

ESTUDO DO IMPACTO DA FIBRA DE AÇO RECICLADA NA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO COM A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO

STUDY OF THE IMPACT OF RECYCLED STEEL FIBER ON THE OPTIMIZATION OF CONCRETE MECHANICAL PERFORMANCE WITH CARBON EMISSIONS REDUCTION

Danielle Ferreira dos Santos, docente, Engenharia Civil, UNIFESO, daniellesantos@unifeso.edu.br

Anna Carrollina Gaspar Gomes Rosa, discente, Engenharia Civil, UNIFESO

Gustavo Vinicius Marques Alves, discente, Engenharia Civil, UNIFESO

Leonardo Araujo Rezende Pereira, discente, Engenharia Civil, UNIFESO

Nathan do Amaral, discente, Engenharia Civil, UNIFESO

Luiz Victor Leite Figueira Barbosa, discente, Engenharia Civil, UNIFESO

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos tem adquirido relevância diante da necessidade de modelos sustentáveis de desenvolvimento, sobretudo na construção civil, setor intensivo em recursos naturais e gerador de grandes volumes de resíduos. Nesse cenário, as fibras de aço recicladas configuram-se como alternativa tecnicamente eficiente e ambientalmente favorável, contribuindo para a economia circular e para a redução de impactos ambientais. Obtidas de materiais descartados, essas fibras melhoram propriedades mecânicas do concreto, como resistência à tração, ao impacto, à fadiga e a durabilidade estrutural. Este estudo avaliou concretos reforçados com fibras recicladas nos teores de 0,01%, 0,05% e 0,10% (em massa), por meio de ensaios de compressão, tração diametral, flexão, permeabilidade, carbonatação e análise morfológica. O teor de 0,05% apresentou o melhor desempenho mecânico, com resistência axial de 9,78 MPa, resistência diametral de 1,20 MPa e capacidade de flexão próxima de 60 kN. Embora os efeitos em permeabilidade e carbonatação tenham sido limitados, o ganho mecânico confirma a viabilidade do uso de fibras recicladas em matrizes cimentícias. Além disso, sua incorporação resultou em reduções estimadas de 0,32 kg CO₂/m³ (0,01%), 1,6 kg CO₂/m³ (0,05%) e 3,2 kg CO₂/m³ (0,10%), devido ao menor consumo energético da reciclagem em comparação ao aço convencional. Assim, o reforço com fibras recicladas se mostra uma solução sustentável e eficaz para concretos de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: Fibras de aço recicladas; Redução de carbono; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Solid waste management has gained relevance in light of the need for sustainable development models, especially in the construction sector, which is intensive in natural resources and generates large volumes of waste. In this context, recycled steel fibers emerge as a technically efficient and environmentally favorable alternative, contributing to the circular economy and the reduction of environmental impacts. Obtained from discarded materials, these fibers enhance the mechanical properties of

concrete, such as tensile strength, impact resistance, fatigue performance, and structural durability. This study evaluated concretes reinforced with recycled fibers at contents of 0.01%, 0.05%, and 0.10% (by mass), through compression, splitting tensile, flexural, permeability, carbonation, and morphological analyses. The 0.05% content presented the best mechanical performance, with axial strength of 9.78 MPa, splitting tensile strength of 1.20 MPa, and flexural capacity close to 60 kN. Although the effects on permeability and carbonation were limited, the mechanical improvements confirm the feasibility of using recycled fibers in cementitious matrices. Furthermore, their incorporation resulted in estimated reductions of 0.32 kg CO₂/m³ (0.01%), 1.6 kg CO₂/m³ (0.05%), and 3.2 kg CO₂/m³ (0.10%), due to the lower energy demand of recycling compared to conventional steel production. Thus, reinforcement with recycled fibers proves to be a sustainable and effective solution for low impact concrete.

Keywords: Recycled steel fibers; Carbon reduction; Mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos emergiu como um tema de crescente relevância no contexto de modelos mais sustentáveis de desenvolvimento, incluindo o consumo racional de recursos naturais e energia. O setor da construção civil, reconhecido como um dos maiores consumidores de recursos naturais, também é um dos principais geradores de resíduos. Nesse cenário, a reutilização de fibras de aço recicladas desponta como uma alternativa tecnologicamente viável e ambientalmente vantajosa, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e oferecendo soluções economicamente competitivas [1,4].

As fibras de aço recicladas, derivadas de materiais descartados como pneus ou resíduos industriais, apresentam propriedades que ampliam significativamente seu potencial de aplicação na construção civil. Essas fibras promovem um efeito de reforço mecânico, além de apresentarem baixo custo e contribuírem para a sustentabilidade do setor. Outro aspecto relevante é a redução da pegada de carbono associada ao uso de aço reciclado, que demanda menor energia de processamento quando comparado ao aço convencional. No presente estudo, essa abordagem resultou em reduções de 0,32 a 3,2 kg CO₂/m³, dependendo do teor incorporado. Tal mitigação reforça o papel das fibras recicladas como estratégia ambientalmente eficaz no desenvolvimento de compósitos cimentícios. Dentre as vantagens observadas, destaca-se o incremento da resistência à tração, ao impacto e à fadiga, bem como a melhoria na durabilidade do material, reduzindo a necessidade de intervenções de manutenção. Ademais, sua aplicação contribui para a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros, favorecendo a economia circular [5,10].

