



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ANDRESSA DE LIMA OLIVEIRA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO COM AREIA RESIDUAL DA EXTRAÇÃO DO MINÉRIO
DE FERRO**

UBERLÂNDIA – MG
SETEMBRO 2025

ANDRESSA DE LIMA OLIVEIRA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO COM AREIA RESIDUAL DA EXTRAÇÃO DO MINÉRIO
DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil na Universidade Federal de Uberlândia como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta

UBERLÂNDIA – MG

SETEMBRO 2025

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus pela saúde e pela força necessárias para superar todas as dificuldades.

Aos meus pais, **Angela Lúcia de Lima Oliveira** e **Marcos Alves de Oliveira**, pela bênção da vida e pelo constante incentivo e apoio incondicional que me deram durante essa jornada.

Aos meus avós maternos, **Antônio Pereira de Lima** e **Vera Lúcia de Lima**, e paternos, **Diógenes Ludovino de Oliveira** e **Almira Alves de Oliveira**, cujos valores e sabedoria transmitidos foram pilares para a formação do meu caráter e da pessoa que me tornei.

Ao meu amado, **Guilherme Henrique Borges Velozo**, por sua constante parceria e cuidado ao final dessa caminhada.

À professora **Leila Aparecida de Castro Motta**, orientadora deste trabalho, agradeço pelos ensinamentos, pela confiança e pelo incentivo contínuo, essenciais para meu amadurecimento.

À empresa **Vale S.A.** por fornecer a areia residual da extração do minério de ferro, que não apenas viabilizou, mas também inspirou e motivou a realização deste trabalho.

À empresa **Saint-Gobain**, por fornecer o aditivo superplastificante, ADVA 458 UHPC, cuja contribuição foi fundamental para o desenvolvimento e êxito deste trabalho.

Aos professores da **FECIV**, que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, ensinamentos que levarei para além da vida acadêmica.

À minha amiga **Amanda Aparecida Souza**, se tornou um grande apoio durante a fase de idealização a concretização deste estudo.

Por fim, estendo meus agradecimentos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente.

RESUMO

O crescimento da urbanização e o avanço tecnológico trouxeram inúmeras melhorias para o cotidiano da população. Contudo, esse progresso também intensificou a exploração sobre os recursos naturais. Um dos grandes alertas para o consumo desenfreado desses recursos é a crescente escassez de areia natural, sobretudo no setor da construção civil, que busca ativamente alternativas sustentáveis para minimizar os impactos ambientais. Dentre as propostas, destaca-se a utilização de areia oriunda do beneficiamento de minérios, um setor que também gera significativos impactos ambientais devido ao alto volume de rejeitos produzidos anualmente. Este trabalho teve como objetivo estudar dosagens de Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) com diferentes teores de areia residual da extração de minério de ferro, a fim de verificar sua viabilidade na produção desse compósito. Adicionalmente, procurou-se avaliar dosagens com o mesmo teor de areia residual, mas variando o teor de fibras de aço, para verificar os efeitos dessa interação na composição da mistura. Foram avaliadas as propriedades da mistura no estado fresco, como consistência, massa específica e trabalhabilidade. No estado endurecido, foram analisadas propriedades físicas aos 28 e 91 dias, incluindo resistência à compressão, resistência à tração na flexão em quatro pontos, tenacidade e absorção. Os resultados demonstraram que a areia residual influenciou significativamente todas as propriedades investigadas, sendo que a dosagem com o maior teor desse material foi a que apresentou os melhores resultados. Observou-se que uma mistura com maior teor de areia residual e menor teor de fibras atingiu valores de resistência à tração na flexão, em ambas as idades, muito próximos aos de uma mistura com menor teor de areia residual, porém com maior volume de fibras. Esse resultado confirma os benefícios da incorporação da areia residual na composição de concretos de alto desempenho.

Palavras-chave: areia residual, concreto de ultra alto desempenho (UHPC), dosagem

ABSTRACT

The growth of urbanization and technological advancement have brought numerous improvements to daily life. However, this progress has also intensified the exploitation of natural resources. One of the major warnings regarding the unrestrained consumption of these resources is the increasing scarcity of natural sand, particularly in the construction sector, which is actively seeking sustainable alternatives to minimize environmental impacts. Among the proposed solutions, the use of sand from mineral processing stands out—a sector that also generates significant environmental impacts due to the high volume of waste produced annually. This study aimed to investigate mix designs of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with different contents of residual sand from iron ore extraction, in order to verify its feasibility in producing this composite. Additionally, the study sought to evaluate mixtures with the same residual sand content but varying steel fiber contents, to examine the effects of this interaction on the mix composition. The properties of the fresh mixture were evaluated, including consistency, density, and workability. In the hardened state, physical properties were analyzed at 28 and 91 days, including compressive strength, flexural tensile strength under four-point bending, toughness, and water absorption. The results demonstrated that the residual sand significantly influenced all investigated properties, with the mixture containing the highest content of this material exhibiting the best performance. It was observed that a mixture with higher residual sand content and lower fiber content achieved flexural tensile strength values, at both ages, very close to those of a mixture with lower residual sand content but higher fiber volume. This result confirms the benefits of incorporating residual sand in the production of high-performance concrete.

Keywords: residual sand, ultra-high performance concrete (UHPC), mix design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microscopia eletrônica (MEV) da areia natural e areia residual.....	4
Figura 2: Exemplo de misturas com baixo e alto empacotamento	7
Figura 3: Argamassadeira planetária usada no preparo das misturas	9
Figura 4: Determinação do índice de consistência	11
Figura 5: Recipiente usado para determinação da massa específica das misturas.....	12
Figura 6: Corpo de Prova com molde adaptado na retífica	13
Figura 7: Máquina Universal de Ensaio utilizada para ensaios de resistência à compressão	13
Figura 8: Corpo de prova prismático disposto para ensaio de tração na flexão com 4 pontos	14
Figura 9: Máquina Universal de Ensaio utilizada para ensaio de flexão.....	15
Figura 10: Gráfico de granulometrias	17
Figura 11: Resistência à compressão com variação do teor de areia residual	23
Figura 12: Resistência à compressão com variação do teor de fibra de aço.....	23
Figura 13: Resistência à tração na flexão com variação do teor de areia residual	25
Figura 14: Resistência à tração na flexão com variação do teor de fibra de aço	25
Figura 15: Curva Tensão x Flecha variando o teor de areia residual	27
Figura 16: Curva Tensão x Flecha variando o teor de areia residual	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura das misturas produzidas	5
Tabela 2: Composição das misturas com variação do q	8
Tabela 3: Composição das misturas de UHPC produzidas.....	9
Tabela 4: Etapas de mistura	10
Tabela 5: Quantidade e tipo de corpos de prova por data de ensaio.....	10
Tabela 6: Massa específica dos materiais secos	16
Tabela 7: Estudo prévio do q	18
Tabela 8: Resultado de consistência de cada mistura	19
Tabela 9: Resultado de Massa específica no estado fresco	20
Tabela 10: Porosidade aos 28d e 91d variando teor de areia residual	21
Tabela 11: Porosidade aos 28d e 91d variando teor de fibra	21
Tabela 12: Crescimento de resistência à compressão entre 28d e 91d	22
Tabela 13: Relação de resistência à tração pela resistência à compressão	24
Tabela 14: Tenacidade aos 28d e 91d	26

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)	2
2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NO UHPC	3
3 MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	5
3.1.1 <i>Massa específica real</i>	6
3.1.2 <i>Granulometria</i>	6
3.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS A&A MODIFICADO	6
3.3 ESTUDO PRÉVIO DO Q	7
3.4 PREPARO DAS MISTURAS, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	8
3.5 CONSISTÊNCIA.....	11
3.6 MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO	12
3.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	12
3.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	14
3.9 TENACIDADE	15
3.10 POROSIDADE POR ABSORÇÃO TOTAL.....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	16
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	16
4.1.1 Massa específica	16
4.1.2 Granulometrias	17
4.2 ESTUDO PRÉVIO DO Q	17
4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	18
4.2.1 Consistência	18

4.2.2 Massa específica no estado fresco	19
4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	20
4.3.1 Porosidade	20
4.3.2 Resistência à compressão	21
4.3.3 Resistência à tração na Flexão.....	24
4.3.4 Tenacidade	26
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica está cada vez mais rápido, trazendo mais conforto e comodidade para toda a população que a usufrui, tanto em âmbitos industriais como no domiciliar. Com os diversos avanços tecnológicos ao longo dos anos, as indústrias aumentaram suas produções drasticamente, logo, a necessidade por matéria prima se tornou maior. Com isso, resultou em maiores explorações desses materiais primários de forma descontrolada, de tal modo que a extração de recursos naturais comparado com a década de 70, mais do que triplicou, e teve um aumento de cinco vezes na exploração de minerais não metálicos (NAÇÕES UNIDAS, 2019).

Esse crescimento acelerado da extração de materiais primários é o principal motivo pelas mudanças climáticas e pela perda de biodiversidade em diversos locais do mundo (NAÇÕES UNIDAS, 2019), entre esses recursos está a areia que tem uma demanda anual de cerca de 50 bilhões de toneladas (NAÇÕES UNIDAS, 2022).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) desenvolveu um relatório em 2019 evidenciando as problemáticas da extração desenfreada da areia natural, a qual resulta no aumento da poluição e das inundações, diminui aquíferos e agrava a seca principalmente nas regiões exploradas (NAÇÕES UNIDAS, 2019).

O relatório nomeado de “Areia e Sustentabilidade: Encontrar novas soluções para governação ambiental dos recursos globais de areia” destaca que a areia natural e o cascalho são o segundo maior recurso extraído e comercializado em volume no mundo (NAÇÕES UNIDAS, 2019). Em 2022, o PNUMA publica novo relatório nomeado de “Areia e Sustentabilidade: 10 recomendações estratégicas para evitar uma crise” o qual traz orientações de melhores práticas de extração e gestão do recurso que está cada vez mais escasso (CHAMARELLI, 2022).

