uma uniformidade considerável entre as quantidades de sílica ativa utilizadas nas misturas, o que indica uma padronização rigorosa na proporção desse material na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

Para a resistência à flexão, a tendência média do consumo de sílica ativa entre as misturas de concreto foi de 166 kg/m³, mais baixo registrado entre as propriedades estudadas. Isso propõe que o teor de sílica influencia significativamente na resistência à flexão do UHPC, não exigindo uma quantidade exorbitante do material para atingir uma performance satisfatória. Todavia, observa-se uma amplitude relativamente alta da caixa, o que estabelece uma maior variabilidade entre as proporções de sílica ativa empregadas nas misturas, revelando uma padronização mais flexível no consumo desse componente na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Em relação ao módulo de elasticidade, a tendência média da proporção de sílica ativa entre as misturas de concreto foi de 204 kg/m³, maior valor registrado entre as propriedades examinadas. Isso mostra uma baixa influência da sílica ativa sobre o módulo de elasticidade do UHPC, sendo necessário um consumo elevado do material para obter resultados satisfatórios. Outro ponto de destaque é a caixa com amplitude mediana, demonstrando uma uniformidade moderada entre as proporções de sílica ativa incorporadas nas misturas, o que indica uma padronização levemente rigorosa na quantidade desse constituinte no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 15 – Tendência de distribuição do consumo de sílica ativa em relação às propriedades mecânicas do UHPC.

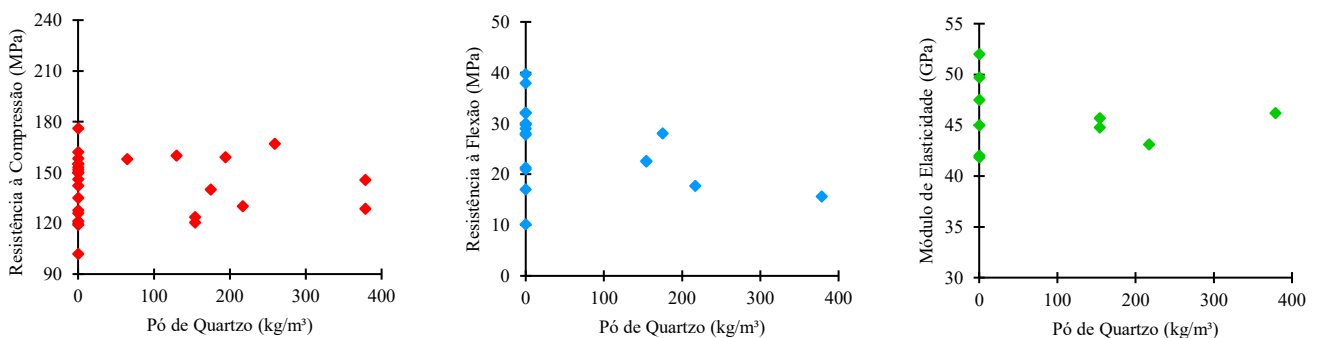


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Influência do pó de quartzo na mistura do UHPC

A Figura 16 exibe a relação entre a quantidade de pó de quartzo utilizada nas misturas de UHPC dos estudos examinados e as correspondentes propriedades mecânicas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o pó de quartzo não foi incorporado às misturas de concreto. Entretanto, nas pesquisas que fizeram uso do material, as adições ocorreram sob uma faixa entre 100 e 300 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão oscilou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 30 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 45 GPa.

Figura 16 - Relação entre o consumo de pó de quartzo e as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 17 são evidenciadas as tendências de distribuição do consumo de pó de quartzo nas misturas de UHPC dos trabalhos analisados referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

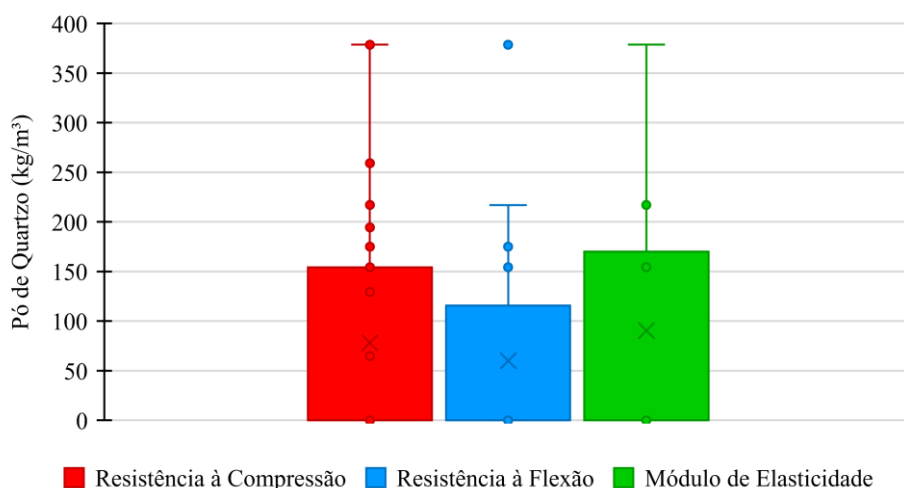
Para as três propriedades mecânicas analisadas, a tendência média da quantidade de pó de quartzo entre as misturas de concreto de ultra desempenho foi de 0 kg/m³. Isso mostra que o pó de quartzo não é um material comumente utilizado nas pesquisas referentes às propriedades do UHPC.

Todavia, nota-se que, para a resistência à compressão, a amplitude da caixa se mostra mediana em relação às demais, indicando uma uniformidade equilibrada entre as quantidades de pó de quartzo utilizadas nas misturas de UHPC, o que sugere uma padronização moderadamente rigorosa na proporção desse componente na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

No caso da resistência à flexão, a caixa mostra uma amplitude reduzida, representando maior uniformidade nas proporções de pó de quartzo utilizadas nas misturas de UHPC, o que indica uma padronização mais rigorosa no consumo desse material na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Quanto ao módulo de elasticidade, a amplitude da caixa mostra um crescimento em relação ao caso anterior, sugerindo maior variabilidade entre as quantidades de pó de quartzo utilizadas nas misturas de UHPC, o que representa uma padronização mais flexível no consumo desse material constituinte no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 17 – Tendência de distribuição do consumo de pó de quartzo em relação às propriedades mecânicas do UHPC.



