


DOI: 10.19180/1809-2667.v26n22024.23382

Submetido em: 17 abr. 2024


Aceito em: 13 dez. 2024

Publicado em: 13 jan. 2025

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais

Ester Borges de Albuquerque  <https://orcid.org/0009-0003-4830-875x>

Mestranda em Engenharia Civil na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ – Brasil. E-mail: esterborgesdealbuquerque@gmail.com.

Dylmar Penteado Dias  <https://orcid.org/0000-0003-1645-1538>

Doutor em Ciência dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Professor Associado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ – Brasil. E-mail: dylmar@uenf.br.

Resumo

A adição de fibras metálicas (elementos filiformes) a matrizes cimentícias tem por finalidade aumentar a tenacidade desses materiais frágeis. Já a técnica de confinamento lateral, empregando-se armadura em espiral ou estribos, é capaz de elevar resistência à compressão do núcleo confinado de matrizes cimentícias. Assim, este trabalho visou à utilização de fibras metálicas helicoidais (elementos bidimensionais) com o intuito de aumentar tanto a tenacidade quanto a resistência à compressão de concretos. Para tanto, um programa experimental foi realizado a fim de determinar a resistência à compressão e a resistência residual (índice de tenacidade) de cinco tipos de concreto, variando-se a fração volumétrica de fibras metálicas helicoidais de 0 (concreto de referência) a 2%, a cada 0,5%. Os resultados obtidos indicaram que as fibras metálicas helicoidais foram capazes de aumentar a resistência residual dos concretos em até 30% (concreto com 2% de fibras helicoidais), sendo esses aumentos lineares e diretamente proporcionais à quantidade de fibras adicionada, porém não tiveram influência significativa na resistência à compressão dos produtos finais. Contudo, mais ensaios precisam ser realizados, variando-se os parâmetros das fibras helicoidais, para a confirmação desses resultados preliminares.

Palavras-chave: concreto; fibras metálicas helicoidais; resistência residual; tenacidade.

Concrete reinforced by helical metal fibers

Abstract

The purpose of adding metallic fibers (filiform elements) to cementitious matrices is to increase the toughness of these brittle materials. The lateral confinement technique, using spiral reinforcement or stirrups, is capable of increasing the compressive strength of the confined core of cement matrices. Thus, this work aimed to use helical metal fibers (two-dimensional elements) with the aim of increasing both the toughness and the compressive strength of concrete. So, an experimental program was carried out in order to determine the compressive strength and residual strength (toughness index) of five types of concrete, varying the volume fraction of helical metal fibers from 0 (reference concrete) to 2%, every 0.5%. The results obtained indicated that the helical metal fibers were able to increase the residual strength of concrete by up to 30% (concrete with 2% of helical fibers), these increases being linear and directly proportional to the amount of fibers added, but they did not have a significant influence on the compressive strength of the final products. However, more tests need to be carried out, varying the helical fiber parameters, to confirm these preliminary results.

Keywords: concrete; helical metal fibers; residual strength; toughness.

Hormigón reforzado con fibras metálicas helicoidales

Resumen

La adición de fibras metálicas (elementos filiformes) a las matrices cementosas tiene como finalidad aumentar la tenacidad de estos frágiles materiales. La técnica de confinamiento lateral, mediante refuerzo en espiral o estribos, es capaz de incrementar la resistencia a la compresión del núcleo confinado de matrices de cemento. Así, este trabajo tuvo como objetivo utilizar fibras metálicas helicoidales (elementos bidimensionales) con el objetivo de aumentar tanto la tenacidad como la resistencia a la compresión del hormigón. Para ello se realizó un programa experimental con el fin de determinar la resistencia a la compresión y la resistencia residual (índice de tenacidad) de cinco tipos de concreto, variando la fracción en volumen de fibras metálicas helicoidales de 0 (hormigón de referencia) a 2%, cada 0.5%. Los resultados obtenidos indicaron que las fibras helicoidales lograron aumentar la resistencia residual del concreto hasta en un 30% (hormigón con 2% de fibras helicoidales), siendo estos aumentos lineales y directamente proporcionales a la cantidad de fibras agregadas, pero no tuvieron un influencia significativa en la resistencia a la compresión de los productos finales. Sin embargo, es necesario realizar más pruebas, variando los parámetros de las fibras helicoidales, para confirmar estos resultados preliminares.

Palabras clave: hormigón; fibras metálicas helicoidales; resistencia residual; tenacidad.

