

SUBMETIDO 04/10/2024

APROVADO 16/12/2024

PUBLICADO ON-LINE 16/01/2025

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 30/12/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Nelma Mirian Chagas de Araújo



<https://doi.org/10.18265/2447-9187a2025id8718>

ARTIGO ORIGINAL

Estudo preliminar sobre a produção de concreto de ultra-alto desempenho com adição de fibra de sisal e substituição parcial de cimento Portland por resíduo de vidro

Alana Rúbia Farias ^[1]

Luiz Fernando
Zambiasi Trentin ^[2]

Allan Guimarães Borçato ^[3] *

[1] alana.rf@aluno.ifsc.edu.br

[2] luiz.fzt@aluno.ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa
Catarina (IFSC), São Carlos,
Santa Catarina, Brasil

[3] allan.borcato@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa
Catarina (IFSC), Florianópolis,
Santa Catarina, Brasil

* Autor para correspondência.

RESUMO: O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) é um material com propriedades físicas e mecânicas avançadas, caracterizado por uma baixa relação água/aglomerante. No entanto, essa característica leva a uma predisposição para a formação de fissuras devido à retração autóloga. Para mitigar esses efeitos, fibras metálicas e não metálicas têm sido utilizadas, embora apresentem alta pegada de carbono. Além disso, o UHPC consome grandes quantidades de cimento Portland (CP), resultando em impactos ambientais significativos. Nesse contexto, o presente estudo investigou materiais alternativos, como resíduos de vidro (RV) e fibra de sisal (FS), para substituir materiais com maior pegada de carbono. Quatro misturas de UHPC foram preparadas, contendo 0%, 10%, 20% e 30% de substituição de CP por RV, todas com adição de 1% de FS. As propriedades avaliadas incluíram resistência à compressão, absorção de água por imersão e índice de vazios. Também foi realizada uma análise de ecoeficiência para avaliar a pegada de carbono de cada mistura produzida. Os resultados indicaram que a substituição parcial de PC por RV promoveu aumento da resistência à compressão em idades avançadas. A análise estatística destacou que a mistura com 20% de RV atingiu a maior resistência à compressão, atingindo 103,8 MPa em 180 dias. Em relação à ecoeficiência, a incorporação de RV e FS resultou em um UHPC mais sustentável, com a mistura contendo 30% de RV atingindo uma pegada de carbono de 5,6 kg.CO₂/m³/MPa em 180 dias. Conclui-se que o uso de RV e FS demonstra potencial para o desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: concreto de ultra-alto desempenho; ecoeficiência; fibra de sisal; resíduo de vidro; sustentabilidade.

Preliminary study on the production of ultra-high performance concrete with



sisal fiber addition and partial replacement of Portland cement with glass waste

ABSTRACT: Ultra-high performance concrete (UHPC) is a material with advanced physical and mechanical properties, characterized by a low water/binder ratio. However, this characteristic leads to a predisposition for the formation of cracks due to autogenous shrinkage. To mitigate these effects, metallic and non-metallic fibers have been used, although they present a high carbon footprint. Additionally, UHPC consumes large amounts of Portland cement (PC), resulting in significant environmental impacts. In this context, the present study investigated alternative materials, such as glass waste (GW) and sisal fiber (SF), to replace materials with a higher carbon footprint. Four UHPC mixtures were prepared, containing 0%, 10%, 20%, and 30% replacement of PC with GW, all with 1% SF addition. The evaluated properties included compressive strength, water absorption by immersion, and void index. Furthermore, an eco-efficiency analysis was conducted to assess the carbon footprint of each produced mixture. The results indicated that the partial replacement of PC with GW promoted increased compressive strength at advanced ages. Statistical analysis highlighted that the mixture with 20% GW achieved the highest compressive strength, reaching 103.8 MPa in 180 days. Regarding eco-efficiency, the incorporation of GW and SF resulted in more sustainable UHPC, with the mixture containing 30% GW achieving a carbon footprint of 5.6 kg CO₂/m³/MPa in 180 days. It is concluded that the use of GW and SF demonstrates the potential for developing environmentally sustainable ultra-high performance concrete.

Keywords: eco-efficiency; glass waste; sisal fiber; sustainability; ultra-high performance concrete.

1 Introdução

O concreto de ultra-alto desempenho (Ultra-High Performance Concrete – UHPC) é um material com propriedades avançadas, amplamente utilizado em ambientes agressivos, como aqueles que contêm dióxido de carbono, cloretos, sulfatos, entre outros agentes, bem como na construção de pontes, rodovias e edificações de grande porte, entre diversas outras aplicações (Feng *et al.*, 2023). O UHPC combina, em um único material, características mecânicas e de desempenho observadas em três tipos de concreto: o concreto de alto desempenho (CAD), o concreto autoadensável (CAA) e o concreto reforçado com fibras (CRF) (Akeed *et al.*, 2022). Esse material pode alcançar níveis de desempenho significativamente superiores aos concretos convencionais, apresentando resistência à compressão acima de 120 MPa e resistência à tração superior a 5 MPa. Contudo, é importante destacar que esses valores variam de acordo com o tipo de cura aplicado e a proporção dos materiais utilizados no traço do concreto (Du *et al.*, 2021).

A dosagem do UHPC caracteriza-se por uma baixa relação água/aglomerante (a/a), um elevado consumo de cimento Portland (CP), adição de sílica ativa (SA) e a substituição de agregados graúdos por agregados miúdos (Ren *et al.*, 2021). Em função dessas características, o UHPC apresenta maior propensão ao surgimento de fissuras decorrentes da retração autógena, o que pode comprometer sua durabilidade e propriedades

mecânicas (Ren; Gao; Zhang, 2022). Para mitigar tais efeitos, fibras metálicas e/ou não metálicas são incorporadas à mistura, aumentando a ductilidade e a tenacidade do concreto, além de possibilitarem melhorias adicionais conforme o tipo de fibra utilizada (Feng *et al.*, 2023).

Uma das principais vantagens do UHPC é a redução do volume de materiais necessários em estruturas, uma vez que o material permite a utilização de seções menores. Além disso, o UHPC possui maior durabilidade em comparação ao concreto convencional, o que reduz a necessidade de manutenções ao longo de sua vida útil (Tahwia *et al.*, 2022). Contudo, o UHPC demanda um volume expressivo de CP, material que possui elevada pegada de carbono devido ao consumo intensivo de energia em sua produção, resultando em impactos ambientais significativos (Miller *et al.*, 2016; Scrivener; John; Gartner, 2018).