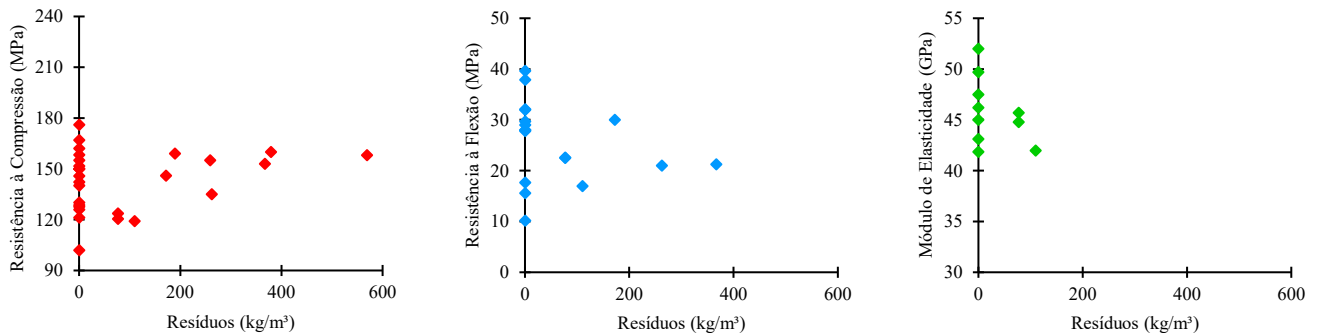
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.5 Influência das adições minerais de resíduos na mistura do UHPC

A Figura 18 mostra a relação entre a quantidade de adições minerais de resíduos utilizada nas misturas de UHPC das pesquisas analisadas e as respectivas propriedades

mecânicas obtidas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, os resíduos não foram utilizados nas misturas de concreto. Entretanto, nos estudos que fizeram uso do material, as adições limitaram-se até 400 kg/m^3 . Nesse intervalo, a resistência à compressão variou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 18 - Relação entre o consumo de resíduos e as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 19 são destacadas as tendências de distribuição do consumo de adições minerais oriundas de resíduos nas misturas de UHPC das pesquisas examinadas referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Nas três propriedades mecânicas analisadas, a tendência média da quantidade de resíduos entre as misturas de concreto de ultra desempenho foi de 0 kg/m^3 . Isso mostra que as adições minerais de resíduos não são materiais comumente utilizados nas pesquisas referentes às propriedades do UHPC.

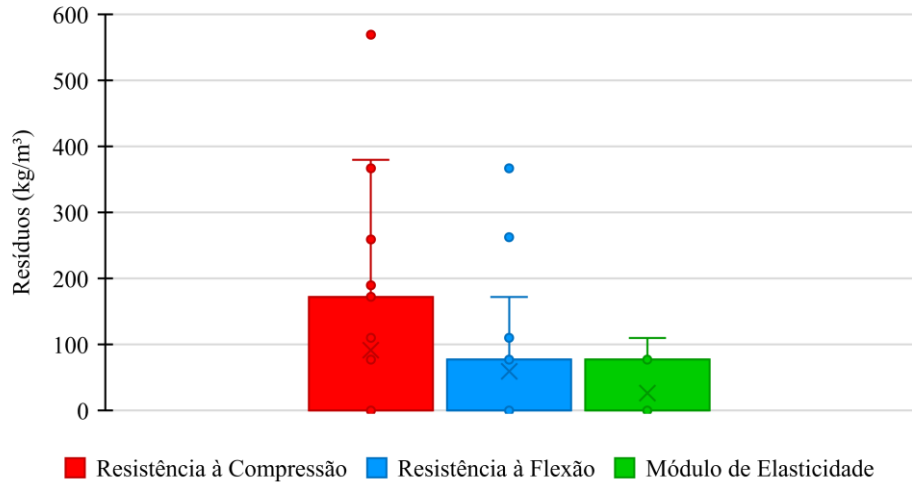
Todavia, nota-se que, para a resistência à compressão, a amplitude da caixa se mostra maior em relação às demais, indicando uma maior variabilidade entre as quantidades de resíduos utilizadas nas misturas de UHPC, o que sugere uma padronização mais flexível na proporção desse componente na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

Nos casos da resistência à flexão, a caixa mostra uma amplitude reduzida, representando maior uniformidade nas proporções de resíduos utilizadas nas misturas de UHPC, o que indica uma padronização mais rigorosa no consumo desse material na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Quanto ao módulo de elasticidade, a amplitude da caixa mostra o mesmo tamanho do caso anterior, sugerindo maior uniformidade entre as quantidades de resíduos utilizadas nas

misturas de UHPC, o que representa uma padronização rigorosa no consumo desse material constituinte no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 19 – Tendência de distribuição do consumo de resíduos em relação às propriedades mecânicas do UHPC.

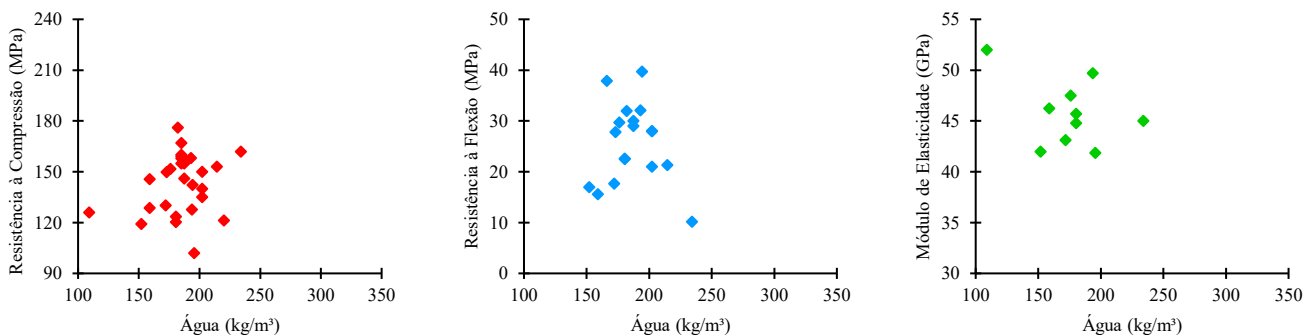


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.6 Influência da água na mistura do UHPC

A Figura 20 apresenta a relação entre a quantidade de água utilizada nas misturas de UHPC dos trabalhos consultados e as correspondentes propriedades mecânicas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o consumo de água tende a convergir entre 150 e 250 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão oscilou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 20 - Relação entre o consumo de água e as propriedades mecânicas do UHPC.



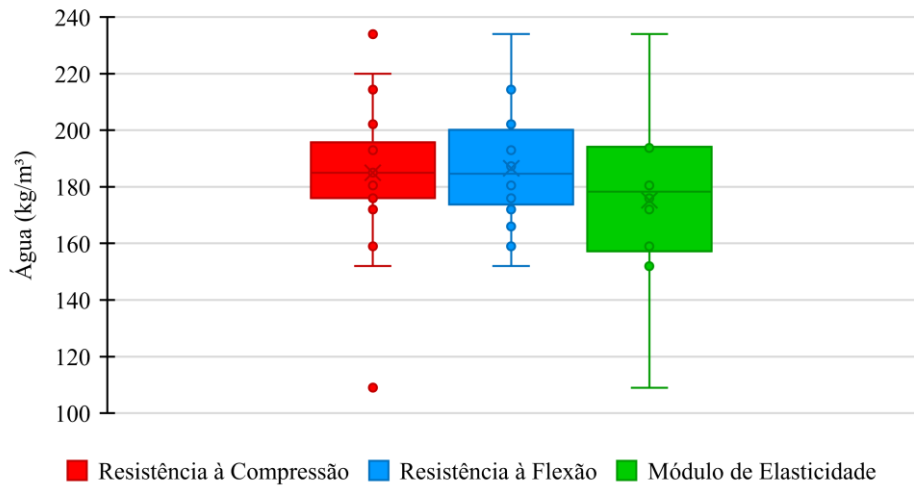
Diferentemente do que ocorre com os materiais finos, a relação entre o teor de água e as propriedades mecânicas do concreto pode ser definida como inversamente proporcional. A incorporação da água visa garantir a trabalhabilidade do concreto, por isso, o teor é mantido em valores mínimos para que o material não comprometa o ganho de resistência.