Este documento é protegido por Copyright © 2024 pelos Autores



Esta obra está licenciada sob uma Licença Creative Commons. Os usuários têm permissão para copiar e redistribuir os trabalhos por qualquer meio ou formato, e também para, tendo como base o seu conteúdo, reutilizar, transformar ou criar, com propósitos legais, até comerciais, desde que citada a fonte.

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteado Dias

1 Introdução

Matrizes cimentícias, tais como concretos e argamassas, são caracterizadas, principalmente, como materiais de característica frágil, de baixa tenacidade e boa resistência à compressão (Dias; Thaumaturgo, 2005; Li *et al.*, 2023). Ambas as matrizes, em seu estado endurecido, apresentam fissuras internas que podem comprometer a durabilidade e propiciar ruptura abrupta do material quando sujeito a um estado de carregamento. Neste contexto, a adição de fibras de aço a essas matrizes confere aumento da deformação pós-fissuração, melhora da tenacidade e durabilidade, porém sem ganho significativo de resistência à compressão (Dias; Thaumaturgo, 2005; Gomes; Dias; Silva, 2020; Granju; Balouch, 2005; Li *et al.*, 2023; Peng *et al.*, 2022; Rao, 1979; Reddy; Ganesan, 2023).

Por outro lado, o confinamento lateral da matriz cimentícia com a utilização de estribos na forma espiral, como alternativa ao estribo convencional, promove melhora na ductilidade, desempenho da resistência ao cisalhamento, dissipação de energia e capacidade de deformação na junção de elementos estruturais, tais como vigas e pilares (Cao *et al.*, 2023; Fan; Zhao; Yang, 2018; Karayannis; Chalioris, 2013).

Desta maneira, o reforço de matrizes cimentícias com fibras metálicas helicoidais pode ser uma alternativa para ganhos de tenacidade e de resistência à compressão em função da suposta interação entre aumento da deformação pós-pico e confinamento lateral localizado/pontual que essas fibras metálicas helicoidais podem proporcionar aos concretos, o que foi justamente o foco deste inédito trabalho científico.

2 Metodologia

Os materiais utilizados na confecção dos concretos foram:

- agregado miúdo - areia quartzosa de rio, lavada, com partículas menores do que 4,8 mm, seca em estufa a 110 °C durante 24 h, com massa específica igual a 2,69 g/cm³, determinada segundo a ABNT NBR NM 52:2009;
- agregado graúdo - brita proveniente de jazidas localizadas no Município de Campos dos Goytacazes/RJ, lavada durante o processo de peneiramento e seca em estufa a 110 °C por 24 h, com diâmetro máximo 9,5 mm (brita zero) e massa específica igual a 2,84 g/cm³, determinada segundo a ABNT NBR NM 53:2009;
- cimento Portland - tipo CPIIE-32, da marca Mauá, com massa específica igual a 2,89 g/cm³, determinada de acordo com a ABNT NBR NM 16605:2017;
- água - proveniente da rede de abastecimento do Município de Campos dos Goytacazes/RJ (Concessionária Águas do Paraíba);
- fibras metálicas helicoidais - suas características foram fornecidas pelo fabricante (Tabela 1). A massa específica foi determinada pelo princípio de Arquimedes, sendo igual a 3,55 g/cm³. Outras especificações importantes fornecidas pelo fabricante foram: fibra helicoidal retificada em ambos os lados, extremidade fechada, enrolamento direto, sem passo, superfície não oleada.

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

Tabela 1. Características das fibras metálicas helicoidais

| Característica | Dimensão |
|------------------------|----------|
| Diâmetro externo (mm) | 11 |
| Diâmetro médio (mm) | 9 |
| Diâmetro interno (mm) | 7 |
| Diâmetro do arame (mm) | 2 |
| Comprimento (mm) | 30 |
| Número de espiras | 11 |

Fonte: Fabricante (RC Molas Indústria e Comércio de Molas Ltda.)