Uma alternativa viável para reduzir o consumo de CP consiste em sua substituição parcial por materiais suplementares, como sílica ativa, metacaulim, pó de pedra e resíduo de vidro (RV) (Althoey *et al.*, 2023; Tahwia *et al.*, 2022). O uso do RV no UHPC pode contribuir para a redução das emissões de CO₂, diminuir os custos de produção, melhorar as propriedades mecânicas em idades avançadas, reduzir a absorção de água, entre outros benefícios.

Adicionalmente, algumas fibras sintéticas, como a fibra de polipropileno (FP), são amplamente utilizadas no UHPC para controle de fissuras originadas pela retração autógena. Contudo, a FP apresenta uma alta pegada de carbono e custos elevados em comparação com fibras naturais, como a fibra de sisal (FS) (Ren *et al.*, 2022). A FS, obtida das folhas da planta *Agave sisalana*, é uma alternativa sustentável por ser biodegradável, de baixo custo e apresentar impactos ambientais mínimos durante sua produção (Ren *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e a ecoeficiência do UHPC produzido com incorporação de FS e diferentes teores de substituição parcial de CP por RV. Por meio desta investigação, busca-se definir um percentual ótimo de substituição, visando ao desenvolvimento de UHPC mais sustentáveis.

As demais seções estão organizadas da seguinte forma: na Seção 2 aborda-se o referencial teórico pertinente ao tema; na Seção 3, os procedimentos experimentais realizados; na Seção 4 apresentam-se os resultados obtidos nas análises e nos ensaios e, por fim, a Seção 5 expõe as conclusões obtidas ao longo do estudo.

2 Referencial teórico

As características e a resistência mecânica necessárias para a classificação como UHPC variam conforme o país e as normativas vigentes. De acordo com a ASTM C1856 (ASTM, 2017), o UHPC é definido como uma mistura cimentícia com resistência à compressão de pelo menos 120 MPa, frequentemente contendo fibras em sua composição e devendo atender aos requisitos de ductibilidade, durabilidade e resistência estabelecidos pela norma. Diversos autores, entretanto, sugerem que a resistência à compressão do UHPC pode variar entre 120 MPa e 150 MPa (Akeed *et al.*, 2022; Amran *et al.*, 2023; Du *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2022; Hamada *et al.*, 2023). A elevada resistência à compressão é atribuída à alta densidade de empacotamento do UHPC.

Devido à alta densidade de empacotamento, a permeabilidade é reduzida, limitando a entrada de substâncias nocivas, como sulfatos, dióxido de carbono, cloretos e outros compostos prejudiciais (Ravichandran *et al.*, 2022). Segundo Li *et al.* (2020), o UHPC apresenta desempenho excepcional frente à carbonatação, sendo praticamente

impermeável a esse efeito. Em um período de 6 meses a 1 ano, a profundidade de carbonatação varia entre 0,5 mm e 2 mm. O UHPC também demonstra excelente resistência em ensaios de congelamento e descongelamento, mesmo após vários ciclos do teste, em virtude da sua baixa porosidade, o que melhora sua durabilidade (Li *et al.*, 2020). Dessa forma, o UHPC se apresenta como uma solução viável para ambientes agressivos em diversas tipologias de construção (Ren; Gao; Zhang, 2022; Wang *et al.*, 2023). Especificamente, o UHPC é amplamente utilizado na construção de pontes na América do Norte, na Europa e na Ásia, permitindo a redução de material estrutural em até 50% a 70%, além de apresentar menor necessidade de manutenção e maior durabilidade (Ravichandran *et al.*, 2022). No entanto, apesar dos avanços e de sua implementação em algumas regiões, a utilização generalizada do UHPC ainda enfrenta desafios, especialmente devido à falta de normativas específicas e ao elevado custo inicial.

Nas últimas três décadas, o UHPC passou por sucessivos aprimoramentos. Inicialmente, sua produção era limitada a laboratórios (Du *et al.*, 2021). A cura mais comum utilizada em laboratório é a cura a vapor ou térmica, que acelera a hidratação, reduz a porosidade e aumenta a densidade, tornando o concreto menos suscetível a ataques de substâncias nocivas (Ravichandran *et al.*, 2022). Contudo, a produção em larga escala ainda enfrenta dificuldades devido à complexidade da preparação da mistura (Du *et al.*, 2021). A aplicação de cura térmica em campo é inviável pela alta demanda energética e de mão de obra. Por esse motivo, estudos buscam alternativas para o uso da cura convencional em condições externas (Ravichandran *et al.*, 2022). Ademais, o processo de mistura do UHPC é determinante para a obtenção de um material homogêneo. Contudo, não existe um método padronizado, o que resulta em variações nos procedimentos encontrados em pesquisas, tais como tempo de mistura, ordem de adição de materiais, fibras e superplastificante (Wang *et al.*, 2023).

A composição do UHPC caracteriza-se por uma proporção extremamente baixa de água/aglomerante (a/a), um elevado consumo de cimento Portland (CP), além do uso de superplastificantes (SA) e agregados finos (Ren *et al.*, 2021). Devido ao impacto ambiental significativo e aos custos associados ao uso do CP, diversas alternativas têm sido investigadas para substituí-lo por outros materiais cimentícios no desenvolvimento do concreto. Entre os materiais mais comumente utilizados como substitutos, destacam-se a sílica ativa, o metacaulim, as cinzas volantes e a escória, entre outros. Essas alternativas buscam reduzir a dependência do CP e promover uma abordagem mais sustentável na produção de concreto, mitigando os impactos característicos da atividade industrial, como a emissão de gases de efeito estufa, o esgotamento de recursos naturais, a ineficiência energética e a escassez de áreas para disposição de resíduos (Cartaxo *et al.*, 2023; Dobiszewska *et al.*, 2023).

O resíduo de vidro também demonstra potencial como substituto parcial do CP no UHPC, em virtude de sua atividade pozolânica (Asgarian; Roshan; Ghalehnovi, 2023). Estudos conduzidos por Tahwia *et al.* (2022) indicam que as reações pozolânicas tanto da sílica ativa quanto do resíduo de vidro promovem um aumento na resistência do UHPC devido à formação adicional de gel C-S-H, o qual preenche os poros da matriz do concreto, aumentando sua densidade e resistência à compressão. Adicionalmente, a incorporação do resíduo de vidro contribui para o empacotamento das partículas do UHPC, especialmente quando apresenta granulometria inferior à do CP, auxiliando a sílica ativa no intertravamento e empacotamento das partículas (Soliman; Tagnit-Hamou, 2017). A utilização desse resíduo também oferece uma solução para o descarte inadequado de vidro em aterros sanitários, contribuindo para sua reutilização e nova destinação (Asgarian; Roshan; Ghalehnovi, 2023). No entanto, o descarte inadequado do vidro é comum devido à sua fragilidade, variedade de cores, contaminações por outros materiais e custos elevados de reciclagem (Tran *et al.*, 2023).