Referente à resistência à compressão, a tendência média da quantidade de água entre as misturas de concreto foi de 185 kg/m^3 , maior valor registrado entre as propriedades analisadas. O aumento no teor de água pode ser justificado pela necessidade de garantir homogeneidade e compacidade mais significativas no UHPC, fatores fundamentais para que o material resista de maneira eficiente à aplicação de cargas compressivas. Outro ponto de destaque é a amplitude reduzida da caixa, que revela uma uniformidade significativa entre as proporções de água utilizadas nas misturas, estabelecendo uma padronização rigorosa na quantidade desse material na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

No caso da resistência à flexão, a tendência média do consumo de água entre as misturas de concreto foi de 185 kg/m^3 . Similarmente ao caso anterior, a eficiência do UHPC em termos de resistência à flexão pode ser alcançada garantindo a homogeneidade e compacidade do material, que podem ser obtidos por meio do aumento do teor de água. Entretanto, a caixa mostra um aumento em sua amplitude, indicando uma uniformidade moderada entre as quantidades de água das misturas, o que revela uma padronização levemente rigorosa no consumo desse constituinte na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Para o módulo de elasticidade, a tendência média da proporção de água entre as misturas de concreto foi de 178 kg/m^3 , valor mais baixo registrado entre as propriedades examinadas. Isso demonstra que, diferentemente dos casos anteriores, a eficácia do UHPC em termos de módulo de elasticidade não está relacionada à homogeneidade ou compacidade, mas à rigidez da matriz cimentícia. Ao diminuir o teor de água, o material torna-se mais rígido, suportando maiores cargas sem a ocorrência de deformações excessivas. Além disso, a alta amplitude da caixa evidencia uma maior variabilidade entre os consumos de água incorporados nas misturas, sugerindo uma padronização mais flexível na quantidade desse componente no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 21 – Tendência de distribuição do consumo de água em relação às propriedades mecânicas do UHPC.

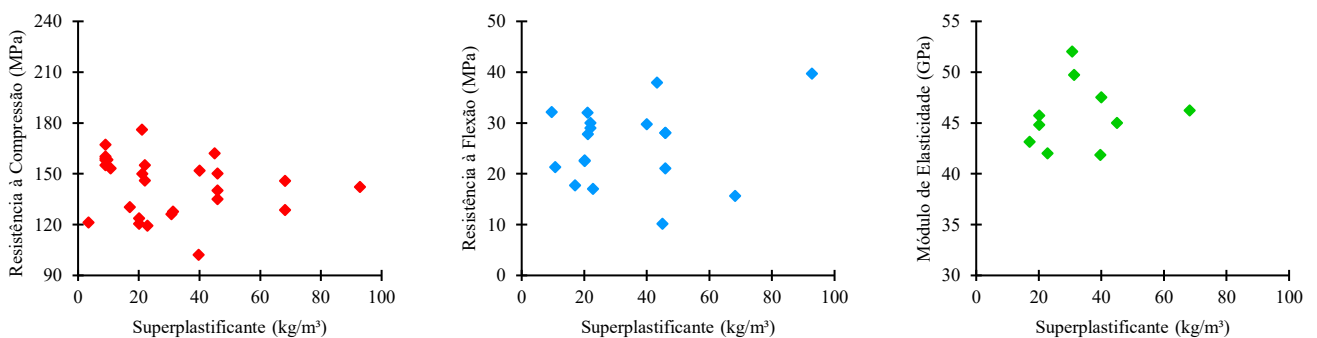


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.7 Influência do superplastificante na mistura do UHPC

A Figura 22 ilustra a relação entre a quantidade de superplastificante utilizada nas misturas de UHPC dos estudos analisados e as propriedades mecânicas obtidas. Conforme apresentado pela maioria dos autores, o consumo de superplastificante tende a limitar-se até 80 kg/m³. Nesse intervalo, a resistência à compressão variou entre 120 e 180 MPa, a resistência à flexão entre 10 e 40 MPa, e o módulo de elasticidade entre 40 e 50 GPa.

Figura 22 - Relação entre o consumo de superplastificante e as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 23 são exibidas as tendências de distribuição do consumo de superplastificante nas misturas de UHPC dos trabalhos consultados referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

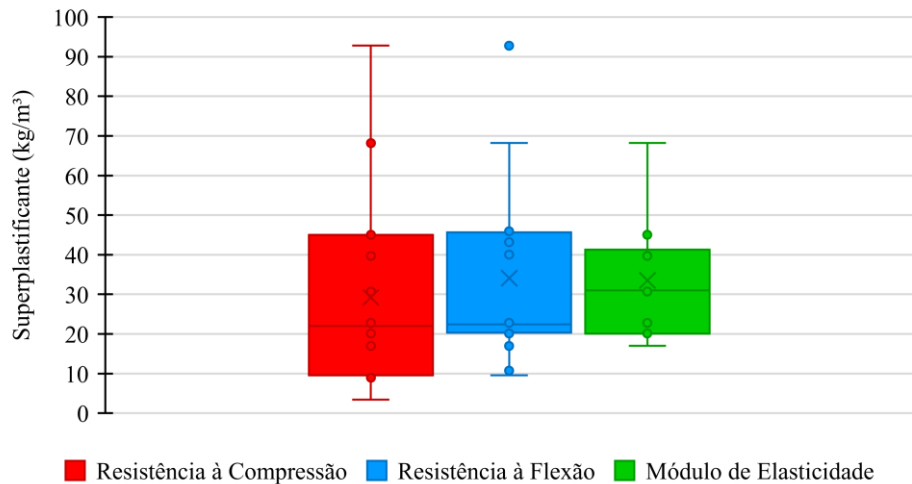
No caso da resistência à compressão, a tendência média da quantidade de superplastificante entre as misturas de concreto foi de 22 kg/m³, valor mais baixo registrado

entre as propriedades analisadas. Isso estabelece que o teor de superplastificante influencia de consideravelmente na resistência à compressão do UHPC, não sendo necessário um consumo excessivo do material para atingir resultados satisfatórios. Todavia, a caixa detém uma amplitude elevada, sugerindo uma dispersão significativa entre as quantidades de superplastificante utilizadas nas misturas, o que indica uma padronização mais flexível na proporção desse material na resistência à compressão em relação às demais propriedades analisadas.

Em relação à resistência à flexão, a tendência média do consumo de superplastificante entre as misturas de concreto foi de 22 kg/m³, mesmo valor descrito no caso anterior. Isso mostra que a influência do teor de superplastificante na resistência à flexão ocorre de maneira similar ao da resistência à compressão, não exigindo uma alta quantidade do material para alcançar uma performance satisfatória. Ademais, a amplitude mediana da caixa demonstra uma uniformidade moderada entre as proporções de superplastificante nas misturas, revelando uma padronização levemente rigorosa no consumo desse componente na resistência à flexão em relação às demais propriedades analisadas.

Referente ao módulo de elasticidade, a tendência média da proporção de superplastificante entre as misturas de concreto foi de 31 kg/m³, maior valor registrado entre as propriedades examinadas. Isso indica que o teor de superplastificante não influencia significativamente no módulo de elasticidade do UHPC, necessitando de um consumo elevado do material para atingir resultados satisfatórios. Entretanto, a caixa apresenta amplitude reduzida, propondo uma uniformidade considerável entre as quantidades de superplastificante empregadas nas misturas, o que sugere uma padronização rigorosa na proporção desse constituinte no módulo de elasticidade em relação às demais propriedades analisadas.