A dosagem utilizada, em massa, na confecção dos concretos foi 1:2:3 (cimento:areia:brita) com relação água-cimento de 0,60. O quantitativo de materiais por m³ é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidade de material empregado por m³ de concreto

| Material | Quantidade (kg) |
|------------------|-----------------|
| Cimento CPIIE-32 | 2,8 |
| Areia | 5,6 |
| Brita 0 | 8,4 |
| Água | 1,7 |

Fonte: Próprios autores (2024)

Os concretos foram fabricados em uma betoneira com capacidade igual a 145 litros, previamente umedecida. As misturas obedeceram à seguinte sequência:

- introdução de toda a areia e cimento na betoneira parada e mistura até a completa homogeneização;
- adição de metade da quantidade da água com a betoneira em movimento e mistura até a completa homogeneização;
- introdução de toda a quantidade de brita com a betoneira em movimento e mistura até a completa homogeneização;
- adição da metade restante da água com a betoneira em movimento e mistura até a completa homogeneização;
- adição da fração volumétrica de fibras metálicas helicoidais com a betoneira em movimento e mistura até a completa homogeneização.

O adensamento dos corpos de prova de concreto (sem e com fibras) foi feito em duas camadas durante 10 s, por meio do uso de mesa vibratória. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e colocados em água com cal durante 27 dias até a data de ruptura.

Ante da realização dos ensaios mecânicos, a face superior de cada corpo de prova foi retificada numa retificadora horizontal pneumática de cilindros da marca Werk-Schott (Figura 1).

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

Figura 1. Retificação



(a) Retificadora

(b) Corpos de prova retificados

Fonte: Próprios autores (2024)

Para determinação das propriedades mecânicas foram moldados, conforme as recomendações da ABNT NBR 5738:2015, cinco tipos de concreto com diferentes quantidades de fibras metálicas helicoidais, variando a fração volumétrica de 0% a 2% em relação ao volume total de concreto, com aumento de 0,5% entre as dosagens.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 28 dias (Figura 2a) em três corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm para cada fração volumétrica de fibras metálicas helicoidais, seguindo as prescrições da ABNT NBR 5739:2018. Todos os corpos de prova foram ensaiados em uma prensa hidráulica da marca Solotest com capacidade de 1.000 kN e carregamento de 0,30 MPa/s até a ruptura.

Para a determinação do fator de resistência residual – índice de tenacidade –, aos 28 dias (Figura 2b), foram ensaiados três corpos de prova prismáticos de 100 mm x 100 mm x 350 mm para cada fração volumétrica de fibras, conforme as diretrizes da ASTM C 1018:1997. Todos os corpos de prova foram ensaiados em uma prensa hidráulica da marca Instron 5582 com capacidade de 100 kN e velocidade de carregamento de 0,05 mm/min até a ruptura.

Figura 2. Ensaio mecânicos



(a) Compressão

(b) Flexão a três pontos

Fonte: Próprios autores (2024)

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
 Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