No material publicado salienta que a areia natural é fundamental para o setor de construção, no entanto, sua utilização está ocorrendo de forma mais rápida do que sua capacidade de reposição, entre as propostas de substituição do material, está a areia de minério resultante da mineração (CHAMARELLI, 2022).

Apesar do crescimento da exploração de minerais críticos à transição energética, como o alumínio, bário, boro, cádmio, cobalto, cobre, lítio, manganês, nióbio e níquel (QUEIROZ, 2024), o minério mais utilizado em larga escala no mundo e por consequência o mais explorado, continua sendo o minério de Ferro, sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores do mundo (ROCHA, 2021).

Após a extração dos minérios da natureza, o material passa por um processo chamado de beneficiamento. Durante esse processo é realizada a separação do minério de ferro dos materiais

sem valor comercial, gerando um alto volume de rejeitos (MARTINI et al., 2016). Esses rejeitos gerados são depositados em barragens de contenção, que são as estruturas mais utilizadas para fazer o armazenamento deste material, quando realizado o beneficiamento úmido (G1, 2019).

No entanto, após as tragédias de Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais, que resultaram em centenas de mortes e pessoas desaparecidas com o rompimento de barragens de rejeitos nas regiões (CAVALLINI, 2019), a maior produtora de minério de ferro no Brasil, Vale S.A., realizou modificações no processo de beneficiamento úmido, de tal modo que esses rejeitos possam ser reutilizados no setor da construção civil (VALE, 2024).

O rejeito gerado é composto por alto teor de sílica e baixo teor de ferro, sendo a sílica o principal componente da areia natural (VALE, 2024), portanto esta é a motivação deste trabalho, que buscou estudar o uso da areia residual do processo de extração do minério de ferro como substituição da areia natural na produção de Concreto de Ultra Alto Desempenho ou Ultra-high Performance Concrete (UHPC).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas do UHPC com a substituição da areia natural pela areia residual do processo de extração do minério de ferro e a contribuição da fibra de aço na mistura.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar as influências nas propriedades no estado fresco e endurecido do UHPC, pela variação do teor de substituição da areia natural pela areia residual.

Avaliar as contribuições da fibra de aço para as propriedades no estado fresco e endurecido do UHPC, variando seus teores de 0% a 2%.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)

O termo Ultra-High Performance Concrete (UHPC) foi utilizado umas das primeiras vezes em 1994 no estudo nomeado por “Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model” o qual teve como objetivo desenvolver um concreto com alta resistência utilizando agregados comuns não tratados, cimento, sílica ativa e superplastificante, utilizando

cura térmica simples, sem pressão adicional ou controle de umidade, diferente dos métodos utilizados na época (LARRARD e SEDRAN, 1994).

Atualmente o termo UHPC está mais difundido e é utilizado para descrever uma mistura cimentícia com uma relação água/aglomerante extremamente baixa, com agregados miúdos e fibras, caracterizado por resistência à compressão superiores a 150MPa, energia de fratura na faixa de 1200-40000 J/m² e deformação à tração de 1% (BAHMANI e MOSTOFINEJAD, 2022).

Nas últimas décadas tem-se despertado o interesse nas aplicações do UHPC em diversos países, sendo utilizado em elementos de construções, pontes, estruturas arquitetônicas, reparos e reforços estruturais (AZMEE e SHAFIQ, 2018). Tornou-se um campo de pesquisa prioritário para a Engenharia Civil, abrangendo pavimentos, estruturas marítimas e construções militares. No entanto, ainda existem muitas lacunas sobre otimização de materiais, regimes de cura e desempenho estrutural que precisam de mais embasamentos, a fim de produzir projetos mais seguros e eficientes (LIU et. al., 2024).

2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NO UHPC

A utilização de resíduos da mineração vem se tornando cada vez mais uma alternativa como agregado na indústria de construção civil, visto que a indústria de mineração enfrenta grandes problemas com o alto volume de resíduos gerados durante o processamento dos minérios, enquanto o setor de construção civil passa por dificuldades para suprir a alta demanda de agregados que estão cada vez mais escassos (AMJAD et al., 2025).

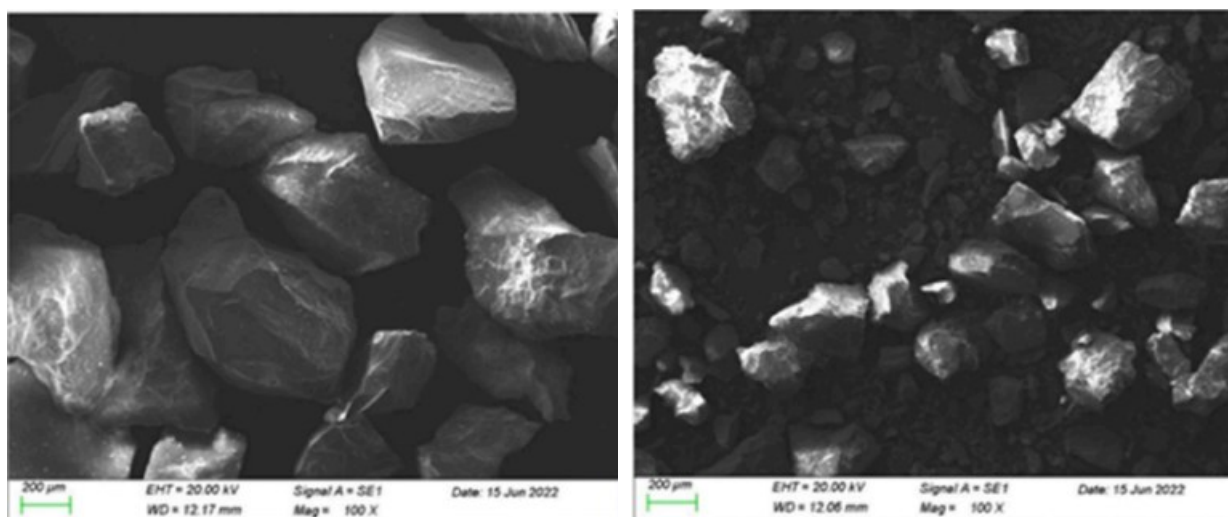
Uma destinação mais sustentável para os resíduos da indústria de mineração ganhou mais relevância no Brasil, após os desastres das barragens nas cidades de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019. O Relatório anual de Lavra declarou que de 2010 a 2019 foi gerado um total de 3,4 bilhões de toneladas de rejeitos e 40,9% estão relacionados à produção de minério de ferro (ANM, 2020).

Tradicionalmente esse material é visto como resíduo da indústria de mineração, mas nos últimos anos, pesquisadores e a própria indústria passaram a investigar o seu potencial como material de construção, diminuindo o impacto ambiental de ambos os setores (AMJAD et al., 2025).

As composições químicas e granulométricas dos rejeitos de minério de ferro variam significativamente dependendo da fonte do minério e do método de beneficiamento. No entanto, geralmente são compostos por dióxido de silício (SiO_2), óxido de Ferro (Fe_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de Magnésio (MgO), óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O) (AMJAD et al., 2025).

Os avanços nos processos de beneficiamento dos minérios alcançaram a diminuição no teor de ferro e o aumento do teor de sílica nos resíduos, tendo uma aproximação maior da composição química da areia natural. No entanto, o formato dos grãos entre a areia residual e a areia natural diferem, pois, a areia residual apresenta formas mais angulares, enquanto a areia natural é tipicamente arredondada (Figura 1) (AMJAD et al., 2025).

Figura 1: Microscopia eletrônica (MEV) da areia natural e areia residual



(a) Areia natural (ampliada 100x)

(b) Areia residual (ampliada 100x)

Fonte: AMJAD et al, 2025

Estudos mostram que a incorporação de areia residual apresenta bons resultados quanto a resistência à compressão, Gu et al. (2022) apresentou aumento na resistência à compressão com 10% de substituição do cimento por areia residual do minério de ferro ativado, Luan et al. (2024) apresentou um ganho de resistência à compressão utilizando 40% de areia residual de minério de ferro e 10% de pó de concreto reciclado, no entanto, notou a redução da fluidez e o aumento da viscosidade da pasta.

Enquanto Zhang et al. (2020) determinou que 40% de substituição de areia natural pela areia residual proporcionou ganho na resistência à compressão e diminuição da permeabilidade, concluiu que substituições acima de 40% apresentam uma queda na resistência à compressão, no entanto, tendem a melhorar a impermeabilidade do UHPC.

Shi et al. (2024) substituiu o cimento por pó de rejeito de minério de ferro e areia natural por areia residual e constatou que a mistura que apresentou melhores desempenhos mecânicos foi a substituição de 10% de cimento pelo pó de rejeito e 50% de areia natural pela areia residual, atingindo a resistência à compressão de 145,6 MPa. No entanto, a adição de resíduos do minério

de ferro reduziram a trabalhabilidade, mas manteve espalhamentos acima de 180mm, adequado para aplicações práticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram adotadas nomenclaturas para cada mistura a fim de facilitar a demonstração dos resultados obtidos. Dessa forma, cada uma delas está descrita na Tabela 1. Manteve-se o consumo de cimento (750 kg/m^3) e a relação água/aglomerante (0,25) em todas as composições produzidas.