No âmbito da construção civil, as fibras de aço são amplamente utilizadas no reforço de matrizes cimentícias, resultando em materiais mais resistentes e duráveis. Essas fibras são eficazes na absorção de energia e no controle de fissuras, contribuindo para estruturas mais seguras e economicamente viáveis. Além disso, a boa relação entre leveza relativa e desempenho mecânico torna o concreto reforçado com fibras de aço uma opção atrativa para pavimentos, fundações e diversos elementos estruturais [11].

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico e a sustentabilidade de concretos reforçados com fibras de aço recicladas, explorando diferentes teores de incorporação (0,01%; 0,05% e 0,10%, em massa). Os resultados indicaram que o teor de 0,05% apresentou o melhor desempenho, destacando-se na resistência axial, diametral e à flexão. Adicionalmente, verificou-se que a incorporação das fibras contribuiu para a redução da pegada de carbono do material, resultando em diminuições estimadas de 0,32 kg CO₂/m³, 1,6 kg CO₂/m³ e 3,2 kg CO₂/m³ para os teores de 0,01%, 0,05% e 0,10%, respectivamente, reforçando a relevância ambiental da aplicação dessas fibras na construção civil.

2. METODOLOGIA

Para avaliar os efeitos da incorporação de fibras de aço recicladas em matrizes cimentícias, foram produzidos compósitos de concreto reforçado contendo diferentes teores de fibras. As concentrações avaliadas foram 0,01%, 0,05% e 0,10%, em relação à massa total do concreto. As fibras, provenientes de resíduos metálicos previamente descartados, foram devidamente limpas, classificadas e incorporadas ao traço durante o processo de mistura, garantindo dispersão uniforme e evitando a formação de aglomerados. Após a moldagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de caracterização mecânica para verificar o desempenho dos compósitos reforçados. As análises incluíram resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e resistência à flexão, permitindo comparar o comportamento estrutural entre os diferentes teores.

2.1 MATERIAIS

Foram empregados cimento Portland CII-E-32 (Mauá) como aglomerante; areia média (Arckom) como agregado miúdo; brita 01 (Arckom) como agregado graúdo; fibras de aço WIRAND FF3 como material de reforço; e o desmoldante Desmol Cd 3,6 L da Otto Baumgart para a moldagem dos corpos de prova.

2.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram preparados com as dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), assim como a moldagem e cura dos mesmos foram de acordo com as orientações preconizadas na norma técnica NBR 5738. O traço a ser utilizado será econômico, com a proporção de 1:3,10:3,09 e um fator água/cimento de 0,65. O concreto leve foi preparado com a dispersão do isopor flocado em três concentrações diferentes, 0,10%; 0,15% e 0,20% (peso/peso), e em seguida o protocolo de cura por 28 dias imersos em tanque de água. A Figura 1 ilustra o preparo dos corpos de prova em moldes pré-preparados com o desmoldante, conforme norma NBR 5738.

Fig. 1: Preparo para dosagem dos materiais para preparo do traço.



As fibras de aço utilizadas foram produzidas pelo corte de cabos de aço reaproveitados, garantindo dimensões adequadas para a incorporação em compósitos cimentícios (Figura 2). As fibras foram cortadas em média com 3 cm de comprimento para preparo do compósito cimentício. O concreto foi preparado com a adição de fibras de aço recicladas, nas concentrações de 0,01%, 0,05% e 0,10% (peso/peso). Após a preparação dos compósitos, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura por imersão em tanque de água durante 28 dias. As vigotas foram moldadas de acordo com as dimensões e especificações do projeto experimental. Comumente, são utilizadas vigotas retangulares ou trapezoidais (NBR 12142:2010 para tração na flexão). O concreto foi preparado com a adição de fibras de aço recicladas, nas concentrações de 0,01%, 0,05% e 0,10% (peso/peso). Após a preparação da mistura, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura por imersão em tanque de água durante 28 dias.

Fig. 2: Corte das fibras de aço.



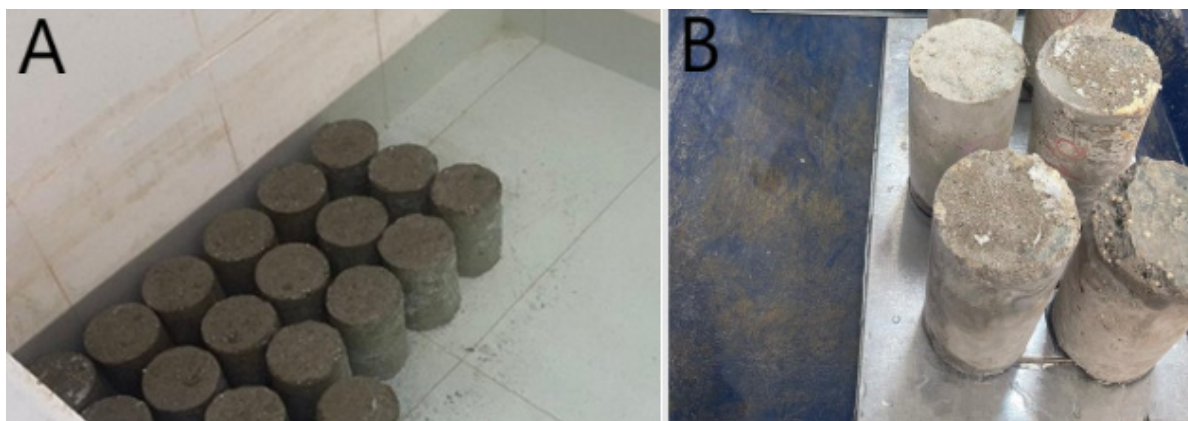
A Figura 3.A ilustra a fibra de aço utilizada no preparo dos compósitos e a figura 3.B preparo dos corpos de prova em moldes pré-preparados com o desmoldante, conforme norma NBR 5738.

