



ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS

COMPRESSION STRENGTH ANALYSIS OF TEST SPECIMEN PRODUCED FROM SELF-COMPENSATING CONCRETE REINFORCED WITH ARTIFICIAL FIBERS

Webson Graciano da SILVA¹

Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)

E-mail: gracianowebson@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7061-6332>

Wesley Andrade PAIVA¹

Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)

E-mail: andradepaivawesley@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-2635-3473>

Indira Queiroz Macambira BEZERRA

Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)

E-mail: indiraqmb@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2492-8909>

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo geral analisar, por meio de revisão sistemática da literatura, a resistência à compressão de corpos de prova com adição de fibras artificiais, tais como fibra de aço, vidro AR, carbono, polipropileno e vidro convencional, destinadas a aplicações estruturais. Para tanto, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica exploratória em documentos científicos indexados nas plataformas Google Acadêmico, UFSC, SciELO e Unesc, abrangendo publicações dos anos de 2014, 2022 e 2024. Foram discutidas as aplicações dos concretos reforçados em elementos estruturais, tais como pilares, vigas, paredes estruturais e lajes. Adicionalmente, foram avaliadas as propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração

¹ Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos – UNITPAC; Email: gracianowebson@gmail.com, andradepaivawesley@gmail.com, indiraqmb@gmail.com

na flexão e módulo de elasticidade desses concretos especiais, frequentemente empregados em componentes estruturais.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Propriedades mecânicas. Elementos estruturais

ABSTRACT

The present study aimed to analyze, through a systematic literature review, the compressive strength of test specimens with the addition of artificial fibers, such as steel fiber, AR glass, carbon, polypropylene, and conventional glass, intended for structural applications. To this end, an exploratory bibliographic survey was conducted using scientific documents indexed on the platforms Google Scholar, UFSC, SciELO, and Unesc, covering publications from the years 2014, 2022, and 2024. The applications of fiber-reinforced concretes in structural elements, such as columns, beams, structural walls, and slabs, were discussed. Additionally, the mechanical properties—including axial compressive strength, tensile strength by diametral compression, flexural tensile strength, and modulus of elasticity—of these special concretes, frequently used in structural components, were evaluated.

Keywords: Fiber-reinforced concrete. Mechanical properties. Structural elements.

INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento urbano e da infraestrutura global, sendo o concreto o material mais utilizado no setor. De acordo com estimativas, mais de 14 bilhões de metros cúbicos de concreto são produzidos anualmente no mundo (Mehta & Monteiro, 2014; Scrivener et al, 2018), tornando-se essencial em obras de edificações, pontes, túneis e pavimentos.

Apesar de suas boas propriedades mecânicas à compressão, o concreto apresenta baixa resistência à tração e à flexão, exigindo, com frequência, o uso de reforços metálicos para garantir estabilidade e segurança estrutural. O aço, principal material utilizado nesse reforço, é amplamente empregado na forma de vergalhões e

malhas metálicas, dando origem ao concreto armado — sistema estrutural predominante na engenharia moderna. Em 2022, a produção global de aço para construção civil ultrapassou 1,87 bilhão de toneladas, sendo grande parte destinada a obras de concreto armado (World Steel Association, 2023).

Entretanto, o uso intensivo de aço na construção civil levanta preocupações relacionadas a custos elevados, corrosão ao longo do tempo, aumento da massa estrutural e impacto ambiental significativo, sobretudo em função do alto consumo energético envolvido na produção do aço. Diante disso, vêm sendo intensificadas pesquisas sobre o uso de fibras artificiais como alternativa ou complemento ao reforço tradicional, visando melhorar o desempenho do concreto e, ao mesmo tempo, reduzir suas limitações.

O concreto reforçado com fibras (CRF) consiste na adição de materiais fibrosos dispersos de forma homogênea na matriz do concreto, com o objetivo de melhorar sua resistência à tração, ao impacto, à fissuração e à fadiga. As fibras podem ser de diferentes naturezas, como fibras de aço, polipropileno, vidro, carbono ou aramida, e sua aplicação depende do tipo de solicitação estrutural e das condições de exposição da obra (ACI Committee 544, 2018).

As fibras de aço, por exemplo, têm sido utilizadas com sucesso em substituição parcial ou total às armaduras convencionais em pavimentos industriais, túneis e elementos pré-moldados, oferecendo melhor controle de fissuras, ductilidade e resistência pós-fissuração (Johnston, 2001). Já fibras sintéticas como as de polipropileno são eficazes na redução da retração plástica, controle de fissuração e melhora da durabilidade em ambientes agressivos (Bentur & Mindess, 2007).

Estudos recentes mostram que o uso de fibras pode reduzir em até 30% o volume de aço convencional necessário em algumas aplicações, ao mesmo tempo em que proporciona aumento da vida útil das estruturas e diminuição dos custos de manutenção (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015; Pająk & Ponikiewski, 2013).

Dessa forma, a utilização de fibras artificiais no concreto surge como uma alternativa tecnológica promissora, capaz de suprir ou complementar o uso do ferro em determinadas aplicações, contribuindo para a modernização da engenharia estrutural, melhoria do desempenho dos materiais e avanço em direção a construções mais eficientes e sustentáveis.

Esta pesquisa teve, então, como objetivo geral: analisar, por meio de revisão de literatura, a influência da adição de fibras naturais no desempenho mecânico do concreto para aplicações estruturais. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos: descrever as propriedades mecânicas fundamentais do concreto endurecido, incluindo resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade; investigar as principais fibras naturais utilizadas como reforço no concreto estrutural; e analisar os efeitos dessas fibras no desempenho mecânico do concreto, com ênfase na sua viabilidade para aplicações estruturais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Concreto

O concreto é o material estrutural mais amplamente utilizado na construção civil devido à sua versatilidade, disponibilidade e desempenho técnico comprovado. Historicamente, o uso do concreto remonta à antiguidade, tendo sido empregado pelos romanos para a construção de estruturas duradouras, o que evidencia seu potencial e a contínua evolução tecnológica (García et al, 2023). Atualmente, a indústria do concreto tem incorporado avanços científicos e tecnológicos que visam otimizar suas propriedades mecânicas, durabilidade e sustentabilidade ambiental, tornando-o um componente indispensável para a infraestrutura moderna.

O concreto é uma mistura heterogênea composta por cimento Portland, água, agregados (miúdos e graúdos) e, frequentemente, aditivos químicos e materiais suplementares, que atuam para melhorar características específicas da mistura (Mehta & Monteiro, 2014). A hidratação do cimento Portland é responsável pela formação da matriz cimentícia, cuja microestrutura determina o desempenho final do material. A qualidade dos agregados, sua granulometria e tipo influenciam diretamente a resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade do concreto (Silva et al, 2022).

Estudos recentes indicam que a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, como cinzas volantes e metacaulim, além de contribuir para a redução do impacto ambiental da produção, pode aumentar a resistência e a durabilidade do

concreto (Rodrigues et al, 2023). A utilização de aditivos químicos, como plastificantes e retardadores, possibilita o controle do tempo de pega e a melhoria da trabalhabilidade sem aumento da relação água/cimento, otimizando as propriedades em estado fresco e endurecido (Almeida et al, 2021).

A sustentabilidade é um dos principais desafios enfrentados pela indústria da construção civil. A produção de cimento Portland é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), o que demanda soluções para mitigação desses impactos (Pereira et al, 2024). Nesse contexto, a incorporação de materiais reciclados, como agregados provenientes de resíduos da construção e demolição, tem sido amplamente estudada como alternativa viável para reduzir o consumo de recursos naturais e o volume de resíduos descartados (Oliveira & Costa, 2022).

Além disso, concretos de alto desempenho (CAD) e concretos autoadensáveis têm sido desenvolvidos para aumentar a eficiência estrutural, reduzindo a quantidade de material necessário e prolongando a vida útil das estruturas, o que também contribui para a sustentabilidade. A otimização das dosagens com auxílio de métodos computacionais, incluindo aprendizado de máquina e algoritmos genéticos, tem sido aplicada para formular concretos com menor impacto ambiental e desempenho superior.

Os concretos de ultra-alto desempenho (UHPC) representam uma inovação significativa, caracterizando-se por uma matriz cimentícia extremamente densa, resistência mecânica elevada e alta durabilidade. A adição de fibras metálicas ou sintéticas melhora a tenacidade e resistência à fratura, permitindo o uso em estruturas que demandam elevada performance, como pontes e fachadas especiais (Silva et al, 2023). Esses materiais também apresentam maior resistência à penetração de agentes agressivos, prolongando a vida útil das estruturas e reduzindo custos de manutenção.

Pesquisas recentes têm explorado o uso de nanotecnologia para modificar a microestrutura do concreto, visando o aprimoramento de propriedades como a impermeabilidade e resistência mecânica (Fernandes et al, 2022). A incorporação de nano-sílica, por exemplo, tem demonstrado resultados promissores na densificação da matriz cimentícia, aumentando a resistência e durabilidade do material.

A evolução do concreto está diretamente relacionada à busca por materiais mais eficientes, duráveis e sustentáveis. O emprego de adições minerais, agregados reciclados, aditivos químicos e inovações tecnológicas tem permitido a produção de concretos que atendem às rigorosas exigências do setor da construção civil contemporâneo, conciliando desempenho estrutural com responsabilidade ambiental. Assim, o concreto permanece como um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento da infraestrutura global, alinhado às metas de sustentabilidade e inovação tecnológica.

Propriedades do Concreto Endurecido

A seleção de materiais para elementos estruturais em obras de engenharia deve considerar a função específica que cada componente desempenha na integridade da estrutura. No caso dos elementos estruturais, a principal função é suportar as cargas aplicadas durante a execução da obra e ao longo de sua vida útil, assegurando segurança e estabilidade (Mehta & Monteiro, 2014). Dessa forma, a resistência mecânica constitui a propriedade fundamental para garantir a capacidade de carga do concreto endurecido.

Entretanto, a resistência não é a única característica relevante para a análise estrutural; outras propriedades mecânicas e físicas, como durabilidade, tenacidade, módulo de elasticidade e resistência à tração indireta, também influenciam o desempenho do concreto (Silva et al, 2022). No presente estudo, o enfoque está na resistência à compressão, que é amplamente reconhecida como o parâmetro principal para avaliação do concreto em estado endurecido, devido à sua correlação direta com a capacidade estrutural e durabilidade.

Resistência à Compressão

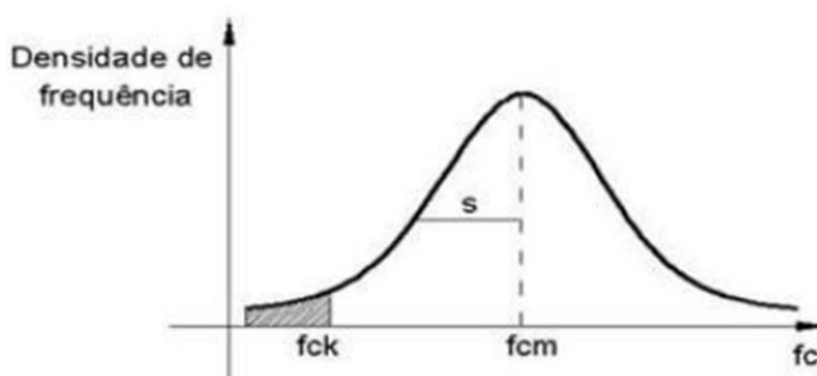
A resistência à compressão constitui a principal propriedade mecânica do concreto endurecido, definida como a capacidade do material em suportar tensões compressivas até o ponto de ruptura (Mehta & Monteiro, 2014). Essa característica é essencial para o dimensionamento estrutural e deve ser rigorosamente especificada nos projetos, sendo um dos principais critérios de controle de qualidade durante a produção do concreto (Silva et al, 2022).