No que se refere à mitigação da retração autógena no UHPC, a incorporação de fibras metálicas e/ou não metálicas tem sido amplamente empregada. A adição de fibras contribui para reduzir os efeitos da retração autógena, além de melhorar propriedades como ductilidade e tenacidade. As fibras desempenham um papel fundamental na composição do UHPC, promovendo melhorias em propriedades mecânicas como resistência à fissuração, ductilidade, resistência à tração e absorção de energia (Feng *et al.*, 2023). Contudo, a seleção cuidadosa do tipo de fibra é crucial, pois diferentes tipos de fibras impactam de maneira distinta as propriedades do concreto. Aspectos como comprimento, formato, tensão, revestimento e reação de arrancamento das fibras são determinantes para a eficiência de sua aplicação (Ravichandran *et al.*, 2022).

A orientação das fibras também é um fator relevante no projeto do UHPC. Essas podem ser distribuídas aleatoriamente, gerando uma orientação tridimensional, ou alinhadas de acordo com as necessidades específicas do projeto (Akeed *et al.*, 2022). A porcentagem de fibras incorporadas, que normalmente varia entre 0,2% e 2% do volume do UHPC, deve ser cuidadosamente definida, já que dosagens excessivas podem comprometer as propriedades do concreto, provocando perda de resistência mecânica, formação de vazios e aglomeração das fibras (Ravichandran *et al.*, 2022).

Fibras de aço e sintéticas têm sido as mais empregadas no UHPC, embora apresentem desvantagens como elevada pegada de carbono e aumento nos custos de produção (Ren *et al.*, 2021). Nesse contexto, o uso de fibras híbridas, como a combinação de fibras de aço e polipropileno, surge como alternativa para reduzir fissuração por retração e custos, embora também enfrente desafios ambientais. Em busca de maior sustentabilidade, o desenvolvimento de UHPC com fibras vegetais ou celulósicas tem se mostrado promissor.

As fibras vegetais ou celulósicas apresentam diversas vantagens em relação a outros tipos de fibras. Destacam-se por serem biodegradáveis, de baixo custo, renováveis e recicláveis (Ravichandran *et al.*, 2022). Assim, devido a essas características únicas, as fibras vegetais configuram-se como uma alternativa viável para substituir fibras com elevada pegada de carbono. Entre as fibras vegetais, a fibra de sisal, obtida das folhas da planta *Agave sisalana* (Ren *et al.*, 2022), é amplamente utilizada. Essa fibra possui propriedades notáveis, como resistência a baixas temperaturas, resistência a ácidos, capacidade de suportar abrasão e elevada resistência à tração (Ren *et al.*, 2021). Além disso, estudos indicam que a fibra de sisal apresenta boa resistência à fragmentação em situações de incêndio quando incorporada ao UHPC, demonstrando ser eficaz na redução da perda de vapor sob exposição a altas temperaturas e prevenindo potenciais danos, como o *spalling* (Ren *et al.*, 2021).

3 Metodologia

Nesta seção, são apresentadas a caracterização dos materiais utilizados, a dosagem dos traços e a metodologia empregada nas análises e nos ensaios realizados para avaliar as propriedades dos traços de UHPC estudados.

3.1 Materiais

O cimento Portland (CP) utilizado foi o CP V – ARI, com massa específica de 3,05 g/cm³. A sílica ativa (SA), de origem comercial (Elkem 920D), apresentou massa específica de 2,20 g/cm³. Utilizou-se areia natural, com massa específica de 2,65 g/cm³.

e granulometria entre 75 μm e 600 μm , como agregado (obtida por peneiramento do material em peneiras com aberturas de malha de 75 μm (#200) e 600 μm (#30)). Para a produção do UHPC, empregou-se um aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilato (MC-Power Flow 400). O resíduo de vidro (RV) foi proveniente do processo de jateamento de elementos metálicos. Esse material foi passado em uma peneira com abertura de malha de 75 μm (#200), sendo a fração passante utilizada no estudo, e possui massa específica de 2,56 g/cm³.

A Tabela 1 apresenta a composição química do CP, da SA e do RV, determinada por meio de análises de fluorescência de raios X (FRX). A análise química revelou que o RV é constituído predominantemente por SiO₂, CaO e Na₂O, caracterizando-se como um vidro sodo-cálcico. A perda ao fogo (P.F.), obtida a 1.000 °C, também está destacada na tabela. A caracterização mineralógica, realizada por análise de difração de raios X (DRX) e ilustrada na Figura 1, indicou que o RV é completamente amorfo. Essas características sugerem que o RV possui potencial pozolânico, contribuindo para a formação adicional de gel C-S-H em idades avançadas, o que aumenta a resistência mecânica e a densidade do UHPC (Soliman; Tagnit-Hamou, 2016; Tahwia *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023).

Tabela 1 ▼

Composição química do resíduo de vidro.

