



CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**UTILIZAÇÃO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS
DE PETRÓLEO E FIBRAS DE REFORÇO PARA
DESENVOLVIMENTO DE FIBROCIMENTOS**

**LAVRAS – MG
2023**

CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**UTILIZAÇÃO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E
FIBRAS DE REFORÇO PARA DESENVOLVIMENTO DE FIBROCIMENTOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

Prof. Dr. Irineu Petri Junior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Narciso, Carolina Rezende Pinto.

Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo e fibras de reforço para desenvolvimento de fibrocimentos / Carolina Rezende Pinto Narciso. – 2023.

123p. : il.

Orientador: Rafael Farinassi Mendes.

Coorientador: Irineu Petri Junior

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Resíduos. 2. Polpa celulósica. 3. Fibras sintéticas. I. Mendes, Rafael Farinassi. II. Petri Junior, Irineu. III. Título.

CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**UTILIZAÇÃO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E
FIBRAS DE REFORÇO PARA DESENVOLVIMENTO DE FIBROCIMENTOS**

**USE OF GRAVEL FROM OIL WELL DRILLING AND REINFORCING FIBERS
FOR THE DEVELOPMENT OF FIBER CEMENTS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 30 de novembro de 2022.

Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro	UFLA
Dra. Luana Elis de Ramos e Paula	UFLA
Dr. Lucas Henrique Pedrozo Abreu	UFLA
Dra. Juliana Farinassi Mendes	Embrapa

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

Prof. Dr. Irineu Petri Junior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

*À minha avó Eliza (in memoriam), exemplo de fé,
fonte de amor eterno e saudade.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Ao final dessa jornada intensa, muitos sentimentos se misturam e o mais forte deles é o de gratidão. “*Sozinhos vamos mais rápido, mas juntos iremos mais longe!*”. Portanto, é mais do que necessário agradecer todos aqueles que durante esta trajetória estiveram ao meu lado.

Agradeço a Deus, acima de tudo, por ter me honrado e colocado pessoas tão especiais e generosas em meu caminho. Por sempre iluminar minhas escolhas e decisões, me conceder coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar. Toda honra e glória, a Ti!

Agradeço a minha família, que contribuíram e sonharam comigo para que eu fosse capaz de me dedicar aos estudos. Aos meus pais, Rosa e Celso, que são grandes exemplos de amor e dedicação. Aos meus irmãos Felipe e Eliza, por serem tão presentes e leais. Aos meus sobrinhos João Emmanuel e Aurora e meus afilhados Noah e Rafael, que trazem alegria e amor genuíno para minha vida. Este trabalho é a prova e a esperança de que dei e darei o meu melhor, todos os dias, para vocês.

Agradeço ao meu companheiro e parceiro de vida, Rafael. Nos momentos de dificuldade, cansaço e dúvidas, me ajudou, acolheu e aconselhou. Seu amor, otimismo, confiança e paciência, me mantiveram de pé e obstinada a transformar meus sonhos em objetivos concretos.

Aos amigos de longa data, cujo apoio incondicional e companheirismo estiveram presentes em todos os momentos. Obrigada por entenderem minha ausência nessa fase, por sempre acreditarem em mim e vibrarem comigo a cada nova conquista.

À Universidade Federal de Lavras, a qual tenho muito orgulho em ter nas páginas da minha história; aos laboratórios da instituição pelo fornecimento dos equipamentos para desenvolvimento de análises; e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBiomat) pela oportunidade de realizar o doutorado.

Agradeço as agências de fomento pelo apoio financeiro e tecnológico que tornou possível a realização deste trabalho. À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e em especial, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Rafael Farinassi Mendes pela orientação, inspiração, amizade e incentivo, durante todos esses anos de convívio. Agradeço pelos ensinamentos e seu

comprometimento com a ciência, buscando sempre nos instigar a sermos pesquisadores e profissionais cada vez melhores.

Ao professor Dr. Irineu Petri Júnior pela coorientação durante o desenvolvimento do projeto de tese, pelos conhecimentos compartilhados e apoio neste processo.

Agradeço aos membros da banca de defesa, que aceitaram participar desta etapa e pelas colaborações, sugestões e considerações realizadas.

Aos amigos de pós-graduação, graduação e funcionários da UFLA. Em especial, Arimatéia, Bruna, Jefferson, Juliana, Lucas, Gustavo, Nayra, Queilla, Ticyane e Tony, por toda ajuda, amizade, dedicação e paciência.

E a todos os outros não citados aqui, meus sinceros agradecimentos por suas diretas ou indiretas contribuições para finalização deste trabalho.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e de repente, você estará fazendo o impossível!”

(São Francisco de Assis)

RESUMO

O petróleo é o principal recurso que compõe a matriz energética mundial, representando parte crucial da cadeia econômica. Seus processos de exploração geram resíduos em grande volume, sendo um deles o cascalho de perfuração de poço de petróleo, que precisa de gerenciamento e destinação adequadas para minimizar os impactos gerados ao meio ambiente. Paralelamente, a construção civil vem se destacando expressivamente por estar em constante crescimento e progresso, sendo o setor que mais cresce atualmente e um dos que mais utiliza recursos naturais e gera impactos ambientais. Diante da busca por novas tecnologias e desenvolvimento de produtos que visam a sustentabilidade e redução da pressão sobre o meio ambiente, se torna necessário avaliar materiais alternativos para suprir as demandas dessa categoria. Neste contexto, o cascalho de perfuração apresenta potencial para ser utilizado como matéria-prima para aplicações na construção civil, proporcionando aproveitamento e agregação de valor ao resíduo e a criação de um produto mais sustentável. Assim, surge a oportunidade de desenvolver compósitos que podem receber em sua matriz a incorporação desse material, como por exemplo os fibrocimentos extrudados, que ainda não foram analisados com cascalho de perfuração. Sendo este produto uma matriz cimentícia reforçada com fibras, sintéticas ou naturais, as indústrias têm optado pela mescla entre fibras de polipropileno e polpa celulósica, em virtude de custo, questões sanitárias e durabilidade, garantindo a preservação das condições físicas e mecânicas dos fibrocimentos. A partir da utilização do cascalho de perfuração, vislumbra-se a possibilidade de inovação nos processos de fabricação de fibrocimento, gerando novas propriedades e permitindo a relação de uso e mistura de fibras. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a atuação do cascalho de perfuração em substituição ao calcário, nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, microestruturais e de durabilidade nos fibrocimentos, bem como avaliar a utilização de polpa celulósica e fibras de polipropileno nas proporções de 0 a 5%, na matriz de compósitos produzidos com resíduo de perfuração com uso direcionado para materiais construtivos. Por fim, conseguiu-se estabelecer a melhor quantidade de uso de cascalho de perfuração na matriz sem afetar o desempenho do produto e ainda, determinar a melhor combinação entre as fibras utilizadas para atuar nos novos compósitos, sendo viável a utilização de 25% de cascalho em substituição ao calcário na matriz cimentícia e o uso de 2% de microfibras de polipropileno em substituição as fibras de celulose.