Tabela 1: Nomenclatura das misturas produzidas

Nome	Descrição da mistura
AR60:C750:F1,0	60% de substituição de areia residual em relação à areia natural, Consumo de Cimento 750 Kg/m^3 , Teor de Fibras de 1%
AR0:C750:F1,0	0% de substituição de areia residual em relação à areia natural, Consumo de Cimento 750 Kg/m^3 , Teor de Fibras de 1%
AR30:C750:F0,0	30% de substituição de areia residual em relação à areia natural, Consumo de Cimento 750 Kg/m^3 , Teor de Fibras de 0%
AR30:C750:F1,0	30% de substituição de areia residual em relação à areia natural, Consumo de Cimento 750 Kg/m^3 , Teor de Fibras de 1%
AR30:C750:F2,0	30% de substituição de areia residual em relação à areia natural, Consumo de Cimento 750 Kg/m^3 , Teor de Fibras de 2%

Fonte: Autora, 2025

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nesse estudo foram o Cimento Portland V-ARI, sílica ativa não densificada, pó de quartzo, areia residual da extração do minério de ferro, areia natural, pó de pedra, superplastificante, fibra de aço e água.

3.1.1 Massa específica real

3.1.1.1 Massa específica do cimento e demais materiais pulverulentos

A determinação da massa específica do cimento e demais materiais pulverulentos utilizados, foi realizada conforme estabelecido pela ABNT NBR 16605:2017, a qual define aparelhagem, preparação das amostras e procedimento do ensaio realizado.

3.1.1.2 Massa específica dos agregados miúdos

Os agregados utilizados na mistura foram a areia natural, areia residual e o pó de pedra, todos considerados agregados miúdos, desta forma foram utilizados os critérios estabelecidos na ABNT NBR 16916:2021 para determinar a massa específica de cada um deles.

3.1.2 Granulometria

A distribuição granulométrica dos materiais secos foram determinadas por meio da técnica de difração de raios laser, em que o equipamento utilizado foi o Mastersizer Microplus da fabricante Malvern.

Para o cimento, que inicia a hidratação assim que entra em contato com a água, foi utilizado álcool isopropílico como meio de dispersão, e para os demais materiais a água foi utilizada como meio de dispersão.

3.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS A&A MODIFICADO

O modelo original de Andreasen e Andersen (A&A) propõe uma equação que define a distribuição ideal de tamanhos de partículas para maximizar o empacotamento em uma mistura. A ideia central é que para preencher todos os vazios entre partículas grandes, você precisa de partículas progressivamente menores, criando uma estrutura densa e contínua (GOES et al., 2020).

Enquanto o modelo de A&A modificado é caracterizado pela introdução de um diâmetro mínimo, maior que zero, na distribuição ideal de tamanhos das partículas, pois sem esse parâmetro definido, a curva ideal no modelo inicial tendia a uma quantidade infinita de finos (GOES et al., 2020).

A definição da formulação de UHPC tem-se utilizado o modelo de empacotamento de A&A modificado, o qual estabelece a distribuição contínua ideal, caracterizada pela introdução do diâmetro mínimo, determinado pela Equação 1 (WANG et al., 2022).

$$P(D) = 100 * \left(\frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$P(D)$: porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D , em %;

D^q : diâmetro da partícula, em μm ;

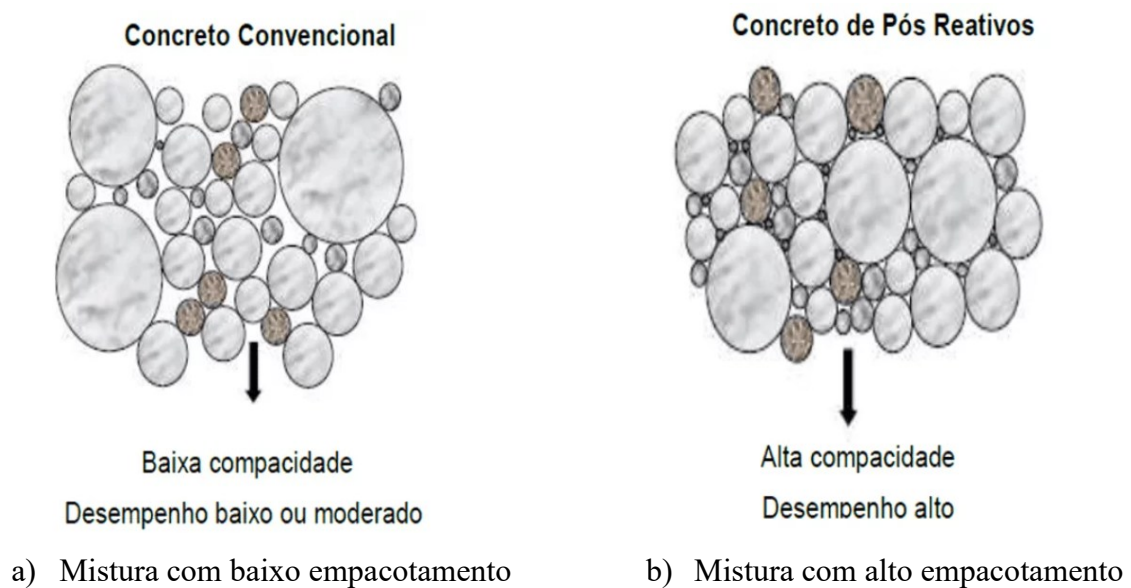
D_{\min}^q : diâmetro da menor partícula, em μm ;

D_{\max}^q : diâmetro da maior partícula do conjunto, em μm ;

q : coeficiente de distribuição.

Neste estudo foi utilizado o método de A&A modificado para determinar o traço de cada mistura, com algumas quantidades pré-definidas, como a sílica ativa não densificada que foi estabelecida como 10% em relação a massa do cimento.

Figura 2: Exemplo de misturas com baixo e alto empacotamento



3.3 ESTUDO PRÉVIO DO Q

O coeficiente de distribuição (q) é um parâmetro significativo no método de A&A modificado, o qual afeta diretamente a proporção entre partículas finas e grossas da mistura. Valores mais baixos de q indicam incorporação de partículas finas, tendendo a uma diminuição da

fluidez da mistura, alguns autores definiram o valor de 0,23 como ideal para misturas de UHPC. No entanto, outros estabeleceram valores entre 0,22 a 0,25 para assegurar dosagem ideal de partículas finas e boa trabalhabilidade (WANG et al., 2022).

Para determinar qual o melhor valor de q para as misturas deste trabalho, foram realizadas moldagens testes com quatro valores de q diferentes, 0,23, 0,25, 0,27 e 0,30, onde se manteve constante o consumo de cimento, em 700 kg/m^3 , e relação água/aglomerante, em 0,25. Na Tabela 2 está detalhado a composição de cada mistura utilizada para determinar o q utilizado neste trabalho, é perceptível a diminuição dos finos (pó de quartzo) e o aumento das partículas grossas (pó de pedra) conforme o aumento do q .

Tabela 2: Composição das misturas com variação do q

Consumo em kg/m^3				Aditivo (%)	q
Cimento	Sílica não densificada	Pó de quartzo	Pó de Pedra		
700,8	52,7	673,1	845,7	3,5	0,23
700,8	52,7	474,3	1049,2	2,5	0,25
700,8	52,7	314,2	1213,3	2,5	0,27
700,8	52,7	125,5	1406,5	2,5	0,30

Fonte: Autora, 2025

3.4 PREPARO DAS MISTURAS, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

O estudo das dosagens foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu em três misturas com variação no teor de substituição da areia natural por areia residual (0%, 30% e 60%). Nessas composições, manteve-se o teor de fibra em 1%, e a composição dos demais materiais inertes foi ajustada em função da variação do teor de areia residual. A segunda etapa consistiu em três misturas com variação no teor de fibra de aço (0%, 1% e 2%). Para esse grupo, manteve-se o teor de areia residual fixo em 30%; portanto, a composição dos materiais inertes não foi alterada.

O detalhamento da composição de todas as misturas de ambas as etapas está disposto na Tabela 3. Ressalta-se que a mistura com 30% de areia residual e 1% de fibra foi avaliada nas duas etapas.

Tabela 3: Composição das misturas de UHPC produzidas

Misturas	Consumo em kg/m ³						Aditivo (%)	Teor de fibras (%)
	Cimento	Sílica não densificada	Pó de quartzo	Areia residual	Areia natural	Pó de Pedra		
AR60:C750:F1,0	750,7	56,1	520,3	432,2	263,9	275	4,5	1
AR0:C750:F1,0	750,7	56,1	419,9	0	659,7	377,7	4,5	1
AR30:C750:F0,0	750,7	56,1	467,4	216,1	461,9	329,0	4,0	0
AR30:C750:F1,0	750,7	56,1	467,4	216,1	461,9	329,0	5,0	1
AR30:C750:F2,0	750,7	56,1	467,4	216,1	461,9	329,0	4,5	2

Fonte: Autora, 2025

As misturas de concreto foram realizadas em argamassadeira planetária com capacidade de 20 litros e três velocidades diferentes, sendo a velocidade máxima de 1720 RPM da marca Solotest (Figura 3). No entanto, devido ao aumento da viscosidade da mistura conforme a adição da areia residual, em algumas amostras não foi possível alcançar a rotação máxima do equipamento.

Figura 3: Argamassadeira planetária usada no preparo das misturas



Fonte: Autora, 2025

A mistura foi dividida em algumas etapas, as quais estão detalhadas em tempos aproximados na Tabela 4, onde cada mistura demorou cerca de 15 a 18 min para finalização. As misturas tiveram uma variação de 4 a 5% de adição de aditivo em relação a massa de aglomerantes.

Tabela 4: Etapas de mistura

Tempo (min)	Etapa da mistura
0-3	Homogeneização dos materiais secos (cimento, sílica, pó de quartzo, areia natural, areia residual e pó de pedra)
3-6	Adição de cerca de 90% da água na mistura
6-9	Adição do restante da água junto ao aditivo
9-15	Adição das fibras de aço na mistura
15-18	Finalização da mistura com fibras.

Fonte: Autora, 2025

O preparo dos corpos de prova seguiu as recomendações da ABNT NBR 5738:2015. Foram utilizados moldes cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10cm de altura. Quanto aos corpos de prova prismáticos, foram utilizados moldes de 4cmx4cmx16cm e para os cúbicos moldes de 4cmx4cmx4cm. Na Tabela 5 está descrito o tipo e a quantidade de corpos de prova produzidos para cada data de ensaio.