Fig. 3: (A) Pesagem das fibras de aço; (B) Preparo dos corpos de prova dos compósitos fibra de aço/concreto.



Após o endurecimento inicial (pega), os corpos de prova foram para o tanque de imersão em água, por 28 dias, para alcançar a cura completa dos compósitos. A Figura 4 ilustra a cura úmida dos corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência a compressão axial e diametral.

Fig. 4: (A) Cura úmida dos corpos de prova; (B) Corpos de prova curados após 28 dias em tanque úmido.



2.3 CARACTERIZAÇÃO

2.3.1 Teste de umidade da areia

Para a mistura do concreto foi verificada a umidade da areia ajustando-se o volume de água na mistura. O procedimento de verificação da umidade foi realizado com o equipamento do tipo *speedy test*. A areia foi inserida no compartimento do aparelho, em seguida inserida uma ampola de carbureto de cálcio e duas esferas de aço. O compartimento foi vedado, e o aparelho chacoalhado até que as esferas romperam a ampola, e então a umidade foi mostrada no medidor do equipamento.

2.3.2 Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump)

O teste de abatimento de tronco de cone, Teste *Slump* avaliou a trabalhabilidade e a fluidez do concreto produzido (Figura 3). A trabalhabilidade está relacionada com a facilidade de moldar o concreto nas formas desejadas, pois, além da resistência, o concreto tem como vantagem a possibilidade de moldá-lo como o desejado. O ensaio foi executado conforme estabelecido NBR 16889:2020 e a medida do abatimento do concreto adotado foi de 10 cm.

Fig. 3: Teste de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*).



2.3.3 Ensaio flow test

O ensaio flow test avaliou a fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob a ação de seu próprio peso, pela determinação do espalhamento e do tempo de escoamento do concreto autoadensável, empregando-se o cone de Abrams (Figura 4). O ensaio foi realizado conforme os requisitos descritos na norma NBR15823 (Concreto autoadensável).

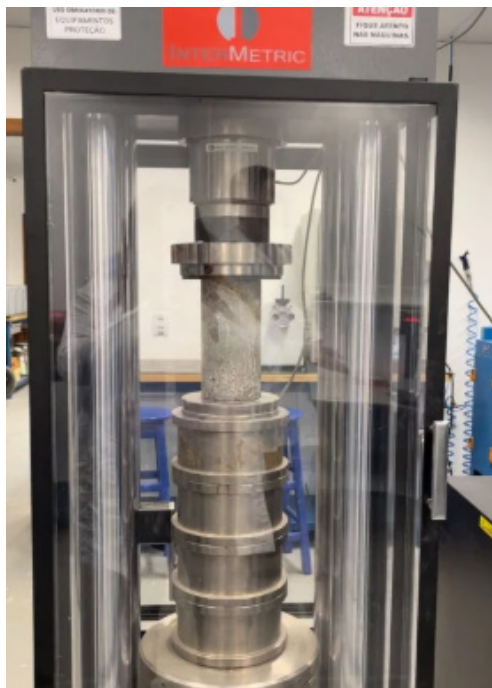
Fig. 4: Ensaio *flow test* do concreto.



2.3.4 Ensaio de resistência a compressão axial de corpos de prova cilíndricos

O ensaio de resistência mecânica compressão axial foi realizado com a aplicação controlada de cargas no corpo de prova a partir de dois pratos de compressão preconizado segundo a norma NBR 5739:1994 (Figura 5).

Fig. 5: Ensaio de resistência a compressão axial.



Para a realização do ensaio mecânico, os corpos de prova devem ser mantidos de acordo com o protocolo de cura úmida ou saturada em tanque com imersão em água. Após a cura do concreto os corpos de prova devem passar por uma retífica para o início dos ensaios experimentais.

2.3.5 Ensaio de resistência a compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

O ensaio de resistência mecânica compressão diametral foi realizado com a aplicação controlada de cargas no corpo de prova a partir de dois pratos de compressão preconizado segundo a norma NBR 7222 (Figura 6).

Fig. 6: Ensaio de resistência a compressão diametral.



Para a realização do ensaio mecânico, os corpos de prova devem ser mantidos de acordo com o protocolo de cura úmida ou saturada em tanque com imersão em água. Após a cura do concreto os corpos de prova devem passar por uma retífica para o início dos ensaios experimentais.

2.3.6 Ensaio de flexão em vigotas

O ensaio de tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 12142:2010 (Figura 7). O princípio empregado nesse ensaio é o da vigota bi apoiada, onde o corpo de prova é posicionado sobre elementos de apoio de forma que uma carga seja aplicada no terço médio do comprimento.

Fig. 7: Ensaio de flexão em vigotas.



2.3.7 Ensaio de permeabilidade dos compósitos à base de concreto e fibra de aço

Para o ensaio de permeabilidade foi realizado conforme a norma ABNT NBR 15259, e foram utilizados três corpos de prova pesados secos, obtendo a massa inicial em quilogramas, de cada para a marcação zero. Na sequência foram posicionados com as faces sobre os suportes no recipiente de ensaio, evitando a molhagem das demais superfícies, com o nível de água constante a 5 mm acima da face em contato com a água, marcando os intervalos de tempo 10, 20 e 30 minutos para verificação da capacidade capilar e permeabilidade de cada concentração avaliada.