Palavras-chave: Resíduos. Polpa celulósica. Fibras sintéticas. Compósitos. Matriz cimentícia.

ABSTRACT

Oil is the main resource that makes up the world energy matrix, representing a crucial part of the economic chain. Its exploration processes generate large volumes of waste, one of which is the oil well drilling gravel, which needs proper management and disposal to minimize the impacts generated on the environment. At the same time, civil construction has stood out significantly for being in constant growth and progress, being the fastest growing sector today and one of the ones that most uses natural resources and generates environmental impacts. Faced with the search for new technologies and product development aimed at sustainability and reducing pressure on the environment, it is necessary to evaluate alternative materials to meet the demands of this category. In this context, drilling gravel has the potential to be used as a raw material for applications in civil construction, providing use and adding value to the waste and the creation of a more sustainable product. Thus, the opportunity arises to develop composites that can receive the incorporation of this material in their matrix, such as extruded fiber cements, which have not yet been analyzed with drilling gravel. As this product is a cement matrix reinforced with synthetic or natural fibers, industries have chosen to mix polypropylene fibers and cellulosic pulp, due to cost, health issues and durability, ensuring the preservation of the physical and mechanical conditions of fiber cements. From the use of drilling gravel, the possibility of innovation in the fiber cement manufacturing processes is envisioned, generating new properties and allowing the relationship of use and mixture of fibers. Thus, the objective of this work was to evaluate the performance of drilling gravel in substitution of limestone, in proportions of 0, 25, 50, 75 and 100% on the physical, mechanical, thermal, microstructural and durability properties in fiber cements, as well as how to evaluate the use of cellulosic pulp and polypropylene fibers in the proportions of 0 to 5%, in the matrix of composites produced with drilling residue with use directed to construction materials. Finally, it was possible to establish the best amount of use of drilling gravel in the matrix without affecting the performance of the product and also, to determine the best combination between the fibers used to act in the new composites.

Keywords: Waste. Cellulose pulp. Synthetic fibers. Composites. Cement matrix.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Indústria do petróleo	15
2.2	Resíduos do processo de extração do petróleo	17
2.3	Fibrocimento	20
2.4	Material de reforço	22
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
	REFERÊNCIAS	27
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	36
	ARTIGO 1 – Propriedades de fibrocimentos extrudados produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo	36
1	INTRODUÇÃO	38
2	MATERIAL E MÉTODOS	41
2.1	Material	41
2.2	Caracterização do cascalho de perfuração de poço de petróleo	41
2.3	Processo de fabricação dos fibrocimentos	42
2.4	Envelhecimento acelerado	43
2.5	Propriedades físico – mecânicas dos fibrocimentos	43
2.6	Propriedade térmica dos fibrocimentos	44
2.7	Propriedades microestruturais dos fibrocimentos	44
2.8	Análise estatística	44
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1	Caracterização do cascalho de perfuração de poço de petróleo	46
3.1.1	Análise granulométrica	46
3.1.2	Ensaio de pozolanicidade	48
3.1.3	Análise de compatibilidade	49
3.1.4	Teores de água, sólidos e óleo e densidade	51
3.1.5	Fluorescência de Raios X	52
3.1.6	Difração de Raios X	54
3.2	Caracterização física dos compósitos	56
3.3	Caracterização mecânica dos compósitos	64
3.4	Caracterização térmica dos compósitos	71
4	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77
	ARTIGO 2 – Fibrocimentos extrudados produzidos com cascalho de perfuração e fibras de celulose e polipropileno	87
1	INTRODUÇÃO	89
2	MATERIAL E MÉTODOS	92
2.1	Matéria-prima	92
2.2	Produção dos compósitos	92
2.3	Caracterização dos compósitos	93
2.4	Análise estatística	95
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
3.1	Difração de Raios X	96
3.2	Propriedades físicas dos compósitos	98
3.3	Propriedades mecânicas dos compósitos	105

3.4	Propriedade térmica dos compósitos.....	113
4	CONCLUSÕES	115
	REFERÊNCIAS	117

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera se destaca pela grande importância na economia mundial, em virtude de o petróleo ser um dos recursos naturais mais valorizados na atualidade (ALI *et al.*, 2020; KAZAMIAS; ZORPAS, 2021). Toda sua produção e atividades de exploração, extração, refino, transporte e comercialização envolvem diversos setores da cadeia produtiva. Mesmo sendo bastante associado a combustíveis, o petróleo é amplamente utilizado na produção de plásticos, asfaltos, borrachas sintéticas, tecidos e diversos outros produtos.

Todo o desenvolvimento econômico é indispensável e necessário, mas deve ser acompanhado de decisões consistentes que busquem pela sustentabilidade, baseando-se em promover o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e material, usando recursos naturais de forma inteligente, garantido a qualidade de vida das gerações futuras. Buscando por esses resultados, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas procurando por alternativas para valorizar o aproveitamento de diversos resíduos industriais e proporcionar destinação adequada aos mesmos, sendo primordial obter resultados para solucionar questões relacionadas a geração, manuseio e armazenamento dos resíduos, bem como mitigar os impactos ambientais causados por seus processos.

Durante a exploração de poços de petróleo *offshore*, ou seja, realizadas afastadas do continente, são gerados vários tipos de resíduos, sendo um deles denominado por cascalho de perfuração. Para que ocorra seu descarte em alto mar, segundo as normas ambientais, o material deve apresentar um teor máximo de contaminantes e por isso, passa por etapas de retirada do teor de óleo e outros hidrocarbonetos. Quando, mesmo após esses processos, o material não atende às exigências legais, precisam ser depositados em aterros industriais por período indeterminado (CAMPOS *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2017; JAGABA *et al.*, 2022; PETRI JUNIOR *et al.*, 2015; RIPA *et al.*, 2017). No entanto, devido às suas características físicas e químicas, a técnica de armazenamento em terra pode não ser viável, tanto pelo alto custo de transporte e manutenção desses locais, quanto pela quantidade de substâncias nocivas presentes no cascalho, o que torna necessário buscar por um gerenciamento mais efetivo desse material (AL QALLAF *et al.*, 2016; ALI *et al.*, 2020; ALMEIDA; ARAÚJO; MEDEIROS, 2017; FIALHO *et al.*, 2012).