3 Resultados e discussão

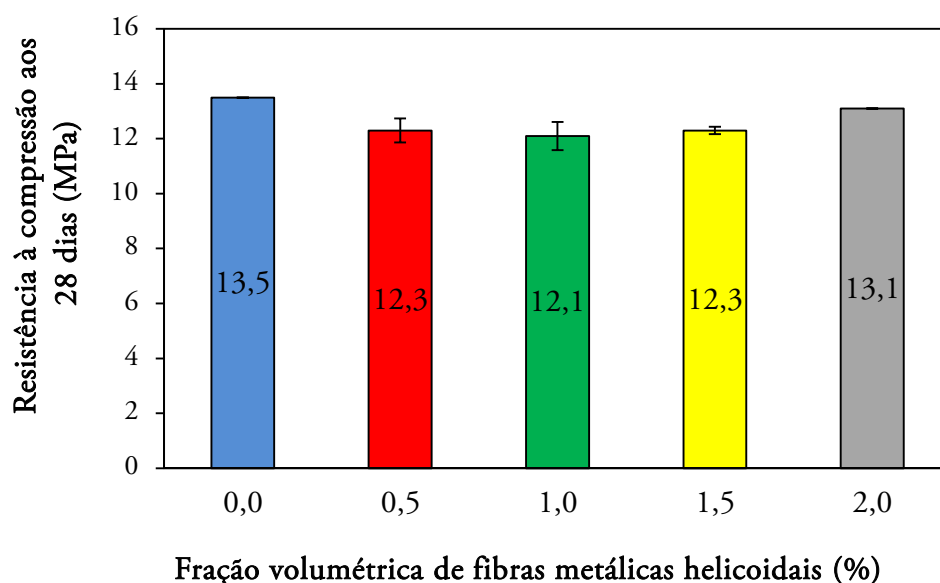
3.1 Resistência à compressão

Os valores médios de resistência à compressão dos concretos são mostrados no Gráfico 1. Da análise estatística (ANOVA) foi possível concluir que os concretos possuem diferenças significativas com relação à resistência à compressão, pois P-valor encontrado foi menor do que 0,05 (Tabela 3), onde SQ é a soma dos quadrados, GL é o grau de liberdade, QM é o quadrado médio, F é o valor da estatística, P-valor é a medida estatística que permite determinar a significância dos resultados obtidos em um teste de hipótese e, finalmente, F_c é o valor crítico da estatística. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 3, sendo $DMS_{0.05}$ e $DMS_{0.01}$ as diferenças mínimas significativas a 5% e 1% de significância, respectivamente, e $Q_{0.05}$ e $Q_{0.01}$ as diferenças entre os grupos a 5% e 1% de significância, respectivamente.

Assim, por meio do Teste de Tukey, com nível de significância igual a 5%, foi possível verificar que os concretos com frações volumétricas de fibras iguais a 0% (referência) e 2,0% não possuem diferença de resistência à compressão, bem como aqueles com 0,5%, 1,0% e 1,5% também não diferem entre si em relação a essa propriedade mecânica. Contudo, os concretos com 0% e 2,0% diferem dos restantes (0,5%, 1,0% e 1,5%), já que os valores de $Q_{0.05}$ foram superiores a 5% (nível de significância adotado).

Logo, é possível concluir que há necessidade de se utilizar, pelo menos, uma fração volumétrica de 2,0% de fibras para manutenção da resistência mecânica, ainda que a perda de resistência não tenha sido muito significativa para as frações inferiores. Como não houve aumento de resistência à compressão para nenhum concreto com fibras em relação à referência (0%), conclui-se que o esperado efeito de confinamento lateral não ocorreu.

Gráfico 1. Resistência à compressão aos 28 dias em função da fração volumétrica de fibras



Fonte: Próprios autores (2024)

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

Tabela 3. Análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão

| V _f (%) | f _c (MPa) | Média (MPa) | Variância | ANOVA | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------|-----------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------|---------------------------|----------------|--|
| | | | | SQ | GL | QM | F | P-valor | F _c | |
| | | | | Fonte da variação - entre grupos | | | | | | |
| | | | | 4,294599 | 4 | 1,07365 | 11,42007 | 0,000953 | 3,47805 | |
| | | | | Fonte da variação - dentro dos grupos | | | | | | |
| T1 = 0 | 13,47 13,48 13,48 | M1 = 13,477 | 4,05E-05 | 0,940143 | 10 | 0,094014 | | | | |
| | | | | Total | | | | | | |
| T2 = 0,5 | 12,72 11,84 12,28 | M2 = 12,281 | 0,196817 | 5,234741 | 14 | | | | | |
| | | | | TESTE DE TUKEY | | | | | | |
| | | | | Comparação entre pares | | DMS _{.05} = 0,4647 | | Q _{.05} = 4,1534 | | |
| | | | | | | DMS _{.01} = 0,5755 | | Q _{.01} = 5,1439 | | |
| T3 = 1,0 | 12,60 11,58 12,09 | M3 = 12,090 | 0,257355 | T1:T2 | M1 = 13,477 M2 = 12,281 | 1,20 | | Q = 10,70% | (= 0,00000) | |
| | | | | T1:T3 | M1 = 13,477 M3 = 12,090 | 1,39 | | Q = 12,39% | (= 0,00000) | |
| | | | | T1:T4 | M1 = 13,477 M4 = 12,344 | 1,13 | | Q = 10,13% | (= 0,00000) | |
| T4 = 1,5 | 12,22 12,47 12,34 | M4 = 12,344 | 0,015834 | T1:T5 | M1 = 13,477 M5 = 13,101 | 0,37 | | Q = 3,34% | (= 0,15979) | |
| | | | | T2:T3 | M2 = 12,281 M3 = 12,090 | 0,19 | | Q = 1,70% | (= 0,75086) | |
| | | | | T2:T4 | M2 = 12,281 M4 = 12,344 | 0,06 | | Q = 0,57% | (= 0,99425) | |
| T5 = 2,0 | 13,10 13,11 13,10 | M5 = 13,101 | 2,53E-05 | T2:T5 | M2 = 12,281 M5 = 13,101 | 0,82 | | Q = 7,36% | (= 0,00020) | |
| | | | | T3:T4 | M3 = 12,090 M4 = 12,344 | 0,25 | | Q = 2,26% | (= 0,51052) | |
| | | | | T3:T5 | M3 = 12,090 M5 = 13,101 | 1,01 | | Q = 9,06% | (= 0,00001) | |
| | | | | T4:T5 | M4 = 12,344 M5 = 13,101 | 0,76 | | Q = 6,79% | (= 0,00055) | |

Fonte: Próprios autores (2024)

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

3.2 Índice de tenacidade

Na Tabela 4 são apresentados os índices de tenacidade e os fatores de resistência residual calculados de acordo com a ASTM C 1018:1997.

