

Análise da influência de macrofibras no desempenho mecânico do concreto para piso industrial

Analysis of the influence of macrofibers on the mechanical performance of concrete for industrial floors

DOI:10.34117/bjdv8n5-274

Recebimento dos originais: 21/03/2022

Aceitação para publicação: 29/04/2022

Matheus Henrique Wendland

Engenheiro Civil

Instituição: Universidade Feevale

Endereço: Av. Dr. Maurício Cardoso, 510 - Hamburgo Velho, Novo Hamburgo – RS

CEP: 93510-235

E-mail: contato@matheuswendland.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3183-0675>

Eduardo Polesello

Professor Doutor, Instituto de Ciências Criativas,, e tecnológicas

Instituição: Universidade Feevale

Endereço: Av. Dr. Maurício Cardoso, 510 - Hamburgo Velho, Novo Hamburgo – RS

CEP: 93510-235

E-mail: eduardopolesello@feevale.br

RESUMO

Com o intuito de aumentar a resistência do concreto e torná-lo mais eficiente, uma das alternativas é a incorporação de fibras junto a matriz cimentícia, podendo ser microfibras, destinadas principalmente para dificultar a geração e o desenvolvimento de microfissuras, e macrofibras, amplamente utilizadas para melhorar algumas propriedades mecânicas do concreto, como, por exemplo, a resistência à tração na flexão. A incorporação de fibras tem sido largamente utilizada em pisos industriais de concreto, a fim de proporcionar uma maior resistência frente aos diversos tipos de carregamento do ambiente, além de ajudar a conter os problemas de retração e variação térmica. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo analisar o comportamento mecânico do concreto convencional (CC) para pisos industriais quando produzido com a incorporação de macrofibras de aço e sintéticas, ora de forma separada, em teores de 0,60% e 0,80%, ora de forma híbrida, em três dosagens diferentes. Para isso, optou-se por realizar os ensaios de resistência à compressão axial e o ensaio de tração na flexão, comparando o CC em relação ao concreto reforçado com fibras. Os resultados mostraram que houve influência significativa da incorporação de fibras no compósito para as propriedades mecânicas avaliadas. No ensaio de compressão axial, verificou-se resistência até 20,8% superior ao CC aos 28 dias, enquanto para o ensaio de tração na flexão esse aumento chegou à 68,95% em relação ao traço referência. Ainda, as fibras incorporadas ao concreto demonstraram ser capazes de absorver e transmitir tensões, promovendo resistência residual, mesmo após a ruptura do concreto, não permitindo o rompimento brusco do compósito.

Palavra-chave: macrofibras, concreto, pisos industriais, resistência à tração na flexão.

ABSTRACT

To increase the strength of concrete and make it more efficient, one of the alternatives is the incorporation of fibers together with the cement matrix, which may be microfibers, intended mainly to hinder the generation and development of microcracks, and macrofibers, widely used to improve some mechanical properties of concrete, such as flexural tensile strength. The incorporation of fibers has been widely used in industrial concrete floors to provide greater resistance to different types of loading, in addition to helping to contain the problems of shrinkage and thermal variation. In this sense, this study aimed to analyze the mechanical behavior of conventional concrete (CC) for industrial floors when produced with the incorporation of steel macrofibers and synthetic macrofibers, sometimes separately, at levels of 0.60% and 0.80%, sometimes in a hybrid form, in three different dosages. For this, it was decided to carry out the axial compressive strength tests and the flexural tensile test, comparing the conventional concrete in relation to the fiber reinforced concrete. The results showed that there was a significant influence of the incorporation of fibers in the composite for the evaluated mechanical properties. In the axial compression test, there was resistance up to 20.8% higher than the CC at 28 days, while for the flexural tensile test this increase reached 68.95% in relation to the reference trace. Furthermore, the fibers incorporated into the concrete proved to be capable of absorbing and transmitting tensions, promoting residual strength, even after the concrete rupture, not allowing the sudden rupture of the composite.

Keywords: macrofibers, concrete, industrial floors, flexural tensile strength.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material indispensável na indústria da construção civil, e o aprimoramento do seu desempenho têm se mostrado ao longo dos tempos fundamental para suprir as necessidades do mercado. Apesar da enorme eficiência de estruturas de concreto quanto à resistência à compressão e ao esmagamento, ele pode apresentar diversas manifestações patológicas devido ao seu comportamento frágil. Uma das alternativas neste quesito é a adição de fibras dispersas aleatoriamente na matriz. Diversas são as fibras existentes no mercado, e sua aplicabilidade varia conforme tamanho e material. Em geral, fibras com dimensões menores tendem a ajudar na retração e evitar fissuras, e fibras maiores tendem a promover maior resistência à tração e uma distribuição mais homogênea das solicitações (GUIMARÃES, 2010; FIGUEIRERO, 2011).

Dada a geometria desfavorável obtida entre a área e espessura, e a possibilidade de apresentar sérias manifestações patológicas, pisos industriais são casos importantes a serem estudados. Dentre as principais incidências em pisos, pode-se destacar o surgimento de fissuras, baixa resistência à abrasão, o desgaste e o fraturamento do concreto junto as bordas, prejudicando seriamente o valor estético e funcional do piso. Neste sentido, a incorporação de fibras, em especial macrofibras sintéticas e de aço, são

uma alternativa para proporcionar maior resistência frente aos diversos tipos de carregamento, além de contribuir para minimizar efeitos de retração e variação térmica (CHODOUNSKY e VIECILI, 2007; POLESELLO e SCHEFFEL, 2019).

Apesar dessa relutância em uma parte do mercado, o concreto reforçado com fibras (CRF) tem provado sua eficácia em numerosas aplicações na indústria da construção civil, como em elementos pré-moldados, pavimentos industriais, estruturas com formato arquitetônico complexas, autoestradas, pavimentos de aeroportos, tuneis de concreto projetado, pisos de concreto apoiado sobre o solo, entre outros (NANA et al, 2021). O uso do concreto reforçado com fibras, além de promover uma maior segurança quanto à resistência à tração e permitir melhor distribuição das cargas, contribui para uma maior durabilidade da estrutura e para menor possibilidade de incidência de manifestações patológicas, promovendo pavimentos e estruturas cada vez mais esbeltas (FIGUEIREDO, 2011).