Nesta perspectiva de encontrar uma maneira adequada para o uso do cascalho de perfuração, destaca-se o setor da construção civil que está em momento de evolução e constante

progresso, intensificando suas atividades que, no geral, utilizam uma quantidade significativa de recursos naturais e produzem resíduos em diversas etapas construtivas. Mediante a isso, é indiscutível a necessidade deste setor em investir em projetos que tragam grandes transformações econômicas, sociais e ambientais (OLIVEIRA *et al.*, 2020; VILELA *et al.*, 2020).

Diante deste cenário, alguns estudos foram desenvolvidos buscando a utilização do cascalho de perfuração como matéria-prima para aplicações em materiais do setor da construção civil, principalmente no uso em concretos (ALMEIDA; RAPÔSO; MARQUES, 2021; CALMON *et al.*, 2017; FERREIRA; BARBOZA, 2013; FIALHO; CALMON; PEREIRA, 2014; FIALHO *et al.*, 2012; MENESES; PAULA, 2015). No entanto, ainda são poucos os trabalhos realizados que abordam profundamente a caracterização do material e seu uso em diferentes tipos de produtos construtivos, o que torna fundamental a investigação de novos processos e aplicações que possam vir a auxiliar na compatibilidade do cascalho de perfuração com matrizes cimentícias. Dentro dessa possibilidade, podemos destacar os fibrocimentos extrudados que ainda não foram avaliados com a aplicação de cascalho de perfuração. O método de extrusão, auxilia na compactação e distribuição das partículas de cascalho dentro da matriz durante o processamento dos compósitos, proporcionando propriedades adequadas para utilização em escala industrial desses materiais.

Os fibrocimentos são constituídos por uma matriz cimentícia reforçada com fibras de origem sintética ou natural. Antes de 2017, era utilizado no Brasil as fibras minerais de amianto como principal constituinte da fase de reforço, contudo em função de suas características tóxicas e relações com doenças pulmonares, com potencial cancerígeno, foram proibidas (LEITÃO; PAES; DOLIVET, 2020). Atualmente, as indústrias se adaptaram a uma mescla de fibras sintéticas (polipropileno) e fibras naturais (celulose), em virtude da relação custo e durabilidade (FARRAPO *et al.*, 2017). No entanto, essa relação depende muito das características de alcalinidade da matriz utilizada, sendo ainda necessários estudos para melhor definição das porcentagens a serem empregadas.

Em decorrência do que foi abordado, a utilização do cascalho de perfuração de poço de petróleo apresenta-se como possibilidade de fonte de matéria-prima para fabricação de fibrocimentos, permitindo proporcionar novas propriedades aos compósitos, influenciar no custo de produção e na relação de fibras de polipropileno e de celulose, e ainda permitir a destinação adequada e agregação de valor ao material. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de durabilidade da utilização de cascalho de perfuração como matéria-prima para obtenção de fibrocimentos. Bem

como, realizar uma otimização das proporções entre celulose e polipropileno para os compósitos produzidos com o cascalho de perfuração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico a seguir foi fundamentado em uma profunda revisão de literatura, a fim de garantir a veracidade e inovação do estudo realizado. Portanto, estão apresentados os conceitos que dão suporte ao foco desta pesquisa sobre compósitos cimentícios e a utilização de resíduos industriais, em especial os fibrocimentos e o cascalho de perfuração de poço de petróleo, salientando sua importância no setor da construção civil, a caracterização de materiais e a utilização de matéria-prima de reforço na melhoria da qualidade dos produtos desenvolvidos.

2.1 Indústria do petróleo

O petróleo é uma matéria-prima extremamente rica e diversificada, sendo umas das mais importantes fontes de energia que compõem a matriz energética mundial, o que permite seu grande aproveitamento em vários setores, podendo determinar o desenvolvimento econômico de um país. A importância dos derivados obtidos a partir de seu refino pode ser evidenciada por suas aplicações, como por exemplo a produção de combustíveis (gasolina, diesel e querosene), uso na indústria química e de produtos asfálticos, fabricação de tintas, embalagens, borrachas sintéticas, cosméticos, entre outros (GUO; GUALAMBOR, 2005; NASCIMENTO; MORO, 2011).

Essa substância é um óleo com origem fóssil, viscoso e inflamável, gerada em rochas sedimentares, áreas marítimas e terrestres, geralmente é menos densa que a água, possui cheiro característico e coloração escura. Suas propriedades químicas e físicas variam de acordo com a sua composição (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2019).

A formação do petróleo é feita pelo acúmulo de material orgânico (microrganismos e algas marinhas) sob condições específicas de pressão e isolamento em camadas do subsolo de bacias sedimentares, que podem estar localizada no continente (*onshore*) ou na costa (*offshore*) e passam por transformações durante milhares de anos (ANP, 2019; ARARUNA JUNIOR; BURLINI, 2013; MARQUES, 2011).

A composição química do petróleo é estabelecida por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e pequenas quantidades de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos. O carbono é o elemento predominante representando 82% da proporção entre os componentes, o hidrogênio atua com o carbono formando moléculas na quantidade de 12%, o

nitrogênio está na forma de amina na quantidade de 4%, o oxigênio é muito pouco encontrado, não apresentando mais que 1%, sais que também raramente são encontrados representam uma pequena porção de 0,5% e metais (ferro, cobre, etc.) na quantidade de 0,5% e são considerados como resíduos do petróleo (ANP, 2019; PAULINO, 2011).

De acordo com a ANP (2019) no Brasil existem 29 bacias sedimentares com potencial para pesquisas e atividades de exploração e produção de hidrocarbonetos, com área de 7,175 milhões de km². Em 2019 a produção de petróleo no Brasil totalizou 3,090 milhões de barris de óleo equivalente por dia (MMboe/d). Essa produção representa um aumento de 20,4% em relação ao mesmo período do ano anterior. A produção ocorreu em 7.220 poços, sendo 646 campos marítimos os responsáveis pela produção de 96% do petróleo (ANP, 2023).

O Programa Anual de Produção – PAP e o Programa Anual de Atividades – PAT, possuem uma ferramenta que fornece estimativas anuais (TABELA 1) sobre as atividades de desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural e de perfuração de poços de desenvolvimento e produção para os próximos anos (ANP, 2020b).

Tabela 1 – Estimativas anuais sobre atividades de produção de petróleo.