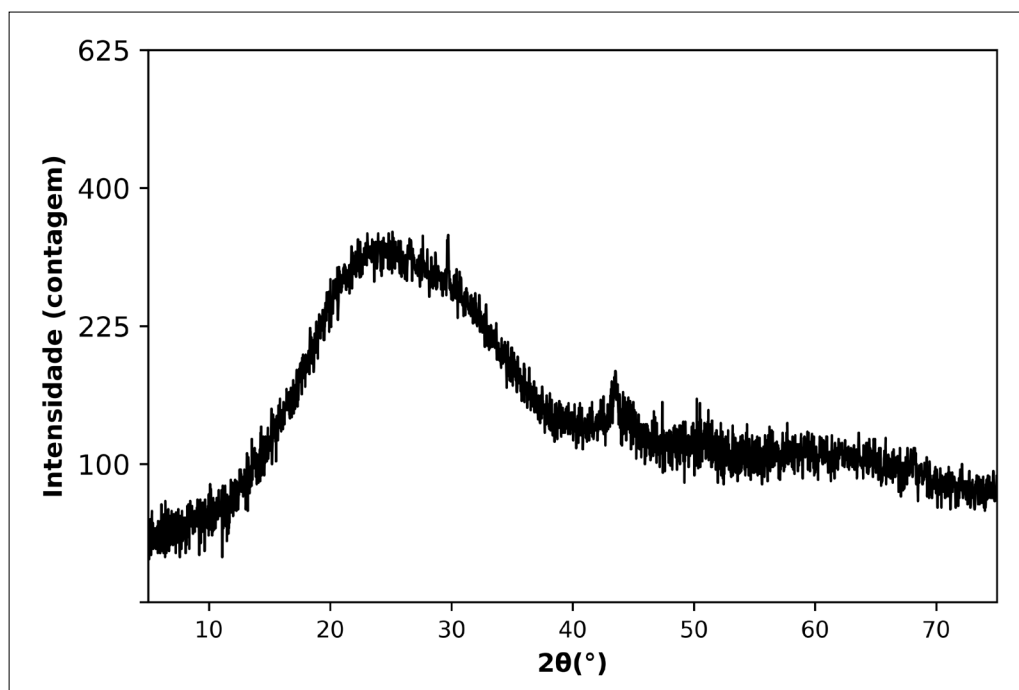
Fonte: dados da pesquisa

Óxido (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	P.F.
CP	55,3	19,5	5,2	4,4	3,6	3,5	1,5	0,4	0,3	0,2	0,1	—	—	5,57
SA	0,5	94,9	0,1	0,3	0,1	0,1	1,1	—	0,2	0,1	—	—	—	2,33
RV	12,1	69,5	0,5	2,8	0,3	1,8	0,2	0,1	11,9	—	0,1	0,4	0,1	0,36

Figura 1 ►

Análise de difração de raios X (DRX) do RV.

Fonte: dados da pesquisa



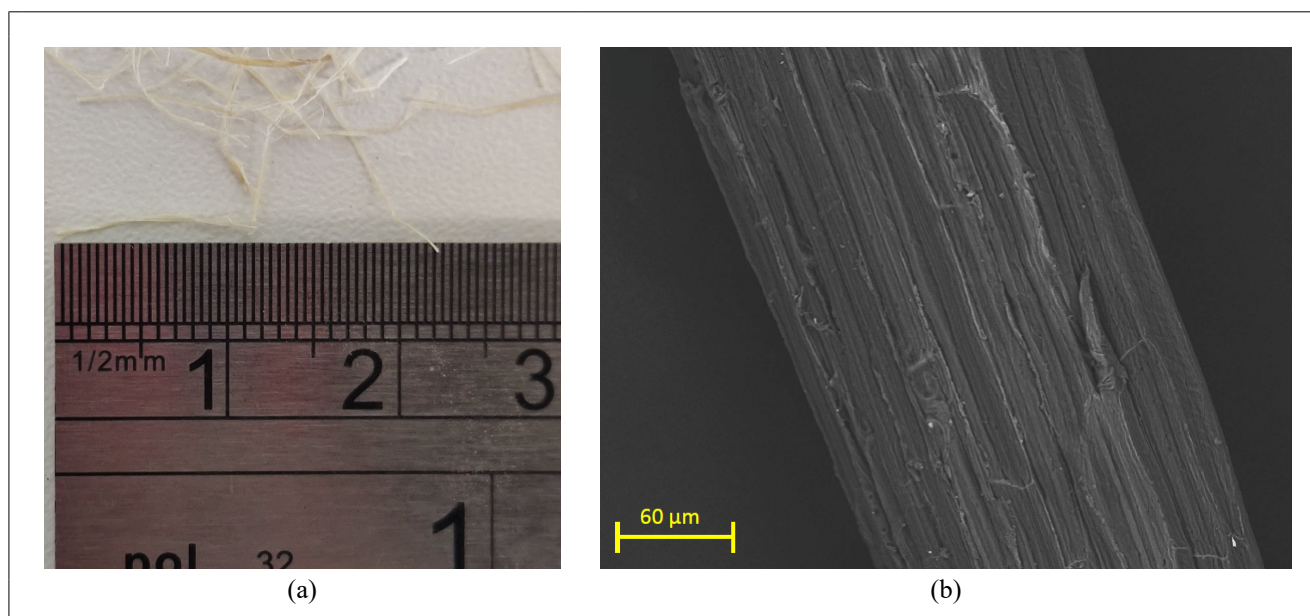
As fibras de sisal (Figura 2a) foram cortadas para obter um comprimento médio de 12 ± 1 mm. Em seguida, passaram por um processo de limpeza para a remoção de impurezas superficiais, seguindo a metodologia descrita por Ren, Gao e Zhang (2022). Após a limpeza, foram imersas em uma solução alcalina de NaOH a 5,0% por 4 horas, lavadas em água corrente e secas em estufa a uma temperatura entre 50 °C e 70 °C,

Figura 2 ▼

Fibra de sisal. (a) Imagem da fibra após o corte e limpeza. (b) Imagem da fibra por MEV.

Fonte: arquivo dos autores

até atingirem massa constante. Esse tratamento químico, frequentemente aplicado a fibras vegetais, auxilia na remoção de componentes como hemicelulose e lignina, presentes na parede celular das fibras, o que contribui para o aumento de sua resistência mecânica (Moura, 2021). A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentada na Figura 2b, confirmou a eficácia do processo de limpeza, evidenciando a ausência de impurezas na superfície das fibras.



3.2 Dosagem

Tabela 2 ▼

Dosagem dos traços de UHPC.

Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 2 apresenta os traços de UHPC avaliados no estudo. O traço de referência (REF) foi adaptado de Ren *et al.* (2021), e, a partir dele, foram desenvolvidos outros três traços, substituindo 10%, 20% e 30% do CP por RV. A relação água/aglomerante (a/a) foi fixada em 0,22 para todos os traços. Em todas as misturas, foi incorporado 1% (em volume) de fibras de sisal com 12 ± 1 mm de comprimento, em conformidade com os parâmetros do estudo de Ren *et al.* (2021), que relatou máxima resistência mecânica do UHPC com essas especificações.