Foram utilizados dois métodos de adensamento durante a moldagem dos corpos de prova. Iniciava-se com o adensamento manual, no qual a cada camada eram realizados 15 golpes nos corpos de prova cilíndricos e cúbicos e 60 golpes nos prismáticos. Logo após, era realizado o adensamento mecânico, a cada camada de cilíndrico e cúbico eram vibrados por 30 segundos, enquanto os prismáticos foram vibrados em mesa vibratória por 1 minuto por camada, ambos após o adensamento manual.

Tabela 5: Quantidade e tipo de corpos de prova por data de ensaio

Ensaio	Quantidade de corpos de prova por traço	Tipo de Corpo de Prova	Quantidade de camadas	Quantidade de golpes/camada	Tempo de vibração por camada (s)
Compressão	4	Cilíndrico	3	15	30
Tração na flexão	3	Prismático	2	60	60
Porosidade por absorção total	3	Cúbico	2	15	30

Fonte: Autora, 2025

Após as moldagens os corpos de prova ficavam em câmara com umidade relativa e temperatura ambiente nas primeiras 36h, após a desmoldagem eram transferidos para o tanque, os quais ficaram em cura submersos em água saturada com $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio) como recomendado pela ABNT NBR 5738:2015.

3.5 CONSISTÊNCIA

Visto que o volume produzido por mistura foi de aproximadamente 4,5 litros e que a composição da mistura se assemelha mais a argamassas e não concretos, a avaliação da consistência seguiu parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 13276:2016, pois não era viável a produção do volume para seguir os critérios estabelecidos na ABNT NBR 16889:2020.

A determinação do índice de consistência foi realizada logo após a finalização da mistura. O procedimento adotado foi adaptado da ABNT NBR 13276:2016, preenchendo-se o molde troncônico em três camadas de alturas iguais, adensando-se cada camada com quinze, dez e cinco golpes, respectivamente, com um soquete. Foi realizado o rasamento da superfície com régua metálica e logo após, retirado o molde verticalmente e esperado 30 segundos para medir 3 diâmetros do espalhamento da pasta. Na Figura 4 estão apresentadas duas etapas do ensaio para determinação do índice de consistência.

Figura 4: Determinação do índice de consistência



a) Molde troncônico preenchido



b) Espalhamento da mistura após a retirada do molde

Fonte: Autora, 2025

3.6 MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO

Devido ao volume de pasta produzido por mistura ser muito inferior à 15dm^3 como estabelecido pela ABNT NBR 9833:2008 e pela composição granulométrica da mistura se assemelhar mais a argamassas, foram seguidos os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR 13278:2005 para determinar a massa específica do concreto no estado fresco.

Foi produzido um recipiente cilíndrico para realização do ensaio, o qual foi calibrado seguindo as recomendações da ABNT NBR 13278:2005. O recipiente utilizado com o volume de $438,8\text{cm}^3$ pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Recipiente usado para determinação da massa específica das misturas



Fonte: Autora, 2025

Seguindo o procedimento normativo, o ensaio foi executado imediatamente após o preparo da mistura, conforme metodologia definida na ABNT NBR 13278:2005.

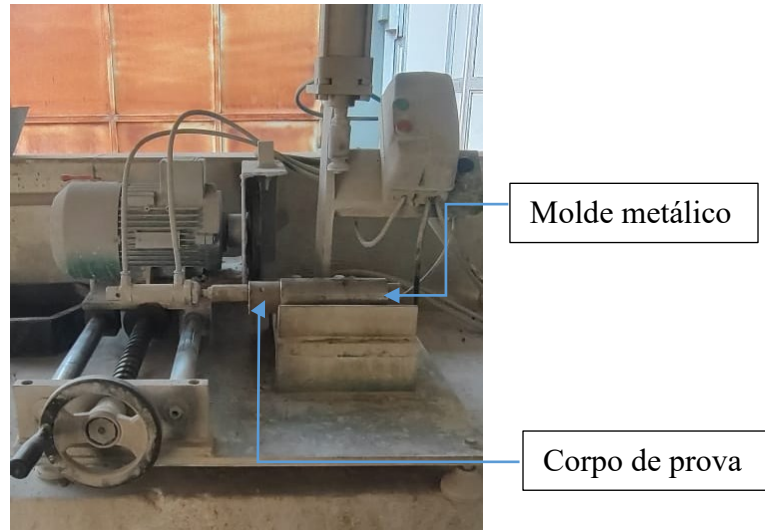
3.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os procedimentos de preparação dos corpos de prova para execução do ensaio de resistência à compressão, seguiu os parâmetros da ABNT NBR 5738:2015, a qual estabelece dois métodos de preparação das bases dos corpos de prova, por capeamento ou retificação, sendo a última a adotada neste trabalho.

Devido ao equipamento utilizado para retificação ser para corpos de prova de 10cm de diâmetro e 20 cm de altura, foi produzido um molde para adaptar o equipamento para os corpos de prova produzidos para este estudo, a fim de garantir que a base e o topo estejam com superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do Corpo de prova, como estabelecido pela ABNT

NBR 5738:2015. Na Figura 6 está apresentada a disposição do molde junto ao equipamento com os corpos de prova a serem retificados.

Figura 6: Corpo de Prova com molde adaptado na retífica



Fonte: Autora, 2025

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova produzidos seguiu os parâmetros da ABNT NBR 5739:2018, a qual estabelece os critérios para realização do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. As idades de ensaios foram de 28 e 91 dias. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi uma máquina Universal de Ensaio, modelo DL 60.000, marca EMIC, como apresentado na Figura 7.

Figura 7: Máquina Universal de Ensaio utilizada para ensaios de resistência à compressão

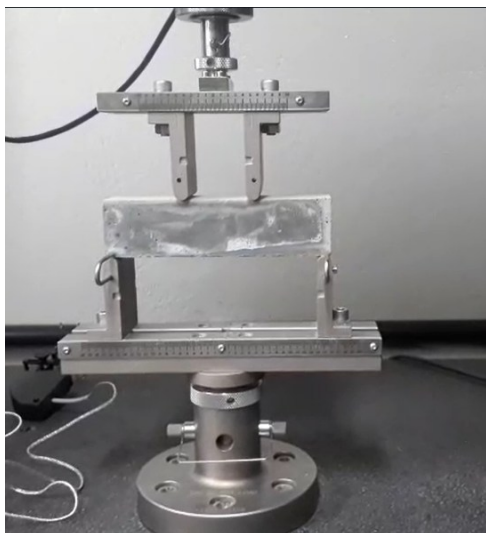


Fonte: Autora, 2025

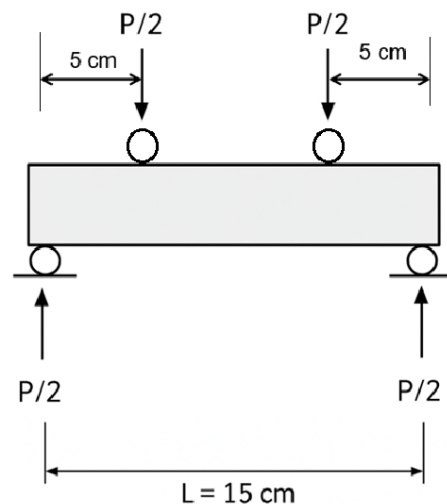
3.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A determinação da resistência à tração na flexão de quatro pontos seguiu parâmetros determinados pela ABNT NBR 12142:2010 com algumas adaptações. Por se tratar de um corpo de prova com comprimento de 16 mm, o vão inferior foi de 15 mm, ou seja, os elementos de aplicação de carga inferiores estavam a 2,5 mm da extremidade de cada lado. Enquanto os elementos de aplicação de carga superiores foram dispostos nos terços médios do vão inferior, como mostra a Figura 8-b. Na Figura 8-a está a representação de um corpo de prova posicionado na máquina para ensaio.

Figura 8: Corpo de prova prismático disposto para ensaio de tração na flexão com 4 pontos



a) Corpo de prova posicionado para ensaio de flexão



b) Esquema de corpo de prova submetido ao ensaio de flexão

Fonte: Autora, 2025

O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio universal modelo 5980, da marca Instron, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: Máquina Universal de Ensaio utilizada para ensaio de flexão.



Fonte: Autora, 2025

3.9 TENACIDADE

A tenacidade foi obtida a partir do ensaio de flexão, a fim de melhor comparação entre compósitos, se determinou uma flecha máxima de 2,5mm como finalização do ensaio.

Para a determinação da tenacidade, utilizou a área sob a curva Tensão x Flecha, até o deslocamento máximo, definido em 2,5mm, dividida pela área da seção transversal do corpo de prova, fornecendo o resultado em kJ/m². Na Equação 2 está detalhado o método de cálculo para a tenacidade.

$$U_t = \left(\frac{\int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta}{A} \right) / 1000 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

U_t : Tenacidade, em kJ/m²;

$\int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta$: integral da curva Força em função da Flecha, que representa a área total sob a curva, em N*m;

F: força, em N;

δ : flecha, em m;

A: área da seção transversal do corpo de prova, em m².

3.10 POROSIDADE POR ABSORÇÃO TOTAL

A porosidade por absorção total foi determinada de acordo com os parâmetros estabelecidos na ASTM C642-21, nas idades de 28 e 91 dias. Na etapa de secagem dos corpos de prova foi utilizada uma estufa da fabricante Luz Nobre, enquanto na etapa de fervura o equipamento utilizado foi a autoclave Vertical Modelo 103 da fabricante Fabbe-Primar, as pesagens submersas foram realizadas com uma balança digital da fabricante Solotest modelo BG 4000, demais pesagens foram na balança digital do modelo EJ-4202B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Massa específica

As massas específicas dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 6, seguindo as descrições de ensaios no item 3.1.