ANO	PRODUÇÃO (m³)	EXPLORAÇÃO EM POÇO	ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO
2020	169.190.255,32	22 un.	179
2021	186.426.327,78	-	278
2022	193.770.541,28	-	230
2023	205.745.034,50	-	167

Fonte: Adaptado de Central de Sistemas ANP (2019).

A ANP (2023) indica que os campos operados pela Petrobras, com participação exclusiva produziram em torno de 44% do petróleo do país. Segundo a Petrobras (2019), a maior parte de suas reservas de petróleo está em campos marítimos o que leva suas atividades de perfuração a profundidades cada vez maiores e prevê para os próximos cinco anos a operação de 13 novos sistemas de produção que representará um crescimento de 5% na produção e um investimento de U\$\$68,8 bilhões até o ano de 2023. A produção diária dessa empresa foi de 2,63 milhões de barris de óleo em 2019 em 113 plataformas de produção e 1,765 milhão de barris de derivados em 13 refinarias.

Entre os requisitos primários para que exista um reservatório de petróleo é a presença de algum tipo de rocha reservatório (geralmente porosa) coberta por uma rocha seladora (que

impede que o óleo escape para a superfície e se dissipe). Raramente o petróleo se encontra em locais acessíveis próximo a superfície, normalmente ele está em rochas porosas e a extração do óleo precisa ser feita com o uso de equipamento que perfurem as camadas rochosas e exerçam certa pressão para que o óleo seja retirado. Quando a rocha reservatória não possui boa permeabilidade, existe a necessidade de fraturá-la e então, explorá-la para utilizar o óleo (ANP, 2020a).

2.2 Resíduos do processo de extração do petróleo

As atividades de exploração com acesso a uma jazida por meio de um poço de petróleo são feitas por sondas de perfuração. O processo exploratório do petróleo envolve diversas etapas, desde operações desenvolvidas na construção de um poço até a fase de desenvolvimento da produção (ALVES; GOMES, 2011; SILVA *et al.*, 2019).

A primeira delas é a prospecção geofísica que descobre reservatórios de petróleo sem que tenha necessidade de perfuração física, além disso fornece informações a respeito da viabilidade econômica da retirada de petróleo e operações de perfuração (PETRI JUNIOR, 2014).

Após a determinação do local onde o poço será aberto é instalado uma sonda de perfuração, o método rotativo é atualmente o mais empregado no Brasil. Trata-se de perfurar e triturar as rochas pela ação da rotação e peso aplicado a uma broca existente na extremidade da coluna juntamente com a ação hidráulica de um fluido. Esse fluido é um material formado de uma mistura com diversos compostos químicos que serve como facilitador para promover a remoção dos fragmentos de rochas sedimentares que neste processo, são denominados popularmente de cascalhos de perfuração, provenientes da ação cortante da broca (ABRAHAM; NGUYEN, 2003; FIALHO *et al.*, 2012; PANISSET, 2014).

Durante a perfuração do poço, o fluido chega até a superfície levando também o cascalho da perfuração que foram gerados no interior do poço pela região anular e transportados por meio de bombas do tipo pistão. O fluido e o cascalho passam por um processo de separação, onde ocorre a recuperação desta fase líquida no sistema de tratamento para que possa ser reinjetado no poço, enquanto o cascalho gerado na forma de resíduo possa ser descartado de forma adequada (ASIM *et al.*, 2021; MENESES; PAULA, 2015; PETROBRAS, 2019). A separação entre o fluido e o cascalho é feito por equipamentos de separação física em um sistema de controle de sólidos. No entanto, existe um potencial de contaminação do cascalho

quando em contato com o fluido e é um problema a ser enfrentado pela indústria do petróleo (GONÇALVES, 2003; FIALHO, 2012).

As atividades de perfuração em ambiente *offshore*, realizadas por sondas de perfuração, seguem a estrutura do projeto de poço de petróleo sendo divididas em fases. A quantidade de cascalho gerada na perfuração dependerá de algumas variáveis como o diâmetro e profundidade do poço e do fluido usado na perfuração. O contínuo aumento da profundidade dos poços tem por consequência o aumento da quantidade de cascalho a ser descartado (AYATI *et al.*, 2019; BALL; STEWART; SCHILIEPHAKE, 2012; CHEN *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2022).

Na literatura, existe uma limitação no levantamento de dados em relação a produção de cascalho de perfuração *offshore*, no entanto alguns autores estimam que o volume gerado pode ser 20% superior ao volume do poço, haja visto a descompactação do material, correspondendo a quantidades superiores a 0,13 m³ de cascalho de perfuração para cada metro de perfuração do poço *onshore* (FIALHO, 2012; GUIMARÃES; ROSSI, 2007; MENESES; PAULA, 2015).

Segundo Pereira (2010), a geração de cascalho produzido por um poço de petróleo é estimada em média de 500 a 800 m³ de cascalho, enquanto a quantidade de resíduos sólidos gerados nas operações *offshore* para descarte por poço pode atingir o volume de 800 a 1200 m³ conforme apresentado por Silva *et al.* (2019). Esse volume descrito pelos autores demonstra a significativa importância de se converter o resíduo de perfuração em matéria-prima na elaboração de novos produtos.

O Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP, 2021) apresenta os dados de Almeida (2016) para os poços da Bacia de Campos – Brasil, mencionando uma geração de 0,19 a 0,25 m³ de cascalho por metro perfurado. Segundo Ismail *et al.* (2017), a recuperação de fluido de cascalho à base de óleo pode gerar cerca de 2000 a 8000 barris de resíduos de perfuração por poço. No geral, cada poço pode produzir alguns milhares de barris de resíduos de perfuração, o que pode causar um impacto social e ambiental (ONWUKWE; NWAKAUDU, 2012; SIDDIQUE; LEUNG; NJUGUNA, 2021).

Os resíduos de perfuração, que são os cascalhos com fluido, em grande maioria são depositados em aterros industriais monitorados ou em aterros com diluição. Nos aterros monitorados o cascalho é deixado em um local impermeável por período indeterminado. Existem diferentes técnicas destinadas à secagem de cascalho com fluido de perfuração, porém a técnica de aterro não é muito viável devido a seu alto custo e pela grande quantidade de cascalho existente que precisa de tratamento e destinação (ALI *et al.*, 2020; PETRI JUNIOR, 2014; SOUZA; LIMA, 2002).