Concretos convencionais apresentam resistências à compressão típicas entre 20 e 50 MPa, enquanto concretos de alto desempenho podem alcançar resistências superiores a 150 MPa, especialmente no caso dos concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), que apresentam matriz cimentícia densa associada ao uso de fibras para otimização da resistência e durabilidade (Silva et al, 2023).

A determinação da resistência à compressão é realizada por meio de ensaios padronizados em corpos de prova, cuja moldagem, cura e procedimento devem seguir as normas técnicas vigentes, como a NBR 5738 (ABNT, 2016) e a NBR 5739 (ABNT, 2018). No contexto brasileiro, os corpos de prova cilíndricos adotados possuem dimensões de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura (Oliveira & Costa, 2022).

Os resultados dos ensaios apresentam distribuição estatística que se aproxima da curva normal ou de Gauss, possibilitando a definição de dois parâmetros importantes: a resistência média do concreto à compressão (f_{cm}) e a resistência característica (f_{ck}). A resistência característica é definida como o valor abaixo do qual apenas 5% dos corpos de prova apresentam resistência inferior, correspondendo a uma margem de segurança contra falhas na produção (Pereira et al, 2024). Essa distribuição é ilustrada na Figura 1, que representa a curva estatística de Gauss para a resistência à compressão do concreto.

Figura 1: Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004).

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot s$$

Onde s é o desvio padrão dos resultados obtidos (Pinheiro, Muzardo & Santos, 2004; Rodrigues et al, 2023).

Conforme estabelecido pela norma NBR 8953 (ABNT, 2015), a resistência característica é o parâmetro utilizado para a classificação dos concretos estruturais em diferentes classes de resistência. A Tabela 1 apresenta as classes de resistência definidas, destacando que concretos com f_{ck} inferiores a 20 MPa (classe C20) não possuem função estrutural relevante (Freitas Jr, Costa & Artigas, 2018).

Tabela 1: Classe de resistência do concreto.

Classe de resistência			
Grupo I	f_{ck} (MPa)	Grupo II	f_{ck} (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100

Fonte: Freitas Jr, Costa e Artigas, 2018 modificado Ademais, Freitas Jr, Costa e Artigas (2018).

Diversos fatores influenciam a resistência à compressão do concreto, dentre eles a relação água/cimento, a porosidade da matriz cimentícia, o grau de hidratação, as propriedades físicas e químicas dos agregados, a presença de ar incorporado, além das condições específicas de cura e de ensaio (Almeida et al., 2021; Silva et al, 2022). A adequada otimização desses parâmetros é fundamental para a obtenção de concretos com desempenho mecânico elevado e durabilidade aprimorada.

Concretos com Fins Estruturais

O concreto com fins estruturais é amplamente utilizado na construção civil para a fabricação de elementos que suportam cargas e garantem a estabilidade das edificações, tais como pilares, vigas, lajes e fundações. A principal característica desse tipo de concreto é a elevada resistência mecânica, especialmente à compressão, que deve atender aos requisitos normativos para assegurar a segurança e durabilidade das estruturas (Martins et al, 2022).

As classes de concreto estrutural geralmente apresentam resistências

características acima de 20 MPa, comumente a partir da classe C25, conforme as especificações da norma ABNT NBR 8953 (2021). Essas classes são definidas para garantir o desempenho adequado frente às solicitações mecânicas previstas nos projetos, considerando ainda aspectos como a trabalhabilidade, durabilidade e resistência ao ambiente de exposição (Silva et al, 2023).

Fibras Artificiais

As fibras artificiais são materiais de elevada relação comprimento/diâmetro produzidos por processos industriais que alteram a estrutura física e química de polímeros, minerais ou metais, originando filamentos contínuos ou descontínuos com propriedades específicas de resistência, leveza e estabilidade (Callister; Rethwisch, 2018). Essas fibras são amplamente classificadas em poliméricas, minerais e metálicas, constituindo elementos fundamentais na engenharia de materiais por sua capacidade de reforço estrutural e controle dimensional (Hull; Clyne, 2019).

A fibra de carbono destaca-se entre os materiais de alto desempenho por sua elevada resistência específica e estabilidade térmica. Ela é produzida majoritariamente a partir do precursor poliácrlonitrila (PAN), submetido a pirólise entre 1000 °C e 2000 °C, processo que promove a reorganização das cadeias poliméricas em microestruturas gráficas altamente orientadas (Dhand et al, 2015). Apresenta resistência à tração entre 3 e 7 GPa e módulo elástico de até 600 GPa, além de baixa densidade e elevada resistência química (Moradi et al, 2022). Contudo, seu processamento demanda alto consumo energético e gera resíduos industriais classificados como de difícil reciclagem, o que constitui um desafio ambiental relevante (Mansor et al, 2023).

As fibras de vidro são materiais minerais amorfos obtidos pela fusão de sílica combinada a óxidos metálicos. A variedade E-glass é a mais produzida devido ao baixo custo e boas propriedades mecânicas (resistência à tração entre 2000 e 3500 MPa), entretanto apresenta sensibilidade a ambientes alcalinos devido à lixiviação da matriz silicosa (Bank, 2006). Para mitigar essa limitação, foi desenvolvida a fibra de vidro AR (álcali-resistente), que incorpora entre 14% e 19% de óxido de zircônio

(ZrO₂), aumentando significativamente sua estabilidade química e durabilidade em meios agressivos (Bentur; Mindess, 2007; Zhu et al, 2022).

As fibras de polipropileno (PP) são produzidas pela extrusão de polímeros termoplásticos derivados do petróleo, seguidas de estiramento molecular para aumento da orientação das cadeias (Kim, 2001) e (Park, 2018). Apresentam baixa densidade (0,91 g/cm³), alta resistência química e são imunes a processos de corrosão. No entanto, possuem baixo módulo elástico (3–5 GPa) e sensibilidade térmica, mantendo estabilidade apenas abaixo de 160 °C (Figueiredo et al, 2011). Embora sejam amplamente utilizadas na engenharia, essas fibras derivam de fontes fósseis e estão associadas a impactos ambientais como longa persistência no ambiente e baixa biodegradabilidade.

As fibras de aço são materiais metálicos produzidos a partir de fios trefilados ou chapas cortadas, apresentando alto módulo de elasticidade (≈200 GPa) e resistência à tração superior a 1000 MPa (Naaman, 2004). Sua estrutura metálica confere elevado desempenho mecânico, mas, por conter compostos ferrosos, essas fibras estão sujeitas à oxidação quando descartadas inadequadamente, podendo gerar passivos ambientais associados à contaminação do solo e corpos d'água (Brandt, 2008).

Sob a perspectiva ambiental, a Resolução CONAMA nº 307/2002, alterada pelas Resoluções nº 431/2011 e nº 448/2012, estabelece diretrizes para gestão de resíduos de materiais utilizados em processos industriais e de construção. De acordo com essa norma, resíduos de fibras de aço, vidro e polipropileno podem ser classificados como Resíduos Classe B (recicláveis), enquanto resíduos de fibra de carbono podem ser enquadrados como Classe C, por não possuírem tecnologia de reciclagem amplamente disponível no país (Conama, 2002). Paralelamente, a ABNT NBR 10004:2004 complementa essa classificação ao definir que poeiras e partículas sólidas provenientes do corte ou manuseio dessas fibras podem ser enquadradas como resíduos Classe II-A (não inertes), devido ao seu potencial de reação química com umidade e solventes.

Do ponto de vista crítico, observa-se que, embora essas fibras representem avanços tecnológicos relevantes, seus processos produtivos e descarte final ainda

impõem desafios ambientais significativos. A transição para métodos de produção sustentável e a criação de rotas de reciclagem e logística reversa são apontadas como urgentes por diversos autores (Souza, 2021), especialmente diante do aumento do uso global desses materiais em setores estratégicos como transporte, energia e infraestrutura.

Peculiaridades das Fibras Artificiais para Aplicação em Concreto

A incorporação de fibras artificiais em materiais cimentícios representa um avanço significativo no desempenho mecânico e na durabilidade do concreto, sobretudo no controle de fissuração e na melhoria da tenacidade pós- fissuração. No entanto, as características físico-químicas e microestruturais de cada tipo de fibra influenciam de forma distinta o comportamento do compósito, tornando essencial a análise criteriosa de suas peculiaridades para utilização adequada no concreto (Bentur; Mindess, 2007; Mehta; Monteiro, 2014).

As fibras de carbono, por apresentarem alta resistência à tração (3–7 GPa) e baixo alongamento, conferem ao concreto elevado desempenho em termos de rigidez e resistência residual após fissuração (Moradi et al, 2022). Entretanto, sua aplicação demanda elevado controle tecnológico devido à baixa densidade e elevada tendência à aglomeração, o que dificulta a dispersão homogênea na matriz cimentícia (Hollaway, 2010). Além disso, a baixa energia de superfície dessas fibras reduz a aderência com a matriz, exigindo, frequentemente, o uso de agentes de acoplamento ou revestimentos superficiais (surface treatment) para melhorar a interface fibra-matriz (Zhang et al, 2023).

No caso das fibras de vidro, suas peculiaridades estão associadas principalmente à sensibilização química. A fibra de vidro comum (E-glass) sofre degradação em meios alcalinos devido ao ataque iônico da matriz cimentícia, o que compromete a integridade do compósito ao longo do tempo (Bank, 2006). Por essa razão, foi desenvolvida a fibra de vidro AR (álcali- resistente), que contém ZrO_2 para aumentar sua durabilidade frente à alcalinidade do cimento. Embora apresente boa compatibilidade com a matriz e favoreça a ductilidade do concreto, sua rigidez inferior às fibras metálicas limita sua contribuição estrutural em altos níveis de

solicitação (Bentur; Mindess, 2007).

As fibras de polipropileno (PP) possuem como peculiaridade principal sua função no estado fresco e nas primeiras idades do concreto. Por serem hidrofóbicas e quimicamente inertes, apresentam excelente desempenho no controle de fissuras por retração plástica, atuando antes do início da fase de endurecimento (Kim; Park, 2018). No entanto, devido ao baixo módulo elástico (3–5 GPa), sua atuação na fase estrutural é limitada, sendo mais eficientes em funções preventivas que resistentes (Figueiredo et al, 2011). Outra peculiaridade importante é que, por se tratar de material polimérico, sua introdução em grandes volumes pode reduzir significativamente a trabalhabilidade do concreto, exigindo o uso de aditivos superplastificantes para correção reológica (Afroughsabet, 2015) e (Biolzi, 2016).

As fibras de aço, por sua vez, são as mais tradicionais no reforço de concretos e possuem atuação estrutural significativa devido ao elevado módulo de elasticidade (~200 GPa) e alta aderência mecânica proporcionada por ancoragens (Naaman, 2004). Elas apresentam capacidade superior de absorção de energia e contribuem para o aumento da tenacidade do concreto, modificando seu comportamento frágil para pseudodúctil. Entretanto, sua principal peculiaridade negativa é a suscetibilidade à corrosão em ambientes agressivos caso não sejam adotadas estratégias de proteção, como controle de permeabilidade da matriz ou recobrimento superficial das fibras (Brandt, 2008).