Desta forma, justificam-se estudos sobre o tema, incorporação de macrofibras na produção de concreto, contribuindo para um melhor conhecimento do assunto e ganho de qualidade final das estruturas. A partir disso, motivou-se o desenvolvimento desta pesquisa, cujo objetivo é avaliar o comportamento mecânico do concreto convencional para pisos industriais quando produzido com a incorporação de macrofibras sintéticas e de aço, tanto de forma individual quanto de forma híbrida.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto com material carbonático, ou CII-F, com classe de resistência de 40MPa, adequado para o projeto de pisos industriais em concreto conforme o Comitê Técnico de Pisos e Concreto (2018).

Os agregados foram caracterizados quanto a composição granulométrica pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e massa específica pelas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009) para o agregado miúdo e graúdo, respectivamente. O agregado miúdo apresentou dimensão máxima de 4,75mm, módulo de finura de 2,37 e massas unitária e específica, respectivamente, de 1512,25kg/m³ e 2,61g/cm³. Para o agregado graúdo obteve-se dimensão máxima de 12,5mm, módulo de finura de 6,02 e massas unitária e específica, respectivamente, de 1528,24kg/m³ e 2,75g/cm³.

Quanto as fibras, utilizou-se fibras de aço e sintéticas. As fibras de aço utilizadas nesta pesquisa estão apresentadas na Figura 1, classificadas, segundo NBR 15530 (ABNT, 2019), como fibras do Tipo A (com ancoragem nas extremidades), pertencentes ao Grupo I (arames trefilados a frio).

Figura 1: Fibra de aço utilizada no estudo.



Fonte: Autor, 2021.

Uma das peculiaridades da fibra utilizada é o fato dela ser fornecida em pentes, coladas entre si, permitindo, segundo o fabricante, uma mistura rápida e com melhor homogeneização, diminuindo a possibilidade de formação de ouriços. Na Tabela 1 serão apresentadas as características desta fibra.

Tabela 1: Características da fibra de aço utilizada.

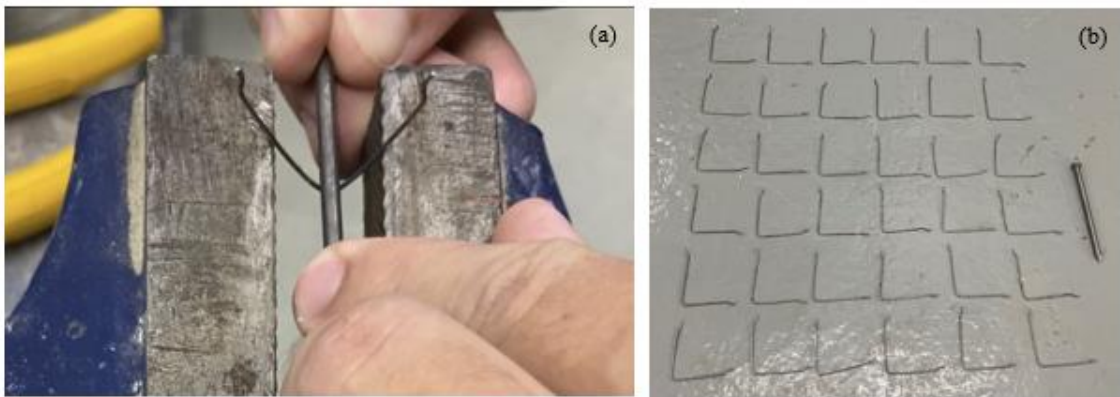
CARACTERÍSTICAS	
Classe Fabricante	80
Fator forma (L/d)	80
Comprimento	60 mm
Diâmetro	0,75 mm
Peso específico	7,85g/cm ³
Dosagem mínima (volume)	10kg/m ³
Resistencia à tração do arame	1100 N/mm ²
Normativa	NBR 15530/2007
Classe normativa	Classe I
Tipo Normativa	Tipo A1

Fonte: Adaptado do catálogo do fabricante, 2018.

Apesar do catálogo mencionar a norma já substituída por uma versão mais atual, as características das fibras ainda atendem aos requisitos e critérios requeridos na norma vigente, a NBR 15530 (ABNT, 2019).

Estas fibras foram submetidas ao ensaio de dobramento, conforme a NBR ISSO 7438 (ABNT, 2016), no qual foram retiradas 30 fibras aleatoriamente do lote (superior ao mínimo recomendado) e submetidas à uma deformação plástica com o auxílio de um pino de 3,00mm de diâmetro, até atingir um ângulo de 90°, à uma temperatura superior à 16°C. A Figura 2(a) mostra uma foto do ensaio, enquanto a Figura 2(b) apresenta as fibras após o ensaio.

Figura 2: Ensaio de dobramento das fibras de aço, sendo (a) durante e (b) após o ensaio.



Fonte: Autor, 2021

Segundo a norma, para o lote ser aprovado, ao menos 90% das fibras não podem ter sofrido ruptura ou fratura do material. No caso das fibras ensaiadas, nenhuma foi danificada, obtendo uma aprovação de 100%.

Já as macrofibras sintéticas utilizadas, são produzidas a partir de copolímero de polipropileno em forma de monofilamento torcido (Figura 3). As características disponibilizadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 2.

Figura 3: Fibras sintéticas utilizadas no estudo.



Fonte: Autor, 2021.

Tabela 2: Características das macrofibras sintéticas.

Material	Copolímero/Polipropileno
Formato	Monofilamento torcido
Peso específico	0,91g/cm ³
Resistência à tração	580 – 620 MPa
Comprimento	54mm
Cor	Branca
Resistência alcalina	Alta
Absorção	zero
Conformidade	ASTM C-1116
Diâmetro médio	0,41mm

Fonte: Adaptado do catálogo do fabricante, 2020.

Devido a indisponibilidade da estufa necessária para realizar o ensaio de durabilidade da fibra em meio alcalino, conforme recomendado pela NBR 16942 (ABNT, 2021), o mesmo não pode ser executado. Contudo, procedeu-se o uso das fibras seguindo as informações técnicas do catálogo do fabricante, o qual indica que as fibras possuem alta resistência em meio alcalino.

A água utilizada na produção do concreto foi proveniente de poço artesiano existente no Campus II da Universidade Feevale, em Novo Hamburgo/RS.

Ainda, na definição do traço, utilizou-se aditivo redutor de água do tipo I, polifuncional livre de cloretos, com dosagem fixa em 0,60% em relação a massa de cimento, e, para ajuste da trabalhabilidade, utilizou-se aditivo redutor de água do tipo II, sendo este à base de éter policarboxílico, livre de cloretos. As características técnicas de ambos os aditivos podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características técnicas dos aditivos redutores de água do tipo I e II.

