

CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS SINTÉTICAS: CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS

SYNTHETIC MACRO-FIBER REINFORCED CONCRETE: MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND MECHANICAL PERFORMANCE

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.033-004>

João Paulo de Almeida Figueiredo

Mestrado profissional em andamento em Materiais-RJ
Centro Universitário de Volta Redonda, UniFOA, Brasil

E-mail: eng.jpaf@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0822793648407303>

Diego Sebastian Carvalho de Souza

Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental, PUC-RJ
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

E-mail: dscs.gp@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-3440-8302>

Thiago Sebastian Carvalho de Souza

Graduado em Administração, Universidade Veiga de Almeida
Universidade Federal Fluminense

E-mail: tsebastian@id.uff.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4825-227X>

Danielle Marçal Vilameá de Souza

Graduado em Arquitetura, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

E-mail: danielle.marcal.souza@uerj.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-4288-760X>

RESUMO

O concreto reforçado com macrofibras sintéticas tem se consolidado como uma alternativa tecnicamente consistente aos sistemas tradicionais de armadura, em razão de sua aptidão para aprimorar o desempenho mecânico e mitigar a propagação de fissuras. Este estudo analisa as propriedades microestruturais, térmicas e mecânicas do concreto com incorporação de macrofibras sintéticas, buscando estabelecer relações entre a constituição do material e seu comportamento em escala macroscópica. As investigações experimentais compreenderam a caracterização térmica das fibras por meio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA), bem como avaliações microestruturais e mineralógicas do compósito utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX). Foram produzidas misturas de concreto com distintos teores de macrofibra, submetidas a ensaios de compressão axial aos 7 e 28 dias. Os resultados demonstram que a adição das macrofibras sintéticas não prejudica a

resistência à compressão, favorecendo o desempenho pós-fissuração e intensificando a interação entre fibra e matriz cimentícia. As análises microestruturais evidenciaram distribuição uniforme das fibras e aderência satisfatória à matriz, corroborando o comportamento mecânico observado. Os achados confirmam a viabilidade técnica das macrofibras sintéticas como elementos de reforço em compósitos cimentícios, ampliando seu potencial de aplicação em sistemas estruturais e semi-estruturais.

Palavras-chave: Concreto reforçado; Macrofibras sintéticas; Compósitos cimentícios.

ABSTRACT

Synthetic macro-fiber reinforced concrete has emerged as a viable alternative to conventional reinforcement systems due to its potential to enhance mechanical performance and control cracking behavior. This chapter investigates the microstructural, thermal, and mechanical characteristics of concrete reinforced with synthetic macro-fibers, aiming to establish correlations between material structure and macroscopic performance. Experimental analyses included thermal characterization of the macro-fibers using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA), as well as microstructural and mineralogical evaluations of the composite through Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD). Concrete mixtures with different macro-fiber contents were produced and tested under axial compression at 7 and 28 days. The results indicate that the incorporation of synthetic macro-fibers does not adversely affect compressive strength while contributing to improved post-cracking behavior and enhanced fiber–matrix interaction. Microstructural analyses revealed homogeneous fiber distribution and adequate bonding with the cementitious matrix, supporting the observed mechanical performance. The findings confirm the technical feasibility of synthetic macro-fibers as reinforcement elements in cement-based composites and provide a scientific basis for their application in structural and semi-structural concrete systems.

Keywords: Reinforced concrete; Synthetic macro-fibers; Cementitious composites.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é amplamente reconhecido como o material construtivo mais utilizado no mundo, em função de sua versatilidade, disponibilidade de matérias-primas e adequada resistência à compressão (IBRACON, 2006; Neville, 2015). Entretanto, do ponto de vista microestrutural, trata-se de um material quase frágil, com reduzida resistência à tração e limitada capacidade de absorção de energia, características que favorecem o surgimento e a propagação de fissuras sob diferentes estados de carregamento (Mehta;

Monteiro, 2008; Neville; Brooks, 2013). Esses aspectos motivam a busca por estratégias capazes de melhorar o desempenho mecânico e o comportamento pós-fissuração dos compósitos cimentícios.