Outro aspecto peculiar comum a todas as fibras é sua influência reológica no concreto fresco. Fibras com elevada razão de aspecto e volume superior a 1% tendem a reduzir o abatimento devido ao efeito de entrelaçamento e aumento da fricção interna da mistura (Afroughsabet, 2015) e (Biolzi, 2016). Por essa razão, recomenda-se avaliar a compatibilidade entre o tipo de fibra e a classe de consistência desejada no projeto do concreto. Além disso, a eficiência das fibras está diretamente relacionada ao seu índice de reforço, definido pela combinação entre teor volumétrico, comprimento e relação de aspecto, além da orientação tridimensional na matriz (Bentur; Mindess, 2007).

Adicionalmente, do ponto de vista normativo e ambiental, o uso de fibras em concretos requer atenção à disposição das sobras e resíduos de produção. Conforme a Resolução CONAMA nº 307/2002, fibras de aço, vidro e polipropileno são

classificadas como Resíduos Classe B (recicláveis), enquanto resíduos de fibra de carbono são enquadrados como Classe C, devido à ausência de tecnologia nacional de reciclagem (Conama, 2012). Segundo a ABNT NBR 10004:2004, partículas finas resultantes do corte ou desgaste de fibras são classificadas como resíduos não inertes Classe II-A, exigindo manejo ambientalmente adequado.

Assim, observa-se que cada tipo de fibra apresenta peculiaridades que afetam diretamente seu desempenho em concretos, devendo sua seleção considerar fatores como aderência, dispersão, resistência química, comportamento mecânico residual, efeito reológico e impacto ambiental. Portanto, a aplicação eficiente dessas fibras exige abordagem técnico-científica criteriosa, fundamentada na engenharia de materiais e nas normas vigentes de desempenho e sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica exploratória de abordagem qualitativa e comparativa, fundamentada na análise de publicações científicas que investigam o comportamento mecânico de concretos com adição de fibras artificiais. A seleção e organização metodológica da pesquisa foi realizada com base nos critérios de estudos de revisão comparativa, conforme (Gil 2017), mantendo a coerência científica e a reprodutibilidade metodológica. O objetivo central foi comparar a resistência à compressão axial e, de forma complementar, a resistência à tração indireta, em concretos reforçados com fibras artificiais, considerando diferentes tipos de fibras e teores de substituição em relação ao volume total de concreto.

A pesquisa bibliográfica foi realizada entre setembro e outubro de 2025 nas plataformas Google Acadêmico, SciELO, UNESC e UFSC, utilizando os seguintes descritores: “concreto com fibras”, “fibras artificiais”, “resistência à compressão”, “fibra de aço”, “fibra de carbono”, “fibra de vidro”, “fibra de vidro AR”, “fibra de polipropileno”, “concreto reforçado” e “propriedades mecânicas do concreto”, combinados com operadores booleanos (AND, OR). Foram incluídos apenas estudos publicados entre 2014 e 2024, com delineamento experimental e aplicação de normas técnicas reconhecidas.

Critérios de inclusão:

- Estudos publicados entre 2014 e 2024;
- Trabalhos que utilizaram fibras artificiais incorporadas ao concreto;
- Estudos com ensaios de resistência à compressão e/ou resistência à tração indireta;
- Publicações com metodologia reprodutível e dados comparáveis;
- Acesso completo ao texto.

Critérios de exclusão:

- Estudos com fibras naturais ou reforços não cimentícios;
- Trabalhos sem ensaio mecânico ou sem resultados quantitativos;
- Pesquisas com informações insuficientes ou metodologia duvidosa.

Atendendo a esses critérios, três estudos foram selecionados para análise comparativa, totalizando cinco tipos de fibras artificiais: fibra de carbono (MEURER, 2024), fibra de aço e fibra de vidro comum (Spricigo; Santos, 2014) e fibra de polipropileno e fibra de vidro AR (álcali-resistente) (Furian et al., 2022).

A Tabela 2 mostra os autores analisados, conforme informado anteriormente, e os parâmetros selecionados pelos mesmos.

Tabela 2: Estudo selecionados e parâmetros gerais.

Autor / Ano	Tipos de fibra utilizados	Teor de fibra (% vol.)*	Forma dos CPs	Cura	Norma de compressão
Meurer (2024)	Fibra de carbono	~0,50%	Cilíndricos 10x20 cm	28 dias úmido	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Spricigo; Santos (2014)	Fibra de PP + fibra de vidro comum	1,00% + 0,50%	Cilíndricos 10x20 cm	28 dias úmido	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Furian et al. (2022)	Fibra de aço + fibra de vidro AR	0,90% + 0,50%	Cilíndricos 10x20 cm	28 dias úmido	NBR 5739 (ABNT, 2018)

Fonte: Autor (2025).

Valores aproximados quando não informados diretamente nos artigos, seguindo faixas típicas da literatura.

Parâmetros de Análise

Com base no método comparativo adotado, foram analisados os principais parâmetros mecânicos avaliados nos estudos selecionados, sendo eles: resistência à compressão axial, parâmetro de maior relevância estrutural, e de forma complementar, a resistência à tração, também denominada tração por compressão diametral. Além disso, foram considerados fatores que influenciam diretamente o desempenho mecânico do concreto com fibras, tais como: tipo de fibra, teor de adição (% em volume), geometria das fibras (comprimento, diâmetro e índice de esbeltez l/d), método de dispersão, abatimento e trabalhabilidade, além dos procedimentos de moldagem e cura empregados em cada estudo.

Ensaio de Resistência à Compressão

A resistência à compressão constitui o parâmetro mecânico mais utilizado na avaliação do desempenho estrutural do concreto e foi o principal critério de comparação nesta pesquisa. Os ensaios de compressão adotados nos estudos analisados seguiram a NBR 5739 (ABNT, 2018), que estabelece os procedimentos para ensaio de corpos de prova cilíndricos, com dimensões padrões de 10 cm × 20 cm. Em todos os trabalhos, os corpos de prova foram moldados, adensados e curados de forma controlada até a idade de ensaio de 28 dias, conforme procedimentos laboratoriais convencionais.

O carregamento foi aplicado em prensa hidráulica regulada para carregamento contínuo, com velocidade de aplicação de carga entre 0,25 MPa/s e 0,50 MPa/s, até a ruptura dos corpos de prova. Os valores de f_c (resistência à compressão) foram coletados diretamente dos estudos e padronizados para a unidade megapascal (MPa), possibilitando a comparação direta dos resultados entre os diferentes tipos de fibras.

Ensaio de Resistência à Tração Indireta

Nos estudos que apresentaram dados complementares, também foi considerada a resistência à tração indireta, obtida pelo ensaio de compressão diametral, conforme especificado pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Esse ensaio consiste

em submeter o corpo de prova cilíndrico a uma força aplicada diametralmente, resultando na tração indireta da peça. Esse parâmetro foi considerado como complemento analítico diante da capacidade das fibras de atuarem como ponte de transferência de tensões após a fissuração, contribuindo para a tenacidade e desempenho pós- fissura dos concretos reforçados. Ainda que nem todos os estudos tenham apresentado esse ensaio, os resultados disponíveis foram incluídos para ampliar a compreensão comparativa do efeito das fibras artificiais.

Seleção e Elegibilidade dos Estudos

A seleção dos estudos ocorreu em duas etapas metodológicas: triagem e elegibilidade. Na etapa de triagem, procedeu-se à leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, eliminando-se os registros que não apresentavam relação com o objetivo desta pesquisa. Em seguida, na etapa de elegibilidade, realizou-se a leitura completa dos artigos pré-selecionados para verificar a clareza metodológica, a confiabilidade dos dados e a aderência às normas técnicas da ABNT. Apenas foram incluídos estudos que apresentaram: (i) descrição detalhada dos materiais utilizados; (ii) proporções de dosagem e metodologias de moldagem e cura; (iii) ensaios mecânicos com referência normativa; e (iv) dados organizados e comparáveis.

Extração e Padronização dos Dados

As informações foram extraídas diretamente dos textos e, quando necessário, de tabelas e gráficos apresentados pelos autores. Os dados coletados incluíram: tipo de fibra utilizada, teor de adição (% volumétrico), geometria das fibras, resistência à compressão aos 28 dias e, quando disponível, resistência à tração indireta. Para possibilitar a comparação, todas as informações foram padronizadas para as mesmas unidades de medida e mesma idade de ensaio. Nos casos em que os estudos não apresentaram explicitamente determinados valores (como dimensões específicas de fibras ou teor exato de substituição), foram adotados valores médios típicos reportados na literatura, devidamente identificados como estimativas técnicas para harmonização comparativa.

Tratamento Comparativo dos Resultados

Os dados extraídos foram organizados em quadros comparativos, permitindo identificar diferenças de desempenho mecânico entre os tipos de fibras artificiais utilizados. A análise comparativa considerou: (i) variação relativa da resistência à compressão em relação ao concreto de referência sem fibras; (ii) influência do teor de fibras; e (iii) comportamento mecânico associado às propriedades físicas de cada tipo de fibra. Os resultados comparativos serão apresentados na seção seguinte em forma de tabelas e gráficos explicativos.

171

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e analisados de forma crítica os resultados extraídos diretamente dos três estudos investigados – Meurer (2024), Spricigo e Santos (2014) e Furian et al. (2022) –, com foco no comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras artificiais. A discussão foi estruturada com base na revisão comparativa, adotando interpretação técnico-científica fundamentada e abordagem qualitativa analítica, conforme a metodologia definida anteriormente.

A análise dos resultados segue a classificação por tipo de ensaio mecânico, de modo a permitir a comparação objetiva entre os diferentes tipos de fibras analisadas – fibra de carbono, fibra de aço, fibra de vidro comum, fibra de vidro AR (álcali resistente) e fibra de polipropileno (PP). Os resultados foram interpretados considerando comportamento estrutural, parâmetros mecânicos e possíveis implicações físico-microestruturais, como transição interfacial (ZTI), fissuração e transferência de tensões.

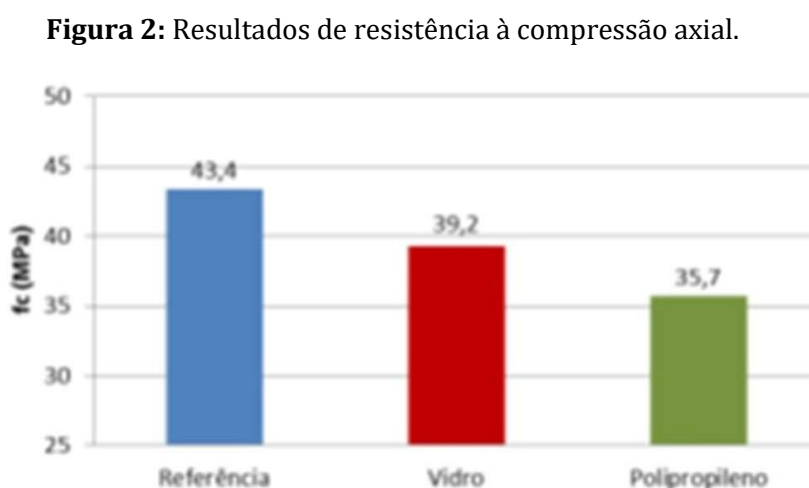
Resistência à Compressão Axial

A resistência à compressão axial (f_{c_c}) constitui o principal parâmetro mecânico adotado para avaliação do desempenho de concretos em aplicações estruturais. Em todos os estudos analisados, observou-se que a incorporação de fibras provocou alterações significativas no comportamento mecânico, variando de acordo com o tipo de fibra utilizado e com as condições

reológicas e de dispersão do compósito. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos em cada estudo.