Especificações técnicas	Redutor de água do tipo I	Redutor de água do tipo II
Aspecto	Líquido	Líquido
pH	10,00	5,25
Densidade (g/cm ³)	1,147	1,059
Teor de sólidos (%)	33,07	29,84
Dosagem (% sobre a massa de cimento)	0,60	Variável

Fonte: Autor, 2021.

A dosagem utilizada do aditivo redutor de água do tipo II foi variável para cada traço produzido. Limitou-se na dosagem necessária para proporcionar um abatimento atendendo à especificação inicialmente estabelecida.

2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental contempla as etapas práticas executadas no Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Feevale, em Novo Hamburgo/RS.

2.1.1 Produção do concreto

O traço foi definido visando a obtenção do produto classificado como C40 S100, apresentando uma resistência característica à compressão de 40,0 MPa e classe de abatimento entre 100 e 160 mm, segundo especificação da NBR 8953 (ABNT, 2015). Para tal, especificou-se uma relação a/c igual a 0,50 e, em função das características dos agregados utilizados, um teor de argamassa de 53%. A dosagem final utilizada está detalhada na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidades de materiais utilizados na produção de concreto.

Relação a/c	Cimento (kg/m ³)	Areia Natural (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Aditivo Redutor de Água do Tipo I (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Traço unitário (em massa)
0,50	367	772	1010	2,20	184	1:2,10:2,75

Fonte: Autor, 2021.

As definições quanto ao abatimento e teor de argamassa atendem as considerações de Chodounsky e Viecili (2007) que limitam em no mínimo 100mm e 50%, respectivamente, ao considerarem dosagem para piso de concreto com fibras.

Optou-se em analisar a incorporação de fibras em dois diferentes percentuais, 0,60% e 0,80%, por serem os mais utilizados pela literatura. Como opção de incorporação híbrida, adotou-se três diferentes composições para a dosagem de 0,8%, conforme detalha a Tabela 5. A quantidade de fibras foi dosada em percentual relativo ao volume do concreto.

Tabela 5: Quantidade de fibras por traço.

Traço	Tipo de fibra	Dosagem (%)	Dosagem (kg/m ³)	Quantidade (g)
T02	Fibra de aço	0,60%	47,10	1955,06
T03	Fibra de aço	0,80%	62,80	2606,75
T04	Fibra Sintética	0,60%	5,46	226,64
T05	Fibra Sintética	0,80%	7,28	302,18
T06	Sintética (25%)	0,20%	1,82	75,55
	Aço (75%)	0,60%	47,10	1955,06
T07	Sintética (50%)	0,40%	3,64	151,09
	Aço (50%)	0,40%	31,40	1303,38
T08	Sintética (75%)	0,60%	5,46	226,64
	Aço (25%)	0,20%	15,70	651,69

Fonte: Autor, 2021.

O procedimento de produção do concreto foi realizado com base na norma NBR 12655 (ABNT, 2015). Os materiais foram pesados individualmente e incorporados à betoneira na seguinte ordem: agregado graúdo, parte da água, fibras (exceto no concreto referência), cimento, agregado miúdo, restante da água e aditivo redutor de água do tipo I. No concreto produzido com as duas fibras, foi incorporado primeiro a fibra de aço, por ser colada em pente, permitindo uma melhor homogeneização quando em contato com a água.

Após a mistura e homogeneização dos materiais, foi verificada a trabalhabilidade do compósito através do ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test), conforme recomendações da NBR 16889 (ABNT, 2020).

2.1.2 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios mecânicos realizados no estado endurecido foram o ensaio de compressão axial, realizado aos 7 e 28 dias, com corpo de prova cilíndrico, medindo 10cm de diâmetro e 20cm de altura, e o ensaio de tração na flexão, realizado aos 28 dias, com corpo de prova prismático, medindo 15cm x 15cm x 50cm. Foram ensaiados três corpos de provas para cada teor e tipo de fibra, no ensaio de compressão axial aos 7 e 28, e 2 corpos de prova para o ensaio de tração na flexão aos 28 dias.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente será analisada a influência da incorporação de fibras no estado fresco do concreto, por meio da consistência pelo abatimento do tronco de cone, regulamentado pela NBR 16889 (ABNT, 2020). Para o estado endurecido, será analisado o comportamento mecânico do concreto por meio do ensaio de resistência à compressão, realizado aos 7 e 28 dias, normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), e do ensaio de tração na flexão, realizado aos 28 dias e normatizado pela NBR 12142 (ABNT, 2010).

3.1 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

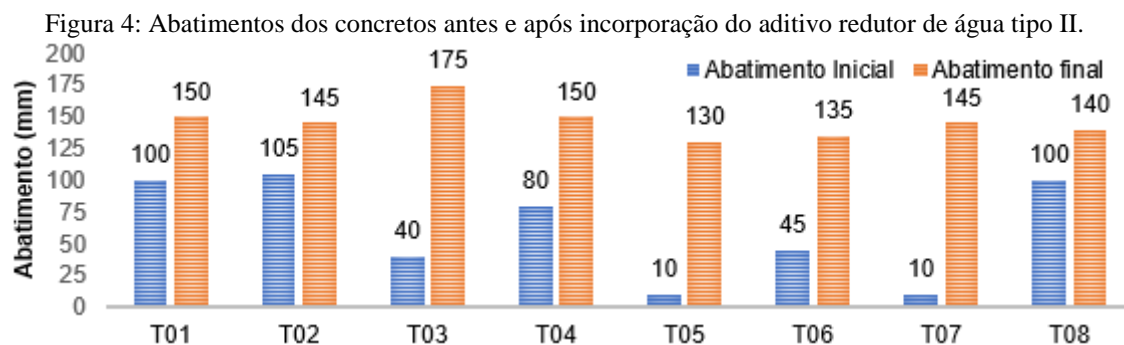
A partir da produção do traço referência obteve-se o abatimento mínimo definido, 100mm, entretanto, a fim de proporcionar uma melhor trabalhabilidade, decidiu-se por incorporar 19,20g do aditivo redutor de água do tipo II, ajustando para um abatimento de 150mm. Em consequência disso, a produção dos demais traços partiu da incorporação da mesma quantidade de aditivo usada no traço referência, permitindo assim, uma comparação fiel da trabalhabilidade entre os traços produzidos. Os abatimentos iniciais e finais obtidos em cada traço, além do teor de aditivo utilizado, podem ser observados na Tabela 6 e o gráfico da Figura 4.