2.3.8 Ensaio de Carbonatação

O ensaio de Carbonatação foi realizado mediante a abertura de pequena janela na superfície do concreto, de forma a chegar até as armaduras, seguida da aplicação de solução de fenolftaleína, que reage e indica se houve diminuição do pH do concreto para valores inferiores a 9, indicando se a frente de carbonatação chegou ou não até a armadura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O preparo dos compósitos foi realizado mediante a mistura inicial de três baldes de brita com 10 litros de água, até a obtenção de homogeneidade. Na sequência, foram adicionados três baldes de cimento e cinco baldes de areia, finalizando-se o traço com a incorporação de 15 litros de água potável. Cada balde utilizado correspondeu a um volume de 12 litros.

3.1 Teste *Slump*

De acordo com ABNR NBR 67:1998, o valor do *slump* para concretos em grandes quantidades e pouca armadura deve apresentar no mínimo 4 cm de altura. Para vigas, lajes e pilares, o mínimo varia de 6 a 8 cm, e para concretos bombeados o mínimo é de 8 a 12 cm. A Tabela 1 apresenta os resultados do Slump Test e mostraram que a adição de fibras de aço recicladas reduziu a trabalhabilidade do concreto. O concreto sem fibras apresentou abatimento de 12,0 cm, enquanto todas as misturas com fibras, mesmo em teores baixos (0,01%, 0,05% e 0,10%), registraram 10,0 cm. A redução do abatimento deve-se ao aumento da coesão interna e à resistência ao escoamento provocada pelas fibras, tornando a mistura mais rígida. Apesar dessa diminuição, os valores permanecem compatíveis com concretos moldados convencionalmente, garantindo boa aplicabilidade.

Tabela 1: Resultados do teste de abatimento (*slump test*) para compósitos contendo fibras de aço.

Teor de fibra de aço	Resultados do <i>slump</i>
0%	12,0 cm
0,01%	10,0 cm
0,05%	10,0 cm
0,10%	10,0 cm

3.2 Teste *Flow*

O *flow Test* demonstrou que a adição de fibras de aço recicladas impactou a fluidez dos compósitos. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios e o concreto sem fibras apresentou fluxo de 0,19 m × 0,20 m. Concentrações baixas (0,01% e 0,05%) reduziram ligeiramente a fluidez, refletindo aumento da viscosidade e coesão interna. Já o teor de 0,10% aumentou o fluxo para 0,20 m × 0,25 m, possivelmente devido à melhor dispersão das partículas na matriz. Os resultados indicam que a fluidez dos compósitos é sensível ao teor de fibras, exigindo ajuste do traço para equilibrar trabalhabilidade e desempenho mecânico, especialmente em aplicações estruturais.

Tabela 2: Resultados *flow test* para compósitos contendo fibras de aço.

Teor de fibra de aço	Resultados do <i>flow</i>
0%	0,19m de largura para 0,20m de altura
0,01%	0,18m de largura para 0,18m de altura
0,05%	0,19m de largura para 0,17% de altura
0,10%	0,20m de largura para 0,25m de altura

3.3 Ensaio de verificação de umidade

O teor de umidade foi definido como a relação entre o peso da água presente no solo e o peso seco das partículas sólidas, expressa em percentual. A determinação foi realizada utilizando o equipamento Speedy Test, conforme a NBR 16097, para verificar a umidade da areia utilizada na preparação dos compósitos. O resultado obtido foi inferior a 1%, indicando que o material apresentou baixa absorção de vapor d'água, possivelmente devido ao seu armazenamento em condições de baixa umidade.

3.4 Ensaio de resistência a compressão axial

Os corpos de prova foram preparados inicialmente sem adição de fibras de aço, servindo como referência para os compósitos aço/concreto. Em seguida, foram preparados compósitos com teores de 0,01%, 0,05% e 0,10% de fibras de aço em relação ao peso do concreto. Os corpos de prova (CPs) foram rompidos após 28 dias de cura úmida em tanque com imersão em água, para realização dos ensaios de resistência à compressão axial e diametral. O cimento utilizado foi do tipo CSN CP II-E-3, e os corpos de prova foram moldados de acordo com os requisitos da NBR 5738.

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova sem adição de fibras de aço. Os CPs (zero) apresentaram resistência à compressão axial média de aproximadamente 9,61 MPa, servindo como referência para os compósitos reforçados. Os valores individuais variaram entre 9,27 e 9,81 MPa, indicando boa uniformidade entre as amostras. Esse resultado confirma que o concreto base possui resistência adequada para aplicação estrutural, de acordo com a NBR 5739. A comparação com compósitos contendo fibras permitirá avaliar o efeito do reforço sobre o desempenho mecânico.

Tabela 3: Valor em MPa com 0 % de fibra de aço para o teste de resistência a compressão axial.

Amostra 1	9,81
Amostra 2	9,27
Amostra 3	9,76

Os corpos de prova com 0,01% de fibras de aço, apresentados na Tabela 4, mostraram resistência média à compressão axial de aproximadamente 8,90 MPa, ligeiramente inferior ao concreto sem fibras. A variação entre as amostras (8,72 a 9,27 MPa) indica boa uniformidade, mas sugere que pequenas adições de fibra não proporcionaram aumento significativo na resistência. Esse comportamento pode estar relacionado à dispersão ainda limitada das fibras na matriz cimentícia. Apesar da leve redução, os valores permanecem dentro de níveis aceitáveis para aplicações estruturais.