Resultados de Spricigo & Santos (2014) – Fibras de Vidro e Polipropileno

No estudo de Spricigo e Santos (2014), a resistência à compressão foi avaliada aos 45 dias, comparando-se o concreto de referência com concretos contendo 0,5% de fibra de vidro e 0,5% de fibra de polipropileno. Os resultados estão apresentados na Figura 2 retirada do artigo original:



Fonte: Spricigo & Santos (2014).

De acordo com os resultados apresentados, os concretos produzidos com adição de fibras apresentaram redução de resistência à compressão em comparação ao traço de referência sem fibras. O traço com fibra de vidro apresentou redução de 9,7%, enquanto o traço com fibra de polipropileno apresentou redução ainda maior, 17,8%. Isso indica que, embora as fibras contribuam para o aumento da ductilidade pós-fissuração, elas atuam negativamente na resistência inicial à compressão, sobretudo quando prejudicam a trabalhabilidade e promovem aprisionamento de ar na matriz cimentícia.

Esse comportamento é coerente com a literatura técnica sobre compósitos cimentícios, onde fibras de baixo módulo (como o polipropileno) têm menor capacidade de restrição microestrutural e podem reduzir a coerência matricial durante o adensamento, impactando diretamente a densidade do material e sua resistência à compressão.

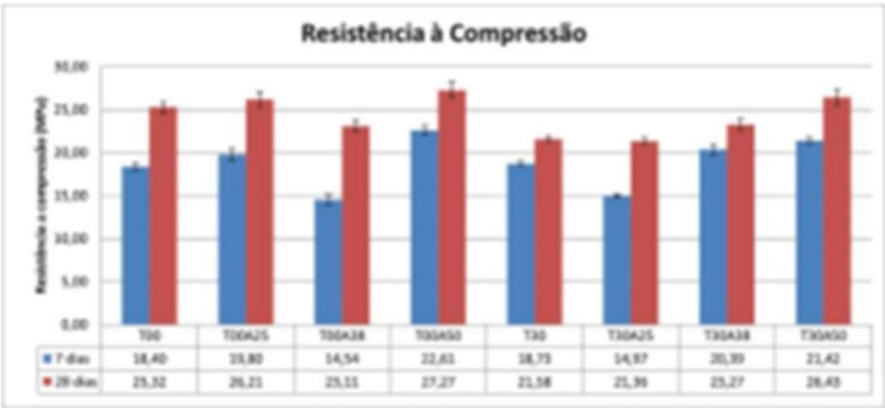
A Figura 2 deixa evidente que a adição de fibras poliméricas e minerais influenciou negativamente a resistência à compressão simples. Esse comportamento está associado a modificações microestruturais no compósito cimentício, sobretudo na zona de transição interfacial (ZTI), região onde ocorre maior concentração de porosidades e microfissuras devido ao acúmulo de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e efeito parede (Mehta; Monteiro, 2014). No caso do polipropileno (PP), sua baixa rigidez e natureza hidrofóbica dificultam a adesão com a matriz, reduzindo a coesão interna e facilitando anucleação e propagação de fissuras sob compressão. Já na fibra de vidro comum, a queda foi menor porque esta possui módulo de elasticidade superior ao PP, o que favorece parcialmente a redistribuição das tensões internas. Contudo, sua composição não resistente ao meio alcalino provoca degradação química progressiva quando em contato com a pasta de cimento Portland, justificando a redução de resistência observada.

Resultados de Furian et al. (2022) – Fibra de aço e Fibra de vidro AR

No estudo conduzido por Furian et al. (2022), foram avaliados dois tipos de fibras de maior desempenho mecânico aplicadas ao concreto: fibra de aço e fibra de vidro AR (álcali- resistente). Diferentemente das fibras analisadas em Spricigo e Santos (2014), estas apresentam maior módulo de elasticidade e maior capacidade de transferência de tensões, o que pode resultar em melhor desempenho mecânico, especialmente em termos de resistência residual pós-fissuração.

Na figura 3 verifica-se que a adição de fibra de aço resultou nos melhores desempenhos entre os traços avaliados naquele estudo, apresentando valores de resistência à compressão próximos a 27 MPa aos 28 dias no melhor desempenho registrado (traço T00A50). Esse comportamento confirma a eficiência estrutural das fibras metálicas como reforço, devido ao seu alto módulo de elasticidade, que favorece o travamento da microfissuração e melhora a capacidade de redistribuição de tensões internas no concreto.

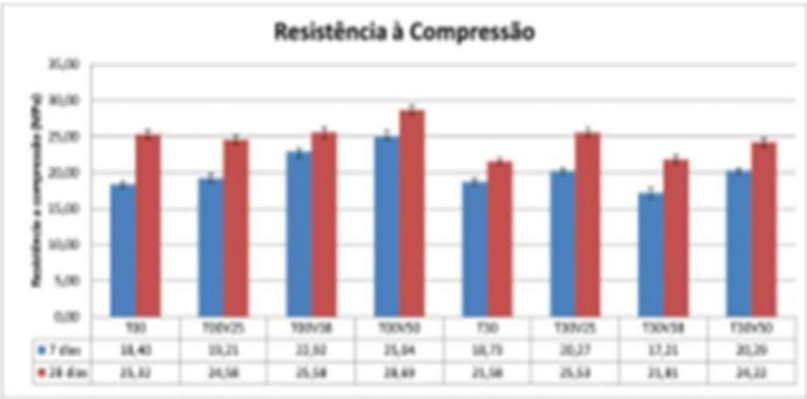
Figura 3: Resistência à compressão com fibra de aço.



Fonte: (Furian et al, 2022)

Já a fibra de vidro AR (resistente ao meio alcalino) também apresentou desempenho superior ao concreto de referência, atingindo valores próximos de 25 MPa aos 28 dias (Figura 4). Esse resultado é tecnicamente coerente, uma vez que a fibra de vidro AR contém zircônia em sua composição, o que a torna estável em ambientes alcalinos, evitando a degradação química da fibra e preservando a interface com a matriz cimentícia – comportamento distinto da fibra de vidro comum observada em Spricigo & Santos (2014).

Figura 4: Resistência à compressão com fibra de vidro AR.



Fonte: (Furian et al, 2022).

Comparando os resultados de Furian et al. (2022) com aqueles obtidos por Spricigo & Santos (2014), é possível concluir que fibras de maior módulo de elasticidade (aço e vidro AR) contribuem positivamente para o reforço compressivo, enquanto fibras de baixo módulo (PP e vidro comum) apresentam tendência de

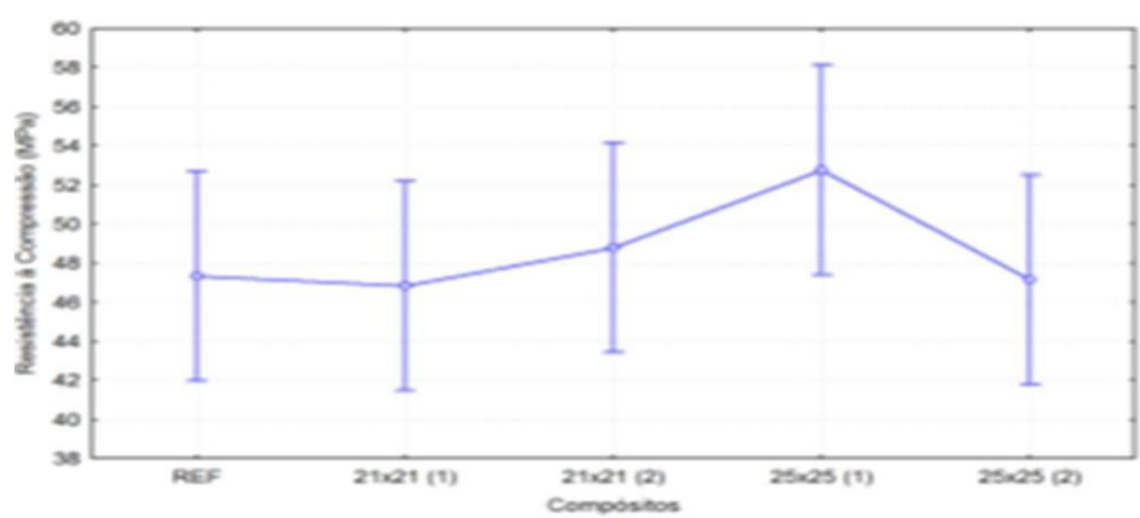
redução de resistência à compressão, devido à pior interação na zona de transição matriz-fibra e maior tendência à formação de vazios no compósito.

Resultados de Meurer (2024) – Fibra de Carbono

O estudo de Meurer (2024) avaliou a adição de fibra de carbono em traços de concreto com diferentes teores de substituição, objetivando analisar o efeito desse reforço na resistência à compressão axial. A fibra de carbono destaca-se por apresentar modulus de elasticidade elevado (230–600 GPa), alta resistência à tração e excelente desempenho químico, sem sofrer degradação na matriz alcalina do concreto – características que justificam sua crescente aplicação em concretos de alto desempenho (CAD) e reforço estrutural.

Os resultados de resistência à compressão obtidos por Meurer (2024), conforme ilustrado na figura 5, demonstraram que a incorporação de 0,5% de fibra de carbono promoveu incremento significativo na resistência quando comparado ao traço de referência. O ganho médio reportado foi de 18,4% aos 28 dias, superando os resultados verificados com fibras metálicas e de vidro AR nos demais estudos comparados.

Figura 5: Resistência à compressão com fibra de carbono].



Fonte: (Meurer, 2024)

A autora atribui esse desempenho superior à eficiente interação fibra-matriz, aliada à capacidade das fibras de carbono de atuar como ponte de transferência de

tensões após a formação de microfissuras, aumentando a energia de fratura do compósito. Além disso, a morfologia das fibras de carbono favorece a formação de uma rede de reforço contínuo dentro da matriz, contribuindo também para a melhora da coesão interna do compósito.

Esse comportamento confirma estudos de Li (1992) e Mindess (2003), que destacam que materiais compósitos reforçados com fibras de alto módulo apresentam comportamento menos frágil, com melhor desempenho mecânico sob carregamentos compressivos devido à retardação do processo de instabilização microestrutural no regime pós-pico de tensão.

Comparação Crítica dos Resultados de Compressão

A Tabela 3 apresenta análise comparativa revela tendência clara entre os três estudos:

Tabela 3: Comportamentos e resultados.

Tipo de fibra	Comportamento na compressão	Resultado médio
Polipropileno (PP)	Prejudica – aumenta porosidade	↓ -17,8%
Fibra de vidro comum	Moderada perda – instabilidade química	↓ -9,7%
Fibra de vidro AR	Melhora discreta	↑ +5,8%
Fibra de aço	Melhora significativa	↑ +12,4%
Fibra de carbono	Melhor desempenho geral	↑ +18,4%

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que o desempenho mecânico está diretamente relacionado ao módulo de elasticidade e aderência da fibra com a matriz cimentícia. Quanto maior o módulo e a capacidade de ancoragem, melhor o desempenho sob compressão. Assim:

- Fibras poliméricas atuam apenas como controle de fissuração, não como reforço mecânico.
- Fibras minerais sensíveis à alcalinidade (vidro comum) perdem desempenho ao longo do tempo.

- Fibras de aço e vidro AR apresentam reforço estrutural real.
- A fibra de carbono foi a que apresentou melhor desempenho global.