Tabela 6: Registro dos abatimentos e dosagem necessária de aditivo redutor de água tipo II

Traço	Características	Dosagem Inicial		Abatimento (mm)	Dosagem Final		Abatimento (mm)
		g	%*		g	%*	
T01	Referência	0,00	0,00%	100	19,20	0,13%	150
T02	Fibra de aço (0,60%)	19,20	0,13%	105	45,05	0,30%	145
T03	Fibra de aço (0,80%)	19,20	0,13%	40	76,50	0,50%	175
T04	Fibra Sintética (0,60%)	19,20	0,13%	80	45,11	0,30%	150
T05	Fibra Sintética (0,80%)	19,20	0,13%	10	61,00	0,40%	130
T06	Sintética (25% de 0,80%)	19,20	0,13%	45	72,35	0,47%	135
	Aço (75% de 0,80%)						
T07	Sintética (50% de 0,80%)	19,20	0,13%	10	71,85	0,47%	145
	Aço (50% de 0,80%)						
T08	Sintética (75% de 0,80%)	19,20	0,13%	100	39,45	0,26%	140
	Aço (25% de 0,80%)						

*Refere-se à quantidade de aditivo redutor de água tipo II em relação a massa de cimento utilizada.

Fonte: Autor, 2021.



Fonte: Autor, 2021.

A partir do comportamento apresentado na Figura 4, observa-se que todos os traços incorporados com fibras, e com 0,13% de aditivo, tiveram uma redução no abatimento quando comparados ao traço referência. Observou-se ainda que maiores teores de fibras simples promovem menores abatimentos.

A adição de fibras no concreto promove uma restrição da mobilidade relativa das partículas, causada especialmente por macrofibras, devido a recomendação por dimensão maior ou igual a duas vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo, dificultando a fluidez. Além disso, a trabalhabilidade também é influenciada pelo fator de forma, pela rigidez e o módulo de elasticidade da fibra, devido as fibras mais rígidas promoverem menor mobilidade do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Em comparação entre as fibras de aço e fibras sintéticas, constata-se que as fibras sintéticas tendem a apresentar um abatimento menor que fibras de aço. Como verificado, para os teores de 0,60% de fibras sintéticas, obteve-se um abatimento de 80mm, ao mesmo tempo que 0,60% de fibras de aço apresentaram um abatimento de 105mm. O

mesmo verifica-se no teor de 0,80%, obtendo-se abatimentos de 10mm e 40mm para fibras sintéticas e de aço, respectivamente. Medeiros (2012) explica que um dos parâmetros que influencia na consistência do concreto é a esbeltez das fibras. A área superficial das fibras demanda água de molhagem, e com isso, para teores iguais, as fibras sintéticas, devido ao menor diâmetro, apresentam maior esbeltez, e conseqüentemente uma maior área superficial devido ao maior número de fibras na matriz, reduzindo a trabalhabilidade. Amorim e Barbosa (2020), utilizando fibras sintéticas, com comprimento de 54mm, em teores de 0,14%, 0,29% e 0,43%, também registraram uma redução da trabalhabilidade maior quando comparado a fibras de aço, com comprimento de 30mm, em dosagens de 1,20%, 2,40% e 3,60%.

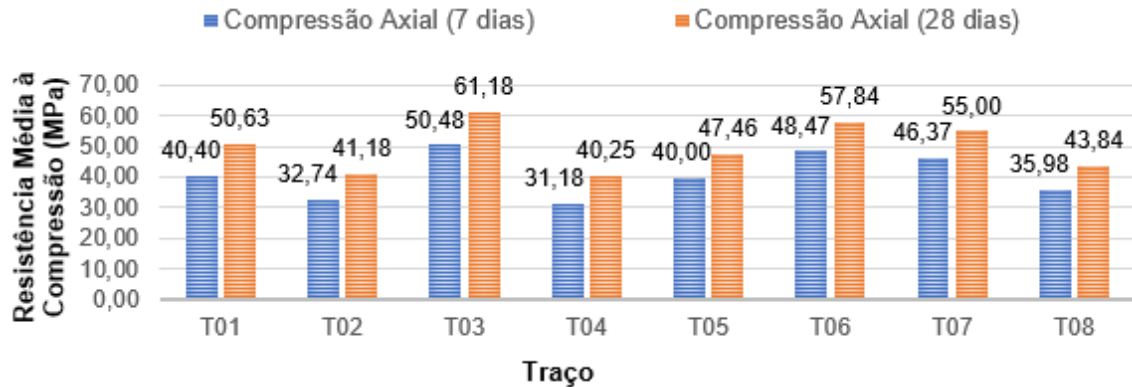
Quanto aos traços híbridos, nota-se uma redução maior do abatimento no teor incorporado com 50% de fibras de aço e 50% de fibras sintéticas, enquanto o melhor abatimento foi obtido através da incorporação de 75% das fibras sintéticas e 25% das fibras de aço, indo na contramão da análise anterior, que demonstrou uma tendência mais acentuada na redução da trabalhabilidade em concretos incorporados com fibras sintéticas. O maior abatimento obtido no traço 08 pode estar associado à um problema evidenciado na matriz e explicado nos próximos tópicos. Caso esse equívoco na obtenção do abatimento pudesse ser confirmado, poderia se ter um melhor abatimento para o traço 06, com menor teor de fibras de sintéticas, e um abatimento menor no traço 07, com 50% de cada fibra, coerente com os estudos apontados.

Por fim, verificou-se que foi necessário incorporar teores adicionais entre 0,26% e 0,50% de aditivo redutor de água tipo II para se obter uma trabalhabilidade final adequada, o qual atende os limites estabelecidos pelo fabricante, que limita a utilização em 1% de desse aditivo em relação a massa de cimento utilizada. Em geral, maiores teores de fibras necessitaram maior teor de aditivo para obter um abatimento adequado, assim como demonstrado por Polesello e Scheffel (2019) e Guimarães (2015).

3.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

A resistência à compressão média obtida para cada traço e idade analisada é apresentada na Figura 5

Figura 5: Resultados obtidos para o ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor, 2021.

Para uma melhor análise dos dados, realizou-se, ainda, uma análise de variância estatística (ANOVA) com os resultados individuais obtidos para cada CP. Nota-se que há uma diferença significativa entre os traços para ambas as idades em estudo, conforme expresso na Tabela 7 e Tabela 8, além de graficamente apresentado nas Figuras 6 e 7.