Segundo a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2004), para o melhor gerenciamento de resíduos sólidos é necessário conhecer e avaliar a fonte geradora, descrição da matéria-prima, insumos utilizados e o processo no qual o resíduo foi gerado. Os resíduos em estado sólido ou semissólido, particularmente, são resultados de atividade industriais, domésticas, hospitalares, agrícolas, entre outras (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Diante dos parâmetros que a norma brasileira apresenta, os resíduos podem ser classificados como perigosos e não perigosos, sendo os não perigosos divididos em outras categorias. Contudo, a norma brasileira não enquadra o cascalho advindo da perfuração de poços de petróleo, portanto, este material se assemelha aos resíduos classificados como Classe I – Perigosos, que devido às suas características físico-químicas podem apresentar risco à saúde pública e riscos ao meio ambiente quando tiver seu descarte inadequado (ABNT, 2004).

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2018), Instrução Normativa nº1/2018, para que seja feito o descarte dos cascalhos de perfuração de poços offshore, apropriadamente em águas marinhas deve ser realizado testes de toxicidade. O cascalho associado aos fluidos de base não aquosa não deve apresentar teor de base orgânica acima do limite de 6,9% m/m (média acumulada por poço). O descarte de cascalho com fluido de perfuração de base não aquosa aderido somente será permitido se a avaliação da ecotoxicidade em sedimento marinho (10 dias) da base orgânica dos fluidos de perfuração não aquosos atender a razão de até 1,0 conforme método EPA 1644. No entanto, atualmente a IN nº1/2018 encontra-se suspensa e órgão regulamentador responsável adotou diretrizes mais restritivas adotadas pela EPA, que menciona que o cascalho para ser descartado não deverá exceder o limite de 5,9% m/m (massa/massa) (IBP, 2021).

Caso a norma não seja atendida, o resíduo deve ser conduzido a terra e ser tratado, para ser descartado ou armazenado, o que gera grandes custos de processos. O lançamento dos resíduos de perfuração de maneira inadequada no ambiente pode ocasionar alterações no ecossistema como por exemplo, a mudança da granulometria do solo em regiões próximas dos poços perfurados, gerando, assim, impacto ambiental no ecossistema marinho. A extração de material sólido inerte de um ecossistema estabilizado e o transporte para outro local requer ações específicas para não provocar perdas tanto ambientais quanto econômicas e sociais (SILVA *et al.*, 2019).

Considerando a indústria petrolífera um dos segmentos mais importantes dentro da economia global, toda sua produção, exploração e estimativa de investimentos futuros geram novos desafios, principalmente no que diz respeito a geração e gestão de resíduos originados pelos processos deste setor, demandando outras destinações no sentido de reduzir seu impacto

sobre o meio ambiente, melhorar seu manejo e agregar valor a um produto sem descarte adequado.

Atualmente, pesquisas que visam a potencialidade do uso de cascalho de perfuração em materiais de construção já estão sendo desenvolvidas com o principal objetivo de reduzir os impactos ambientais e sociais causados pelo setor e se mostraram bastante relevantes. O cascalho de perfuração pode funcionar como substituto de componentes usados na matéria-prima do concreto e na fabricação de tijolos ecológicos (BANDEIRA *et al.*, 2019; FIALHO, 2012; MENESES; PAULA, 2015).

Diante desta perspectiva, a escolha de compósitos de fibrocimento se baseia na possibilidade de incorporar o resíduo de cascalho de poço de petróleo na matriz cimentícia, podendo mudar as características da matriz e do material de reforço a ser utilizado.

Dessa maneira, o uso do resíduo de cascalho de perfuração de poço de petróleo apresenta grande potencial de utilização na produção de fibrocimentos, visando a possibilidade de uma nova fonte de matéria-prima para o setor de construção civil, podendo proporcionar novas e melhoradas propriedades aos compósitos, influenciar o valor final da produção e da relação de uso de fibras de polipropileno e celulose, agregando valor ao material, proporcionando destinação adequada a ele e promovendo desenvolvimento técnico e científico para novos produtos.

2.3 Fibrocimento

Na indústria e nas áreas da engenharia cada vez mais se faz necessário buscar por novas tecnologias e materiais que apresentem propriedades peculiares e específicas que muitas vezes não são encontradas diretamente na natureza. Baseado nisso, muitas pesquisas estão direcionadas ao desenvolvimento de materiais compósitos.

Considera-se um material compósito aquele obtido pela junção de dois ou mais constituintes em fases distintas com naturezas diferentes, com o objetivo de criar um material com propriedades e características melhoradas, que não são apresentadas por nenhum dos componentes isoladamente. Esses materiais possuem uma fase denominada de matriz que apresenta maior tenacidade e é responsável por transmitir os esforços para a fase dispersa. Já a fase dispersa, é uma fase descontínua que tem a função de absorver o esforço que é transmitido pela matriz (CALLISTER, 2012).

O fibrocimento é considerado um material compósito que utiliza como matriz o cimento com adições minerais e em sua fase dispersa é utilizado fibras minerais, sintéticas e/ou vegetais

como reforço (ALREKABI *et al.*, 2017; COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017; MARQUES; GOMES; KERN, 2016). Este material surgiu a partir de uma necessidade de adequação de propriedades, pois, apesar das matrizes cimentícias apresentarem alta dureza, possuem baixa tenacidade, o que acarreta baixa resistência à fratura quando submetidos a esforços de tração apresentando-se quebradiços, com tendência a formação de fissuras, condicionando a diminuição de sua durabilidade e inviabilizando sua utilização (ALREKABI *et al.*, 2017; COUTTS, 2005; JO; CHAKRABORTY; YOON, 2014).

As características mecânicas dos compósitos cimentícios serão determinadas pelas propriedades das fibras utilizadas, pela dispersão das mesmas na matriz e pela ligação da interface matriz/fibra (CALLISTER; RETWISCH, 2016). Dessa maneira, o material que é usado como reforço deve ocasionar uma ligação com a matriz de forma que a transmissão de carga aplicada seja absorvida pelo reforço, produzindo compósitos de matriz cimentícia mais resistentes à flexão, tração e impacto, conferindo maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura e aumento da durabilidade do compósito (GRAY; JOHNSTON, 1984; QIAN *et al.*, 2003; TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Os produtos de fibrocimento vêm sendo largamente utilizados na construção civil e edificações rurais, como materiais de cobertura, planos de revestimento de interiores e exteriores, caixas d'água e telhas (EUGÊNIO *et al.*, 2023; FONSECA *et al.*, 2016; LABIB, 2018; MENDES *et al.*, 2021b; PEREIRA *et al.*, 2020; ROSTAMI *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020, 2021; TONOLI *et al.*, 2010; VIANA *et al.*, 2022).