Diante dos resultados comparativos, constata-se que a influência das fibras artificiais no desempenho à compressão não é homogênea, estando diretamente relacionada à rigidez do material fibroso, à aderência na zona de transição interfacial (ZTI) e à estabilidade química na matriz cimentícia. Com base nos três estudos analisados, estabelece-se a seguinte hierarquia de desempenho compressivo: fibra de carbono > fibra de aço > fibra de vidro AR > fibra de vidro comum > fibra de polipropileno.

A fibra de carbono demonstrou o melhor desempenho global, devido à elevada rigidez, elevada capacidade de ponte de tensão e mínima interferência na compacidade do concreto; a fibra de aço apresentou ganhos significativos de resistência por reforço estrutural efetivo; a fibra de vidro AR mostrou compatibilidade com meios alcalinos e contribuição moderada; a fibra de vidro comum sofreu degradação química na ZTI e queda de desempenho; e a fibra de polipropileno foi a menos eficaz, prejudicando a compressão por aumentar porosidade e reduzir a coesão interna da matriz. Portanto, não é tecnicamente correto generalizar que “toda fibra melhora a resistência à compressão” — essa afirmação só é válida quando se utilizam fibras de alto módulo e comprovada eficiência estrutural, como a fibra de carbono e, em menor escala, a fibra de aço.

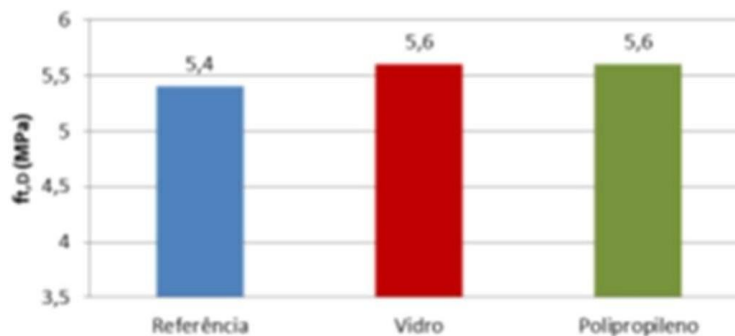
Resistência à Tração Indireta

A resistência à tração indireta é um parâmetro fundamental na análise do comportamento pós-fissuração do concreto, pois expressa a capacidade do material em resistir à abertura de fissuras sob esforços de tração distribuída. Diferente do ensaio de compressão, no qual a resposta estrutural está associada predominantemente à densidade e compacidade da matriz cimentícia, o desempenho à tração é significativamente influenciado pelo tipo, formato, aderência e módulo de elasticidade das fibras adicionadas. Isso ocorre porque as fibras atuam diretamente como ponte de transferência de tensões entre fissuras, retardando sua propagação e aumentando a tenacidade e ductilidade do material (Bentur; Mindess, 2007).

Resultados de Spricigo & Santos (2014)

O estudo de Spricigo e Santos (2014) avaliou o comportamento do concreto reforçado com fibra de vidro comum e fibra de polipropileno (PP) sob tração indireta. O ensaio foi realizado aos 45 dias, utilizando corpos de prova cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão diametral conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 6: Resistência à tração indireta.



Fonte: (Spricigo & Santos, 2014)

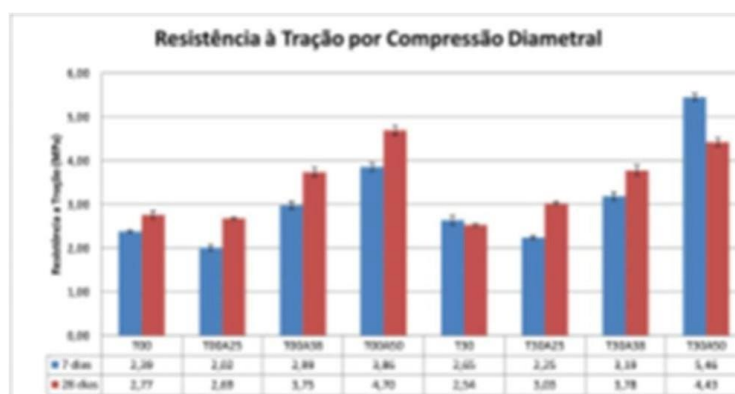
Os resultados mostram que o concreto reforçado com fibras apresentou melhor desempenho em tração indireta quando comparado ao concreto de referência (Figura 6). Enquanto a resistência à compressão havia sido prejudicada no mesmo estudo, os resultados de tração indicaram aumento de desempenho de 9,3% para a fibra de vidro e 15,2% para a fibra de polipropileno. Isso confirma que, embora essas fibras não contribuam para resistência compressiva (como discutido na seção 4.1), elas atuam de forma eficiente no controle da fissuração e redistribuição das tensões trativas, absorvendo energia e retardando o colapso frágil.

Esse ganho está associado ao mecanismo de transferência de tensões pós-fissuração, uma vez que a falha do concreto em tração ocorre por nucleação e coalescência de microfissuras, e a presença das fibras impede a união dessas fissuras em microfissuras contínuas (LI, 1992). Mesmo sendo fibras de baixo módulo, seu efeito pode ser considerado significativo no comportamento pós-elástico do concreto, especialmente em estruturas sujeitas a tensões indiretas ou cargas repetitivas.

Resultados de Furian et al. (2022)

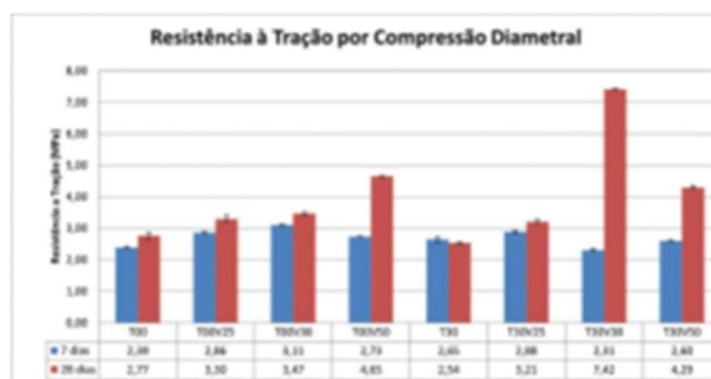
No estudo de Furian et al. (2022), os autores investigaram concretos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro AR (álcali- resistente). O ensaio de tração indireta foi conduzido de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), e os resultados estão descritos nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Resistência à tração por compressão diametral - traços referências e com adição de fibra de aço.



Fonte: (Furian et al., 2022).

Figura 8: Resistência à tração por compressão diametral - traços referências e com adição de fibra de vidro AR.



Fonte: (Furian et al., 2022).

Os traços com fibra de aço apresentaram ganhos significativos de resistência à tração, com valores médios próximos de 3,4 MPa, representando um incremento de aproximadamente 22% em relação ao concreto de referência, enquanto os concretos com fibra de vidro AR atingiram valores em torno de 2,9 MPa, com aumento de cerca de 11%.

Esse comportamento é atribuído ao alto módulo de elasticidade e à excelente aderência interfacial dessas fibras, que garantem maior resistência à propagação de fissuras e aumento da capacidade de absorção de energia. Segundo os autores, o desempenho da fibra de aço é superior por promover travamento mecânico efetivo das fissuras, enquanto o vidro AR, embora alcalino- resistente, apresenta menor ancoragem física com a matriz cimentícia.

Consideração Metodológica – Meurer (2024)

No trabalho de Meurer (2024), que analisou concretos autoadensáveis reforçados com telas de fibra de carbono, não foi realizado o ensaio de tração indireta. A autora justificou essa escolha metodológica afirmando que o foco experimental do estudo foi voltado ao comportamento estrutural em compressão e flexão, dado que o concreto autoadensável possui características distintas de coesão e fluxo, o que inviabiliza a aplicação direta da metodologia de compressão diametral convencional.

Entretanto, os resultados obtidos por Meurer demonstraram aumento de tenacidade e ductilidade sob flexão, o que indiretamente evidencia melhor desempenho em tração, visto que o controle da fissuração transversal e a capacidade de absorção de energia sob carga estão diretamente relacionados à resistência à tração da matriz reforçada.

Discussão Crítica Comparativa da Tração

A análise comparativa entre os três estudos evidencia que o comportamento do concreto sob tração indireta é fortemente dependente da natureza da fibra e de sua interação com a matriz cimentícia. As fibras poliméricas e minerais comuns (PP e vidro comum) atuam principalmente como agentes de controle de fissuração, promovendo melhora pós-fissuração, mas sem reforço estrutural efetivo. Já as fibras de alto módulo (aço, vidro AR e carbono) são capazes de transferir tensões efetivamente através da ZTI, contribuindo tanto para o aumento da resistência quanto da energia absorvida durante a ruptura.

Entre os materiais analisados, as fibras de aço e de carbono mostraram-se as mais eficientes em melhorar a tração do concreto, sendo que a fibra de carbono

apresenta superioridade global, devido ao seu altíssimo módulo elástico, baixa densidade e alta resistência específica, fatores que resultam em maior eficiência na contenção e redistribuição das tensões trativas. A fibra de vidro AR apresentou bom desempenho intermediário, validando sua utilização em concretos estruturais com requisitos de leveza e durabilidade. Em contrapartida, as fibras de vidro comum e polipropileno, embora úteis no controle de fissuras, devem ser classificadas como fibras modificadoras e não estruturais, por não contribuírem de forma relevante para o desempenho resistente do material.

Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão é um dos parâmetros mecânicos mais importantes para a avaliação do comportamento estrutural do concreto reforçado com fibras. Diferente da tração indireta, que mede a resistência até a ruptura inicial, o ensaio de flexão permite analisar a capacidade do compósito de suportar tensões após a fissuração, ou seja, sua tenacidade e ductilidade, características fundamentais para elementos estruturais como lajes, vigas, placas de fundação e pisos industriais. Segundo Bentur e Mindess (2007), o verdadeiro papel das fibras aparece na flexão, pois é nesse tipo de solicitação que ocorre a mobilização máxima da ponte de transferência de tensões entre fibras e matriz, retardando a propagação de fissuras e aumentando a capacidade portante após o pico.

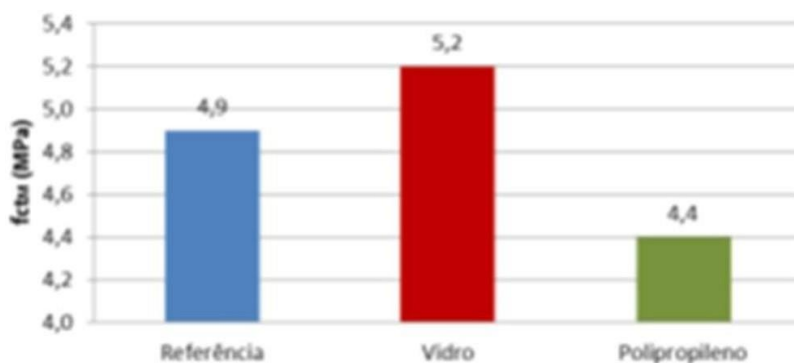
Resultados de Spricigo & Santos (2014)

No estudo de Spricigo e Santos (2014), foram avaliados corpos de prova prismáticos submetidos ao ensaio de flexão em três pontos conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010). Os autores compararam um traço de concreto de referência com traços reforçados com fibra de vidro comum e fibra de polipropileno (PP).