Tabela 4: Valor em MPa com 0,10 % de fibra de aço para o teste de resistência a compressão axial.

Amostra 1	8,72
Amostra 2	8,73
Amostra 3	9,27

Os corpos de prova com 0,05% de fibras de aço, apresentados na Tabela 5, exibiram resistência média à compressão axial de aproximadamente 9,78 MPa, superior ao concreto sem fibras e ao compósito com 0,01% de fibras. A variação entre as amostras (9,27 a 10,07 MPa) indica boa uniformidade e homogeneidade da mistura. Esses resultados demonstram que essa concentração é eficaz em promover reforço mecânico, aumentando a capacidade estrutural do compósito. O desempenho sugere que 0,05% foram considerada a concentração ideal para equilibrar resistência e trabalhabilidade na aplicação em concreto reforçado com fibras de aço.

Tabela 5: Valor em MPa com 0,05 % de fibra de aço para o teste de resistência a compressão axial.

Amostra 1	10,07
Amostra 2	10,02
Amostra 3	9,27

Os corpos de prova com 0,10% de fibras de aço, apresentados na Tabela 6, apresentaram resistência média à compressão axial de aproximadamente 9,37 MPa, ligeiramente inferior ao compósito com 0,05% de fibras. A variação entre as amostras (9,25 a 9,46 MPa) indicou boa uniformidade. A redução na resistência sugere que o excesso de fibras pode gerar espaçamentos na matriz cimentícia, tornando o material mais frágil. Esses resultados indicam que concentrações elevadas não proporcionam ganho adicional de resistência e podem comprometer o desempenho mecânico do compósito.

Tabela 6: Valor em MPa com 0,10 % de fibra de aço para o teste de resistência a compressão axial.

Amostra 1	9,25
Amostra 2	9,46
Amostra 3	9,41

A Figura 8 ilustra a amostra do compósito de fibra de aço/concreto após o ensaio de resistência a compressão axial. Durante o ensaio de resistência à compressão axial, observou-se a formação de uma fissura no topo do corpo de prova, característica típica de ruptura frágil em concretos de baixa

ou média resistência. Esse tipo de fissura indica que a falha se iniciou na região de maior concentração de tensões, seguindo um padrão de tração localizada perpendicular à carga aplicada. A presença de fibras de aço contribui para retardar a propagação das fissuras, mas pode ocorrer concentração de tensões que favorece a abertura inicial no topo.

Fig. 8: Corpo de prova após ensaio de resistência a compressão axial.



3.5 Ensaio de resistência a compressão diametral

Os corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência a compressão diametral seguiram os mesmos protocolos de preparo seguindo a norma NBR 5738, conforme os ensaios realizados de resistência a compressão axial. Os corpos de prova sem adição de fibras de aço, apresentados na tabela 7, apresentaram resistência média à compressão diametral de aproximadamente 1,15 MPa. A variação entre as amostras (1,07 a 1,24 MPa) indica boa uniformidade do material. Esse valor representa a capacidade do concreto de resistir à propagação de fissuras por tração indireta. Serve como referência para avaliar o efeito do reforço com fibras de aço, que tende a aumentar a resistência diametral e a controlar a abertura de fissuras. Os resultados confirmam o comportamento esperado do concreto não reforçado, com ruptura relativamente frágil.

Tabela 7: Valor em MPa com o % de fibra de aço para o teste de resistência a compressão diametral.

Amostra 1	1,07
Amostra 2	1,24
Amostra 3	1,14

Os corpos de prova com 0,01% de fibras de aço, apresentados na tabela 8, apresentaram resistência média à compressão diametral de aproximadamente 0,98 MPa, ligeiramente inferior ao concreto sem fibras. A variação entre as amostras (0,96 a 1,03 MPa) indica uniformidade limitada e possível dispersão desigual das fibras na matriz cimentícia. Essa redução sugere que pequenas adições de fibras não foram suficientes para proporcionar reforço efetivo contra a propagação de fissuras. O

resultado evidencia a importância de otimizar a concentração e a distribuição das fibras para melhorar a resistência diametral.

Tabela 8: Valor em MPa com 0,01% de fibra de aço para o teste diametral.

Amostra 1	1,03
Amostra 2	0,96
Amostra 3	0,96

Os corpos de prova com 0,05% de fibras de aço, apresentados na tabela 9, apresentaram resistência média à compressão diametral de aproximadamente 1,20 MPa, indicando melhora em relação às concentrações menores. A variação entre as amostras (1,14 a 1,29 MPa) demonstra boa homogeneidade do compósito. Esse aumento reflete o efeito reforço proporcionado pelas fibras, que contribuem para maior resistência à fissuração e melhor distribuição de tensões na matriz cimentícia. Os resultados confirmam que 0,05% de fibras representam uma concentração eficaz para otimizar o desempenho diametral do compósito.

Tabela 9: Valor em MPa com 0,05% de fibra de aço para o teste diametral.