Tabela 6: Massa específica dos materiais secos

Material	Massa específica (g/cm ³)
Cimento	2,97
Sílica Ativa não densificada	2,22
Pó de quartzo	2,66
Areia residual	2,85
Areial natural	2,61
Pó de pedra	2,72

Fonte: Autora, 2025

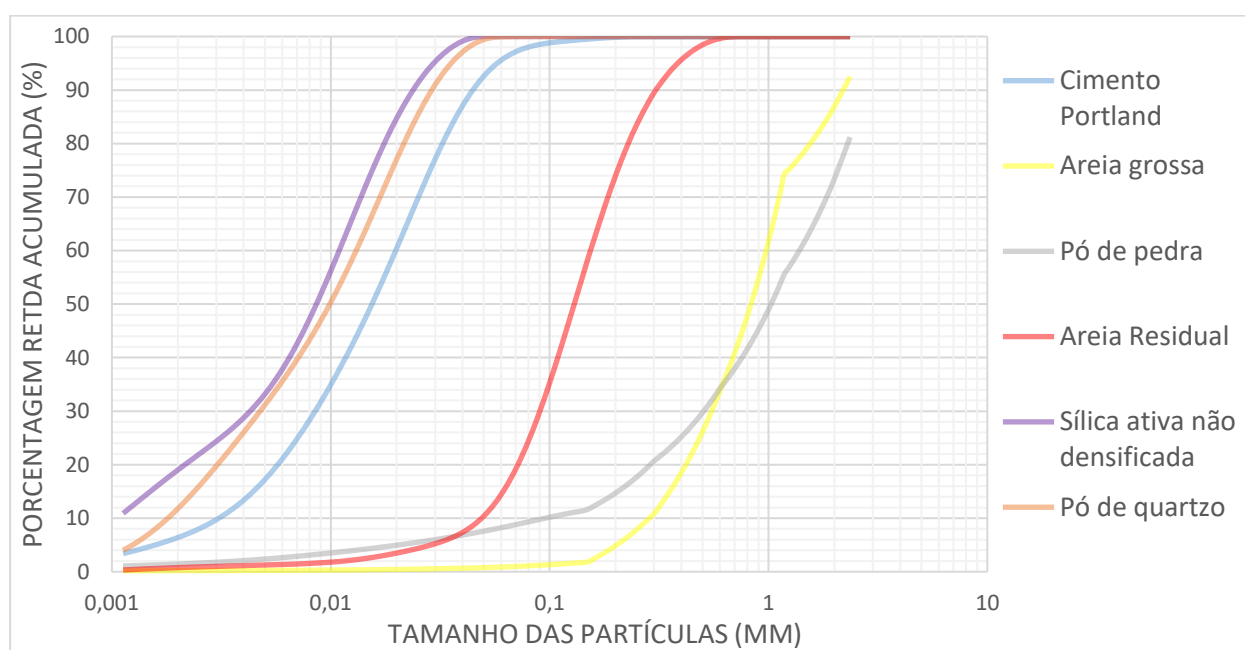
Nota-se que a areia residual apresenta a maior massa específica dentre os materiais usados como inertes. Os resultados encontrados para os materiais utilizados estão de acordo com a literatura.

4.1.2 Granulometrias

Para realização do empacotamento de partículas do método de A&A modificado, as granulometrias dos materiais são de extrema importância, na Figura 9 estão dispostas todas as curvas granulométricas dos materiais secos utilizados nas misturas.

No estudo foi utilizado uma areia natural que é classificada como grossa, na Figura 10 é perceptível a diferença de finura entre a areia residual e a natural, nota-se também que apesar do pó de pedra ter granulometria maior do que a areia natural ele tem mais finos na sua composição.

Figura 10: Gráfico de granulometrias



Fonte: Autora, 2025

Percebe-se que a finura da sílica e o pó de quartzo são próximas, mas ambas mais finas que o cimento, dessa forma a composição da curva granulométrica de cada material se tornam complementares auxiliando no empacotamento ótimo da mistura.

4.2 ESTUDO PRÉVIO DO Q

Para a definição do valor de 'q' utilizado neste trabalho, foi analisada a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos aos 7 dias, moldados com misturas com diferentes valores de "q". Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Estudo prévio do q

q	Consistência	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)
0,30	Excelente plasticidade	82,41
0,27	Excelente plasticidade	100,62
0,25	Péssima plasticidade	89,84
0,23	Péssima plasticidade	80,15

Fonte: Autora, 2025

Durante o preparo das misturas de estudo do q, foi perceptível a confirmação conforme bibliografias que quanto maior o valor de q, melhor será a trabalhabilidade, tendo uma mistura mais plástica, mais fluída e com boa consistência.

Quanto aos resultados de resistência à compressão, os resultados dos dois extremos, 0,23 e 0,30, foram os que apresentaram os menores resultados. Para q com 0,23 e 0,25, por apresentarem altos teores de finos, teve-se baixa plasticidade, alta viscosidade e pouca trabalhabilidade, dificultando o adensamento dos corpos de prova, logo se teve corpos de prova com muitos vazios diminuindo a resistência à compressão.

Em contrapartida, o q com 0,30 teve teores menores de finos, apresentava uma boa plasticidade e trabalhabilidade, mas por ter uma composição com mais grãos grossos, não se teve bom empacotamento, portanto apresentou muitos vazios, resultando em uma resistência à compressão mais baixa.

Portanto, o valor escolhido para o q foi o de 0,27, pois apresentou boa plasticidade e trabalhabilidade e obteve o maior resultado de resistência à compressão aos 7 dias.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Consistência

Foi necessário um teor mais alto de aditivo para a formulação com AR30:C750:F1,0 devido à alta viscosidade apresentada durante o preparo da mistura, conforme detalhado na Tabela 2. No entanto, para o mesmo teor de fibra, mas 60% de substituição de areia natural pela areia residual, utilizou-se 0,5% a menos de aditivo, pois durante o preparo da mistura conseguiu-se alcançar uma velocidade mais alta do misturador utilizado, dessa forma, obtendo trabalhabilidade semelhante com menor teor de aditivo.

Conforme Graybeal (2005), as propriedades reológicas das misturas de UHPC são diretamente influenciadas pela energia de mistura e condições ambientais, logo, misturadores com maior capacidade de energia de rotação resultam em misturas com melhores trabalhabilidades, exigindo menor consumo de aditivo.

Foi notável a diferença de consistência entre as misturas, ressaltando que o maior resultado de consistência foi obtido para a mistura com 0% de areia residual, seguido pelas misturas com teor de 30%, nas quais se tem um decréscimo da consistência conforme há o acréscimo do teor de fibras, e por fim, a mistura com menor consistência foi a com o maior teor de areia (60%) e com 1% de fibra, como detalhado na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado de consistência de cada mistura

Nomenclatura das misturas	Consistência (mm)
AR60:C750:F1,0	226,67
AR0:C750:F1,0	288,33
AR30:C750:F0,0	277,67
AR30:C750:F1,0	275,00
AR30:C750:F2,0	254,67

Fonte: Autora, 2025

Nota-se que para as misturas com teor de fibra 1%, conforme há o aumento do teor de areia residual na mistura, se tem o decréscimo da consistência, semelhante ao que ocorre quando se mantêm o teor de areia constante em 30% e há o acréscimo do teor de fibras, conforme aumenta o teor de fibra resulta em uma queda da consistência.

Constata-se que o teor de areia residual e o teor de fibra na mistura influenciam diretamente em sua consistência, no entanto, observa-se que apesar da mistura AR30:C750:F2,0 ter o maior teor de fibra a mistura AR60:C750:F1,0 apresentou uma consistência menor, onde ambas utilizaram o mesmo consumo de aditivo de 4,5%.

Sendo assim, entende-se que o teor de areia residual na mistura tem um impacto maior em sua consistência e trabalhabilidade. Pois foi observado durante preparo das misturas, que quanto maior o teor de areia residual, mais viscosa e pesada se tornava.

4.2.2 Massa específica no estado fresco

A partir do ensaio de massa específica no estado fresco, foi possível comprovar que o principal componente que influencia a variação entre cada mistura é o teor de fibras. Na Tabela 9

está descrito o resultado para cada uma das misturas e é perceptível a proximidade da massa específica entre as composições com teor de fibra 1%. Mesmo essas misturas tendo variações no teor de areia residual, entre 0, 30 e 60%, os resultados de massa específica se mantiveram entre 2,37 e 2,38 kg/m³.

Em contrapartida, para as misturas que mantiveram o teor de areia residual em 30%, mas sofreram variações do teor de fibra, apresentaram uma variação de 2,30 a 2,42 kg/m³, aumentando o valor da massa específica conforme aumentou o teor de fibra.

Tabela 9: Resultado de Massa específica no estado fresco

Nomenclatura das misturas	Massa específica estado fresco (Kg/m ³)
AR60:C750:F1,0	2,37
AR0:C750:F1,0	2,38
AR30:C750:F0,0	2,30
AR30:C750:F1,0	2,37
AR30:C750:F2,0	2,42

Fonte: Autora, 2025

4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Porosidade

Os resultados obtidos no ensaio de porosidade por absorção total, em função do teor de areia, estão dispostos na Tabela 10. Nota-se um decréscimo da densidade e aumento da porosidade das misturas com o aumento da idade de ensaio

Apesar de as misturas com 0% e 60% de areia residual apresentarem densidades próximas aos 28 e 91 dias, suas porosidades não seguiram o mesmo padrão. Isso porque a mistura com maior teor de areia residual apresentou porosidade menor em ambas as idades, quando comparadas à mistura com 0% de areia residual.