É possível observar aumento gradual nos índices I5, I10 e I20 para cada fração volumétrica de fibras, quando analisada individualmente. Já a comparação entre os diferentes volumes de fibras mostra que esses índices não diferem muito entre si.

Os índices correspondem ao comportamento linear elástico dos materiais, ou seja, antes do aparecimento da primeira trinca. Logo, é compreensível que não existam diferenças significativas para diferentes frações volumétricas, pois a atuação das fibras tem início *a posteriori*, quando do início da deformação plástica dos materiais.

É importante ressaltar que esses índices têm o mesmo significado independentemente do tamanho da seção transversal e da extensão dos corpos de prova.

Tabela 4. Índice de tenacidade e fator de resistência residual, calculados segundo a ASTM C 1018:1997

| Índice | Fração volumétrica de fibras helicoidais (%) | | | | |
|--------|----------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|
| | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| I5 | 5,26 | 5,25 | 5,21 | 5,66 | 5,70 |
| I10 | 10,57 | 10,87 | 10,20 | 11,22 | 11,63 |
| I20 | 19,05 | 20,14 | 20,17 | 21,62 | 22,66 |
| R5-10 | 106,30 | 112,40 | 99,82 | 111,10 | 118,60 |
| R10-20 | 84,80 | 92,70 | 99,67 | 104,01 | 110,30 |

Fonte: Próprios autores (2024)

3.3 Fator de resistência residual

Os fatores de resistência residual R5-10 e R10-20 (Tabela 4) representam a resistência média retida após o aparecimento da primeira trinca. Valores próximos ou acima de 100 correspondem a um comportamento perfeitamente plástico do material.

Verifica-se, assim, aumento de tenacidade dos concretos a partir da fração volumétrica de fibras de 1,0%, sendo que o melhor desempenho foi obtido pelo concreto com 2,0% (ganho de tenacidade de 30% em relação ao concreto de referência – sem fibras).

Esse comportamento pós-fissuração é desejável para muitas aplicações que exigem elevada tenacidade, e pode ser alcançado ou excedido somente pela seleção cuidadosa do tipo de fibra, fração volumétrica de fibras, bem como parâmetros da matriz cimentícia.

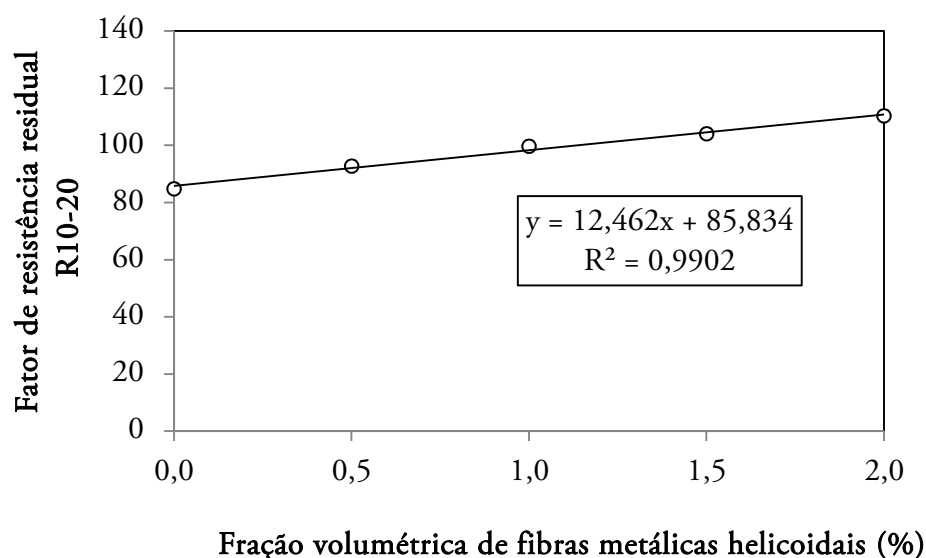
Logo, as fibras metálicas helicoidais não foram capazes de aumentar a resistência à compressão dos concretos pelo efeito de confinamento lateral, mas atuaram de maneira eficiente quanto ao aumento de tenacidade (função principal quando da inclusão de fibras nos materiais cimentícios).