Entre as soluções investigadas, a incorporação de fibras ao concreto destaca-se como uma alternativa eficiente para o controle da fissuração e o aumento da tenacidade do material. Estudos indicam que a atuação das fibras ocorre principalmente por meio do mecanismo de ponte de fissuras, promovendo redistribuição de tensões e retardando a evolução do dano (Medeiros, 2012; Costa, 2015). Nesse contexto, as macrofibras sintéticas, especialmente as à base de polímeros, têm recebido atenção crescente devido à resistência à corrosão, estabilidade química e facilidade de processamento, quando comparadas às fibras metálicas (Figueiredo et al., 2012; Barreda; Iaiani; Sota, 2000).

O desempenho do concreto reforçado com macrofibras sintéticas está diretamente associado às propriedades físicas, térmicas e morfológicas das fibras, bem como à qualidade da interação fibra–matriz cimentícia. A caracterização térmica de polímeros, por meio de técnicas como DSC e TGA, permite avaliar a estabilidade do material e seu comportamento frente às temperaturas envolvidas no processo de hidratação do cimento (Akcelrud, 2007; Canevarolo Jr., 2003; Manrich, 2005).

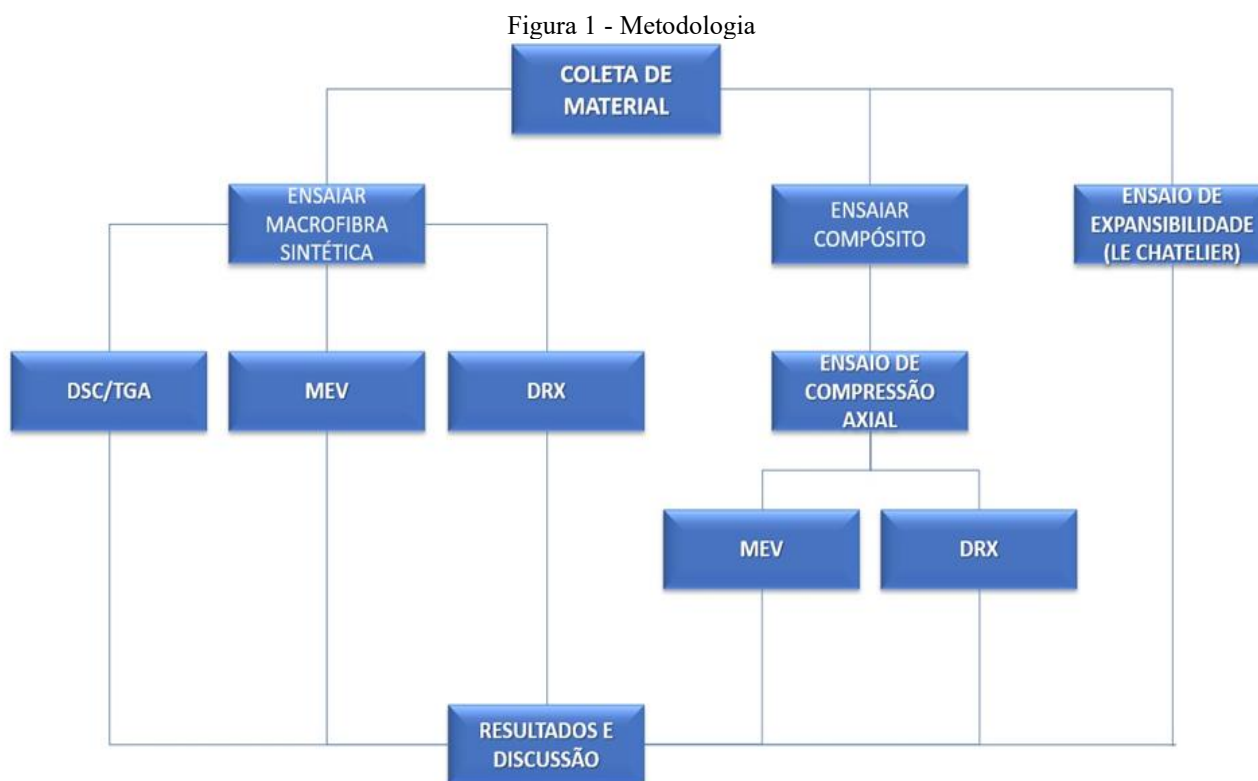
De forma complementar, análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios X possibilitam compreender os mecanismos de aderência, a dispersão das fibras e a evolução da microestrutura do compósito (Mehta; Monteiro, 2014; Silva, 2000; Hoppe Filho, 2008).