ID	Cimento Portland (kg/m³)	Resíduo de vidro (kg/m³)	Sílica ativa (kg/m³)	Agregado (kg/m³)	Água (kg/m³)	SP (kg/m³)	SP (%)	Fibra de sisal (kg/m³)	a/a
REF	836,4	—	234,5	936,4	224,5	32,1	836,4	14,5	0,22
V10	752,9	79,2	233,4	931,6	223,4	31,9	752,9	14,5	0,22
V20	677,7	150,6	232,3	927,4	222,4	31,8	677,7	14,5	0,22
V30	609,7	215,2	231,3	923,5	221,5	31,7	609,7	14,5	0,22

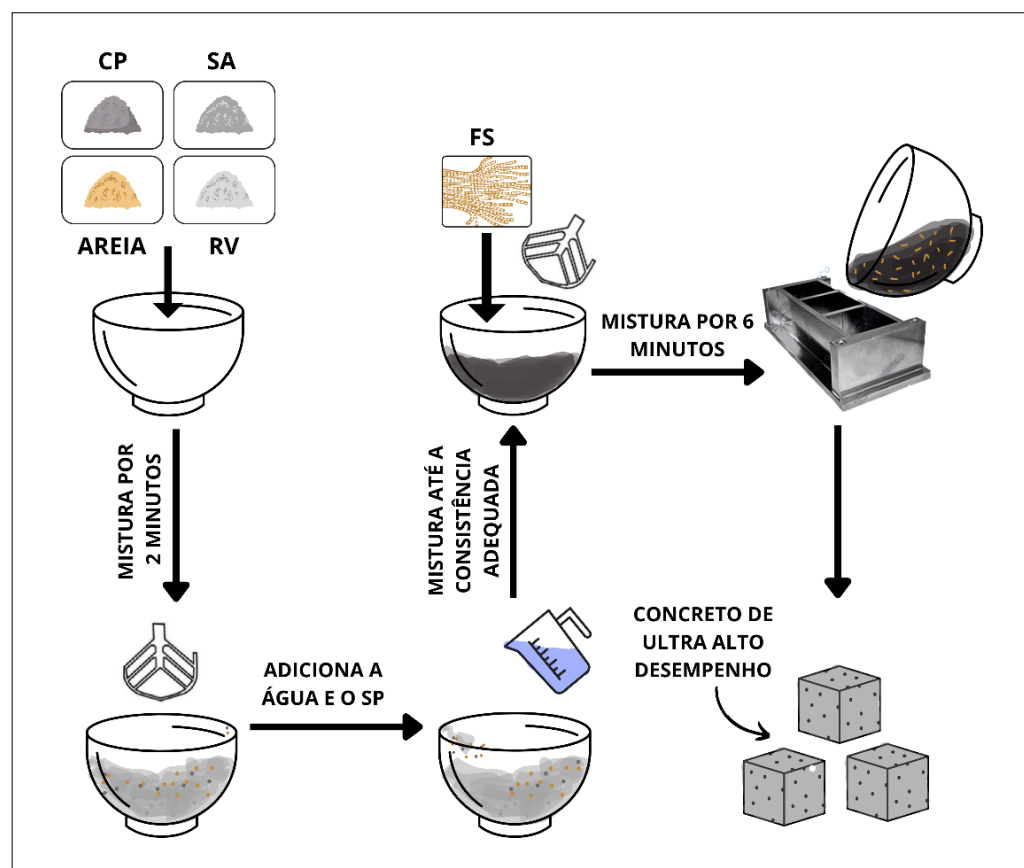
O processo de mistura seguiu a metodologia proposta por Ren *et al.* (2021). Inicialmente, os materiais secos (CP, SA, RV e agregados) foram misturados por 2 minutos em misturador de argamassa. Em seguida, adicionaram-se gradualmente a água e o SP, misturando até alcançar consistência fluida. Posteriormente, as fibras de sisal foram

incorporadas, e a mistura foi realizada por mais 6 minutos para garantir a distribuição uniforme dos componentes.

Após a mistura, os corpos de prova foram moldados em moldes cúbicos (50 × 50 × 50 mm) e armazenados em uma sala com temperatura ambiente. Para minimizar bolhas de ar, o molde foi preenchido em três camadas, sendo cada camada adensada com 10 golpes. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com filme plástico para evitar perda de água superficial. Passadas 24 horas, os corpos foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada com cal até o momento dos ensaios. O fluxograma do processo de mistura e moldagem está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 ►

Fluxograma da mistura e moldagem dos corpos de prova.
Fonte: elaborado pelos autores



3.3 Análises e ensaios realizados

A resistência à compressão foi determinada nas idades de 7, 28 e 180 dias, conforme a norma ASTM C109 (ASTM, 2020). O ensaio de absorção por imersão em água e índice de vazios, realizado aos 28 dias, seguiu a metodologia descrita na norma ASTM C140 (ASTM, 2022). Para a análise de ecoeficiência, empregou-se a metodologia proposta por Tran *et al.* (2023), possibilitando o cálculo das emissões totais equivalentes de carbono por metro cúbico (eCO_{2tot}) de cada mistura de UHPC e sua comparação com a mistura de referência. Essa abordagem é expressa pela Equação 1:

$$eCO_{2tot} = \sum CI \times mi \quad (1)$$

Na equação, *CI* representa o carbono incorporado de cada matéria-prima e *mi* corresponde à quantidade de matéria-prima utilizada para produzir um metro cúbico de UHPC. Os valores de *CI* foram baseados nos estudos de Tran *et al.* (2023) e Ren, Gao e Zhang (2022), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 ►

Valores de carbono incorporado dos materiais utilizados como insumo do UHPC.
Fonte: dados da pesquisa

Material	CI (kg.CO ₂ /kg)	Referência
Cimento Portland (CP)	0,840	Ren, Gao e Zhang (2022)
Sílica ativa (SA)	0,00031	Ren <i>et al.</i> (2022)
Resíduo de vidro (RV)	0,0838	Tran <i>et al.</i> (2023)
Agregados (Areia)	0,025	Ren <i>et al.</i> (2022)
Água	0,0003	Tran <i>et al.</i> (2023)
Superplastificante (SP)	0,75	Ren <i>et al.</i> (2022)
Fibra de sisal (FS)	-1,31	Ren <i>et al.</i> (2022)

Cabe ressaltar que o da fibra de sisal é negativo. De acordo com Ren *et al.* (2022), enquanto a produção de uma tonelada de fibras de sisal emite aproximadamente 270 kg de CO₂, esse mesmo volume captura cerca de 1.582 kg de CO₂ durante o crescimento vegetativo da planta. Assim, o balanço final indica uma pegada de carbono negativa.

Após a determinação das emissões totais de carbono por metro cúbico, a ecoeficiência de cada mistura foi calculada dividindo-se o total de emissões de carbono pela resistência à compressão média obtida em cada idade analisada.