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

Assim, mais ensaios precisam ser realizados, variando-se os parâmetros das fibras, para a confirmação dos resultados preliminares ou mesmo para a obtenção de melhores desempenhos dos concretos com relação à resistência à compressão e à tenacidade.

No Gráfico 2 mostra-se que o fator de resistência residual e a fração volumétrica de fibras são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, o aumento de uma implica o aumento da outra. Esse comportamento mostra que há necessidade, também, de se analisar maiores frações volumétricas de fibras, visando alcançar maiores valores de tenacidade e, possivelmente, aumentos de resistência à compressão, já que com 2,0% a resistência mecânica foi igual a do concreto de referência.

Gráfico 2. Fator de resistência residual R10-20 em função da fração volumétrica de fibras helicoidais, calculados segundo a ASTM C 1018:1997



Fonte: Próprios autores (2024)

4 Considerações finais

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, foi possível concluir:

- a incorporação de fibras metálicas helicoidais aos concretos não foi capaz de aumentar a resistência à compressão destes, ou seja, o efeito de confinamento lateral não ficou evidenciado;
- o aumento da tenacidade dos concretos foi diretamente proporcional ao aumento na fração volumétrica de fibras helicoidais;
- novos experimentos precisam ser realizados, com frações volumétricas mais altas e diferentes parâmetros das fibras metálicas helicoidais, para verificar se existe a possibilidade de se obter ganhos de resistência à compressão devido ao efeito de confinamento lateral das fibras helicoidais.

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C 1018**: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete: Using Beam With Third-Point Loading. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, 1997.
- CAO, X.; QUAN, Y.; REN, Y.; FU, F.; JIN, Q.; HE, D.; ZHENG, Y. Experiment study on reactive powder concrete beams using spirals reinforcement under torsion. **Engineering Structures**, v. 290, p. 116361, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116361>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623007769?via%3Dihub>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- DIAS, D. P.; THAUMATURGO, C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000575>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- FAN, G.; ZHAO, Z.; YANG, G. Cyclic Response of Reinforced Concrete Shear Walls with Continuous Rectangular Spiral Stirrups. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 1771-1781, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1134-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-017-1134-4>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- GOMES, R. F.; DIAS, D. P.; SILVA, F. A. Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 107, p. 102568, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102568>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844220301439>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- GRANJU, J.-L.; BALOUCH, U.S. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 572-577, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604002856>. Acesso em: 2 jan. 2025.

Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais
Ester Borges de Albuquerque, Dylmar Penteadó Dias

KARAYANNIS, C. G.; CHALIORIS, C. E. Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 86-97, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813003462>. Acesso em: 2 jan. 2025.

LI, L.; YAN, C.; ZHANG, N.; FAROOQI, M. U.; XU, S.; DEIFALLA, A. F. Flexural fracture parameters of polypropylene fiber reinforced geopolymer. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 1839-1855, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423004970>. Acesso em: 2 jan. 2025.

PENG, K. D.; ZENG, J. J.; HUANG, B. T.; HUANG, J. Q.; ZHUGE, Y.; DAI, J. G. Bond performance of FRP bars in plain and fiber-reinforced geopolymer under pull-out loading. **Journal of Building Engineering**, v. 57, p. 104893, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104893>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222009068>. Acesso em: 2 jan. 2025.

RAO, C. V. S. K. Effectiveness of random fibres in composites. **Cement and Concrete Research**, v. 9, n. 6, p. 685-693, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(79\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(79)90063-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884679900632>. Acesso em: 2 jan. 2025.

REDDY, P. C.; GANESAN, R. Comparative study of compressive strength of novel steel fiber reinforced geopolymer concrete and conventional concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 504-508, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.352>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322072042>. Acesso em: 2 jan. 2025.

COMO CITAR (ABNT): ALBUQUERQUE, E. B.; DIAS, D. P. Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais. *Revista Vértices*, v. 26, n. 2, p. e26223382, 2024. DOI: <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v26n22024.23382>. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/23382>.

COMO CITAR (APA): Albuquerque, E. B. & Dias, D. P. (2024). Concreto reforçado por fibras metálicas helicoidais. *Revista Vértices*, 26(2), e26223382. <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v26n22024.23382>.