Figura 23 – Tendência de distribuição do consumo de superplastificante em relação às propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PROPOSTA DE MISTURA DE UHPC

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos materiais constituintes do UHPC determinados através dos melhores resultados de resistência à compressão (157 MPa), resistência à tração na flexão (30 MPa) e módulo de elasticidade (47 GPa). Os resultados obtidos para a dosagem e propriedades mecânicas do UHPC mostram-se alinhados com àqueles propostos por Buttignol et al. (2017) e Richard e Cheyrezy (1995), que caracterizam o concreto de ultra desempenho pelo seu elevado consumo de cimento, predominância de finos e baixa relação água/aglomerante, o que sugere a existência de um padrão de valores em relação ao traço do UHPC.

Apesar de pequenas divergências entre as misturas, a relação água/aglomerante se manteve próxima dos limites entre 0,10 e 0,20, conforme recomendado por Tutikian et al. (2011). Além disso, a quantidade de água permaneceu constante entre as três formulações propostas, sugerindo que as variações nas propriedades mecânicas do UHPC são predominantemente influenciadas pelas mudanças nas proporções de materiais finos, como cimento, agregado fino e sílica ativa.

Tabela 2 - Misturas obtidas para o UHPC em função das propriedades mecânicas.

Material (kg/m ³)	Propriedade mecânica de influência		
	Resistência à compressão (157 MPa)	Resistência à tração na flexão (30 MPa)	Módulo de elasticidade (47 GPa)
Cimento	725	875	825
Agregado Fino	1150	950	1050
Sílica Ativa	180	225	210
Pó de Quartzo	25	25	50
Adições Minerais	50	25	10
Água	190	185	190
Superplastificante	5	25	35
Relação água/aglomerante	0,21	0,17	0,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

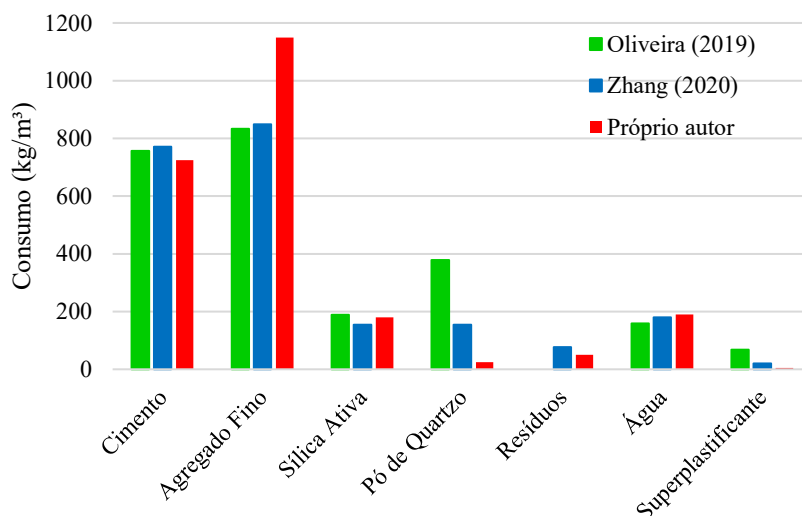
4.3 RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 Resistência à compressão

A Figura 24 exibe uma análise comparativa entre três misturas utilizadas para a determinação da resistência à compressão do UHPC. Uma dessas misturas representa os resultados teóricos obtidos nesta pesquisa, enquanto as demais correspondem aos estudos experimentais elaborados por Oliveira (2019) e Zhang (2020).

Os gráficos mostram semelhanças notáveis nas proporções de cimento, sílica ativa e água entre as misturas de UHPC analisadas. Em média, as quantidades utilizadas foram de 800 kg/m³ de cimento, 200 kg/m³ de sílica ativa e 200 kg/m³ de água. Em contrapartida, divergências significativas puderam ser identificadas nas proporções de agregado fino e pó de quartzo. Para a mistura elaborada nesse trabalho, foi estabelecido que a quantidade de agregado fino seria de 1150 kg/m³, representando um aumento de 35% em relação aos dados de Oliveira (2019) e Zhang (2020), que utilizaram 833 e 848 kg/m³, respectivamente. Em relação ao pó de quartzo, Oliveira (2019) adicionou 380 kg/m³ do material em sua mistura, enquanto Zhang (2020) fez uso de apenas 40% desse valor (154 kg/m³) e, esta pesquisa 7% (25 kg/m³).

Figura 24 – Misturas de UHPC para a resistência à compressão.



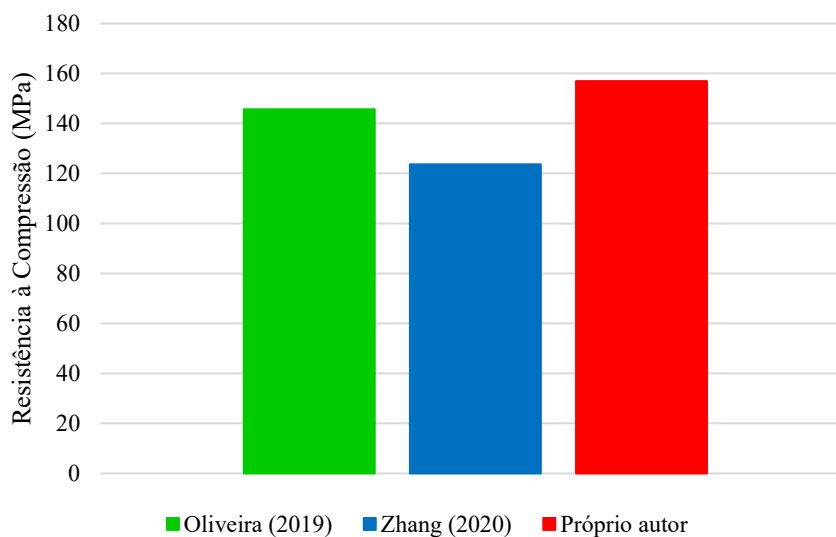
Fonte: Elaborado pelo autor.

As discrepâncias registradas entre as misturas geraram variações nos valores de resistência à compressão, conforme ilustrado na Figura 25.

A mistura formulada nesse estudo apresentou o maior valor de resistência à compressão entre as análises, alcançando 157 MPa. A superioridade na performance do concreto pode ser atribuída ao consumo significativamente maior de agregado fino em comparação com às demais misturas. Oliveira (2019), apesar de possuir a menor proporção de agregado fino entre os trabalhos, compensou essa limitação através de um consumo substancial de pó de quartzo, resultando em uma resistência intermediária de 146 MPa. Por outro lado, o concreto desenvolvido por Zhang (2020) registrou a resistência à compressão mais baixa entre as misturas, atingindo apenas 124 MPa. Esse declínio na resistência pode ser justificado pela quantidade intermediária de agregado fino e pó de quartzo utilizadas na composição do UHPC. A ausência de um consumo substancial de materiais finos pode dificultar o desempenho do concreto, especialmente no que se refere ao ganho de resistência.

Os resultados finais corroboram estudos anteriores sobre a relevância do empacotamento de partículas no desempenho do concreto (BONEN; SARKAR, 1995; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009) A eficiência e compacidade na disposição das partículas na matriz cimentícia podem otimizar a utilização dos materiais constituintes, aprimorando a coesão e a interação entre eles. Isso resulta na formação de uma matriz densa, contribuindo para um ganho expressivo de resistência à compressão.