Adicionalmente, foram realizadas análises de difração de raios X (DRX), fluorescência de raio X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a caracterização das matérias-primas. As análises de DRX e MEV foram conduzidas no Laboratório Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, enquanto a análise de FRX foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), vinculado ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

- Análise de DRX: realizada para caracterizar mineralogicamente o RV, utilizando um equipamento Rigaku Mini Flex 600 com os seguintes parâmetros: comprimento de onda de 1,54 Å; intervalo de leitura de 5° a 75° (2θ); passo de 0,02°, com tempo de 0,4 segundos por passo; radiação Cu-Kα; e tensão elétrica de 40 kV;
- Análise de MEV: realizada para avaliar o resultado da preparação de superfície da FS, empregando um microscópio Hitachi TM3000, equipado com filamento de tungstênio (W) e operando a 15 kV;
- Análise de FRX: conduzida para identificar a composição química do CP, SA e RV, utilizando um espectrômetro de raios X Panalytical Axios Max, equipado com um tubo de ródio de 4 kV. A perda ao fogo (P.F.) foi determinada mediante o aquecimento das amostras até a temperatura de 1.000 °C.

4 Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos ao longo do programa experimental. Os resultados dos ensaios físico-mecânicos são discutidos na subseção 4.1, enquanto os resultados da análise de ecoeficiência são tratados na subseção 4.2.

4.1 Resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão. Conforme relatado por Xu *et al.* (2023), observa-se uma redução inicial da resistência à compressão aos 7 dias por causa da substituição do cimento Portland (CP) pelo resíduo vitrificado (RV).

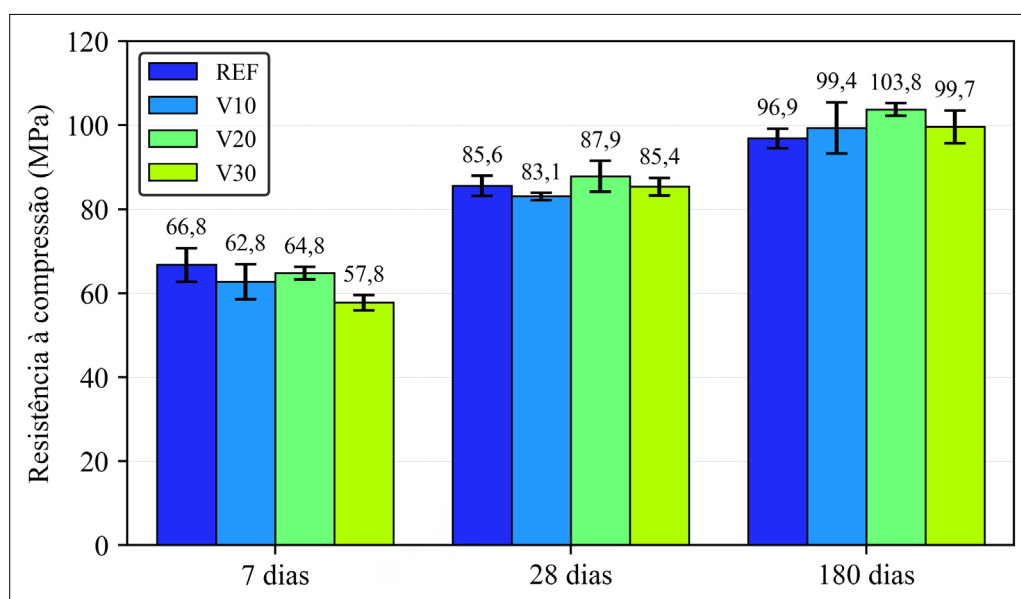
As reduções na resistência aos 7 dias foram de 6,0%, 2,9% e 13,5% para os traços V10, V20 e V30, respectivamente, em comparação ao traço de referência (REF). Essas reduções podem ser atribuídas à diminuição da quantidade de CP nas misturas. Como o RV é um material pozolânico, sua reação depende da portlandita liberada durante a hidratação do CP. Aos 28 dias, o comportamento da resistência à compressão mostrou-se distinto: os traços V10, V20 e V30 apresentaram resistências similares ao traço REF, com variações entre -2,9% e 2,6%. Aos 180 dias, as variações foram de -0,1%, 5,7% e 1,6% para os traços V10, V20 e V30, respectivamente, em relação ao traço REF. A análise estatística revelou uma diferença significativa apenas no traço V20, que obteve o maior valor médio de resistência à compressão (103,8 MPa), indicando que o teor de 20% de substituição proporcionou as melhores propriedades mecânicas.

Resultados semelhantes foram descritos por Soliman e Tagnit-Hamou (2017), que também observaram uma redução na resistência à compressão inicial em misturas com substituição de CP por RV, especialmente quando a substituição ultrapassa 30%. Contudo, um traço com 20% de substituição apresentou aumentos de 8% e 13% na resistência aos 56 e 91 dias, superando a resistência do traço de referência e demonstrando desempenho mecânico satisfatório.

Figura 4 ►

Resistência à compressão
aos 7, 28 e 180 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa



Adicionalmente, o aumento da resistência à compressão entre as idades analisadas para cada traço reforça a atividade pozolânica do RV. O incremento foi de 28,2%, 32,3%, 35,5% e 47,9% entre 7 e 28 dias, e de 47,1%, 56,2%, 60,0% e 72,7% entre 7 e 180 dias para os traços REF, V10, V20 e V30, respectivamente. Esse comportamento indica que maiores teores de substituição resultam em maior resistência à compressão em idades avançadas. Tal fenômeno ocorre devido à interação do RV com os produtos da hidratação do cimento, gerando gel C-S-H adicional, que preenche os poros da matriz do UHPC,

aumentando sua densidade e resistência (Silva; Marques; Rapôso, 2023; Soliman; Tagnit-Hamou, 2016; Tahwia *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023).

Entretanto, nenhum dos traços avaliados atingiu a resistência mínima de 120 MPa, conforme previsto. O traço utilizado como referência baseou-se no estudo desenvolvido por Ren *et al.* (2021), no qual o traço, incorporando 1% de fibra de sisal com comprimento de 12 mm, alcançou aproximadamente 120 MPa. Por outro lado, o traço de referência (REF) deste estudo alcançou 96,9 MPa. Ren *et al.* (2021) utilizaram uma relação água/aglomerante de 0,20. No entanto, após testes preliminares, optou-se por adotar uma relação de água/aglomerante de 0,22 para garantir uma melhor homogeneidade da mistura.