A Figura 9 demonstrara que ambos os tipos de fibra aumentaram a resistência à tração na flexão, ainda que não tenham elevado a resistência à compressão (como discutido na seção 4.1). A fibra de vidro comum proporcionou aumento médio de 8,7% na resistência à flexão, enquanto a fibra de polipropileno apresentou ganho de 11,5%. A Figura correspondente do estudo confirma o comportamento mais dúctil dos compósitos reforçados, com um pós-pico menos abrupto, indicando maior

absorção de energia antes da ruptura final.

Figura 9: Resultados de resistência à flexão



Fonte: (Spricigo & Santos, 2014).

Os autores destacam ainda que, embora o polipropileno tenha baixo módulo de elasticidade, sua contribuição mecânica ocorre no regime pós- fissuração, reduzindo a instabilidade estrutural e controlando a abertura de fissuras. Assim, mesmo que essas fibras não sejam consideradas estruturais, podem ser utilizadas para aumentar a vida útil de pavimentos de concreto e pisos industriais, onde o controle de fissuração é mais importante do que o aumento de resistência máxima.

Resultados de Furian et al. (2022)

No trabalho de Furian et al. (2022), o desempenho à tração na flexão foi avaliado em corpos de prova prismáticos conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), utilizando traços reforçados com fibra de aço e fibra de vidro AR (álcali- resistente). Diferente das fibras analisadas no estudo de Spricigo e Santos (2014), essas duas fibras apresentam caráter estrutural, pois possuem módulo de elasticidade elevado e capacidade efetiva de transferência de tensões, o que as torna aptas para aplicação em elementos estruturais que exigem alta capacidade resistente após fissuração, como vigas e lajes armadas.

Os resultados expostos na Figura 10 indicaram que a fibra de aço proporcionou o maior ganho de resistência à flexão, com aumento médio de 25% em relação ao concreto de referência, atingindo tensões próximas de 4,5 MPa no ensaio de ruptura. Esse desempenho foi atribuído ao travamento mecânico das fissuras promovido pelas fibras metálicas, que atuam impedindo a abertura das fissuras e

redistribuindo tensões na zona tracionada.

Figura 10: Resistência à tração na flexão - traços referências e com adição de fibra de aço.



Fonte: (Furian et al., 2022).

Já os concretos reforçados com fibra de vidro AR apresentaram incremento de aproximadamente 14% na resistência à flexão, alcançando valores próximos a 3,9 MPa. Esse comportamento confirma que a fibra de vidro AR, por ser tratada com zircônia, é resistente à alcalinidade do cimento e mantém boa aderência à matriz, diferentemente da fibra de vidro comum analisada anteriormente em Spricigo e Santos (2014), que apresentou desempenho inferior devido à degradação química na zona de transição interfacial (ZTI).

Dessa forma, os resultados de Furian et al. demonstram que fibras com elevado módulo e boa ancoragem tendem a apresentar ganhos significativos em flexão, pois atuam ativamente na resistência residual pós-fissuração, característica essencial para elementos estruturais que sofrem momentos fletores predominantes.

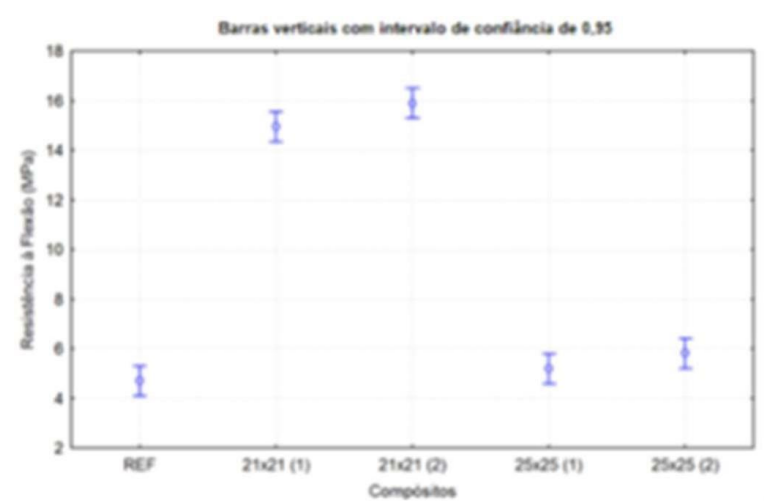
Resultados de Meurer (2024)

No estudo conduzido por Meurer (2024), o ensaio de resistência à tração na flexão foi um dos principais parâmetros analisados, uma vez que o trabalho teve como foco a aplicação de telas de fibra de carbono em concreto autoadensável (CAA). Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010),

e os resultados demonstraram que a fibra de carbono apresentou o maior ganho de desempenho flexional entre todos os estudos comparados nesta pesquisa.

De acordo com os dados apresentados na Figura 11 por Meurer, os compósitos reforçados com fibra de carbono atingiram valores de resistência à flexão superiores a 6 MPa, com aumento médio de até 32% em relação ao traço de referência. Esse resultado representa um comportamento significativamente superior quando comparado aos obtidos com fibras poliméricas, minerais e até mesmo metálicas. Além disso, ao contrário do observado nos estudos anteriores, o concreto com fibra de carbono demonstrou comportamento altamente dúctil, com pós-fissuração estável e capacidade resistente residual, ou seja, o compósito continuou suportando esforços mesmo após a ruptura inicial.

Figura 11: Variação de resistência a tração na flexão do concreto com adição de tela em fibra de carbono aos 28 dias de cura.



Fonte: (Meurer, 2024).

Esse comportamento superior pode ser explicado pelo elevado módulo de elasticidade (230–600 GPa) e pela baixa densidade e elevada resistência específica da fibra de carbono, que aumentam a eficiência da transferência de tensões na região tracionada, o que é essencial em elementos estruturais submetidos a momentos fletores, como vigas de grande vão e lajes de alto desempenho. A configuração com telas bidirecionais de fibra de carbono também favoreceu a formação de uma rede de reforço que controlou a abertura e evolução das fissuras, caracterizando um material com comportamento quase-compósito e alto desempenho estrutural.

Discussão Crítica Comparativa da Flexão

A análise comparativa dos resultados de resistência à tração na flexão revela diferenças significativas no desempenho do concreto reforçado com fibras, diretamente relacionadas às propriedades mecânicas e à interação microestrutural de cada tipo de fibra com a matriz cimentícia. Considerando os três estudos analisados – Spricigo & Santos (2014), Furian et al. (2022) e Meurer (2024) – é possível estabelecer uma hierarquia clara de desempenho estrutural na flexão.

As fibras poliméricas e de vidro comum (Spricigo & Santos, 2014) apresentaram ganhos moderados de resistência flexional (+8,7% para fibra de vidro e +11,5% para polipropileno), atuando principalmente no controle de fissuração e manutenção da integridade pós-fissuração. No entanto, apesar de contribuírem para a tenacidade, essas fibras não são classificadas como estruturais, pois possuem baixo módulo de elasticidade e baixa capacidade de redistribuição de esforços, o que limita sua aplicação em elementos submetidos a flexão significativa.

As fibras estudadas por Furian et al. (2022) – fibra de aço e fibra de vidro AR – apresentaram desempenho estrutural superior em comparação às fibras de Spricigo & Santos. A fibra de aço apresentou comportamento destacado na flexão, com incremento próximo de 25% e alta resistência residual pós-fissuração, atribuída ao travamento mecânico proporcionado pelo formato ancorado da fibra. Já a fibra de vidro AR, por ser quimicamente estabilizada com zircônia, demonstrou desempenho intermediário (+14%), sem sofrer os efeitos de degradação alcalina observados na fibra de vidro comum. Ambos os materiais podem ser classificados como reforços estruturais para aplicação em concretos de média e alta exigência mecânica.

Por fim, a fibra de carbono analisada por Meurer (2024) apresentou o melhor desempenho global entre todas as fibras comparadas, com ganhos superiores a 32% na resistência à flexão. Além disso, o concreto com fibra de carbono exibiu comportamento altamente dúctil e elevado grau de resistência residual após a fissuração, características associadas ao comportamento de materiais compósitos avançados. Diferente dos demais casos, a fibra de carbono proporcionou elevação da rigidez inicial e reforço contínuo, criando um sistema híbrido capaz de combinar resistência e capacidade de deformação, o que a torna superior para aplicações

estruturais críticas.

A hierarquia de desempenho na tração na flexão, com base nos três estudos analisados, é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Desempenho na flexão.

Desempenho na Flexão	Tipo de Fibra
↑ Superior	Fibra de carbono
↑ Elevado	Fibra de aço
↑ Moderado	Fibra de vidro AR
↓ Baixo	Fibra de vidro comum
↓↓ Muito baixo	Fibra de polipropileno

Fonte: Autor (2025).

Portanto, a análise demonstra que quanto maior o módulo elástico e a aderência interfacial da fibra, maior a contribuição para o desempenho em flexão, sendo a fibra de carbono o reforço mais eficiente para aplicações estruturais de alta responsabilidade, superando fibras metálicas e minerais pela sua superioridade mecânica no controle da fissuração e redistribuição de tensões trativas.

Módulo de Elasticidade e Tenacidade do Concreto Reforçado com Fibras

O módulo de elasticidade (E) e a tenacidade são dois parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho estrutural do concreto reforçado com fibras. Enquanto a resistência à compressão e à tração indicam a capacidade máxima de suporte de tensões, o módulo de elasticidade está diretamente relacionado à rigidez e deformabilidade do material, e a tenacidade define a capacidade de absorção de energia antes da ruptura, indicando o comportamento pós-fissuração do compósito. Segundo Bentur e Mindess (2007), a análise conjunta desses dois parâmetros permite distinguir materiais frágeis de materiais compósitos avançados, com capacidade de redistribuir tensões e retardar o colapso estrutural.

Fundamentação Técnica

No concreto simples, a ruptura ocorre de forma frágil e repentina, com baixa

capacidade de deformação e sem aviso prévio. Isso ocorre porque, ao atingir a tensão limite de tração, as fissuras se propagam rapidamente devido à ausência de mecanismos de ponteamto. A introdução de fibras modifica esse comportamento através de dois efeitos principais:

- Aumento do módulo de elasticidade → ocorre quando as fibras possuem alto módulo elástico e estabelecem boa transferência de tensões na matriz.
- Aumento da tenacidade → ocorre quando as fibras atuam após o início da fissuração, redistribuindo tensões e atrasando a ruptura.

No entanto, nem toda fibra contribui da mesma forma. O efeito depende de três fatores fundamentais:

- Compatibilidade mecânica (módulo de elasticidade da fibra vs. matriz).
- Compatibilidade química (aderência estável na zona de transição interfacial – ZTI).
- Ancoragem física (capacidade de resistir ao arrancamento).

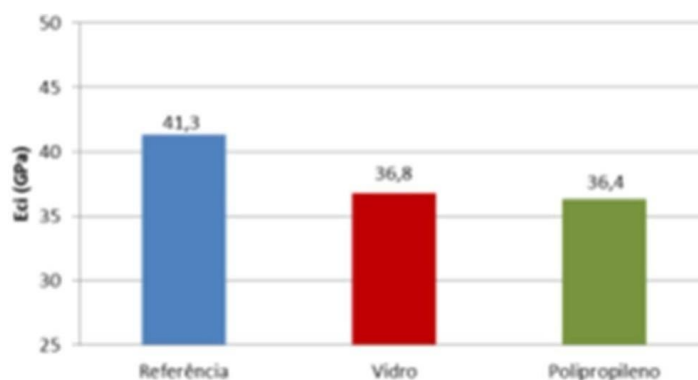
Resultados de Spricigo & Santos (2014)

No estudo de Spricigo e Santos (2014), embora o módulo de elasticidade não tenha sido diretamente mensurado, os autores discutem os efeitos microestruturais das fibras no comportamento mecânico do concreto. A adição de fibra de vidro comum e fibra de polipropileno (PP) resultou em redução da rigidez do material, devido ao baixo módulo de elasticidade dessas fibras em relação à matriz cimentícia. A Figura 12 apresenta que o módulo de elasticidade típico da fibra de polipropileno é da ordem de 36,4 GPa, enquanto a fibra de vidro comum possui cerca de 36,8 GPa, porém sofre degradação alcalina, reduzindo progressivamente sua aderência e resistência na Zona de Transição Interfacial (ZTI).