Nesta perspectiva, a investigação aprofundada e integrada das propriedades microestruturais, térmicas e mecânicas do concreto reforçado com macrofibras sintéticas não representa apenas uma etapa experimental, mas o alicerce indispensável para decifrar a complexa interação fibra-matriz. A compreensão da morfologia da interface, aliada à estabilidade térmica do polímero e à resposta mecânica sob carregamento, fornece o embasamento técnico-científico necessário para validar o uso desses compósitos cimentícios avançados. Tal abordagem é vital para garantir a segurança e a durabilidade em aplicações de larga escala, permitindo que esses materiais transitem de soluções inovadoras para padrões normatizados em sistemas estruturais e semiestruturais de alta responsabilidade.

Este capítulo fundamenta-se nos resultados experimentais obtidos por João Paulo de Almeida Figueiredo, autor principal deste trabalho, durante o desenvolvimento de sua dissertação de mestrado intitulada 'Desenvolvimento de concreto reforçado com macrofibra sintética para aplicação em piso industrial' (UniFOA, 2022). A utilização desses dados originais visa expandir a discussão técnica sobre a microestrutura das macrofibras, consolidando o estudo em um formato de capítulo de livro para ampliar o alcance do conhecimento gerado na pesquisa de campo e laboratório.

2 METODOLOGIA

A metodologia experimental foi estruturada com o objetivo de avaliar de forma integrada o comportamento térmico, microestrutural e mecânico do concreto reforçado com macrofibras sintéticas. O delineamento do programa experimental seguiu uma sequência lógica de etapas, conforme apresentado na Figura 1, contemplando a caracterização dos materiais, a produção dos compósitos cimentícios, a realização dos ensaios laboratoriais e a análise dos resultados.



Fonte: Figueiredo (2022)

Inicialmente, a macrofibra sintética foi submetida a análises térmicas, microestruturais e mineralógicas, utilizando técnicas amplamente empregadas na caracterização de materiais poliméricos. As análises de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA) foram realizadas no Laboratório da UniFOA (Unidade Três Poços), em equipamento Perkin Elmer STA 6000, previamente calibrado conforme as especificações do fabricante. As amostras, com massa aproximada de 3,458 mg, foram acondicionadas em porta-amostras adequados, sob fluxo constante de nitrogênio de 50 mL·min⁻¹, taxa de aquecimento de 10 °C·min⁻¹ e faixa de temperatura entre 20 °C e 950 °C. A caracterização morfológica da macrofibra foi conduzida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando equipamento HITACHI TM 3000, operando com tensão de 15 kV, detector de elétrons secundários e ampliação de 200×, permitindo a avaliação das características físicas e superficiais do

material. A análise mineralógica complementar foi realizada por Difração de Raios X (DRX), visando à identificação de possíveis fases cristalinas associadas à macrofibra.

A caracterização do compósito cimentício incluiu avaliações no estado fresco e endurecido. A consistência do concreto fresco foi determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR 16889 (2020), sendo obtido abatimento médio de 10 ± 2 cm para todas as misturas.

No estado endurecido, o desempenho mecânico foi avaliado por ensaios de compressão axial, realizados de acordo com a ABNT NBR 5739 (2007). Foram analisados concretos com resistências características estimadas de 25 MPa e 40 MPa, produzidos sem adição de macrofibra sintética e com adição de macrofibra nos teores de $2,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $4,00 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $6,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mantendo-se constantes as proporções dos demais constituintes para cada classe de resistência.