Tabela 7: Análise estatística do ensaio de compressão axial aos 7 dias.

	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Fator p	Significativo
Compressão Axial	1094,48	7	156,35	51,95	0,000000	Sim
Erro	48,15	16	3,01			

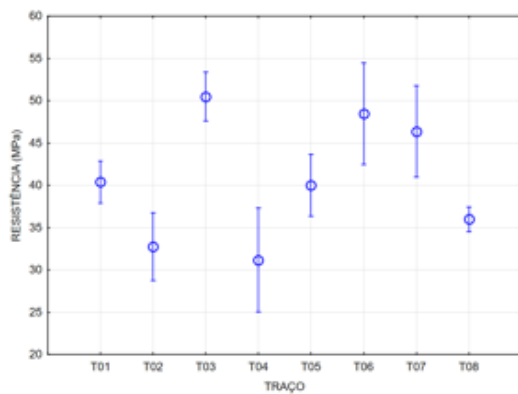
SQ: soma quadrática; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrática; F_{calc}: valor calculado de F
Fonte: Autor, 2021.

Tabela 8: Análise estatística do ensaio de compressão axial aos 28 dias.

	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Fator p	Significativo
Compressão Axial	1284,83	7	183,50	35,72	0,000000	Sim
Erro	82,20	16	5,14			

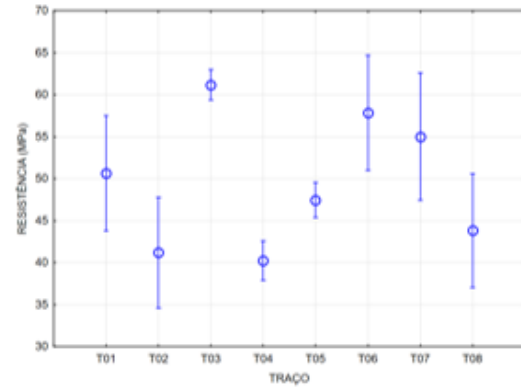
SQ: soma quadrática; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrática; F_{calc}: valor calculado de F
Fonte: Autor, 2021.

Figura 6: Comportamento do ensaio de compressão axial aos 7 dias.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 7: Comportamento do ensaio de compressão axial aos 28 dias.

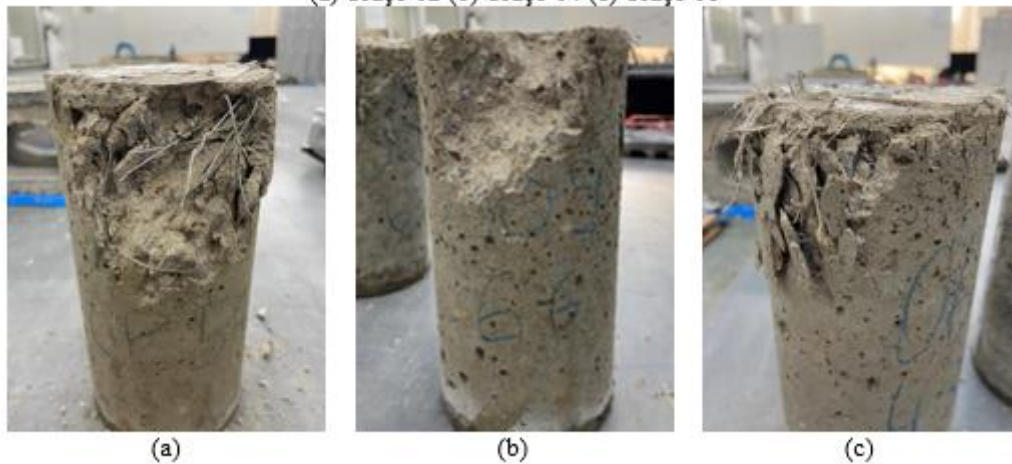


Fonte: Autor, 2021.

Analisando os resultados de compressão aos 7 dias, é possível constatar uma redução significativa na resistência para os traços com 0,60% de fibras de aço (T02), 0,60% de macrofibras sintéticas (T04), e para o traço híbrido (T08), composto por 75% de macrofibras sintéticas e 25% de fibras de aço, o que não era esperado. Essa redução pode estar relacionada à uma mistura deficitária ou incorreta incorporação das fibras na mistura, o que pode ter contribuído em aumento de vazios e perda de capacidade resistente (FIGUEIREDO, 2011). De maneira equívoca, houve, para esses traços, uma redução no tempo de mistura em função da incorporação total do aditivo redutor de água do tipo II, e a partir disso, destaca-se a importância de haver um maior controle do tempo de mistura e a padronização de todos os procedimentos para a produção do concreto. Durante a produção de concreto dos demais traços, a cada fração de 0,1% do aditivo redutor de água do tipo II incorporada ao concreto, foi realizado um ensaio de abatimento de tronco de cone.

Para os traços T02, T04 e T08, sabendo-se a média de consumo de aditivo, o mesmo foi incorporado até se obter, visualmente, uma mistura com consistência e trabalhabilidade adequada, para então ser verificado por meio de ensaio de abatimento se atendia os requisitos, o que reduziu consideravelmente o tempo de mistura. Para dar mais fundamento a essa teoria, na Figura 8 são apresentados alguns corpos de prova destes traços, notando-se uma mistura não homogênea no compósito, e até mesmo uma presença maior de vazios observados visualmente, como no caso do traço com incorporação de fibras híbridas (Figura 8c).

Figura 8: Corpos de prova após rompimento por compressão axial aos 7 dias
(a) Traço 02 (b) Traço 04 (c) Traço 08



Fonte: Autor, 2021.

Apesar de ainda haver uma redução considerável destes traços aos 28 dias, a resistência à compressão média ultrapassa a resistência para qual foi definido o traço deste concreto, tornando viável sua utilização.

Amorim e Barbosa (2020), utilizando macrofibras poliméricas com mesmo comprimento utilizado nesta pesquisa, em teores de 0,14%, 0,29% e 0,43% de fibras, observaram uma redução da resistência à compressão entre 13,07%, para o menor teor, e 25,30%, para o maior teor, em relação ao concreto referência, comportamento semelhante ao apresentado neste trabalho, onde para o traço T04 foi obtido uma redução de 20,5%. Os autores justificaram a perda de resistência à compressão devido ao maior número de vazios presentes na matriz.