Além disso, no estudo de Ren *et al.* (2021), foi utilizada cura térmica (90 °C por 3 dias) para acelerar o ganho de resistência à compressão. Neste estudo, por outro lado, empregou-se apenas cura submersa em água saturada com cal à temperatura ambiente, o que resultou em resistências inferiores em comparação ao traço desenvolvido por Ren *et al.* (2021). Cabe destacar que as alterações adotadas em relação ao estudo de Ren *et al.* (2021) foram deliberadas, com o objetivo de aumentar a ecoeficiência dos UHPC produzidos.

A absorção de água por imersão foi de 4,2%, 4,5%, 4,3% e 4,4% aos 28 dias para os traços REF, V10, V20 e V30, respectivamente. De forma semelhante, o índice de vazios manteve-se praticamente constante, com valores de 9,2%, 9,7%, 9,2% e 9,4%, respectivamente. A porosidade não variou significativamente devido à incorporação uniforme de 1% em volume de fibras de sisal em todos os traços.

Figura 5 ▼

Resistência à compressão.

(a) Realização do ensaio.

(b) Corpo de prova após a realização do ensaio.

Fonte: arquivo dos autores

A Figura 5a apresenta um corpo de prova rompido após o ensaio de compressão. Observou-se que, mesmo com a ruptura, o corpo de prova manteve sua forma cúbica, apresentando fissuras macroscópicas nas faces, o que demonstra a eficácia das fibras de sisal em manter a integridade estrutural. A Figura 5b evidencia que as fibras formam “pontes” que ajudam na transferência de cargas, reduzindo a fissuração e preservando o formato original, conforme descrito por Ren *et al.* (2021).



4.2 Análise de ecoeficiência

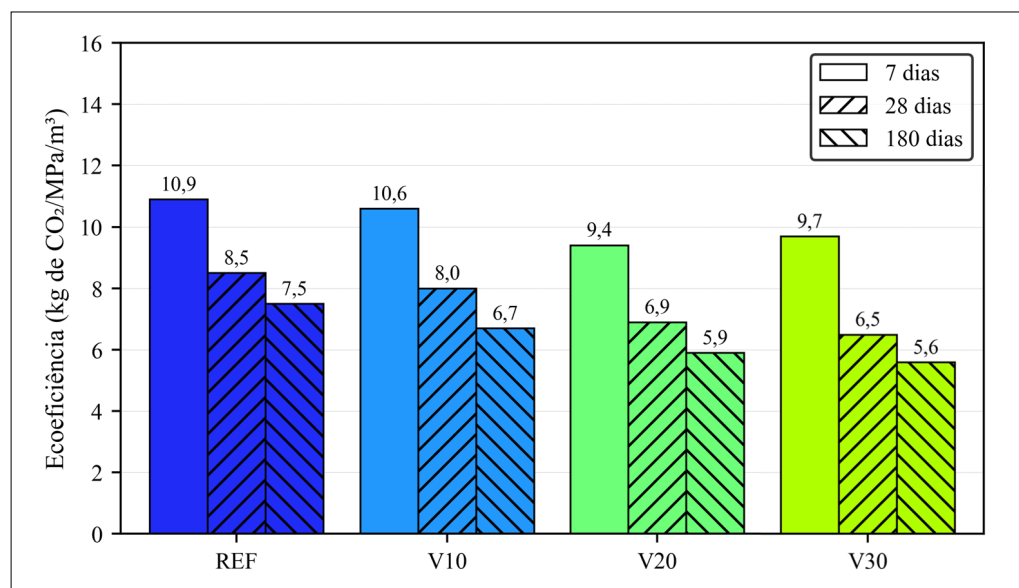
A Figura 6 apresenta os resultados da análise de ecoeficiência dos UHPC produzidos. Foi constatado um aumento da ecoeficiência com o incremento do teor de substituição de CP por RV. Aos 180 dias, observou-se uma redução de 11,0%, 22,1% e 25,8% nas emissões de CO₂ (kg.CO₂/m³/MPa) para os traços V10, V20 e V30, respectivamente, em

relação ao traço REF. O menor valor registrado foi de 5,6 kg.CO₂/m³/MPa para o traço V30, enquanto o traço V20, que apresentou a maior resistência à compressão (103,8 MPa), alcançou 5,9 kg.CO₂/m³/MPa.

Figura 6 ►

Análise de ecoeficiência das misturas de UHPC aos 7, 28 e 180 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa



Esses valores estão significativamente abaixo das médias reportadas na literatura internacional e brasileira, que são de 7,1 kg.CO₂/m³/MPa e 9,1 kg.CO₂/m³/MPa, respectivamente (Damineli *et al.*, 2010). De forma semelhante, Soliman e Tagnit-Hamou (2017) identificaram que a substituição parcial de CP por RV reduz o impacto ambiental do UHPC, sem comprometer de forma significativa suas propriedades mecânicas. Dessa forma, com base nos resultados apresentados, o RV pode ser considerado uma alternativa eficaz para a mitigação dos impactos ambientais do UHPC.

5 Conclusões

Com base nos resultados obtidos por meio das análises e ensaios realizados no programa experimental, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- A substituição do cimento Portland por resíduo de vidro mostrou-se viável, promovendo melhores propriedades mecânicas nos UHPC desenvolvidos. A análise estatística indicou que o teor de 20% de substituição resultou na maior resistência à compressão, que alcançou 103,8 MPa. Apesar desse valor ser inferior aos 120 MPa, resistência mínima recomendada para UHPC segundo a ASTM C1856 (ASTM, 2017), observou-se potencial para a produção de UHPC incorporando resíduo de vidro, em virtude de uma maior ecoeficiência obtida com o uso desse resíduo industrial;
- A substituição do cimento Portland pelo resíduo de vidro proporcionou ganhos significativos na ecoeficiência dos UHPC. A redução nas emissões de kg.CO₂/m³/MPa foi de 11,0%, 22,1% e 25,8% para os traços com 10%, 20% e 30% de substituição, respectivamente. O traço com 30% de substituição demonstrou a maior ecoeficiência, atingindo emissões de 5,6 kg.CO₂/m³/MPa. De forma similar, o traço que apresentou a maior

resistência à compressão (V20) também exibiu elevado nível de ecoeficiência, com emissões de 5,9 kg.CO₂/m³/MPa. Esses valores estão significativamente abaixo das médias reportadas na literatura internacional e brasileira, que são de 7,1 kg.CO₂/m³/MPa e 9,1 kg.CO₂/m³/MPa, respectivamente;

- No que diz respeito ao desenvolvimento da resistência à compressão nas misturas com substituição de cimento Portland por resíduo de vidro, observou-se que, em idades iniciais, o ganho de resistência foi reduzido, sendo inferior ao da mistura de referência. Contudo, em idades mais avançadas, como aos 180 dias, o ganho de resistência foi superior nos traços com maior teor de incorporação de resíduo, por causa da reação pozolânica do vidro. O aumento da resistência à compressão foi de 28,2%, 32,3%, 35,5% e 47,9% entre 7 e 28 dias, e de 47,1%, 56,2%, 60,0% e 72,7% entre 7 e 180 dias, para os traços REF, V10, V20 e V30, respectivamente.