Os corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100×200 mm, foram moldados conforme a ABNT NBR 5738 (2015), sendo confeccionados cinco corpos de prova por traço e por idade, totalizando 80 corpos de prova, considerando as idades de 7 e 28 dias. O adensamento foi realizado manualmente com haste metálica, conforme procedimento normativo, e a desmoldagem ocorreu após 24 horas, seguida de cura por imersão em água a 23 ± 2 °C, conforme a ABNT NBR 9479 (1993), até as idades de ensaio. Como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Corpos de Prova



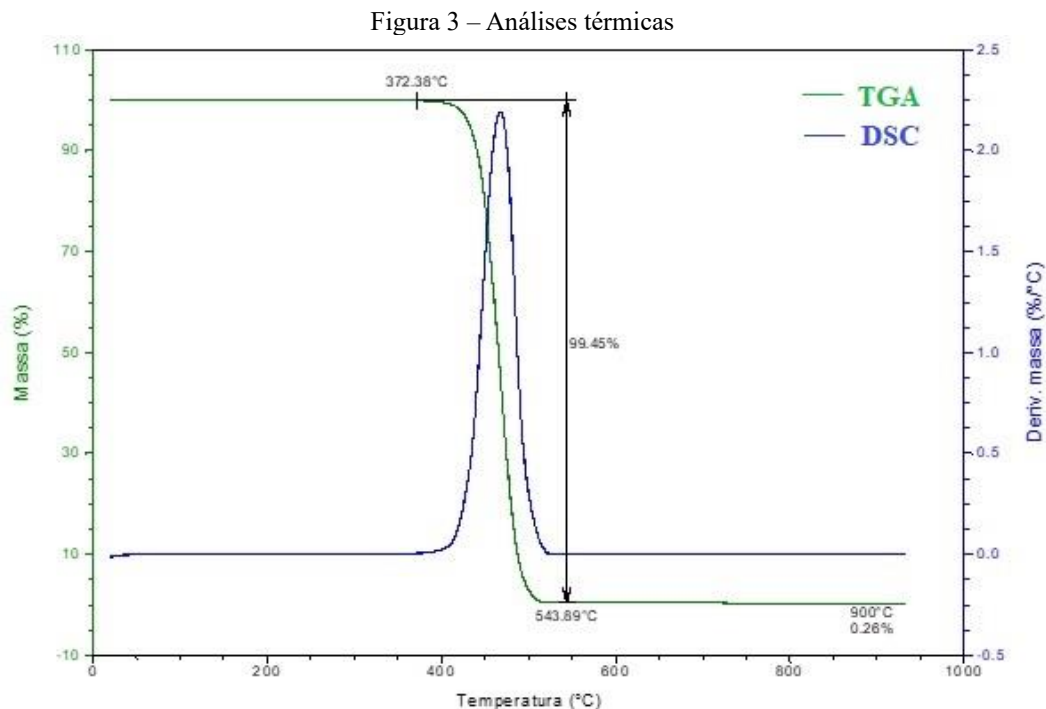
Fonte: Figueiredo (2022)

Os ensaios de compressão axial foram realizados em prensa EMIC, modelo PC 150C, com capacidade de 100 MPa, utilizando bases de neoprene, sendo a resistência à compressão determinada pela razão entre a força máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova, conforme preconizado

pela norma vigente. Após os ensaios mecânicos, amostras dos corpos de prova rompidos foram submetidas à análise microestrutural por MEV, utilizando o mesmo equipamento e parâmetros empregados na caracterização da macrofibra, com o objetivo de avaliar a morfologia da matriz cimentícia, a distribuição das macrofibras e os mecanismos de interação fibra–matriz. De forma complementar, as amostras foram analisadas por Difração de Raios X em difratômetro Shimadzu XRD 6100, operando com tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, radiação $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $2^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ e intervalo angular entre 10° e 80° . Adicionalmente, a compatibilidade volumétrica entre o cimento Portland e a macrofibra sintética foi avaliada por meio do ensaio de expansibilidade pelo método das agulhas de Le Chatelier, conforme a ABNT NBR 11582 (1991).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises térmicas por TGA e DSC evidenciaram o comportamento de estabilidade térmica da macrofibra sintética utilizada no compósito. Observou-se que a amostra apresentou apenas um evento significativo de perda de massa, caracterizado por um único pico na curva derivativa, indicando um mecanismo de decomposição térmica predominantemente único. Como pode ser compreendida pela Figura 3.