Amostra 1	1,17
Amostra 2	1,14
Amostra 3	1,29

Os corpos de prova com 0,10% de fibras de aço, apresentados na tabela 10, apresentaram resistência média à compressão diametral de aproximadamente 1,16 MPa, semelhante ao desempenho observado para 0,05% de fibras. A variação entre as amostras (1,14 a 1,17 MPa) indica boa uniformidade da mistura. Os resultados sugerem que o aumento do teor de fibras acima de 0,05% não promove ganhos adicionais significativos na resistência diametral. Isso evidencia que concentrações mais elevadas podem não melhorar o controle de fissuras, reforçando que 0,05% representam o teor mais eficiente para este tipo de compósito.

Tabela 10: Valor em MPa com 0,10% de fibra de aço para o teste diametral.

Amostra 1	1,14
Amostra 2	1,17
Amostra 3	1,17

Na figura 9 foi observado que o corpo de prova apresentou fissura ao longo do diâmetro durante o ensaio de resistência à compressão diametral, porém não ocorreu ruptura completa. A presença de fibras de aço impediu a separação do compósito sob a carga aplicada, evidenciando seu efeito de reforço e controle de fissuração. Esse comportamento demonstra que as fibras contribuíram para a coesão interna da matriz cimentícia, retardando a propagação das fissuras e aumentando a segurança estrutural do material.

Fig. 9: Corpos de prova após os ensaios de resistência a compressão diametral.



A utilização de fibras de aço na construção civil tem ganhado destaque, especialmente em aplicações que demandam maior resistência mecânica, como em elementos de revestimento e argamassas projetadas. Embora tradicionalmente empregadas em pisos industriais e estruturas de concreto reforçado, sua inserção em revestimentos de fachadas não estruturais tem demonstrado benefícios relevantes. Essa melhoria no comportamento mecânico reduz a incidência de trincas e patologias associadas à retração e variações térmicas, o que é especialmente vantajoso em fachadas expostas às intempéries [12].

3.6 Ensaio de flexão - vigotas

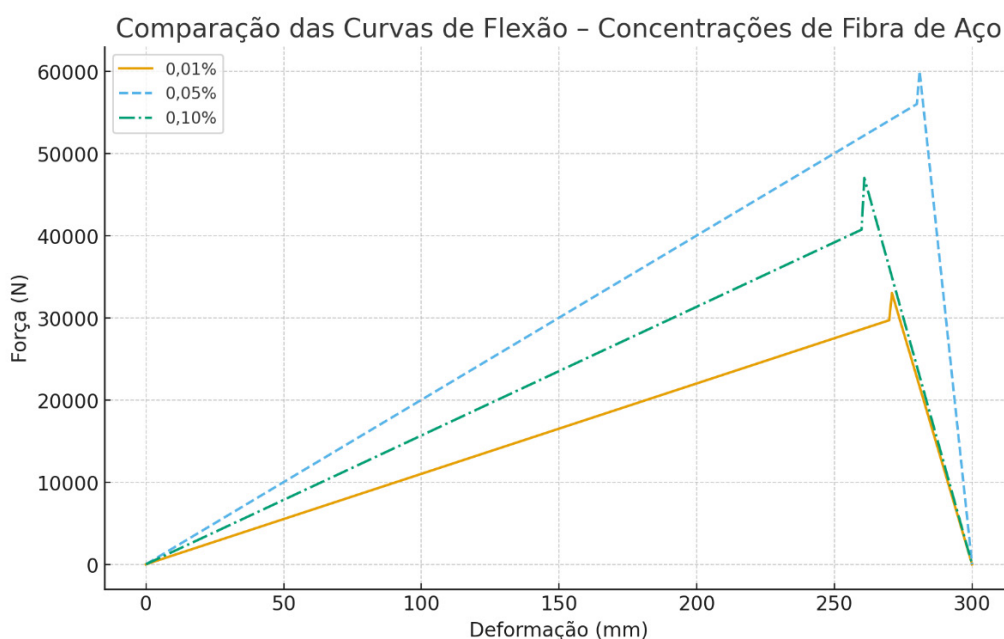
A análise comparativa dos três compósitos evidencia que o aumento do teor de fibra de aço influenciou diretamente a capacidade resistente das vigotas no ensaio de flexão. O ensaio de tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 12142:2010 (Figura 10).

Fig. 10: Vigotas curadas e ensaio de resistência a flexão bi apoiada.



A análise comparativa dos três compósitos evidencia que o aumento do teor de fibra de aço influenciou diretamente a capacidade resistente das vigotas no ensaio de flexão. A Figura 11 ilustra o resultados combinados de resistência a flexão das três composições de fibra de aço em comparação ao concreto puro (0%). O compósito com 0,01% apresentou menor força máxima e ruptura mais precoce, indicando contribuição limitada das fibras ao travamento das microfissuras. Já o compósito com 0,10% apresentou desempenho intermediário, com aumento significativo da resistência, porém ainda inferior ao observado na concentração de 0,05%.

Fig. 11: Resultados dos ensaios de resistência a flexão bi apoiada nas vigotas.



A comparação das curvas mostra de forma clara o efeito das diferentes porcentagens de fibra de aço na resistência à flexão. O compósito com 0,01% de fibra atingiu aproximadamente 33 kN de carga máxima, sendo o de menor desempenho entre os três, com ruptura precoce e menor capacidade de absorção de energia. Já o compósito com 0,10% apresentou um ganho relevante, alcançando cerca de 47 kN, ou seja, um aumento de aproximadamente 14 kN em relação ao 0,01% (incremento da ordem de incremento em 42%). Entretanto, o melhor desempenho foi observado no compósito com 0,05%, que atingiu cerca de 60 kN, sendo o maior valor registrado. Isso representa um ganho de 27 kN em relação ao 0,01% (82% superior) e cerca de 13 kN a mais que o 0,10% (superando 28%). Essa diferença expressiva indica que a concentração de 0,05% proporcionou uma dispersão mais eficiente das fibras, maximizando o travamento das fissuras e resultando na maior resistência e ductilidade. Portanto, 0,05% é a melhor concentração, combinando maior capacidade resistente com melhor comportamento pós-fissuração.