Figura 25 - Valores de resistência à compressão das misturas de UHPC analisadas.



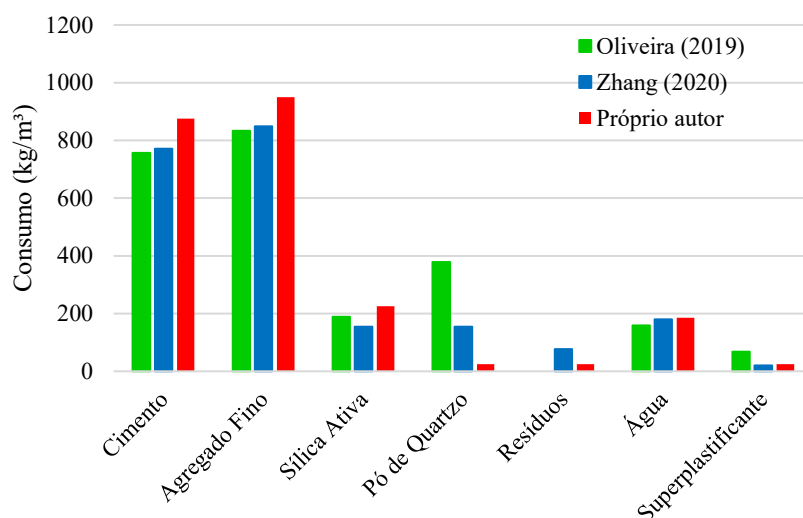
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Resistência à tração na flexão

Na Figura 26 é representada uma análise comparativa entre três misturas utilizadas para a determinação da resistência à flexão do UHPC. Uma dessas misturas corresponde aos resultados obtidos neste estudo, enquanto as demais referem-se aos trabalhos desenvolvidos experimentalmente por Oliveira (2019) e Zhang (2020).

Os gráficos revelam similaridades notáveis em relação às quantidades de sílica ativa e água incorporadas nas misturas de UHPC analisadas. Em média, os consumos foram de 200 kg/m³ de sílica ativa e 200 kg/m³ de água. Entretanto, discrepâncias puderam ser observadas nas quantidades de cimento, agregado fino e pó de quartzo. Para a mistura elaborada nesta pesquisa, foi determinado que o consumo de cimento seria de 875 kg/m³, valor 15% maior em relação à quantidade empregada por Oliveira (2019) (757 kg/m³) e 13% em relação a Zhang (2020) (771 kg/m³). Quanto à proporção de agregado fino, neste trabalho foi estabelecido o valor de 950 kg/m³, que corresponde a um aumento de 14% em relação aos estudos de Oliveira (2019) e 12% aos de Zhang (2020), que empregaram 833 e 848 kg/m³ de agregado fino em suas misturas, respectivamente. Referente ao consumo de pó de quartzo, Oliveira (2019) utilizou 380 kg/m³ na mistura de seu concreto, enquanto Zhang (2020) empregou apenas 40% desse valor (154 kg/m³) e, esta pesquisa 7% (25 kg/m³).

Figura 26 – Misturas de UHPC para a resistência à tração na flexão.



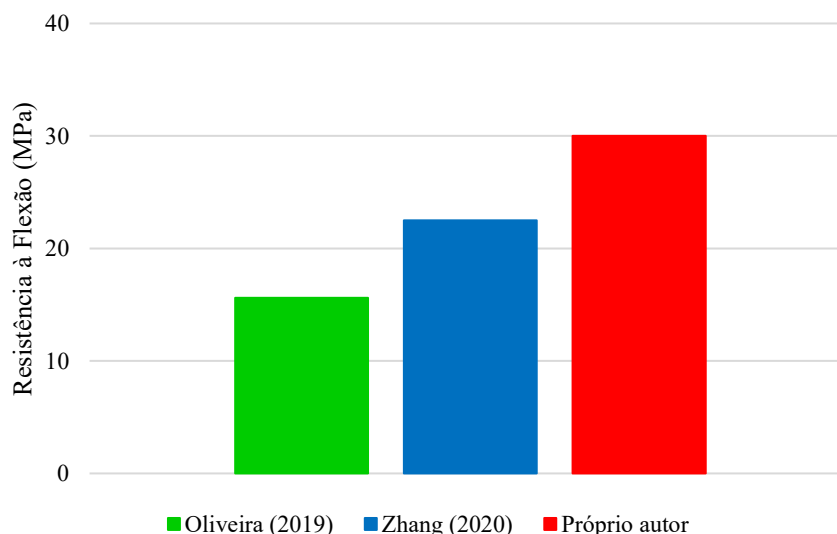
Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações identificadas entre as composições das misturas tiveram uma variação na resistência à tração por flexão do UHPC, conforme ilustrado na Figura 27.

A mistura proposta por este trabalho obteve o maior valor de resistência à flexão, atingindo 30 MPa. A excelência apresentada na performance do concreto pode ser justificada pelo consumo significativamente mais elevado de cimento e agregado fino em comparação às outras misturas. Zhang (2020), cuja mistura fez uso de quantidades intermediárias de cimento, agregado fino e pó de quartzo, registrou uma resistência intermediária, atingindo o valor de 23 MPa. Oliveira (2019), apesar de compensar a disparidade nas proporções de cimento e agregado fino com um consumo significativo de pó de quartzo, registrou a menor resistência à flexão, alcançando apenas 16 MPa. Isso sugere que, diferentemente do comportamento registrado para a resistência à compressão, onde o pó de quartzo exerceu uma influência notável, na resistência à flexão seu efeito é menos significativo.

Dado que as condições referentes às fibras de aço eram as mesmas para as três misturas analisadas (fibras retas sob teor de 2% do volume), a distinção nos resultados de resistência à flexão se deve principalmente às variações nas proporções de cimento e agregado fino. Embora o pó de quartzo possua relevância no contexto do UHPC, o mesmo não demonstrou exercer um impacto tão expressivo no ganho de resistência à flexão.

Figura 27 - Valores de resistência à tração na flexão das misturas de UHPC analisadas.



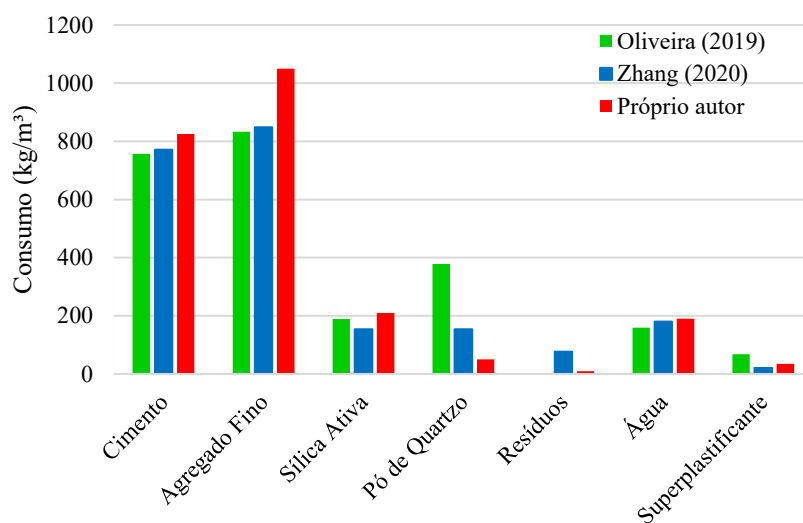
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Módulo de elasticidade

A Figura 28 ilustra uma análise comparativa entre três misturas utilizadas para determinar o módulo de elasticidade do UHPC. Uma dessas misturas reflete os resultados teóricos desta pesquisa, enquanto as demais representam os estudos experimentais conduzidos por Oliveira (2019) e Zhang (2020).