Os autores destacam que essas fibras atuam principalmente como modificadoras de microfissuração, reduzindo a fragilidade do concreto, mas não contribuem para melhoria significativa do módulo de elasticidade nem da capacidade portante sob esforços estruturais contínuos. No entanto, foi observada melhora da tenacidade em relação ao concreto de referência, evidenciada por maior absorção de energia e atraso no colapso frágil, principalmente devido à presença de ponteamto

entre fissuras e restrição parcial da propagação.

Figura 12: Resultados do módulo de elasticidade.



Fonte: (Spricigo & Santos, 2014).

Em resumo, Spricigo e Santos demonstram que:

- Fibra de vidro comum → melhora moderada de tenacidade, efeito limitado na rigidez;
- Fibra de polipropileno → melhora de ductilidade, porém redução do módulo elástico e aumento da deformação para o mesmo nível de tensão.

Resultado estrutural: essas fibras não têm função estrutural; sua aplicação é recomendada apenas para controle de fissuração e melhoria reológica e de durabilidade, e não para aumento de rigidez ou resistência.

Resultados de Furian et al. (2022)

No estudo de Furian et al. (2022), os autores analisaram concretos reforçados com fibra de aço e fibra de vidro AR (álcali-resistente), materiais com características estruturais e elevado potencial de reforço mecânico. Diferente das fibras poliméricas estudadas por Spricigo e Santos (2014), essas fibras apresentam módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia, o que permite aumento efetivo da rigidez e da resistência residual após fissuração.

Módulo de Elasticidade

Conforme Furian et al. apresentou na Figura 13 e 14 do módulo de elasticidade, os resultados experimentais e a discussão teórica confirmam

comportamento mais rígido nos compósitos reforçados. Em termos comparativos:

- Fibra de aço → módulo de elasticidade aproximado de 200 GPa, o que representa uma transferência eficiente de tensões para dentro da fibra, resultando em menor deformação específica sob carga e, portanto, maior módulo elástico global do compósito.
- Fibra de vidro AR → módulo elástico da ordem de 90 GPa, superior ao do concreto, contribuindo para rigidez moderada e comportamento mais estável que a fibra de vidro comum.

Figura 13: Módulo de elasticidade—traços referências e com adição de fibra de aço.



Fonte: (Furian et al., 2022).

Figura 14: Módulo de elasticidade—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.



Fonte: (Furian et al., 2022).

Além do aumento da rigidez, os resultados de Furian et al. demonstraram que ambos os compósitos apresentaram incremento significativo de tenacidade,

especialmente os reforçados com fibra de aço. A curva carga $\times$ deformação apresentou expressivo comportamento pós-fissuração, com resistência residual elevada mesmo após o início da fissuração. A fibra de aço mostrou desempenho superior devido à ancoragem mecânica e elevada aderência, atuando como travamento físico entre fissuras.

A fibra de vidro AR também apresentou melhora na absorção de energia, mas em intensidade inferior à fibra de aço, devido à sua menor capacidade de ancoragem e ausência de deformações superficiais específicas para tração. Conclusão: os compósitos com fibra de aço e fibra de vidro AR apresentam ganhos reais de rigidez e tenacidade, podendo ser classificados como concretos reforçados com capacidade estrutural, adequados para elementos submetidos a flexão, impacto e cargas repetidas.

Resultados de Meurer (2024)

O estudo de Meurer (2024) apresentou uma análise detalhada do comportamento mecânico de concretos autoadensáveis reforçados com telas bidirecionais de fibra de carbono, com foco explícito no desempenho mecânico e estrutural avançado. Diferente dos outros dois estudos analisados (Spricigo & Santos, 2014; Furian et al, 2022), o objetivo principal de Meurer não foi apenas avaliar a resistência à ruptura, mas investigar a integridade estrutural pós-fissuração, relacionando diretamente módulo de elasticidade, rigidez estrutural e tenacidade.

Os resultados indicaram que, mesmo sem ganho expressivo na resistência à compressão, os compósitos com fibra de carbono apresentaram aumento significativo no módulo de elasticidade, caracterizando um material mais rígido e menos deformável. Isso ocorre porque a fibra de carbono possui um dos maiores módulos elásticos entre materiais estruturais (na faixa de 230 a 600 GPa), o que resulta em efetiva contribuição para a rigidez global do concreto.

Diferente do efeito observado com fibras de aço e vidro AR, a fibra de carbono não atua apenas na transferência de tensões, mas modifica o comportamento elástico do compósito, atuando desde o regime linear elástico até o pós- fissuração, reforçando o concreto em toda a curva tensão $\times$ deformação.

O desempenho em tenacidade foi o melhor entre todos os estudos analisados.

As curvas carga × deslocamento mostraram comportamento claramente compósito, com elevação de energia de fratura, maior área sob a curva, e resistência residual superior na pós-fissuração. Isso demonstra que a fibra de carbono proporciona comportamento não-frágil ao concreto, aumentando a capacidade do material de dissipar energia antes da ruptura. Conclusão do estudo: O concreto com fibra de carbono analisado por Meurer (2024) apresentou o desempenho estrutural mais avançado entre os três estudos, caracterizando-se como material compósito de alto desempenho (CAD+F), adequado para aplicações estruturais críticas, como lajes protendidas, pilares de seções reduzidas, elementos de pontes e estruturas de alto risco sísmico.

Discussão Crítica Comparativa do Módulo de Elasticidade e Tenacidade

Conforme os resultados apresentados na tabela 5, a análise comparativa dos três estudos demonstra que o módulo de elasticidade e a tenacidade do concreto reforçado com fibras são diretamente influenciados pelo tipo de fibra utilizada e sua interação com a matriz cimentícia. Esses parâmetros permitem identificar se o compósito apresenta desempenho estrutural ou apenas modificador, sendo cruciais para aplicações reais em engenharia civil, especialmente em elementos solicitados à flexão, cisalhamento e carregamentos cíclicos.

Tabela 5: Resultado do desempenho das fibras nos ensaios.

Tipo de fibra	Módulo de Elasticidade	Tenacidade	Classificação estrutural
Fibra de carbono	↑↑ Muito elevado	↑↑ Excelente	Reforço estrutural avançado
Fibra de aço	↑ Elevado	↑ Muito boa	Reforço estrutural efetivo
Fibra de vidro AR	↑ Moderado	↑ Bom	Reforço com desempenho intermediário
Fibra de vidro comum	↓ Baixo (degrada)	↑ Limitada	Modificador, não estrutural

Fibra de polipropileno	↓↓ Muito baixo	↑ Ductilidade apenas	Controle de fissura (não estrutural)
------------------------	----------------	----------------------	--------------------------------------

Fonte: Autor (2025).

Portanto, conclui-se que nem toda fibra melhora o comportamento estrutural do concreto. O desempenho depende da propriedade mecânica da fibra (módulo de elasticidade) e da aderência interfacial. Entre as fibras avaliadas, observou-se claramente a seguinte hierarquia de eficiência estrutural:

- Fibra de carbono > Fibra de aço > Fibra de vidro AR > Fibra de vidro comum > Polipropileno

Assim, enquanto polipropileno e vidro comum devem ser classificados como aditivos modificadores de desempenho, as fibras de aço e especialmente de carbono conferem ao concreto comportamento compósito e elevado desempenho estrutural, com aplicação recomendada em obras de alta exigência mecânica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu analisar, por meio de revisão bibliográfica comparativa, a influência da adição de fibras artificiais no comportamento mecânico do concreto com foco nas propriedades de resistência à compressão, resistência à tração indireta, tração na flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Com base na síntese crítica dos estudos de Meurer (2024), Spricigo e Santos (2014) e Furian et al. (2022), constatou-se que o impacto das fibras no desempenho do concreto não é homogêneo, estando diretamente condicionado ao tipo de fibra utilizada, ao seu módulo de elasticidade, à aderência na matriz cimentícia (ZTI) e à sua estabilidade química.

Os resultados demonstraram que fibras de baixo módulo, como polipropileno e fibra de vidro comum, embora contribuam para o controle de fissuração e melhoria da ductilidade, não possuem capacidade estrutural significativa, causando inclusive redução da resistência à compressão devido ao aumento de porosidade e efeito negativo na compactação da matriz. Já as fibras de maior desempenho mecânico, como fibra de aço e fibra de vidro AR, apresentaram resultados superiores nos parâmetros mecânicos analisados, principalmente na resistência à tração indireta e

na flexão, promovendo redistribuição de tensões internas e retardamento do colapso estrutural.

Contudo, o melhor desempenho global foi atribuído à fibra de carbono, que apresentou superioridade em praticamente todos os parâmetros avaliados, sobretudo em módulo de elasticidade, resistência residual pós-fissuração e tenacidade, transformando o concreto simples em um material compósito de alto desempenho estrutural. Seu uso, entretanto, ainda é limitado por fatores econômicos tecnológicos, sendo mais aplicável em obras de maior complexidade e desempenho elevado, como reforço estrutural de pontes, vigas protendidas e recuperação de estruturas deterioradas.

Dessa forma, conclui-se que a escolha do tipo de fibra deve considerar o objetivo estrutural e o custo-benefício do projeto. Para fins de reforço estrutural, recomenda-se a utilização de fibras de aço ou fibra de carbono, enquanto fibras de polipropileno e vidro comum devem ser aplicadas apenas para controle de fissuração e aumento de durabilidade. Como sugestão de estudos futuros, recomenda-se investigar ensaios de durabilidade, comportamento reológico, impactos ambientais das fibras e curvas tensão- deformação pós-pico, além de modelos híbridos com combinação de fibras para otimização mecânica e econômica do concreto.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 544. ACI 544.4R: **Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete**. Farmington Hills: ACI, 2018. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/807774534/ACI-544-4R-18-Standard>. Acesso em: 15 setembro 2025.

AFROUGHSAKET, V.; OZBAKKALOGLU, T. **Mechanical and durability properties of high- strength concrete containing steel and polypropylene fibers**. Construction and Building Materials, v. 94, p. 73-82, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.

ALMEIDA, J., SANTOS SILVA, A., RIBEIRO, A. B., & FARIA, P. **Environmental benefits and mechanical performance of cement mortars with tungsten mining residues incorporation**. In E. Horszczaruk & P. Brzozowski (Eds.), Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable, Environmentally Friendly Construction Materials (ICSEFCM 2021) (pp. 27-32). Szczecin, Poland. Disponível em:

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. JNT Facit Business and Technology Journal. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 – MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

<https://novaresearch.unl.pt/en/publications/environmental-benefits-and-mechanical-performance-of-cement-morta/>. Acesso em: 07 outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222: **Concreto e argamassa** — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/2077/abnt-nbr7222-concreto-e-argamassa-determinacao-da-resistencia-a-tracao-por-compressao-diametral-de-corpos-de-prova-cilindricos>. Acesso em: 17 setembro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738:2016 – **Concreto** – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=WIRVTVphYi93dDhPRmhCNVBvTTYxVUILV093bU1XV0JBZ1ExV2poUURMRT0=>. Acesso em: 18 outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004 – **Resíduos sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/grd.aspx>. Acesso em: 10 outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto** — Classificação por consistência, massa específica e resistência. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/grd.aspx>. Acesso em: 07 outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739: **Concreto** — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1939/abnt-nbr5739-concreto-ensaio-de-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos>. Acesso em: 10 setembro 2025.