3.7 Ensaio de permeabilidade dos compósitos à base de concreto e fibra de aço

Para o ensaio de permeabilidade foi realizado conforme a norma ABNT NBR 15259, e foram utilizados três corpos de prova pesados secos, obtendo a massa inicial em quilogramas, de cada para a marcação zero. A Figura 12 ilustra os compósitos em bacia de lâmina de água (5 mm).

Fig. 12: Ensaio de permeabilidade dos compósitos concreto/fibra de aço.



Os resultados da Tabela 11 mostram que a variação da massa dos compósitos ao longo dos períodos de 10, 20 e 30 minutos em contato com lâmina d'água foi relativamente pequena, indicando uma absorção superficial limitada nesse intervalo de tempo. O concreto sem fibra (0,0%) apresentou estabilidade praticamente constante, com aumento discreto de 0,01 kg, sugerindo baixa permeabilidade inicial. As misturas com fibras mostraram comportamentos distintos, o teor de 0,01% apresentou massa ligeiramente maior já no primeiro intervalo, indicando possível maior capacidade de retenção de água na superfície ou microvazios localizados. O teor de 0,05% mostrou aumento mais progressivo da absorção ao longo dos 30 minutos, sugerindo que a dispersão das fibras pode ter influenciado a conectividade dos poros. Já o teor de 0,10% apresentou comportamento semelhante ao concreto sem fibras, sugerindo que quantidades muito baixas ou mais altas de fibras não alteraram significativamente a absorção inicial.

Tabela 11: Valor em massa (kg) dos compósitos por tempo em contato com lâmina de água.

Amostras	10 minutos	20 minutos	30 minutos
0,0%	3,59	3,59	3,60
0,01%	3,64	3,65	3,65
0,05%	3,53	3,56	3,59
0,10%	3,59	3,59	3,60

De modo geral, as diferenças foram pequenas, indicando que, nos tempos analisados, a presença de fibras de aço não impactou de forma expressiva a absorção imediata por capilaridade.

3.8 Ensaio de Carbonatação

A análise da carbonatação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras de aço (Figura), nas concentrações de 0,01%, 0,05% e 0,10%, revelou que todos os corpos de prova permaneceram incolores após a aplicação da solução alcoólica de fenolftaleína (Figura 13). A ausência de coloração rosa nos corpos de prova após a aplicação da solução alcoólica de fenolftaleína indica pH abaixo do limiar de viragem do indicador (aproximadamente 9,0), evidenciando que o processo de carbonatação avançou até a região analisada independentemente das concentrações de fibra de aço utilizadas (0,01%, 0,05% e 0,10%).

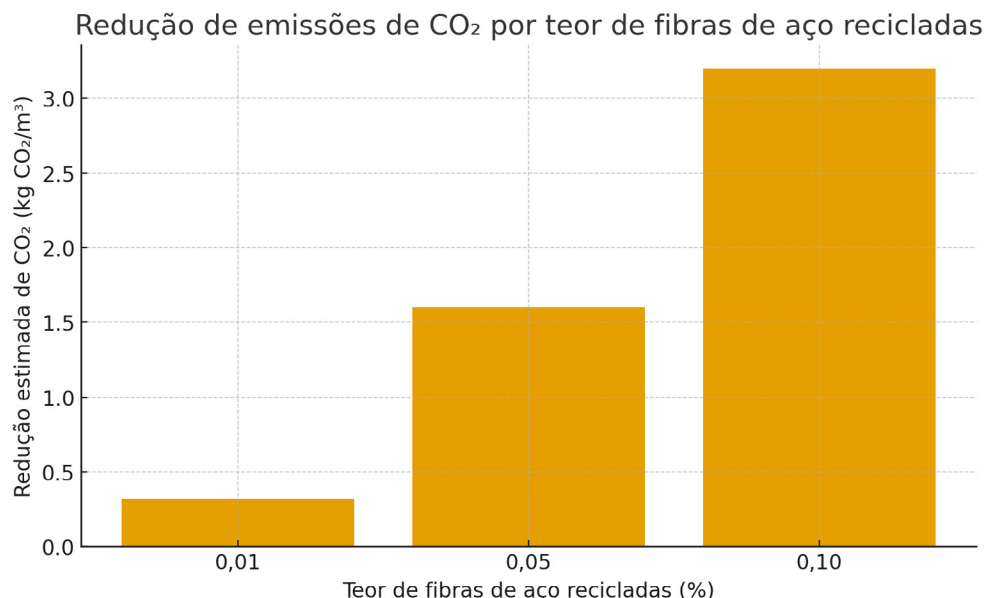
Fig. 13: Ensaio de carbonatação dos compósitos concreto/fibra de aço.



A redução do pH é resultado da reação entre hidróxidos alcalinos presentes na matriz cimentícia e o dióxido de carbono atmosférico, formação de carbonatos e consequente perda da capacidade passivadora do concreto.