Os gráficos indicam semelhanças significativas nas proporções de cimento, sílica ativa e água entre as misturas de UHPC analisadas. Em média, as quantidades utilizadas foram de 800 kg/m³ de cimento, 200 kg/m³ de sílica ativa e 200 kg/m³ de água. Contudo, divergências puderam ser identificadas nas proporções de agregado fino e pó de quartzo. Para a mistura elaborada neste trabalho, foi determinado um consumo de agregado fino de 1050 kg/m³, que corresponde a um aumento de 26% em relação à pesquisa de Oliveira (2019) e 24% em relação a de Zhang (2020), que utilizaram 833 e 848 kg/m³ do material em seus trabalhos, respectivamente. Quanto ao pó de quartzo, Oliveira (2019) adicionou 380 kg/m³, enquanto Zhang (2020) fez uso de apenas 40% desse valor (154 kg/m³) e, este estudo 13% (50 kg/m³).

Figura 28 – Misturas de UHPC para o módulo de elasticidade.



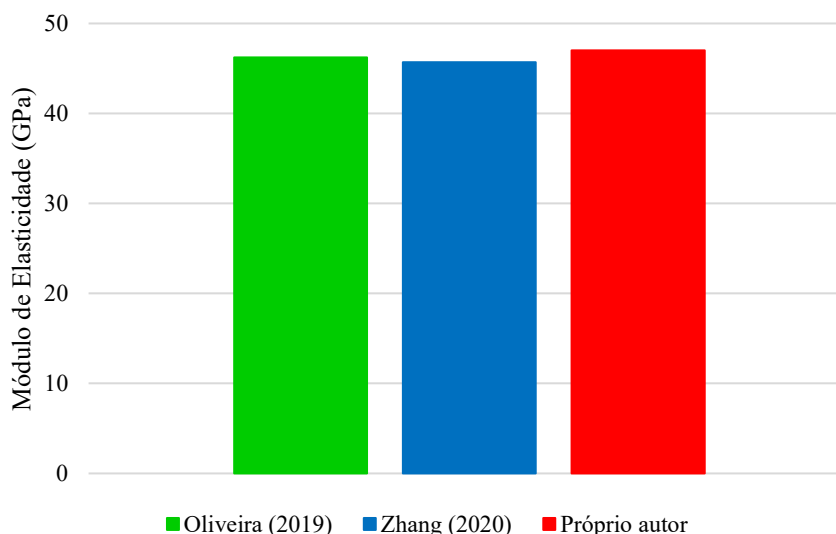
Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das discrepâncias identificadas entre as três misturas analisadas, as mesmas não geraram impactos significativos no módulo de elasticidade do UHPC, conforme apresentado na Figura 29.

Mesmo possuindo um consumo de agregado fino consideravelmente superior em relação às outras misturas, este estudo obteve um módulo de elasticidade de 47 GPa, correspondendo a um aumento de 2% em relação às pesquisas de Oliveira (2019) e Zhang (2020), que registraram valores próximos à 46 GPa.

Os resultados finais corroboram com trabalhos anteriores (OUYANG et al., 2020), nos quais constatou-se que o módulo de elasticidade do concreto de ultra desempenho é consideravelmente influenciado pela redução da relação água/aglomerante e pela adição de agregado graúdo. Dado que as misturas analisadas apresentaram relação água/aglomerante semelhantes e não incluíram agregado graúdo em sua composição, é condizente que o módulo de elasticidade se mantenha similar, apesar das variações identificadas entre as composições.

Figura 29 - Valores de resistência à tração na flexão das misturas de UHPC analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

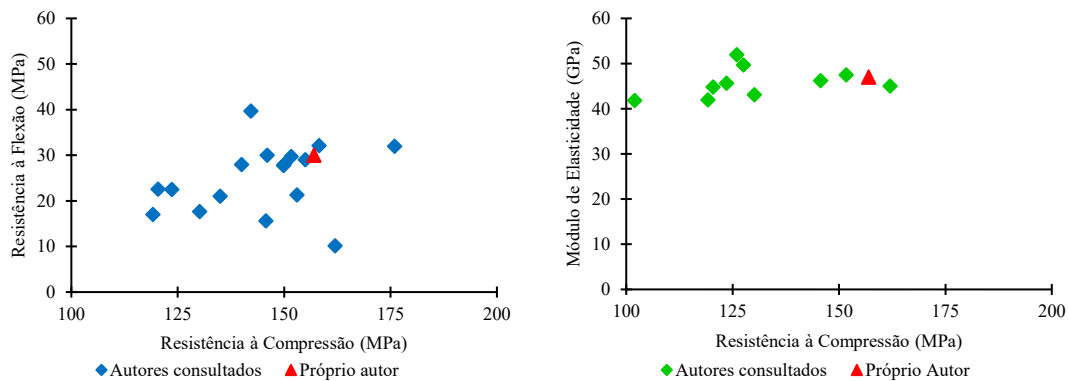
4.4 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC

A Figura 30 apresenta graficamente as relações entre resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade do UHPC. Os resultados mostram que a relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão possui um comportamento contrário ao que foi apresentado pela relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, apesar de ambas serem caracterizadas como não determinísticas.

A relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão do UHPC revela que, para uma resistência à compressão de 150 MPa, a resistência a flexão pode variar entre 10 e 40 MPa. Isso indica que as divergências entre os componentes das misturas de UHPC de cada autor possuem impactos significativos nas propriedades de tração à flexão do concreto de ultra desempenho.

Quanto à relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do UHPC, verifica-se que para a resistência à compressão variando entre 100 e 175 MPa, o módulo de elasticidade permanece consistentemente entre 40 e 50 GPa. Tal comportamento evidencia que as variações nas proporções dos componentes do UHPC não geram impactos notáveis no módulo de elasticidade, desde que a relação água/aglomerante seja mantida em taxas semelhantes, bem como as proporções de agregado graúdo.