Fonte: Figueiredo (2022)

A macrofibra manteve estabilidade térmica até aproximadamente 372°C , temperatura a partir da qual se iniciou a degradação acentuada do material, resultando em perda de praticamente toda a massa

inicial, com resíduo final de apenas 0,26% a 900 °C. Esse comportamento confirma a compatibilidade térmica da macrofibra com aplicações em matrizes cimentícias, uma vez que as temperaturas envolvidas em processos de hidratação do cimento e em condições normais de serviço são significativamente inferiores a esse limite. Resultados semelhantes de estabilidade térmica foram reportados por Lopes (2016), ao analisar compósitos poliméricos reforçados, reforçando a coerência do comportamento observado.

A caracterização morfológica da macrofibra por microscopia eletrônica de varredura evidenciou uma estrutura contínua e homogênea, sem descontinuidades aparentes, o que favorece sua atuação como elemento de reforço no compósito cimentício. Essa morfologia foi fundamental para compreender o comportamento da fibra incorporada à matriz de concreto, especialmente no que se refere à dispersão e interação fibra–matriz observadas nas análises subsequentes do compósito.

Os resultados de resistência à compressão mostraram que a adição de macrofibra sintética não comprometeu o desempenho mecânico do concreto. Para o concreto com resistência característica de 25 MPa, observou-se manutenção da resistência aos 28 dias para todas as dosagens avaliadas, indicando que a presença da fibra não interferiu negativamente no desenvolvimento da resistência. No concreto de 40 MPa, os valores médios aos 28 dias variaram entre 35,31 e 36,74 MPa, comportamento compatível com a evolução da resistência prevista pela NBR 5739, que indica crescimento progressivo até idades superiores. Esses resultados demonstram que a incorporação da macrofibra sintética não inviabiliza a aplicação estrutural do material.

A análise do coeficiente de variação revelou maior dispersão dos resultados para os concretos com adição de macrofibra, especialmente nas maiores dosagens. Esse comportamento está associado, principalmente, às condições de mistura adotadas, uma vez que o concreto não foi preparado em caminhão betoneira conforme recomendação do fabricante, o que pode ter favorecido a heterogeneidade do compósito. Tendência semelhante foi observada por Fernandes (2018), que relatou aumento da variabilidade dos resultados mecânicos com o acréscimo do teor de fibras em compósitos cimentícios.

As análises de MEV dos fragmentos de corpos de prova após o ensaio de compressão evidenciaram boa homogeneização da macrofibra nas dosagens de 2,25 e 4,0 kg/m³, com distribuição uniforme na matriz cimentícia. Esse comportamento está de acordo com a faixa de dosagem recomendada pelo fabricante, indicando uma interação eficiente entre fibra e matriz. Em contrapartida, na dosagem de 6,25 kg/m³, observou-se indício de segregação parcial da fibra, sugerindo dificuldade de dispersão em teores superiores ao recomendado, o que pode influenciar tanto a variabilidade dos resultados mecânicos quanto a microestrutura do compósito. Resultados semelhantes foram relatados por Francisco (2017), que associou a segregação observada em análises microestruturais a elevadas proporções de reforço e condições inadequadas de mistura.

Os difratogramas de raios X mostraram que as fases cristalinas predominantes do compósito permaneceram associadas aos constituintes típicos do concreto, como sílica, alumina e cal. A presença da macrofibra polimérica não alterou de forma significativa o padrão cristalográfico da matriz, sendo seus principais picos concentrados em baixos ângulos, coincidentes com regiões associadas à sílica. Não foi observada uma tendência clara de aumento da intensidade dos picos com o acréscimo do teor de fibra, possivelmente devido à heterogeneidade do compósito e às deformações induzidas pelos ensaios de compressão realizados previamente, que podem alterar a intensidade e o posicionamento dos picos difratados.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a macrofibra sintética avaliada apresenta comportamento compatível com sua aplicação em compósitos cimentícios, tanto do ponto de vista térmico quanto mecânico e microestrutural. As análises térmicas por TGA e DSC indicaram elevada estabilidade térmica da macrofibra até aproximadamente 372 °C, com decomposição ocorrendo em um único evento, o que confirma sua adequação às condições de processamento e uso do concreto, nas quais as temperaturas permanecem muito inferiores a esse limite.