Tabela 10: Porosidade aos 28d e 91d variando teor de areia residual

Nomenclatura das misturas	Porosidade (%)		Densidade (g/cm ³)	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
AR0:C750:F1,0	5,22	5,79	2,58	2,34
AR30:C750:F1,0	5,40	5,48	2,56	2,26
AR60:C750:F1,0	4,51	4,95	2,58	2,35

Fonte: Autora, 2025

Quanto as misturas em função do teor de fibra, os resultados de porosidade e densidade obtidos a partir do ensaio de absorção do total, estão dispostos na Tabela 11. Observa-se que a densidade manteve o padrão para as misturas apresentadas na Tabela 9, as quais diminuíram com a idade, exceto a da mistura com 0% de fibra. É perceptível que se teve o aumento da densidade, em ambas as idades, conforme ocorreu o acréscimo do teor de fibra.

Enquanto a porosidade da mistura com 0% de fibra diminuiu com a idade, demais misturas apresentaram um acréscimo com o tempo. Dessa forma, a maior porosidade foi obtida pela mistura com 1% de fibra.

Tabela 11: Porosidade aos 28d e 91d variando teor de fibra

Nomenclatura das misturas	Porosidade (%)		Densidade (g/cm ³)	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
AR30:C750:F0,0	4,13	3,49	2,17	2,19
AR30:C750:F1,0	5,40	5,48	2,56	2,26
AR30:C750:F2,0	5,27	5,40	2,63	2,31

Fonte: Autora, 2025

4.3.2 Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão foi separada em duas etapas, as misturas com variação no teor de areia residual e as com variação no teor de fibra de aço. Na Tabela 12 estão dispostos os resultados de todas as composições aos 28 e 91 dias de idade, junto com a porcentagem de aumento da resistência à compressão de cada mistura ao longo desse tempo.

Tabela 12: Crescimento de resistência à compressão entre 28d e 91d

Misturas	Resistência média à compressão (MPa)		Crescimento (%)
	28 dias	91 dias	
AR60:C750:F1,0	132,41	150,64	14
AR0:C750:F1,0	105,96	133,92	26
AR30:C750:F0,0	130,27	134,41	3
AR30:C750:F1,0	129,07	134,83	4
AR30:C750:F2,0	134,99	148,35	10

Fonte: Autora, 2025

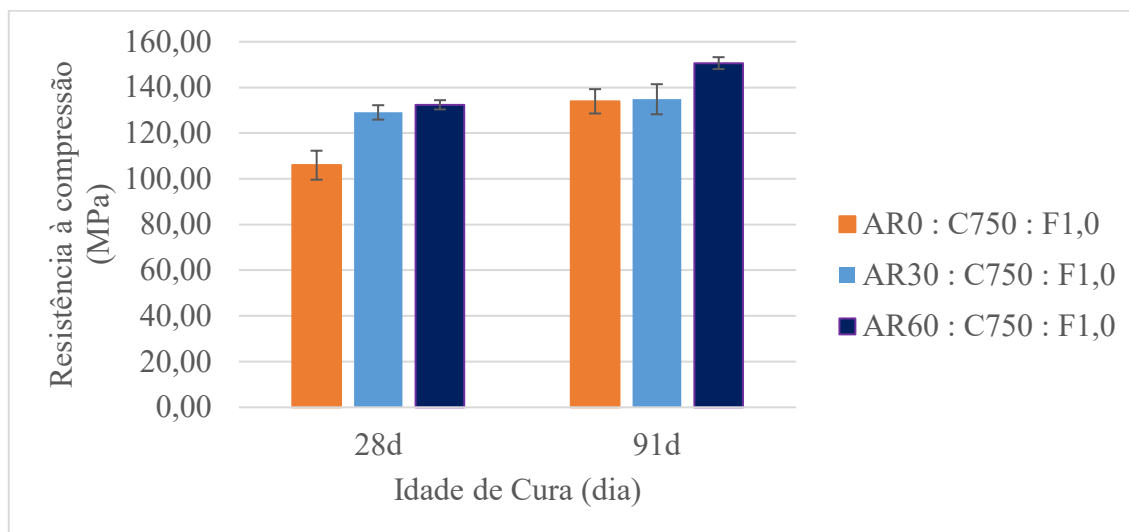
Nota-se, a partir da Figura 11, que aos 28 dias os melhores desempenhos das misturas, variando o teor de areia residual, seguiram a ordem de teor de areia residual com 60%, 30% e 0%, aos 91 dias manteve-se a ordem, no entanto, a composição com 60% de areia residual apresentou resultados significativamente superiores, enquanto as demais misturas obtiveram valores muito próximos.

Esses resultados próximos entre as misturas de 0 e 30% de areia residual, foi devido a um alto ganho de resistência à compressão entre as idades de ensaio, de 26%, da composição com 0% de areia residual, enquanto a composição com 30% obteve um ganho de apenas 4%, dessa forma, resultou em resistências à compressão aos 91 dias praticamente iguais.

Em contrapartida, as misturas com 30 e 60% obtiveram resultados muito próximos aos 28 dias, devido ao baixo ganho de resistência à compressão ao longo do tempo para a composição de 30%, e ao ganho mais significativo de 14% da composição de 60%, aos 91 dias apresentaram resultados muito distintos.

Constata-se que os melhores desempenhos, em ambas as idades, acompanham o aumento do teor de areia residual nas composições. No entanto, o ganho de resistência à compressão com a idade para os teores de 0%, 30% e 60% de areia residual foi de 26%, 4% e 14%, respectivamente. Consequentemente, a formulação com maior teor de areia residual, 60%, não apenas atingiu os valores de resistência à compressão mais elevados aos 28 e 91 dias, mas também registrou o segundo maior incremento de resistência no período.

Figura 11: Resistência à compressão com variação do teor de areia residual

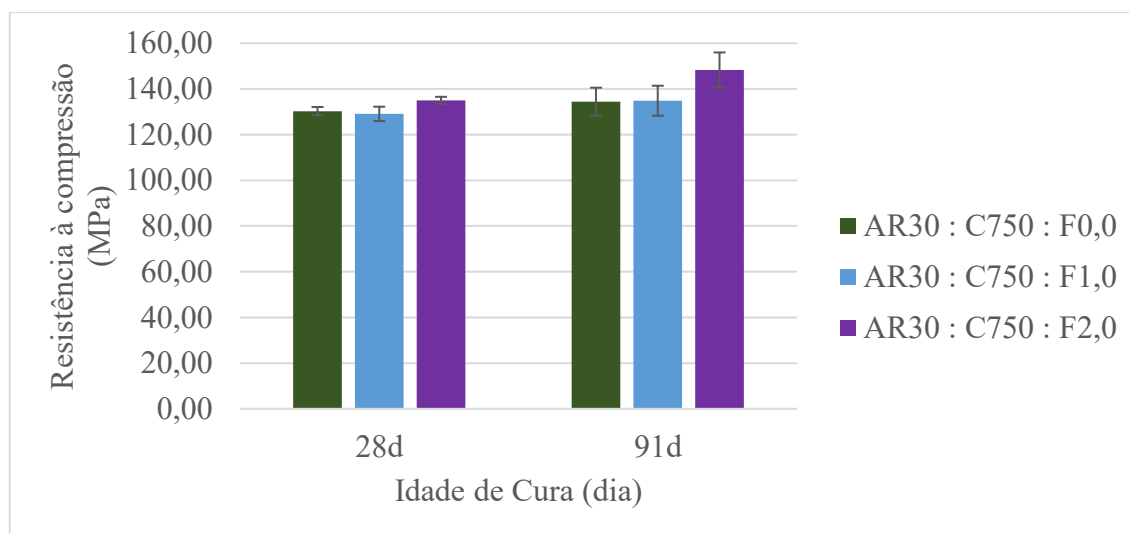


Fonte: Autora, 2025

Quanto aos resultados obtidos das misturas com variação do teor de fibra estão dispostos na Figura 12, estes não apresentaram grandes diferenças entre as resistências à compressão aos 28 dias, apesar da mistura com maior teor de fibra, com 2%, ter apresentado o melhor desempenho.

Aos 91 dias seguiu da mesma forma, o maior teor obteve o melhor desempenho, dessa vez, apresentando um ganho mais significativo, de 10%, que as demais composições, distanciando o seu resultado. Em contrapartida, as de composições com 0% e 1% de fibra mantiveram resultados próximos aos 91 dias e obtiveram ganhos de 3% e 4%, respectivamente, mantendo essa proximidade de resistências em ambas as idades de ensaio.

Figura 12: Resistência à compressão com variação do teor de fibra de aço



Fonte: Autora, 2025

Observa-se que os melhores resultados foram obtidos para as misturas com maiores teores, 60% de areia residual e 2% de fibra de aço. Entre as duas composições, os resultados foram muito próximos. No entanto, a mistura com 60% de areia residual, apresentou um ganho de 14%, em contrapartida a mistura com 2% de fibra obteve apenas 10% de ganho de resistência à compressão ao longo do tempo.

4.3.3 Resistência à tração na Flexão

Os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão estão dispostos na Tabela 13, de forma análoga que foi apresentado no item anterior, os resultados foram separados entre as composições com variação de areia residual e as com variação do teor de fibra de aço.