Com a expansão da atividade da construção civil no Brasil, a quantidade de cimento Portland consumido em 2019 foi estimado em 21.716.491 toneladas, sendo 571.046 toneladas consumidos por indústrias de fibrocimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2019). Existe um grande interesse desse setor em buscar outros materiais pozolânicos que apresentem composição ótima do ponto de vista econômico, técnico e ambiental, para reduzir substancialmente o consumo de cimento Portland e com isso, novos estudos envolvendo fibrocimentos estão se intensificando nos últimos anos (RODRIGUES *et al.*, 2013).

Muitas pesquisas sobre as aplicações de resíduos na forma de adições minerais surgem com objetivo de substituir parcialmente o uso de cimento em matrizes cimentícias, dentre quais pode-se citar o uso de resíduo de vidro laminado, sílica ativa, metacaulim, escória de alto-forno, resíduo de cerâmica e casca de arroz (DOBIAS; POKORNY, 2017; LIMA; IWAKIRI, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2019; SATA *et al.*, 2012; SIMÕES *et al.*, 2013).

Em contrapartida, variações na composição do cimento podem provocar lenta evolução da resistência, alterações na cinética de hidratação do cimento, modificar as fases mineralógicas e a microestrutura do compósito, interferindo diretamente no processo de produção, o que inviabiliza o processo de grandes substituições desse material (GIORDANO; SOUZA; JOHN, 2009; SCRIVENER; WIENER, 1992).

Lima e Toledo Filho (2008) estudaram matrizes cimentícias com 30% de metacaulim, com o intuito de melhorar o desempenho de compósitos reforçados com fibras de sisal. Os autores observaram que a utilização desse teor de metacaulim possibilitou produzir uma matriz livre de cal (CaO) e que apresentou resistência mecânica mais elevada, menores absorção e índice de vazios, se comparada à matriz controle. Nas matrizes livres de cal os autores constataram que as fibras vegetais mantiveram o comprimento de arrancamento e não apresentaram alterações visíveis após o ensaio de envelhecimento acelerado. Neste caso isso acontece devido a mudança de alcalinidade na matriz de cimento, essa ocorrência pode ser boa para relação interface fibra/matriz, principalmente no caso de fibras vegetais que são rapidamente degradadas em meio alcalino.

O uso do calcário se dá principalmente pelo fato de substituir parcialmente o volume de cimento nos sistemas cimentícios, reduzindo o consumo de cimento Portland, e ao seu baixo custo dentro do processo produtivo de matrizes cimentícias (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Além disso, a presença do calcário na mistura funciona como um retentor de água que vai liberando aos poucos para o cimento, que precisa de água para reagir e endurecer, com isso aumenta sua resistência, evitando fissuras. O calcário por ser um material mais fino que o cimento e permite preencher os vazios dentro do compósito (PILAR *et al.*, 2016). Não existem muitos estudos que avaliam a substituição parcial e total do calcário (CaCO₃) por um material que possa manter ou melhorar as características da matriz. Dessa forma, é interessante avaliar as possibilidades de substituição de calcário por outro material que possa apresentar um custo ainda mais baixo e que exerça a mesma função sem provocar prejuízos a qualidade final do produto.

2.4 Material de reforço

Para avaliação de fibrocimentos, é fundamental avaliar e considerar as possibilidades de reforço da matriz. Um dos principais materiais já utilizados como reforço em matrizes cimentícias é a fibra mineral de amianto. Este material apresenta baixo custo e excelentes propriedades físicas e mecânicas, sendo utilizado em materiais compósitos no setor da construção civil, como telhas, placas, caixas d'água e tubos (COUTTS, 2005). No entanto, de acordo com pesquisas médicas, durante a manipulação desse material são liberadas fibras muito finas que podem ser inaladas e ficam alojadas no organismo, originando tumores, problemas pulmonares e câncer (GIANNINI *et al.*, 2012; RADVANEC *et al.*, 2013).

No Brasil, desde 2017, por decisão do Supremo Tribunal Federal (STF) está proibido a extração e importação de todos os tipos de amianto. No entanto, atualmente existe na justiça um projeto de lei que pretende liberar a exploração do amianto em alguns estados brasileiros, como Goiás e Bahia e, portanto, existe uma liminar que suspende parcialmente a proibição em todo o território nacional por apelo das indústrias produtoras de fibrocimentos que alegam que o uso de outros materiais, principalmente as fibras sintéticas, elevam muito o custo de produção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO - ABREA, 2020).

Vários estudos já vêm sendo desenvolvidos com a intenção de encontrar substitutos e fibras alternativas para a fibra de amianto que se adequem ao processo de fabricação do fibrocimento (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017; CORREIA *et al.*, 2017; FARRAPO *et al.*, 2017; MARQUES; GOMES; KERN, 2016; PIMENTA *et al.*, 2016; ZANATTA; ROSA, 2019). A indústria brasileira de fibrocimento, na busca por se adequar ao mercado futuro, já possui matérias-primas eficientes usadas em larga escala para fabricação e comercialização de produtos sem amianto, um exemplo são as fibras sintéticas de base polimérica como o Polivinil Acetato (PVA) e o Polipropileno (PP), aprovados pelo Ministério da Saúde e as fibras vegetais como a polpa celulósica, aplicadas isoladamente ou em associação (PP + celulose) (MACEDO, 2014).

As fibras sintéticas são bastante adequadas e com grande potencial de substituição ao amianto por demonstrarem ter boa durabilidade dentro da matriz, pois os compósitos cimentícios são fortemente alcalinos o que dificulta a resistência química, causando sua deterioração. As fibras de PP são as mais comumente utilizadas em fibrocimento por serem mais baratas que as demais fibras sintéticas e, por exibirem alta resistência a ambientes alcalinos e baixa toxicidade. Além disso estudos envolvendo essas fibras apresentam informações sobre alta ductilidade, alta resistência, baixo custo em relação as demais fibras poliméricas, pois são produzidas no Brasil e alto rendimento (SAVASTANO JUNIOR *et al.*, 1999; TAKAHASHI; TSURUNGA; KONDO, 2013; ZHANG; QINGFU; HAIYANG, 2011).

O PP é um material não polar, portanto não há afinidade por inorgânicos e macromoléculas polares. Alguns experimentos envolvendo fibras de PP em compósitos de matriz cimentícia apontam dificuldade uso dessa matéria-prima por apresentarem hidrofobicidade. Apesar disso, elas não são condutoras, possuem baixa densidade, apresentam boas propriedades em isolamento, são termoplásticas quimicamente inertes e possuem boa maleabilidade, sendo fáceis de manipular e dispersar (MADDAH, 2016).