A incorporação da macrofibra sintética ao concreto não comprometeu a resistência à compressão aos 28 dias, tanto para os concretos de 25 MPa quanto para os de 40 MPa, evidenciando que o reforço polimérico pode ser utilizado sem prejuízo ao desempenho mecânico do material. As variações observadas nos coeficientes de variação estão associadas principalmente às condições de mistura e ao aumento do teor de fibra, reforçando a importância do controle do processo de dosagem e homogeneização do compósito.

As análises microestruturais por MEV confirmaram que dosagens de até 4,0 kg/m³ proporcionaram boa dispersão da macrofibra na matriz cimentícia, favorecendo a interação fibra–matriz. Em contrapartida, teores superiores resultaram em indícios de segregação, indicando um limite prático de incorporação para garantir a homogeneidade do compósito. Os resultados de DRX evidenciaram que a presença da macrofibra não alterou significativamente as fases cristalinas do concreto, mantendo a integridade mineralógica da matriz.

Diante do conjunto de resultados apresentados, verifica-se que a incorporação de macrofibra sintética ao concreto, quando realizada em dosagens adequadas, não compromete a resistência à compressão nem a estabilidade físico-química do compósito, ao mesmo tempo em que preserva a homogeneidade microestrutural da matriz cimentícia. As análises térmicas evidenciaram elevada estabilidade da fibra nas faixas de temperatura de interesse, enquanto os ensaios mecânicos, microestruturais e mineralógicos indicaram comportamento compatível com concretos convencionais. Observou-se, contudo, que teores elevados de macrofibra podem induzir heterogeneidades, reforçando a

importância do controle de dosagem e do procedimento de mistura. De modo geral, os resultados demonstram que o uso de macrofibra sintética apresenta potencial técnico para aplicação em concretos estruturais, desde que respeitados os limites operacionais e as recomendações normativas.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9479 Esta Norma fixa as condições exigíveis de câmaras úmidas e tanques de cura utilizados nos ensaios de cimento e concreto. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

AKCELRUD, L. Fundamentos da Ciência dos Polímeros. Editora Manole Ltda, São Paulo, 2007

BARREDA, M., IAIANI, C., SOTA, J. D. Hormigon reforzado con fibras de polopropileno: tramo experimental de un pavimento de hormigon. In: IV Colóquio Latioamericano de Fractura y Fatiga, 2000, Neuquén. Anais. Viena: INTERNATIONAL Atomic Energy Agency (IAEA), 2000. P. 1145-1150.

CANEVAROLO JR. S. V. Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo. Artliber editora, 2003.

CONCRETO, 44., 2006, Belo Horizonte. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006.

COSTA, F. B. P. Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com fibras. 2015. 169 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande do Sul.

FERNANDES, R. S. Avaliação do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras vegetais. 2018. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

FIGUEIREDO, A. D., AGUAFO A., FLUENTE, A. D., EXCARIZ, R. et al. Fibras Plásticas como reforço de de tubos de concreto. Parte 1: Caracterização Tecnológica. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012. Maceió. Anais., São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2012.

FIGUEIREDO, João Paulo de Almeida. Desenvolvimento de concreto reforçado com macrofibra sintética para aplicação em piso industrial. 2022. 72 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2022

FRANCISCO, L. M. Análise microestrutural de concretos com adição de resíduos sólidos. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2017.

HOPPE FILHO, J. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia), 318 fls., 2008. Universidade de São Paulo, Doutorado em Engenharia, São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19082008-172648/publico/TESE_DOUTORADO_JUAREZ_HOPPE_FILHO.pdf. Acesso em: 02 nov. 2021.

LOPES, R. M. Desenvolvimento de compósitos poliméricos de PEAD reforçados com fibras naturais. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2016.

MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde, 1. ed. - São Paulo: Artliber Editora, 2005.

MEDEIROS, A. Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras. 2012. 201 fl. Tese Doutorado em engenharia civil. Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000