Figura 30 - Relação entre as propriedades mecânicas do UHPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Através da revisão abrangente da literatura e dos resultados obtidos neste estudo, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

- As misturas desenvolvidas teoricamente nesta pesquisa com base em cada propriedade mecânica demonstraram estar em conformidade com os padrões identificados na revisão da literatura para o concreto de ultra desempenho, que caracterizam o material por um consumo significativo de cimento, presença elevada de finos e baixa relação água/aglomerante.
- Apesar de pequenas variações, as misturas elaboradas neste estudo com base em cada propriedade mecânica mostraram semelhanças significativas entre si, sugerindo uma padronização na composição do UHPC.
- As pequenas variações identificadas entre as misturas propostas neste trabalho para cada propriedade mecânica permitem constatar que os materiais finos são os principais contribuintes para o ganho de resistência do UHPC.
- Apesar das pequenas variações nas proporções de materiais finos, a relação água/aglomerante permaneceu constante entre as três misturas elaboradas nesta pesquisa para cada propriedade mecânica, comprovando a importância do papel desempenhado pela água em relação à trabalhabilidade do concreto.
- As misturas desenvolvidas teoricamente neste trabalho apresentaram desempenho superior às misturas experimentais propostas por outros autores, em termos de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

- f) O agregado fino desempenha um papel significativo no ganho de resistência à compressão e à flexão do UHPC. Em contrapartida, o pó de quartzo exerce maior influência sobre a resistência à compressão do que sobre a resistência à flexão.
- g) O módulo de elasticidade não é influenciado pela proporção dos materiais constituintes do UHPC, uma vez que não há presença de agregado graúdo, considerado principal fator determinando dessa propriedade.
- h) A relação entre as propriedades mecânicas do UHPC exibe um comportamento não determinístico. A resistência à flexão pode variar para um mesmo valor de resistência à compressão. No entanto, o módulo de elasticidade tende a permanecer relativamente constante, independentemente das variações nos valores de resistência à compressão.

A partir destas conclusões fica evidente que o empacotamento de partículas é o fator principal para garantir o elevado desempenho do UHPC, em termos de resistência e durabilidade. Entretanto, para assegurar o empacotamento ideal das partículas, um programa experimental deve ser realizado. Os ensaios laboratoriais são essenciais para avaliar a distribuição das partículas, a compacidade da mistura e a microestrutura do material. Ao analisar tais aspectos, torna-se possível verificar como as partículas dos materiais constituintes se organizam e interagem na mistura.

Contudo, as misturas teóricas desenvolvidas neste trabalho apresentaram características e desempenhos satisfatórios que as tornam adequadas para auxiliar nas etapas iniciais de elaboração de traço do UHPC em programas experimentais.

Por fim, o trabalho oferece uma visão aprofundada em relação à complexidade apresentada entre as interações dos materiais constituintes e as propriedades mecânicas do UHPC, fornecendo informações relevantes para o desenvolvimento e otimização desse material de alta performance em diversas aplicações na engenharia.

REFERÊNCIAS

- ABELLÁN-GARCÍA, J. Study of nonlinear relationships between dosage mixture design and the compressive strength of UHPC. **Case studies in construction materials**, Amsterdam, v. 17, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01228>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- AKEED, M.H.; QAIDI, S.; AHMED, H.U.; FARAJ, R.H.; MOHAMMED, A.S.; EMAD, W.; TAYEH, B.A.; AZEVEDO, A.R.G. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part II: hydration and microstructure. **Case studies in construction materials**, Amsterdam, v. 17, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01289>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- ALSALMAN, A.; DANG, C.N.; MARTÍ-VARGAS, J.R.; HALE, W.M. Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures. **Journal of building engineering**, United Kingdom, v. 27, p. 100970, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2019.100970>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- AMIN, M.; AGWA, I.S.; MASHAAN, N.; MAHMOOD, S.; ABD-ELRAHMAN, M.H. Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. **Sustainability**, Switzerland, v. 15, n. 4, p. 3085, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su15043085>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- BONEN, D.; SARKAR, S.L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. **Cement and concrete research**, United States, v. 25, n. 7, p. 1423-1434, 1995. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00137-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00137-2). Acesso em: 14 nov. 2023.
- BRANDÃO, J.H. **Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- BRAZ, M.C.A.; NACIMENTO, F.B.C. Concreto reforçado com fibras de aço. **Caderno de graduação - Ciências exatas e tecnológicas**, Aracaju, v. 3, p. 43–56, nov. 2015.
- BUTTIGNOL, T.E.T. et al. Ultra Concreto Reforçado com Fibra de Alto Desempenho (UHPRFC): uma revisão das propriedades dos materiais e procedimentos de projeto. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 957-971, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400011>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, p. 18-32, mar. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Método de dosagem UNISINOS para UHPC. **Concreto & construções**, Brazil, v. 1, n. 105, p. 30-33, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.105.0001>. Acesso em: 14 nov. 2023.

EMAD, W.; MOHAMMED, A.S.; BRAS, A.; ASTERIS, P.G.; KURDA, R.; MUHAMMED, Z.; HASSAN, A.M.T.; QAIDI, S.M.A.; SIHAG, P. Metamodel techniques to estimate the compressive strength of UHPFRC using various mix proportions and a high range of curing temperatures. **Construction and building materials**, United Kingdom, v. 349, p. 128737, 2022. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128737>. Acesso em: 14 nov. 2023.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S.. **Ultra-high performance concrete UHPC**, Germany, 2014.

FENG, S.; XIAO, H.; LI, H. Comparative studies of the effect of ultrahigh-performance concrete and normal concrete as repair materials on interfacial bond properties and microstructure. **Engineering structures**, United Kingdom, v. 222, p. 111122, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111122>. Acesso em: 14 nov. 2023.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2012.tde-18052012-112833>. Acesso em: 14 nov. 2023.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; MUHYADDIN, G.F.; ASAAD, D.S. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: effect of fiber type and concentration. **Composites part B: Engineering**, United Kingdom, v. 103, p. 74-83, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.004>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HASSAN, A.M.T.; MAHMUD, G.H.; MOHAMMED, A.S.; JONES, S.W. The influence of normal curing temperature on the compressive strength development and flexural tensile behaviour of UHPFRC with vipulanandan model quantification. **Structures**, United Kingdom, v. 30, p. 949-959, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.063>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HOANG, A.L.; FEHLING, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. **Construction and building materials**, United Kingdom, v. 153, p. 790-806, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HUANG, B.; WANG, Y.; WU, J.; YU, J.; DAI, J.; LEUNG, C.K. Effect of fiber content on mechanical performance and cracking characteristics of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHP-SSC). **Advances in structural engineering**, United Kingdom, v. 24, n. 6, p. 1182-1195, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1369433220972452>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HUI, Z.; JIE, S.; ZHI, F. The First Precast Segmental Box-Girder Road Bridge in China, in: C. Shi, D. Wang (Eds.). **INTERNATIONAL CONFERENCE ON UHPC MATERIALS AND STRUCTURES**, 1, United Kingdom, p. 622–628. 2016.

JIANG, H.; DONG, X.; FANG, Z.; XIAO, J.; CHEN, Y. Experimental Study on Shear Behavior of a UHPC Connection Between Adjacent Precast Prestressed Concrete Voided

Beams. **Journal of bridge engineering**, United States, v. 25, n. 12, 2020. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001644](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001644). Acesso em: 14 nov. 2023.

KANG, S.; JEONG, Y.; TAN, K.H.; MOON, J. The use of limestone to replace physical filler of quartz powder in UHPFRC. **Cement and concrete composites**, United Kingdom, v. 94, p. 238-247, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.013>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LI, J.; WU, C.; HAO, H. An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. **Materials & design**, Netherlands, v. 82, p. 64-76, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.045>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LI, V.C.; FISHER, G. Reinforced ECC - an evolution from materials to structures. **Proceedings of the first fib congress 2002: Concrete structures in the 21st century**, Japan, v. 5, p. 105-122, 2002.