Apesar dos avanços observados, destaca-se a necessidade de alcançar valores superiores de resistência à compressão para que os UHPC desenvolvidos atendam aos critérios normativos mínimos. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros explorem relações água/aglomerantes ainda menores e analisem o efeito do empacotamento de partículas. Além disso, é imprescindível investigar a durabilidade dos compostos cimentícios contendo resíduo de vidro frente aos principais agentes agressivos ao concreto.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Laboratório Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Pato Branco e ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo suporte técnico fornecido.

Financiamento

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pelo auxílio financeiro por meio do Edital nº 02/2023/PROPI – Universal.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

FARIAS, A. R.; TRENTIN, L. F. Z.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados. **BORÇATO, A. G.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, da discussão, da leitura e da aprovação da versão final do artigo.

Referências

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 I: developments, principles, raw materials. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, e01290, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01290>.

ALTHOEY, F.; ZAID, O.; MARTÍNEZ-GARCÍA, R.; PRADO-GIL, J.; AHMED, M.; YOSRI, A. M. Ultra-high-performance fiber-reinforced sustainable concrete modified with silica fume and wheat straw ash. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 6118-6139, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.179>.

AMRAN, M.; MURALI, G.; MAKUL, N.; TANG, W. C.; ALLUQMANI, A. E. Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): cost, carbon emission, and structural ductility. **Construction and Building Materials**, v. 398, 132477, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132477>.

ASGARIAN, A.; ROSHAN, N.; GHALEHNOVI, M. The strength, microstructure, and ecological assessment of concrete mix incorporating waste glass powder and polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 371, 130726, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130726>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109M-20**. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). West Conshohocken: ASTM, 2020.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C140M-22b**. Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. West Conshohocken: ASTM, 2022.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1856M-17**. Standard Practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete. West Conshohocken: ASTM, 2017.

CARTAXO, F. M.; FERREIRA, F. G. S.; FREITAS, K. M. G.; NASCIMENTO, L. C.; GUILGE, M. S.; ZANETTI, C. Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais. **Revista Principia**, v. 60, n. 4, p. 1413-1433, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6647>.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

DOBISZEWSKA, M.; BAGCAL, O.; BEYCIOĞLU, A.; GOULIAS, D.; KÖKSAL, F.; PŁOMIŃSKI, B.; ÜRÜNVEREN, H. Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: an alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. **Journal of Building Engineering**, v. 69, 106180, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106180>.

DU, J.; MENG, W.; KHAYAT, K. H.; BAO, Y.; GUO, P.; LYU, Z.; ABU-OBEIDAH, A.; NASSIF, H.; WANG, H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Composites Part B: Engineering**, v. 224, 109220, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>.

FENG, Z.; SHEN, D.; LUO, Y.; HUANG, Q.; LIU, Z.; JIANG, G. Effect of polypropylene fiber on early-age properties and stress relaxation of ultra-high-performance concrete under different degrees of restraint. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 106035, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106035>.

GONG, J.; MA, Y.; FU, J.; HU, J.; OUYANG, X.; ZHANG, Z.; WANG, H. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: a review. **Composites Part B: Engineering**, v. 241, 109995, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995>.

HAMADA, H. M.; SHI, J.; ABED, F.; JAWAHERY, M. S.; MAJDI, A.; YOUSIF, S. T. Recycling solid waste to produce eco-friendly ultra-high performance concrete: a review of durability, microstructure, and environment characteristics. **Science of The Total Environment**, v. 876, 162804, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162804>.

LI, J.; WU, Z.; SHI, C.; YUAN, Q.; ZHANG, Z. Durability of ultra-high performance concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 255, 119296, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>.

MILLER, S. A.; MONTEIRO, P. J. M.; OSTERTAG, C. P.; HORVATH, A. Comparison indices for design and proportioning of concrete mixtures taking environmental impacts into account. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 131-143, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.002>.

MOURA, C. R. Avaliação da resistência mecânica da fibra de bambu tratada com hidróxido de sódio. **Revista Principia**, v. 56, p. 106-115, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id3355>.

RAVICHANDRAN, D.; PREM, P. R.; KALIYAVARADHAN, S. K.; AMBILY, P. S. Influence of fibers on fresh and hardened properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC): a review. **Journal of Building Engineering**, v. 57, 104922, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104922>.

REN, G.; GAO, X.; ZHANG, H. Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 130, 104555, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104555>.

REN, G.; YAO, B.; HUANG, H.; GAO, X. Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes. **Construction and Building Materials**, v. 286, 122958, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122958>.

REN, G.; YAO, B.; REN, M.; GAO, X. Utilization of natural sisal fibers to manufacture eco-friendly ultra-high performance concrete with low autogenous shrinkage. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, 130105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130105>.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

SILVA, M. V. P.; MARQUES, S. K. J.; RAPÔSO, Á. L. Q. R. S. Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da casca do coco em concretos. **Revista Principia**, v. 60, n. 4, p. 1120-1141, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6543>.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder: towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600-612, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 374-383, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084>.

TAHWIA, A. M.; ESSAM, A.; TAYEH, B. A.; ELRAHMAN, M. A. Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, e01648, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01648>.

TRAN, T. M.; TRINH, H. T. M. K.; NGUYEN, D.; TAO, Q.; MALI, S.; PHAM, T. M. Development of sustainable ultra-high-performance concrete containing ground granulated blast furnace slag and glass powder: mix design investigation. **Construction and Building Materials**, v. 397, 132358, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132358>.

WANG, S.; WANG, B.; ZHU, H.; CHEN, G.; LI, Z.; YANG, L.; ZHANG, Y.; ZHOU, X. Ultra-high performance concrete: mix design, raw materials and curing regimes – a review. **Materials Today Communications**, v. 35, 105468, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105468>.

XU, J.; ZHAN, P.; ZHOU, W.; ZUO, J.; SHAH, S. P.; HE, Z. Design and assessment of eco-friendly ultra-high performance concrete with steel slag powder and recycled glass powder. **Powder Technology**, v. 419, 118356, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118356>.