Tabela 13: Relação de resistência à tração pela resistência à compressão

Nomenclatura das misturas	Resistência média à tração na flexão (MPa)			
	$f_{ct,f}$, 28d (MPa)	$f_{ct,f} / f_c$ 28d (%)	$f_{ct,f}$, 91d (MPa)	$f_{ct,f} / f_c$ 91d (%)
AR60:C750:F1,0	13,45	10,2	16,60	11,0
AR0:C750:F1,0	11,51	10,9	13,52	10,1
AR30:C750:F0,0	7,32	5,6	9,60	7,1
AR30:C750:F1,0	10,70	8,3	13,41	9,9
AR30:C750:F2,0	14,84	10,9	17,84	12,0

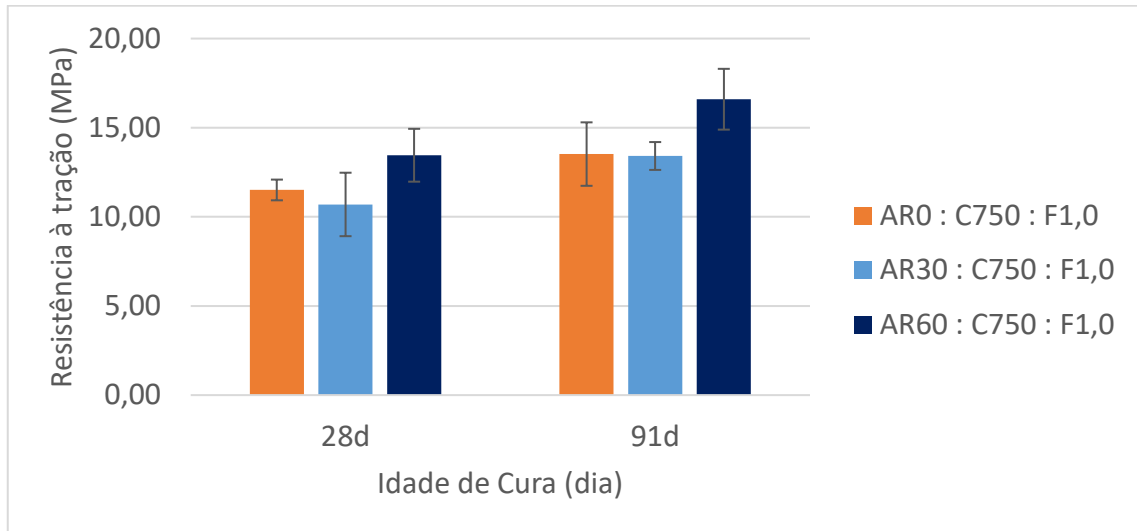
f_{ct,f}: resistência média à tração na flexão; f_c: resistência à compressão.

Fonte: Autora, 2025

Para as composições com variação de areia residual, o melhor desempenho foi obtido pela mistura com teor mais alto, como apresentado na Figura 13. Esta mistura atingiu valores de resistência significativamente superiores aos das demais formulações em ambas as idades avaliadas (28 e 91 dias). As composições com teores inferiores (0% e 30% de areia residual) exibiram resultados muito próximos entre si.

A resistência à tração das misturas de 0% e 60%, em ambas as idades de ensaio, ficaram em torno de 10 a 11% da resistência à compressão, a composição com 30% de areia residual apresentou uma relação mais baixa, mas apresentou a maior variação entre as idades.

Figura 13: Resistência à tração na flexão com variação do teor de areia residual

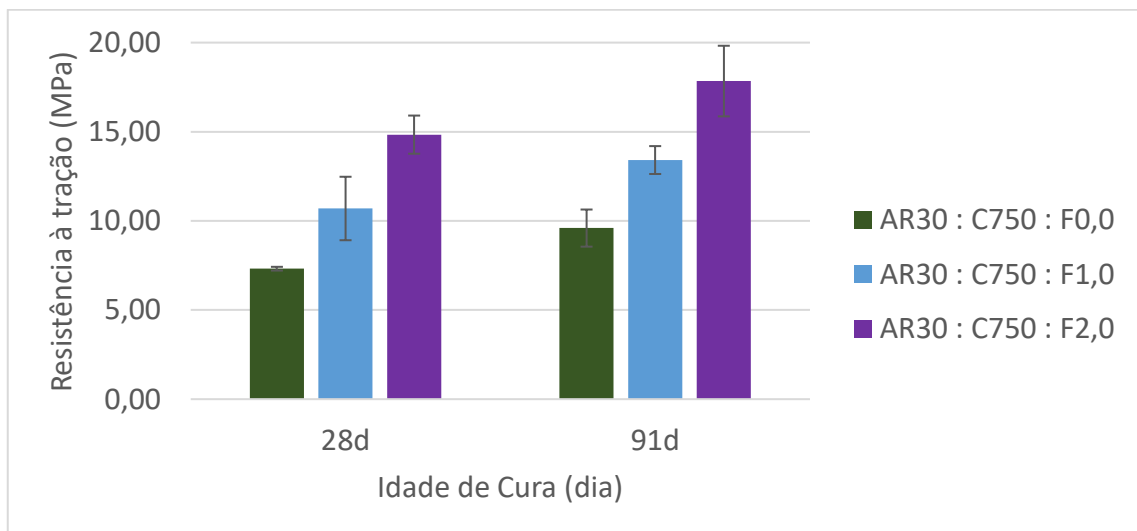


Fonte: Autora, 2025

Em ambas as idades a mistura com melhores resultados foi a com 2% de fibra, seguido pelas composições de 1% e 0%, respectivamente (Figura 14).

A mistura com maior teor de fibra, 2%, apresentou uma resistência à tração em torno de 10,9 a 12% da resistência à compressão, como disposto na Tabela 13. Enquanto a composição com 1% de fibra apresentou valores menores, na faixa de 8,3% a 9,9%, e a composição com 0% obteve valores ainda menores, na faixa de 5,6% a 7,1%.

Figura 14: Resistência à tração na flexão com variação do teor de fibra de aço



Fonte: Autora, 2025

De forma análoga aos resultados de resistência à compressão, os melhores desempenhos de resistência à tração foram obtidos pelas composições com maior teor de areia residual e maior teor de fibra.

4.3.4 Tenacidade

Quanto aos resultados de tenacidade obtidos, vale ressaltar que foi definido uma flecha de 2,5mm para interromper o ensaio, dessa forma, apenas a composição com 0% de fibra (AR30:C750:F0) foi levado à ruptura, como pode ser observado nas figuras 15 e 16. Os resultados obtidos de todas as composições estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Tenacidade aos 28d e 91d

Nomenclatura das misturas	Tenacidade (KJ/m ²)	
	28 dias	91 dias
AR60:C750:F1,0	7,03	8,71
AR0:C750:F1,0	5,99	6,42
AR30:C750:F0,0	0,23	0,28
AR30:C750:F1,0	5,37	7,29
AR30:C750:F2,0	7,52	9,43

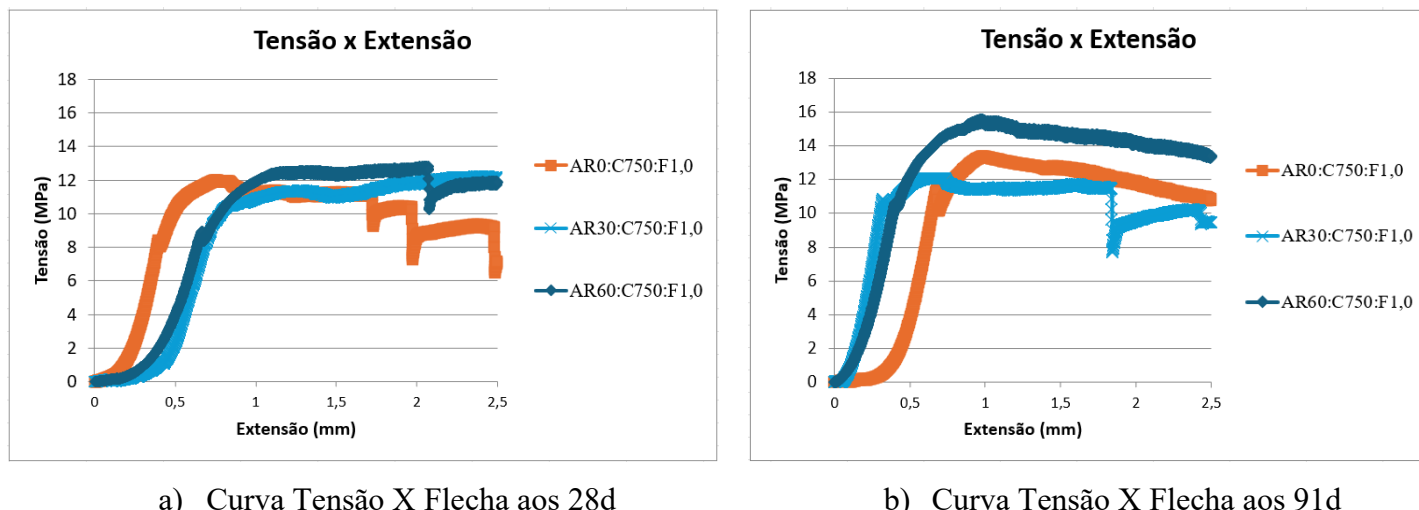
Fonte: Autora, 2025

Na Figura 14 estão apresentadas as curvas de Tensão x flecha das misturas com variação do teor de areia residual aos 28 dias (Figura 15-a) e aos 91 dias (Figura 15-b).

É perceptível na mistura com 60% de areia residual a maior resistência, e por consequência da Tenacidade, ao longo da idade. Em contrapartida, apesar das outras duas misturas apresentarem ganho de tenacidade com a idade, este foi mais modesto. Destaca-se ainda que todas as composições apresentaram comportamentos parecidos, com incremento de resistência após a ruptura da matriz, o que era esperado, considerando que o teor de fibras é igual a 1% nas três formulações.

A areia residual parece contribuir para o empacotamento das partículas, ficando mais evidente à medida que a hidratação da matriz avança, melhorando o desempenho do compósito como um todo, pela melhor aderência das fibras à matriz mais resistente.