Nos traços incorporados com teores de 0,80% de fibras simples observa-se uma tendência. Aos 7 dias, o concreto incorporado com fibras de aço (T03) registrou um ganho significativo de 25,0% de resistência à compressão em relação ao traço referência, enquanto a incorporação do mesmo teor de fibras sintéticas (T05) promoveu uma pequena redução de 1,0%, não significativa. Aos 28 dias, o traço T03 apresentou um aumento de 20,8%, enquanto o traço T05 apresentou uma redução de 6,26%, ainda coerente com a bibliografia estudada.

Cáceres, Figueiredo e Monte (2013), utilizando fibras de polipropileno com comprimento de 53mm e fibras de aço de 29mm, obtiveram resultados bem próximos na comparação destas fibras. Para teores de 0,40%, registraram resistência de 17,06MPa e 17,13MPa, sendo para fibras sintéticas e de aço, respectivamente, ao mesmo tempo que, para os teores de 0,60%, registraram 15,25MPa utilizando fibras de aço e 15,98MPa utilizando fibras sintéticas. Ainda, observa-se que para o mesmo tipo de fibra, há uma

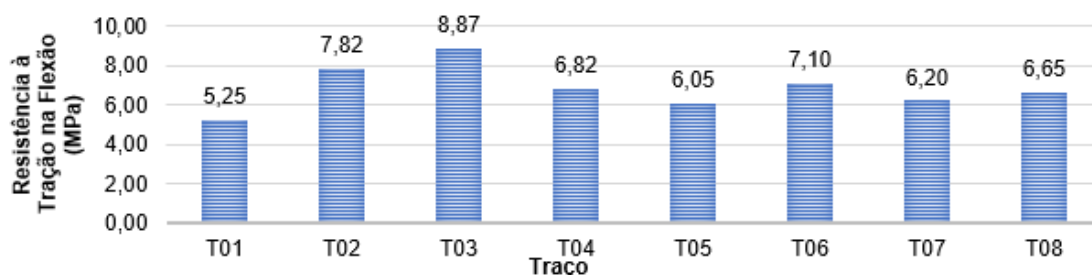
redução da resistência à compressão à medida em que o teor de fibras cresce, compatível com a presente pesquisa.

Para os traços híbridos, há novamente uma confirmação das análises anteriores. Nota-se, que à medida em que o teor de fibras sintéticas aumenta em relação as fibras de aço, no mesmo compósito, há uma pequena variação da resistência à compressão. Aos 7 dias, o traço T06, composto por 25% de fibras sintéticas e 75% de fibras de aço, apresenta uma resistência de 20,0% em relação ao concreto referência, o traço T07, incorporado com um teor de 50% de cada fibra apresenta um ganho de 14,8%, enquanto o traço T08 apresenta redução de 10,9%. Nota-se o mesmo comportamento aos 28 dias, uma resistência maior para o traço T06, incorporado com menor teor de fibras sintéticas, seguido do traço intermediário T07, e por fim, a menor resistência é observada no traço T08, o qual apresenta maior teor de fibras sintéticas.

3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A tração na flexão é uma das principais resistências que tende a ser otimizada por meio da incorporação de fibras, e por este motivo, é importante a análise e avaliação dessa característica no compósito. Para realizar essa análise por meio do ensaio de tração na flexão, foram moldados 2 corpos de prova para cada traço, sendo estes rompidos na idade de 28 dias. A Figura 9 apresenta as médias obtidas, a fim de promover uma melhor visualização e comparação.

Figura 9: Resultados médios obtidos da resistência à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2021.

Assim como na resistência à compressão, os dados individuais também foram submetidos a análise de variância estatística (ANOVA), conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Análise estatística do ensaio de tração na flexão aos 28 dias.

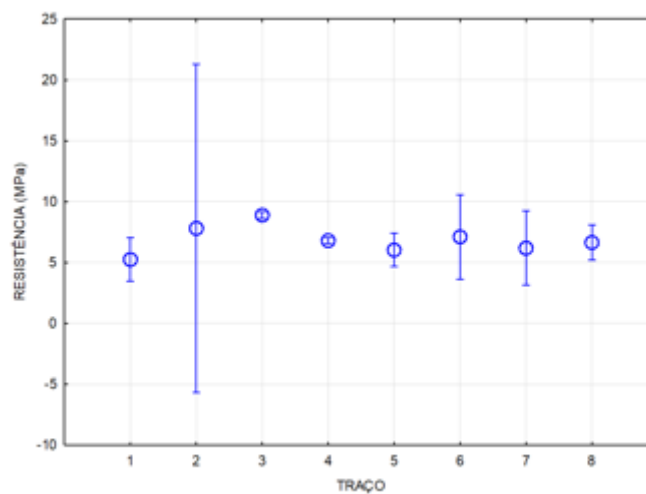
	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Fator p	Significativo
Tração na flexão	17,5344	7	2,5049	7,704	0,004979	Sim
Erro	2,6011	8	0,3251			

SQ: soma quadrática; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrática; F_{calc}: valor calculado de F

Fonte: Autor, 2021.

Nota-se que houve uma variação significativa entre os traços estudados. No gráfico da Figura 10, é possível observar quais os traços apresentaram maior significância nesta análise em relação ao traço referência.

Figura 10: Análise estatística do ensaio de tração na flexão aos 28 dias.

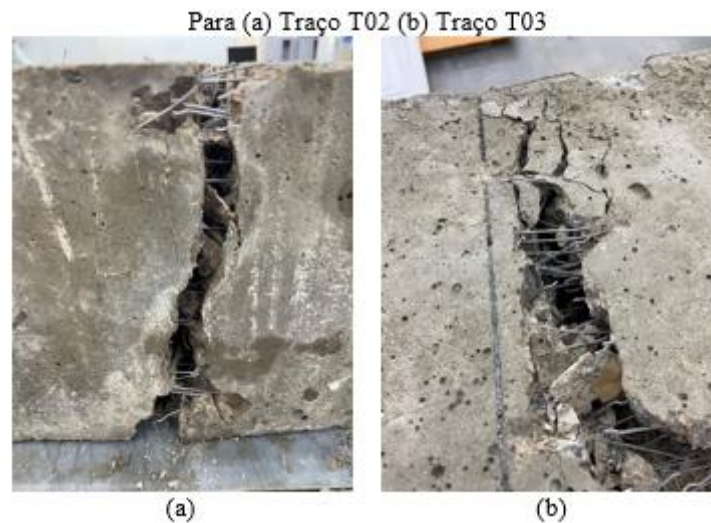


Fonte: Autor, 2021.