Outro material bastante utilizado como material de reforço em matrizes cimentícias são as fibras naturais de origem vegetal, em razão da sua variedade de espécies e disponibilidade na natureza e ainda, ser um recurso renovável. Atualmente, muitos estudos avaliam o potencial de uso da celulose em fibrocimentos (RAABE, 2019; SILVA *et al.*, 2015; TEIXEIRA *et al.*, 2014, 2020).

No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas passíveis de pesquisas. Além disso, pode-se utilizar as fibras vegetais em forma de polpa ou residual, uma vez que a agroindústria tem um alto volume de material a ser descartado e que pode e deve ser utilizado. Fibras de eucalipto, pinus, sisal, coco, casca de café, casca de arroz, juta, resíduos da indústria madeireira, bagaço de cana-de-açúcar e soja, são alguns exemplos (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; MARINELLI *et al.*, 2008; MENDES *et al.*, 2021a; PEREIRA *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2021). As polpas celulósicas se destacam dentro do processo de fabricação do fibrocimento, principalmente aquelas disponíveis comercialmente, em especial as polpas de *Eucalyptus sp.*, em função de sua padronização química no processo produtivo, abundância, disponibilidade e baixo custo para a escala comercial.

Entretanto, o uso de fibras vegetais pode acarretar alguns problemas como o comprometimento das propriedades dos compósitos em função da capacidade de degradação das fibras na matriz cimentícia. O problema de durabilidade está associado ao enfraquecimento das fibras quando expostas ao meio alcalino, que culminado a sua capacidade de absorção de líquidos, promovem a mineralização das fibras, pela penetração dos produtos de hidratação do cimento no interior da cavidade das fibras (lúmen e espaços da parede celular), fragilizando e reduzindo seu desempenho mecânico (VO; NAVARD, 2016). Esta situação é indesejada, pois pode causar prejuízos a algumas propriedades importantes dos fibrocimentos, como a tenacidade e a resistência (SANTOS *et al.*, 2015).

Na preparação de compósitos à base de cimento Portland e fibras vegetais devem ser considerados dois fatores – o ataque alcalino às fibras e a incompatibilidade física e química entre as fibras e a matriz. A degradação de materiais cimentícios modificados pela adição de

fibras vegetais ocorre principalmente em virtude da elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz do cimento Portland (com pH superior a 13). A interface, região da matriz em torno da fibra vegetal, tem alta porosidade e permite o acúmulo de água; com a presença de quantidades elevadas de cal hidratada (Ca(OH)_2), propicia-se a formação de uma região com elevada alcalinidade (AGOPYAN; SAVASTANO JUNIOR, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2013; ROSTAMI *et al.*, 2020).

Algumas alternativas foram desenvolvidas com a intenção de viabilizar novos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais para minimizar estes efeitos e melhorar o desempenho e a durabilidade. Embora novas propostas tenham surgido com a intenção de melhorar o desempenho de fibrocimentos sem o uso de amianto, ainda é necessário explorar possibilidades para ampliar as formas de aplicação.

Diante destes aspectos apresentados é que se reforça a necessidade de procurar alternativas para aumentar a interação entre fibra e matriz. A proposta de avaliar o uso de fibras sintéticas e fibras vegetais associadas é uma busca por melhorar as propriedades dos compósitos, unindo a boa durabilidade das fibras sintéticas ao baixo custo de fibras de celulose, garantindo um novo produto com grandes perspectivas de se tornar viável.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com as tecnologias voltadas para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, que visam a redução dos impactos ambientais associado ao avanço econômico e social, a utilização de resíduos industriais torna-se uma opção adequada para se tornar matéria-prima na substituição de alguns componentes dentro do processo produtivo.

Para adequada utilização do cascalho de perfuração de poço de petróleo na fabricação de fibrocimentos, atrelado ao uso de fibras sintéticas como o polipropileno e fibras vegetais como a celulose, que já são utilizados em escala industrial, tornam-se necessário a pesquisa e o conhecimento das características e das propriedades dos produtos.

Independente do processo e do material de reforço que são utilizados na produção de fibrocimentos é importante que o produto desenvolvido atenda aos requisitos mínimos relativos à resistência, durabilidade e conforto térmico, pois o fibrocimento é utilizado na maioria das vezes em construções externas, que estão expostas a intempéries (KHORAMI; GANJIAN, 2011), além de oferecer um valor competitivo para as opções comerciais.

O presente trabalho contribui com a avaliação e o entendimento do uso de diferentes porcentagens do resíduo e do uso de fibras alternativas, visando agregar valor ao resíduo ao mesmo tempo em que contribui com a sustentabilidade, busca por uma destinação adequada a este material e ainda atua no desenvolvimento técnico e científico das propriedades dos fibrocimentos.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, M. A.; NGUYEN, N. Green engineering: defining the principles: results from the sandestin conference. **Environmental Progress**, New York, v. 22, n. 4, p. 233-236, Dec. 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim mensal da produção de petróleo e gás natural**: dados da produção de petróleo e gás natural no Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 13 jul. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Exploração e produção de óleo e gás**. 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas>. Acesso em: 13 dez. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Petróleo e derivados**. 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 8 jan. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Previsão de atividades, investimentos e produção**. 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/previsao-de-producao-e-atividades-investimentos-e-producao>. Acesso em: 6 jul. 2020.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIR, H. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. *In*: FREIRE, W. J.; BERARDO, A. L. (coord.). **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. Campinas: Editora Unicamp, 2003. p. 121-142.

AL QALLAF, Y. *et al.* Analysis and improvement possibilities of waste management at Kuwait Oil Company (KOC). **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, Southampton, v. 202, p. 73-84, 2016. DOI: 10.2495/WM160081.

ALI, J. A. *et al.* A state-of-the-art review of the application of nanotechnology in the oil and gas industry with a focus on drilling engineering. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 191, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107118>.

ALMEIDA, A. E. F. de S. *et al.* Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 42, p. 49-58, 2013.

ALMEIDA, J.; RAPÔSO, A.; MARQUES, S. Caracterização do cascalho de perfuração dos poços de petróleo da bacia Sergipe - Alagoas para produção de concreto permeável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 12, n. 7, p. 585-598, 2021.

ALMEIDA, P. C. de. **Análise técnico-ambiental de alternativas de processamento de cascalho de perfuração offshore**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, P. C. de; ARAUJO, O. de Q. F.; MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 165, p. 143-156, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.062>.