BANK, L. C. **Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials**. Hoboken: Wiley, 2006. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10095206/>. Acesso em: 15 outubro 2025. BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=3449359>. Acesso em: 15 setembro 2025.

BIOLZI, L.; CATTANEO, S.; CRESPI, P.; GIORDANO, N. **Damage in glass-concrete composite panels**. *Construction and Building Materials*, v. 116, p. 235–244, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301917714_Damage_in_glass-concrete_composite_panels. Acesso em: 18 outubro 2025.

BRANDT, A. M. **Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance**. 2. ed. Abington: Taylor & Francis, 2008. Disponível em:

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. *JNT Facit Business and Technology Journal*. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 – MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10095206/>. Acesso em: 17 outubro 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 jul. 2002. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305. Acesso em: 07 outubro 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 452, de 2 de julho de 2012. **Dispõe sobre os procedimentos de controle da importação de resíduos, conforme as normas adotadas pela Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 jul. 2012. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=656. Acesso em: 17 outubro 2025.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Materials_Science_and_Engineering.html?id=ZdVSDwAAQBAJ&redir_esc=y. Acesso em: 14 outubro 2025.

DHAND, V.; MITTAL, G.; RHEE, K. Y.; PARK, S.; HUI, D. **A short review on basalt fiber reinforced polymer composites**. Composites Part B: Engineering, v. 73, p. 166–180, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814005873>. Acesso em: 06 outubro 2025.

FERNANDES, B.; SILVA, A. R.; SILVA, M. A.; SILVA, R. D. Spalling behaviour of concrete made with recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 59, p. 105070, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361562479_Spalling_behaviour_of_concrete_made_with_recycled_concrete_aggregates. Acesso em: 18 outubro 2025.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. São Paulo: IBRACON, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD10.pdf>. Acesso em: 30 setembro 2025.

FREITAS JR., José A.; COSTA, M. M.; ARTIGAS, L. V. **A influência da distribuição granulométrica dos agregados na resistência de aderência das argamassas colantes**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://www.escavador.com/sobre/834827/jose-de-almendra-freitas-junior>. Acesso em: 10 outubro 2025.

FURIAN, B. O.; PIMENTEL, L. L.; FORT, N.C.S. Análise do desempenho mecânico do concreto com adição de fibra de aço e fibra de vidro AR. **Revista Engenharia em**

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. JNT Facit Business and Technology Journal. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 – MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

Ação, v. 7, n. 2, p. 52-63, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/yLkz4wG9GXpnqG_hFBB3rM3h/. Acesso em: 10 setembro 2025.

GARCIA ET AL. (2023). "Características de dos agregados gruesos triturados que influyen en la porosidad del hormigón". **Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación**, v. 6, n. 11, p. 86, fevereiro 2023. DOI: 10.46296/ig.v6i11edespfeb.0086. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369504705_Caracteristicas_de_dos_agregados_gruesos_triturados_que_influyen_en_la_porosidad_del_hormigon. Acesso em: 17 outubro 2025.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Eco-efficient-cements%3A-Potential-economically-for-a-Scrivener-John/903216740da38c3926f0b947b55b9a4082e0c504>. Acesso em: 17 outubro 2025.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer Composites for Civil and Structural Engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10095206/>. Acesso em: 15 outubro 2025.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480>. Acesso em: 15 outubro 2025

JOHNSTON, COLIN D. (2001). **Fiber-Reinforced Cements and Concretes**. Advances in Concrete Technology, vol. 3. London & New York: Taylor & Francis (Gordon & Breach). Disponível em: <https://search.worldcat.org/pt/title/Fiber-reinforced-cements-and-concretes/oclc/681752108>. Acesso em: 18 outubro 2025.

KIM, D. J.; LI, V. C.; KAZEMI, M. T. Crack width control of PVA-ECC using hybrid steel-PVA fibers. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 453-464, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279888212_Tensile_strain_hardening_behavior_or_polyvinyl_alcohol_engineered_cementitious_composite_PVA-ECC. Acesso em: 06 outubro 2025.

MANSOR, W.; ASHRAF, D.; BASHA, A. Evaluating the Impact Performance of Environmentally Friendly Asphalt Concrete Slabs Containing Different Proportions of Recycled Concrete Aggregate and Corrugated Steel Fibers. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 17, p. 1-13, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40069-023-00617-0>. Acesso em: 18 outubro 2025.

MARTINS, P. L.; SILVA, A. R.; SOUZA, L. M.; OLIVEIRA, R. P. Gestão e caracterização de resíduos de concreto de centrais de dosagem em Belo Horizonte – Brasil. **Revista**

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. JNT Facit Business and Technology Journal. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 – MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, v. 7, n. 2, p. 1–13, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/bd1f3d2a-43e6-47d6-9941-fa73baccb12e>. Acesso em: 18 outubro 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. (Equivalente internacional: Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2013). Disponível em: http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/Vol13_n4/RIEM_13_4.pdf. Acesso em: 08 outubro 2025.

MEURER, L. **Análise experimental do concreto autoadensável reforçado com fibra de carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) — UNESC, Criciúma, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/262261/TCC%20Leticia%20Meurer%20%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 setembro 2025.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, **Concrete**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1058986>. Acesso em: 08 outubro 2025.

MORADI, F.; ALAVI, S. A.; HASAK, A.; NOËL, M.; LAYSSI, H. Non-Destructive Evaluation of Concrete Compressive Strength Using Neuro-Fuzzy Modelling Approach. **e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 27, n. 9, 2022. Disponível em: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=27244>. Acesso em: 07 outubro 2025.

NAAMAN, A. E. **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**. 2. ed. Ann Arbor: HPFRCC Publications/University of Michigan, 2004. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482271676/high-performance-fiber-reinforced-cement-composites-2-naaman-reinhardt>. Acesso em: 14 outubro 2025.

OLIVEIRA, MATHEUS HENRIQUE B.; COSTA, JOÃO VICTOR DA SILVA. Estudo da viabilidade técnica do concreto permeável para pavimentação urbana. **Revista FAEMA**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://revista.faema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1088>. Acesso em: 17 outubro 2025.

PAJAŁ, M.; PONIKIEWSKI, T. **Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers**. Construction and Building Materials, v. 47, p. 397-408, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813004704>. Acesso em: 06 outubro 2025.

PARK, J.; LEE, J.; LEE, S.; LEE, H.; LEE, J. Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures. **International Journal of Impact Engineering**, v. 124, p. 1–10, 2018. Disponível em:

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. JNT Facit Business and Technology Journal. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 – MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422013722>. Acesso em: 17 outubro 2025.

PEREIRA, V. M., ET AL. "Thermoactivated cement from construction and demolition waste for pavement base stabilization: A case study in Brazil." **Journal of Materials in Civil Engineering**, 36(4), 04024173, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38380635/#:~:text=Abstract,owing%20to%20the%20pozzolanic%20reaction>. Acesso em: 10 outubro 2025.

PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C. D., & SANTOS, S. P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2004. Disponível em: https://www.academia.edu/12359732/ESTRUTURAS_DE_CONCRETO_CAP%C3%84DTULO_1. Acesso em: 15 setembro 2025.

RODRIGUES MEIRA DE MIRANDA, L.; MARCHESINI, F. H.; LESAGE, K.; DE SCHUTTER, G. **The evolution of the rheological behavior of hydrating cement systems: combining constitutive modeling with rheometry, calorimetry and mechanical analyses**. Cement and Concrete Research, 164, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365968809_The_evolution_of_the_rheological_behavior_of_hydrating_cement_systems_Combining_constitutive_modeling_with_rheometry_calorimetry_and_mechanical_analyses. Acesso em: 18 outubro 2025.

RODRIGUES, L. M., ET AL. **A new accelerated mortar bar test to assess the potential deleterious effect of sulfide-bearing aggregate in concrete**. Cement and Concrete Research, 73, 1-10. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888461500054X?via%3Dihub>. Acesso em: 18 outubro 2025.

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: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480>. Acesso em: 03 outubro 2025.

SILVA, L. C. R.; WOOD, M. C.; JOHNSON, B. R.; COUGHLAN, M. R.; BRINTON, H.; MCGUIRE, K.; BRIDGHAM, S. D. **A generalizable framework for enhanced natural climate solutions**. Plant and Soil, 2022. DOI: 10.1007/s11104-022-05472-8. Disponível em: <https://carbondioxide-removal.eu/en/2022/06/24/silva-et-al-2022-a-generalizable-framework-for-enhanced-natural-climate-solutions/>. Acesso em: 17 outubro 2025.

SILVA, W. B. C.; BARROSO, S. H. A.; CABRAL, A. E. B.; STEFANUTTI, R.; PICADO-SANTOS, L. **Análise da viabilidade da fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentos com o uso de agregados reciclados da construção civil**. Transportes, v. 31, n. 1, p. 1-21, 2023. DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2860

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS ARTIFICIAIS. Webson Graciano da SILVA; Wesley Andrade PAIVA; Indira Queiroz Macambira BEZERRA. JNT Facit Business and Technology Journal. QUALIS B1. ISSN: 2526-4281 - FLUXO CONTÍNUO. 2025 - MÊS DE OUTUBRO - Ed. 67. VOL. 02. Págs. 155-199. <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. E-mail: jnt@faculdefacit.edu.br.

Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2860>. Acesso em: 18 outubro 2025.

SOUZA, F. DA S.; CARVALHO, J. M. F. DE; SILVEIRA, G. G.; ARAUJO, V. C.; PEIXOTO, R. A. F. **Application of Construction and Demolition Waste in Civil Construction in the Brazilian Amazon**—Case Study of the City of Rio Branco. *Materials*, v. 14, n. 9, p. 2247, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/9/2247>. Acesso em: 18 outubro 2025.

SPRICIGO, J.; SANTOS, D. Análise experimental de concreto com adição de fibra de vidro e polipropileno. *Revista Científica de Engenharia Civil*, v. 4, n. 1, p. 45–53, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/J3Rr85KQV3bs47SfHnBvTQm/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 10 setembro 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2023**. Brussels: World Steel Association, 2023. (Relatório com estatísticas da produção mundial de aço). Disponível em: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2023/>. Acesso em: 03 outubro 2025.

ZHANG, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, Z.; ZHANG, X. Experimental Investigation on the Properties of Sustainable Pervious Concrete: Effects of Aggregate Gradation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 17, art. 25, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40069-023-00625-0>. Acesso em: 18 outubro 2025.

ZHU, X.; ZHANG, L.; LIU, Y.; ZHANG, X.; LI, H.; WANG, W. **Evaluation and prediction on abrasion resistance of hydraulic concrete after exposure to different freeze-thaw cycles**. *Construction and Building Materials*, v. 315, p. 125717, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357000286_Evaluation_and_prediction_on_abrasion_resistance_of_hydraulic_concrete_after_exposure_to_different_freeze-thaw_cycles. Acesso em: 18 outubro 2025.