Figura 15: Curva Tensão x Flecha variando o teor de areia residual



a) Curva Tensão X Flecha aos 28d

b) Curva Tensão X Flecha aos 91d

Fonte: Autora, 2025

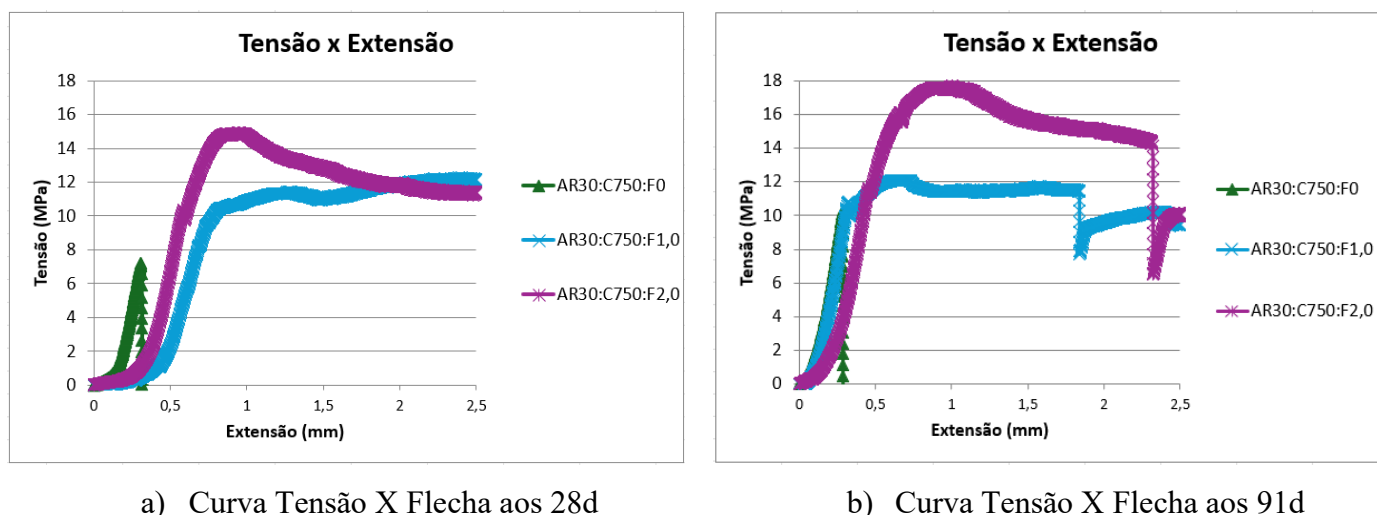
Quanto às composições que sofreram variações do teor de fibra, as curvas Tensão x Flecha estão apresentadas na Figura 16, os resultados para os 28d (Figura 15-a) e aos 91d (Figura 15-b). Os resultados entre elas diferem mais, pois cada uma das composições apresentou comportamentos mais distintos.

Conforme se teve o aumento do teor de fibra, obteve o aumento da tenacidade, de tal forma que a formulação com 2% de fibra apresentou um desempenho significativamente em comparação às demais misturas avaliadas. Em contrapartida, a composição com 0% de fibra foi a única que sofreu ruptura do corpo de prova durante ensaio, como esperado para um material de elevada fragilidade como o concreto de alta resistência.

Na Figura 16 é perceptível a ruptura do compósito sem fibras, com a queda brusca da tensão até o marco zero, tão logo a matriz se rompe.

Dado o fato da presença das fibras de aço nas composições e conforme ocorre o aumento do seu teor, os compósitos absorvem maiores deformações e resistem a maiores tensões antes da primeira queda de tensão, devido ao rompimento ou escorregamento das fibras.

Figura 16: Curva Tensão x Flecha variando o teor de areia residual



a) Curva Tensão X Flecha aos 28d

b) Curva Tensão X Flecha aos 91d

Fonte: Autora, 2025

Foi mantido, como nos resultados das demais propriedades apresentadas, que os melhores desempenhos foram das misturas com maior teor de areia residual e maior teor de fibra.

Para a resistência à tração na flexão e tenacidade, destaca-se a mistura com maior teor de fibra com o melhor desempenho, o que era realmente esperado. No entanto, o desempenho alcançado pela mistura com maior teor de areia residual e 1% de fibra se aproxima do compósito com 2% de fibra, demonstrando a contribuição da areia para o empacotamento da mistura e, assim, desenvolver maior resistência, otimizando o uso das fibras em menor teor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou misturas com variação no teor de substituição de areia residual, mantendo-se constante o teor de fibra; e misturas com variação no teor de fibra de aço, mantendo-se constante o teor de areia residual.

Analisando separadamente, a composição com o maior teor de substituição de areia residual (60%) foi a que apresentou o melhor desempenho em sua categoria. Da mesma forma, o melhor desempenho referente à variação do teor de fibra também foi obtido com o maior teor, 2% de fibra de aço.

No entanto, ao comparar os melhores resultados de cada categoria, observa-se que eles foram muito próximos. Dessa forma, conclui-se que a mistura com maior teor de areia residual oferece o melhor desempenho, a melhor eficiência energética e é a opção mais econômica.

Isso se deve ao fato de que, por conter maior teor de areia residual, essa mistura apresentou menor consumo de areia natural, obteve resultados muito próximos aos da mistura com maior teor de fibra e, em algumas propriedades, como a resistência à compressão, atingiu um desempenho superior com apenas 1% de fibra de aço em sua composição.

REFERÊNCIAS

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **ONU pede modelos sustentáveis em uso e extração de recursos naturais.** 2019 Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/82595-onu-pede-modelos-sustent%C3%A1veis-em-uso-e-extra%C3%A7%C3%A3o-de-recursos-naturais>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. **ONU alerta que entre 40 e 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas por ano.** 2019. Disponível em: < <https://news.un.org/pt/story/2019/05/1671251>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CHAMARELLI, Renata. **Novo relatório aponta areia como recurso estratégico para conter crise climática.** Nações Unidas Brasil, 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/179235-novo-relat%C3%B3rio-aponta-areia-como-recurso-estrat%C3%A9gico-para-conter-crise-clim%C3%A1tica>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

QUEIROZ, Christina. **Pesquisas mapeiam conflitos causados pela mineração.** PesquisaFapesp. Ed. 343. set. 2024. Disponível em: < <https://revistapesquisa.fapesp.br/pesquisas-mapeiam-conflitos-causados-pela-mineracao/>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

ROCHA, L. C. **As tragédias de Mariana e Brumadinho: É prejuízo? Para Quem?.** Caderno de Geografia. v. 31. 2021. Disponível em: < <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/25541/17777>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

G1. **Entenda o que é minério de ferro, rejeito e barragem:** Conheça os termos chaves do caso de Brumadinho. G1, 2019. Disponível em: < <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/01/30/entenda-o-que-e-minerio-de-ferro-rejeito-e-barragem.ghtml>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

CAVALLINI, Marta. **Mais cara, mineração a seco é alternativa a barragens, apontam especialistas.** G1, 2019. Disponível em: < <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/02/01/mais-cara-mineracao-a-seco-e-alternativa-a-barragens-apontam-especialistas-entenda.ghtml>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

VALE, S.A. **Cerca de 80% da produção de minério de ferro da Vale no Brasil não utiliza barragens de rejeitos.** 2024. Disponível em: < [https://vale.com/pt/w/cerca-de-80-porcento-da-producao-de-minerio-de-ferro-da-vale-no-brasil-nao-utiliza-barragens-de-rejeitos#:~:text=Sobre%20o%20processamento%20a%20seco,e%20menos%20fases%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o](https://vale.com/pt/w/cerca-de-80-porcento-da-producao-de-minerio-de-ferro-da-vale-no-brasil-nao-utiliza-barragens-de-rejeitos#:~:text=Sobre%20o%20processamento%20a%20seco,e%20menos%20fases%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o.)>. Acesso em: 16 jul. 2025.

LARRARD, F. de, SEDRAN, T. **Optimizations of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model.** Cement and Concrete Research, vol. 24, 1994. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BAHMANI, H., MOSTOFINEJAD, D. **Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review study.** Journal of Building Engineering, vol. 50, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104118>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

AZMEE, N. M., SHAFIQ, N. **Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications.** Case Studies in Construction Materials, vol. 9, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>>. Acesso em: 22 jul. 2025.

LIU, Y. et al. **Current research status of UHPC creep Properties and the corresponding applicaations – A review**. Construction and Building Materials, vol. 416, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135120>>. Acesso em: 22 jul. 2025.

AMJAD, H. et al. **A critical review of irom ore tailings as cement and aggregate substitutes for robust infrastructure: Mechanical, durability, eco-economic, and social impacts**. Journal of Cleaner Production, vol. 492, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144853>>. Acesso em: 22 jul. 2025.

BRASIL, Agência Nacional de Mineração. **Análise de Impacto Regulatório – AIR**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/governanca-regulatoria/analise-de-impacto-regulatorios-air/air-realizados/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.

GU, X. et al. **Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: The effects of mechanical activation and iron tailings contente**. Journal of Building Engineering, vol. 45, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103459>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

LUAN, C. et al. **Enhancing the Properties of UHPC with recycled concrete poder and iron or tailings sand, and evaluating the environmental impact**. Construction and Building Materials, vol. 452, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138769>>. Acesso em: 24 jul. 2025.

ZHANG, W. et al. **Effects of iron tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete**. Construction and Building Materials, vol. 260, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119917>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SHI, J. et al. **Properties of Ultr-High performance concrete incorporating iron tailings poder and iron tailings sand**. Journal of Building Engineering, vol. 83, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108442>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

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

WANG, J. N. et al. **Effect of distribution modulus (q) on the Properties and microstructure development of a sustainable Ultra-High Performance Concrete (UHCP)**. Cement and Concrete Composites, vol. 125, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104335>>. Acesso em: 28 jul. 2025.

GOES, C. M. W. et al. **Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho**. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345310605_Revisao_sobre_empacotamento_de_particulas_e_os_materiais_utilizados_no_desenvolvimento_de_concreto_de_ultra-alto_desempenho#fullTextFileContent>. Acesso em: 28 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ASTM C642. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2021.**

GRAYBEAL, B. A. **Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/253169904_Characterization_of_the_behavior_of_ultra-high_performance_concrete>. Acesso em: 24 ago. 2025.