Em virtude de problemas observados no ensaio de compressão axial apresentado no tópico anterior, percebe-se a necessidade de algumas considerações em relação aos traços T02, T04 e T08. Através dos dados obtidos no ensaio de tração na flexão, é possível observar que não houve uma influência que reduzisse a resistência destes em relação ao traço referência. Entretanto, verifica-se um desvio elevado no traço com 0,60% de fibras de aço (T02), onde um dos corpos de prova atingiu 6,76 MPa de resistência, ao mesmo tempo que o outro atingiu 8,88 MPa, obtendo uma diferença de 2,12 MPa, superior à maior diferença registrada nos demais traços, que foi de 0,54 MPa para o T06.

Dentre os dois corpos de prova ensaiados para cada traço, um era escolhido para permanecer sendo tracionado além da tensão pós pico. Por meio destes corpos de prova, foi possível observar uma tensão resistente adicional do compósito, além de permitir uma análise visual da homogeneidade da matriz. Na Figura 11 são apresentados dois corpos de prova, sendo o primeiro referente ao T02, e o segundo, referente ao T03.

Figura 11: Corpos de prova incorporados com fibras de aço após rompimento



Fonte: Autor, 2021.

Por meio da Figura 11 é possível constatar uma distribuição menos homogênea do T02, o que pode ter influenciado a perda de capacidade resistente já citada. Essa perda de resistência pode ter sido causada por problemas na mistura, onde a distribuição não homogênea das fibras impede um comportamento resistente equivalente em toda a peça.

Analisando os resultados obtidos para a incorporação simples de fibras de aço, nota-se que o teor de 0,80% (T03) obteve um maior aumento de resistência em relação ao teor de 0,60% (T02). Entretanto, para fins de comparação, se analisado apenas o corpo de prova com maior resistência obtida no traço T02, percebe-se que ambos os traços tiveram a mesma resistência à tração na flexão. Em contrapartida, na incorporação simples de macrofibras sintéticas, nota-se uma maior resistência no traço com menor teor de fibras.

Analisando os mesmos teores de incorporação entre fibras de aço e macrofibras sintéticas, nota-se que em ambos os casos as fibras de aço promoveram uma maior resistência, chegando à um aumento de 69,0% em comparação ao traço referência.

Cáceres, Figueiredo e Monte (2013), utilizando fibras de polipropileno com comprimento de 53mm e fibras de aço de 29mm apresentaram tendências satisfatórias a este estudo. Para a incorporação de 0,40% de fibras, obtiveram uma resistência de 1,88MPa para fibras de aço e 1,67MPa para fibras sintéticas, da mesma forma que incorporando 0,60% de fibras, obtiveram 2,14MPa para fibras de aço e 1,45MPa para fibras sintéticas.

Polesello e Scheffel (2019), utilizando a mesma fibra de aço deste estudo, obteve resultados compatíveis com esta pesquisa. Para teores de 0,19%, 0,32% e 0,45% de fibra,

registrou resistências de 3,5MPa, 3,8MPa e 4,4MPa, respectivamente, demonstrando maiores resistências para maiores teores, tendo o maior teor, um ganho de 25% em relação ao traço referência. Ainda, pode-se promover uma comparação com o presente estudo, que teve um ganho de 49% para o teor de 0,60% de fibras de aço (T02), e 69% para o teor de 0,80% (T03), reforçando o aumento da resistência com o aumento do teor de fibras.

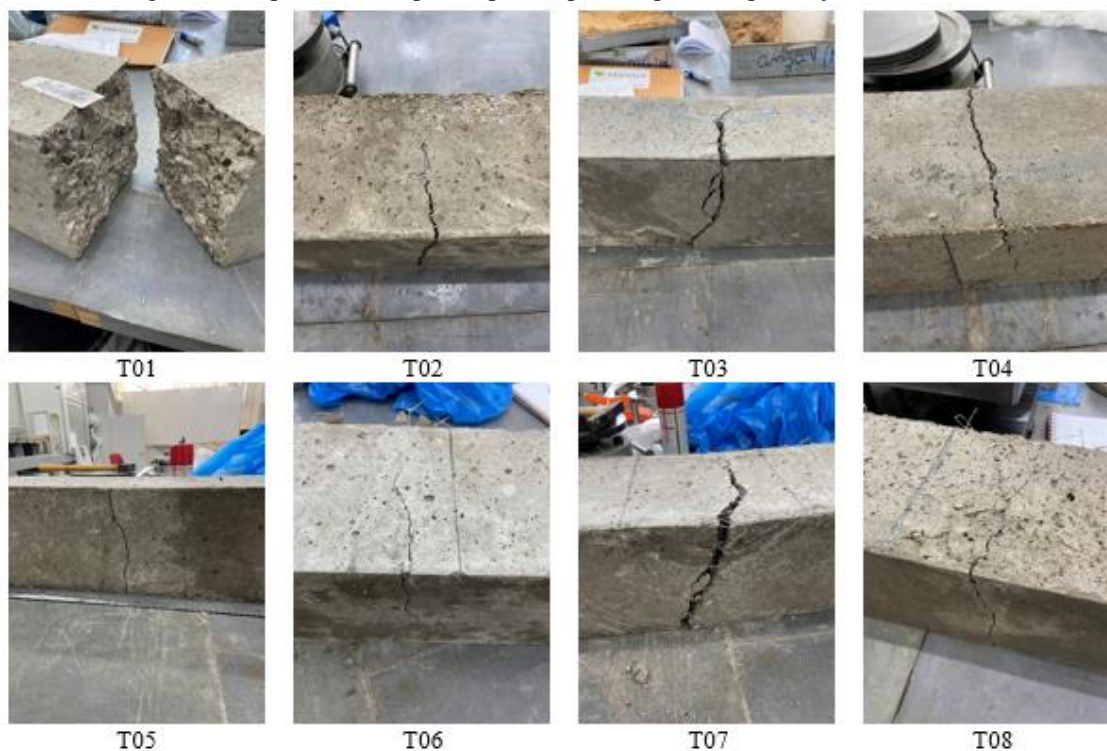
Analisando a incorporação de fibras híbridas, nota-se que a maior resistência obtida foi para o traço T06, com maior teor de fibra de aço, seguido pelo T07, com uma relação de 50% de cada fibra, e por fim, o T08, com menor incorporação de fibras de aço e maior teor de fibras sintéticas.