LI, Z.; RANGARAJU, P.R. Effect of Surface Roughness on the Bond Between Ultrahigh-Performance and Precast Concrete in Bridge Deck Connections. **Transportation research record: journal of the transportation research board**, United States, v. 2577, n. 1, p. 88-96, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2577-11>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LIN, Y.; YAN, J.; WANG, Z.; FAN, F.; ZOU, C. Effect of silica fumes on fluidity of UHPC: experiments, influence mechanism and evaluation methods. **Construction and building materials**, United States, v. 210, p. 451-460, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.162>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LIU, J.; CHEN, Z.; GUAN, D.; LIN, Z.; GUO, Z. Experimental study on interfacial shear behaviour between ultra-high performance concrete and normal strength concrete in precast composite members. **Construction and building materials**, United States, v. 261, p. 120008, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120008>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LOPEZ, J.A.; SERNA, P.; CAMACHO, E.; COLL, H.; NAVARRO-GREGORI, J.. First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: design and construction. **Structural engineering international**, International organization, v. 24, n. 1, p. 101-104, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2749/101686614x13830788505793>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MA, J.; SCHNEIDER, H. Properties of ultra-high-performance concrete. **Leipzig annual civil engineering report (LACER)**, Germany, v. 7, p. 25-32, 2002.

MA, J.; DEHN, F.; TUE, N.V.; ORGASS, M.; SCHIMIDT, D. Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates. **Proceeding international symposium on ultra high performance concrete (UHPC)**, Germany, p. 205-212, 2004.

MÁCA, P.; SOVJÁK, R.; VAVRINÍK, T. Experimental Investigation of Mechanical Properties of UHPFRC. **Procedia engineering**, United Kingdom, v. 65, p. 14-19, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.004>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, 2008.

MENG, W.; KHAYAT, K.H. Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC. **Journal of materials in civil engineering**, United States, v. 30, n. 4, 2018. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002212](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002212). Acesso em: 14 nov. 2023.

MOHAMAD, M.E.; IBRAHIM, I.S.; ABDULLAH, R.; RAHMAN, A.B.A.; KUEH, A.B.H.; USMAN, J. Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond. **Cement and concrete composites**, United States, v. 56, p. 1-14, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.003>. Acesso em: 14 nov. 2023.

OLIVEIRA, C. O. E. **Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2020.tde-07022020-134801>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ORGASS, M.; KLITSCH, B.; WIBLER, M.; TAUSCHER, F.; DEHN, F. Überführungsbauwerk der L 3378 bei Fulda-Lehnerz. **Beton- Und Stahlbetonbau**, Germany, v. 113, n. 11, p. 821-830, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/best.201800067>. Acesso em: 14 nov. 2023.

OUYANG, X.; SHI, C.; WU, Z.; LI, Kai; SHAN, B.; SHI, J. Experimental investigation and prediction of elastic modulus of ultra-high performance concrete (UHPC) based on its composition. **Cement and concrete research**, United Kingdom, v. 138, p. 106241, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106241>. Acesso em: 14 nov. 2023.

PARK, S.H.; KIM, D.J.; RYU, G.S.; KOH, K.T. Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. **Cement and concrete composites**, United Kingdom, v. 34, n. 2, p. 172-184, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>. Acesso em: 14 nov. 2023.

PONCETTI, B.L.; SANTOS, V.B.D.; GROSSI, C.C.D.M.; TOLENTINO, L.D.; VANDERLEI, R.D. Experimental investigation of the performance of normal and high-strength concrete confined by UHPFRC jacketing. **Engineering structures**, United Kingdom, v. 289, p. 116321, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116321>. Acesso em: 14 nov. 2023.

PRADO, L.P.; CARRAZEDO, R.; DEBS, M.K.E. Interface strength of High-Strength concrete to Ultra-High-Performance concrete. **Engineering structures**, United Kingdom, v. 252, p. 113591, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113591>. Acesso em: 14 nov. 2023.

REN, G.M.; WU, H.; FANG, Q.; LIU, J.Z. Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC. **Construction and building materials**, United States, v. 163, p. 826-839, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.184>. Acesso em: 14 nov. 2023.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and concrete research**, United Kingdom, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2). Acesso em: 14 nov. 2023.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: part I: Raw materials and mixture design. **Construction and building materials**, United States, v. 101, p. 741-751, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>. Acesso em: 14 nov. 2023.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; VIDAL, T. Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin. **Construction and building materials**, United States, v. 112, p. 980-987, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169>. Acesso em: 14 nov. 2023.

TENG, J.; XIANG, Y.; YU, T.; FANG, Z. Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete. **Advances in structural engineering**, United Kingdom, v. 22, n. 14, p. 3100-3120, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1369433219858291>. Acesso em: 14 nov. 2023.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho – UHPC: ciência e tecnologia**, São Paulo, v. 2, n. 36, p. 1283-1325, 2011.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C.; HELENE, P. **Concreto de ultra alto desempenho - UHPC: fundamentos, propriedades e dosagem**, São Paulo, p. 1-30, 2022. Disponível em: [concreto-ultra-alto-desempenho-UHPC_deg.pdf](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.11.009). Acesso em: 14 nov. 2023.

VALIKHANI, A.; JAHROMI, A. J.; MANTAWY, I. M.; AZIZINAMINI, A. Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application. **Construction and building materials**, United States, v. 238, p. 117753, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117753>. Acesso em: 14 nov. 2023.

WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and building materials**, United States, v. 86, p. 33-43, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.087>. Acesso em: 14 nov. 2023.

VAN TUAN, N.; YE, G.; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A.L.A.; BUI, D.D. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and building materials**, United States, v. 25, n. 4, p. 2030-2035, 2011a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046>. Acesso em: 14 nov. 2023.

VAN TUAN, N.; YE, G.; VAN BREUGEL, K.; COPUROGLU, O.. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and concrete research**, United Kingdom, v. 41, n. 11, p. 1104-1111, 2011b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.009>. Acesso em: 14 nov. 2023.

WU, Z.; SHI, C.; HE, W.; WU, L. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction and building materials**, United States, v. 103, p. 8-14, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>. Acesso em: 14 nov. 2023.

WU, Z.; KHAYAT, K.H.; SHI, C. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? **Cement and concrete composites**, United Kingdom, v. 90, p. 193-201, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.021>. Acesso em: 14 nov. 2023.

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**, Netherlands, v. 174, p. 107021, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>. Acesso em: 14 nov. 2023.

YOU, X.M.; LIN, L.B.; FU, B.; XIANG, Y. Ultra-high performance concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP composites. **Case studies in construction materials**, Amsterdam, v. 18, p. 02120, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02120>. Acesso em: 14 nov. 2023.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC). **Cement and concrete research**, United Kingdom, v. 56, p. 29-39, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZHANG, Y.; ZHU, P.; LIAO, Z.; WANG, L. Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material. **Construction and building materials**, United States, v. 235, p. 117431, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117431>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZHANG, S.S.; WANG, J.J.; LIN, G.; YU, T.; FERNANDO, D. Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPRFC) under triaxial compression. **Construction and building materials**, United States, v. 370, p. 130658, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZHONG, H.; CHEN, M.; ZHANG, M. Effect of hybrid industrial and recycled steel fibres on static and dynamic mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Construction and building materials**, United States, v. 370, p. 130691, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130691>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZHOU, M.; LU, W.; SONG, J.; LEE, G.C. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. **Construction and building materials**, United States, v. 186, p. 1256-1267, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036>. Acesso em: 14 nov. 2023.