3.9 Redução de carbono com o uso da fibra de aço na produção do compósito cimentício e o impacto ambiental na sustentabilidade

A Figura 14 ilustra a correlação direta entre o teor de fibras de aço recicladas incorporado ao concreto e a redução estimada das emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas ao material produzido. O comportamento apresentado pelo gráfico demonstra que a substituição parcial de insumos convencionais por fibras metálicas recicladas contribui de forma mensurável para a diminuição do impacto ambiental do compósito.

Fig. 14: Redução de emissões de CO₂/teor de fibras de aço

O menor teor avaliado (0,01%) resultou em uma redução aproximada de 0,32 kg CO₂/m³, refletindo o efeito inicial da reciclagem do resíduo metálico na mitigação das emissões. Quando o teor foi elevado para 0,05%, observou-se uma redução de 1,6 kg CO₂/m³, valor cinco vezes superior ao do teor mínimo, indicando uma relação proporcional entre o incremento de fibras e o abatimento de emissões. O teor máximo (0,10%) apresentou a maior redução absoluta, atingindo 3,2 kg CO₂/m³, o que confirma que o aumento da incorporação do material reciclado intensifica o benefício ambiental [13-15].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram que a incorporação de fibras de aço recicladas melhora de forma significativa o desempenho mecânico dos compósitos, destacando-se a concentração de 0,05%, que alcançou os melhores valores: aproximadamente 9,78 MPa na resistência à compressão axial, 1,20 MPa na compressão diametral e cerca de 60 kN no ensaio de flexão, evidenciando maior travamento das fissuras e desempenho superior às demais formulações. Embora teores menores não gerem ganhos relevantes e quantidades maiores possam comprometer a homogeneidade, o uso de fibras reforça a sustentabilidade do material ao valorizar resíduos metálicos. Nos ensaios de permeabilidade, as variações foram discretas, indicando influência limitada das fibras na absorção inicial. O ensaio e o gráfico de carbonatação mostraram comportamento semelhante entre todas as misturas, sem alteração perceptível na difusão de CO₂. Diante disso, as fibras contribuem de maneira expressiva para o desempenho mecânico e para benefícios ambientais, ainda que apresentem efeito reduzido sobre a carbonatação e a permeabilidade inicial. O aumento do teor de fibras de aço recicladas eleva proporcionalmente a redução estimada de CO₂, passando de cerca de 0,32 kg CO₂/m³ (0,01%) para 1,6 kg CO₂/m³ (0,05%) e atingindo aproximadamente 3,2 kg CO₂/m³ no teor de 0,10%. Esses resultados evidenciam que a incorporação de fibras recicladas contribui diretamente para a mitigação das emissões associadas ao concreto.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Gurkewicz RP, Toledo ALS, Salvador MCF, Figueiredo AD. Concreto reforçado com fibra de aço de pneus inservíveis. *Cerâmica Industrial*. 2023;28(1):e272801.
- [2] Marques BB. Estudo experimental e numérico de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto de resíduos reciclados de concreto e fibras de aço [dissertação]. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2022.
- [3] Gomes AL, Silva FA, Lima PRL. Análise do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras de aço recicladas de pneus. *Rev IBRACON Estrut Mater*. 2021;14(3):1–12.
- [4] Silva RA, Oliveira LA, Andrade JJ. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com a incorporação de fibras de aço recicladas. *Mundi Eng Tecnol Gest*. 2021;6(1):1–10.
- [5] Sharma R, Bansal PP. Utilization of waste tire fibers in concrete as a sustainable solution for waste management. *J Clean Prod*. 2021;278:123–131.
- [6] Siqueira AH, Silva MCE. Estudo da utilização de fibras de aço de pneus inservíveis no concreto [Trabalho de Conclusão de Curso]. Brasília: Centro Universitário de Brasília; 2019.
- [7] Santos WJ. Influência da adição de fibras de aço recicladas de pneus na resistência ao impacto de concretos. *Rev Matéria*. 2005;10(2):123–131.
- [8] Graeff AG, Cavalcanti DKK, Paz AR. Estudo experimental de concretos reforçados com fibras de aço recicladas de pneus. *Rev Eng Civ*. 2010;58:35–44.
- [9] Daniel MEM. Betão com adição de fibras de aço e têxteis recicladas de pneu sujeito a altas temperaturas: análise de desempenho [dissertação]. Castelo Branco: Instituto Politécnico de Castelo Branco; 2016.
- [10] Choi YW, Moon DJ, Chung JS, Cho SK. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cem Concr Res*. 2005;35(4):776–781.
- [11] Gurkewicz RP, Toledo ALS, Figueiredo AD. Concreto reforçado com fibra de aço de pneus inservíveis. *Cerâmica Industrial*. 2023;28(1):e272801. (duplicada conforme lista original)
- [12] Belgo Arames. Fibra de aço para concreto: durabilidade e resistência. Belo Horizonte: Belgo Arames; 2025.
- [13] Wu L, Feng C, Qiu J, Wang L, Peng Y, Liu J. Influence of recycled tire steel fibers on the mechanical properties and carbon emissions of high-performance cement-based materials. *Materials*. 2025;18(13):3008.
- [14] Maximov D. Assessment of using recycled steel fiber in concrete for techno-eco-efficiency. *J Steel Struct Constr*. 2024;10(2).
- [15] Zhang X, Biswas WK, Matters C, Maboud M. Techno-eco-efficiency assessment of using recycled steel fibre in concrete. *Sustainability*. 2024;16(9):3717.