Para Guo et al. (2021), a incorporação de fibras híbridas, em geral, apresentam maiores resistências nos traços com maior teor de fibras de aço, demonstrando comportamento similar ao deste estudo. No entanto, salientam que apesar da influência das fibras sintéticas na redução da resistência, elas se mostram essenciais ao evitar a geração e desenvolvimento de pequenas fissuras nas primeiras idades, enquanto as fibras de aço ajudam a conter fissuras com maiores aberturas.

Cáceres, Figueiredo e Monte (2013) apresentam também estudos envolvendo as duas fibras, o qual demonstram comportamento interessante. Incorporando 0,20% de fibras sintéticas e 0,20% de fibras de aço na mesma matriz, registraram uma resistência de 1,55MPa, enquanto a incorporação 0,20% de fibras de aço combinadas com 0,40% de fibras sintéticas promoveram uma resistência de 2,01MPa, maior que a registrada anteriormente. Os autores indicam ainda, que quando utilizado os teores de 0,20% de cada fibra, o compósito apresentou um comportamento de “*slip softening*”, enquanto o compósito com 0,40% de fibras sintéticas e 0,20% de fibras de aço apresentaram um comportamento “*slip hardening*”, observando ainda, que o maior emprego de fibras poliméricas está associado a um melhor comportamento mecânico do concreto no estado último de serviço.

Ainda, por meio da análise dos corpos de prova durante o ensaio de tração na flexão, foi possível comprovar um comportamento dúctil do compósito incorporado com fibras, o qual permitiu, em todos os teores estudados, deformação plástica após tensão de pico, diferentemente do traço referência, o qual rompeu-se bruscamente, apresentando comportamento frágil. A Figura 12 apresenta alguns corpos de prova após seus rompimentos, evidenciando este aspecto citado.

Figura 12: Aspecto dos corpos de prova após rompimento por tração na flexão



Fonte: Autor, 2021

Após a ruptura do concreto, todos os compósitos incorporados com fibras foram capazes de absorver tensões e fornecer resistência residual aos corpos de prova, assim como demonstrado em estudos desenvolvidos por diversos autores, como Santos et al. (2018) e Nana et al (2021). Apesar da recente determinação de métodos de ensaio apresentados na NBR 16940 (ABNT, 2021), não foi possível avaliar a resistência residual por meio do equipamento utilizado, em razão, também, do avançado estágio em que se encontrava esta pesquisa no momento de publicação da referida norma. Por meio disto, sugere-se novos estudos que contemplem a avaliação dessa resistência, promovendo uma maior discussão quanto a influência das fibras no comportamento pós fissuração do concreto.

4 CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve por objetivo avaliar o comportamento mecânico do concreto convencional para pisos industriais quando produzido com a incorporação de diferentes macrofibras, e as principais conclusões obtidas ao final deste estudo, para os teores aqui utilizados, são:

- a) A incorporação de fibras promoveu uma redução no abatimento, sendo essa redução maior em traços com maiores teores de fibra. Ainda, em relação ao tipo de fibra, verificou-se valores de abatimento menores com a incorporação de fibras sintéticas;
- b) Ficou constatado uma redução significativa na resistência à compressão axial para os traços T02, T04 e T08, sendo este comportamento justificado por uma mistura deficitária ou incorreta incorporação de fibras na matriz, o qual se sugere novos estudos para avaliação da sua influência no compósito;
- c) Para o concreto incorporado com fibras híbridas, observou-se valores de resistência à compressão superiores nos traços com menores teores de fibras sintéticas, tendo o menor valor de resistência verificado no traço T08;
- d) A maior eficiência em relação à compressão axial foi verificada no concreto incorporado com 0,80% de fibras de aço (T03), obtendo um aumento significativo de 25% aos 7 dias e 20,8% aos 28 dias;
- e) Em relação à tração na flexão, registrou-se, para todos os traços, valores de resistência superiores ao traço referência, chegando à um aumento significativo de 68,95% no traço T03, com teor de 0,80% de fibras de aço;
- f) A incorporação de fibras sintéticas apresentou valores de resistência à tração na flexão inferiores aos traços produzidos com fibras de aço, porém, a incorporação dessas fibras ainda se mostra essencial no controle de microfissuras por retração nas primeiras idades;
- g) Por fim, constatou-se que as fibras promoveram comportamento capaz de absorver energia de deformação após o estágio de fissuração do compósito, demonstrando um comportamento dúctil.

Com isso, conclui-se que a incorporação de fibras em concreto para pisos industriais se mostra promissora, promovendo melhoras significativas na resistência à tração na flexão, altamente importante em pisos industriais devido a solicitação de cargas estáticas e dinâmicas, além de promover ductilidade ao compósito.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Lucas G. M.; BARBOSA, Anderson H.. **Análise comparativa do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras metálicas e sintéticas.** Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto, [s. l.], p. 11, 2020.

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

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16940:** Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16942:** Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR ISO 7438:** Materiais metálicos — Ensaio de dobramento. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

CÁCERES, Alan Renato Estrada; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; MONTE, Renata. **Avaliação do comportamento mecânico do concreto com reforço híbrido de fibras.** Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, [s. l.], p. 16, 2013.

CHODOUNSKY, Marcel Aranha; VIECILI, Fábio André. **PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO: ASPECTOS TEÓRICOS E EXECUTIVOS**. São Paulo: Reggenza, 2007. 373 p.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Concreto com Fibras. In: **Livro Concreto: Ciência e Tecnologia**. [S. l.]: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. cap. 37, p. 36.

GUIMARÃES, Diego. **Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos industriais**. 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GUIMARÃES, Diego. **Pisos industriais em concreto: Determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos**. 2010. 90 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GUO, Hui et al.. **Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness**. Construction and Building Materials, v. 275, Elsevier, p. 14, 2021.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 201 f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.

NANA, W. S. A. et al.. **Behaviour of macro-synthetic fibers reinforced concrete: Experimental, numerical and design code investigations**. Structures, v. 32, Elsevier, p. 16, 2021.

POLESELLO, Eduardo; SCHEFFEL, Mainara. **Uso de fibras de aço como alternativa para melhorar o desempenho do concreto para pisos industriais quanto à resistência à tração na flexão**. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto, [s. l.], p. 15, 2019.

SANTOS, Lucas Aparecido da Silva et al.. **Análise experimental comparativa da incorporação das fibras de aço ao concreto**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto, [s. l.], p. 15, 2018..