ALREKABI, S. *et al.* Mechanical performance of novel cement-based composites prepared with nanofibres, and hybrid nano and microfibres. **Composite Structures**, Oxford, v. 178, p. 145-156, 2017.

ALVES, F. B.; GOMES, J. S. **O universo da indústria petrolífera: da pesquisa à refinação**. 2. ed. Lisboa: Calouste, 2011.

ARARUNA JUNIOR, J.; BURLINI, P. **Gerenciamento de resíduos na indústria de petróleo e gás**. Rio de Janeiro: PUC Rio, 2013. 210 p.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 79, p. 115-128, Mar. 2015.

ASIM, N. *et al.* Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: opportunities, limitations, and directions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 284, p. 125459, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: Editora ABNT, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO. Disponível em: <https://abrea.org.br/>. Acesso em: 17 fev. 2020.

AYATI, B. *et al.* Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 208, p. 252-260, 2019.

BALL, A. S.; STEWART, R. J.; SCHLIEPHAKE, K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. **Journal Waste Management & Research**, London, v. 30, p. 457-473, 2012.

BANDEIRA, R. A. F. *et al.* Viabilidade técnica da aplicação do cascalho de perfuração de poços de petróleo na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente. *In*: FRANCISCO, P. R. M.; SILVA, V. M. de A.; QUEIROZ, N. M. de (org.). **Caderno de pesquisa, ciência e inovação**. Campina Grande: EPGRAF, 2019. v. 2, n. 1, p. 43-54.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CALMON, J. L. *et al.* Characterization of pre-treated drill cutting waste and its use as fine aggregate in concrete. **African Journal of Environmental Science and Technology**, Maiduguri, v. 11, n. 9, p. 461-470, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJEST2015.1910>.

- CAMPOS, L. F. de *et al.* Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de petróleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes, v. 10, n. 1, p. 119-138, 2016.
- CHEN, Z. *et al.* Supercritical water oxidation of oil-based drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 332, p. 205-213, 2017.
- COELHO, T. da C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 147-161, jan./mar. 2017.
- CORREIA, V. C. *et al.* Utilization of vegetable fibers for production of reinforced cementitious materials. **RILEM Technical Letters**, Paris, v. 2, p. 145-154, 2017.
- COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fiber cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 518- 526, May 2005.
- DOBIAS, D.; POKORNY, P. Influence of partial replacement of hydraulic binder by ground brick on the characteristics of composites. **Procedia Engineering**, New York, v. 190, p. 568-574, 2017.
- EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Journal of Building Engineering**, New York, v. 63, part A, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105547>.
- FARRAPO, C. L. *et al.* Cellulose associate whit pet bottle waste in cement based composites. **Material Research**, São Carlos, v. 20, n. 5, p. 1380-1387, Oct. 2017.
- FERREIRA, M. M.; BARBOZA, A. S. R. Estudo do aproveitamento do cascalho de perfuração de poços como material de construção. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 9, n. 1, p. 181-187, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/19800827912013604>.
- FIALHO, P. F. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás: estudo do potencial de aplicação em concreto**. 2012. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.
- FIALHO, P. F.; CALMON, J. L.; PEREIRA, V. S. Resíduo de perfuração de petróleo como agregado miúdo em blocos de pavimentação. **Materiais de Construção Sustentáveis**, Florianópolis, v. 2, p. 137-146, 2014.
- FIALHO, P. F. *et al.* Substituição de areia em concretos por resíduos da perfuração de poços de petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: CBC, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319330440_Substituicao_de_areia_em_concretos_p_or_residuos_da_perfuracao_de_pocos_de_petroleo. Acesso em: 10 mar. 2022.

FONSECA, C. S. *et al.* Micro/nanofibrilas celulósicas de eucalyptus em fibrocimentos extrudados. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 59-68, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201622012084> .

GIANNINI, M. B. *et al.* Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data. **Italian Journal of Remote Sensing**, Milano, v. 44, n. 1, p. 27-37, Feb. 2012.

GIORDANO, B. L.; SOUZA, R. B.; JOHN, V. M. Influence of binder in the drying shrinkage of fiber cement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 7-16, out./dez. 2009.

GONÇALVES, J. T. **Fluidos não aquosos**: apostila do curso de formação em química de petróleo. Salvador: Universidade Corporativa; Petrobras, 2003.

GRAY, R. J.; JOHNSTON, C. D. The effect of matrix composition of fibre/matrix interfacial bond shear strength in fiber-reinforced mortar. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 14, p. 285-296, 1984.

GUIMARÃES, I. B.; ROSSI, L. F. dos S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração**: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta. Campinas: PDPETRO, 2007.

GUO, B.; GHALAMBOR, A. **Natural gas engineering handbook**. Houston: Gulf, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Projeto de controle da poluição**: histórico das diretrizes e dos procedimentos de análise nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de petróleo e gás, até junho de 2008. Brasília, DF: IBAMA, 2008. Nota Técnica: CGPEG/DILIC/IBAMA nº 03/08, de 13.06.2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Avaliação de opções para a destinação do cascalho gerado na perfuração de poços marítimos no Brasil**: fascículo 2. Rio de Janeiro: IBP, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 1, de 2 de janeiro de 2018**. Altera a Instrução Normativa 10, de 20 de setembro de 2011. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacoes&ano=2018&norma=92030>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ISMAIL, A. R. *et al.* Drilling fluid waste management in drilling for oil and gás wells. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 56, p. 1351-1356, 2017.

JAGABA, A. H. *et al.* Combined treatment of domestic and pulp and paper industry wastewater in a rice straw embedded activated sludge bioreactor to achieve sustainable development goals. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, Barcelona, v. 6, p. 100261, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100261>.

JO, B.; CHAKRABORTY, S.; YOON, K. W. A hypothetical model based on effectiveness of combined alkali and polymer latex modified jute fibre in controlling the setting and hydration behaviour of cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 68, p. 1-9, 2014.

KAZAMIAS, G.; ZORPAS, A. A. Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 322, p. 129098, 2021.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E. Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, n. 9, p. 3661-3667, Sept. 2011.

LABIB, W. A. Fibre reinforced cement composites. **Cement Based Materials**, New York, v. 31, 2018. DOI: [10.5772/intechopen.75102](https://doi.org/10.5772/intechopen.75102).

LEITÃO, A. R.; PAES, L. H.; DOLIVET, S. Interdição definitiva do amianto no Brasil?: um (longo) processo ainda não encerrado. **OpenEdition Journals**, New York, v. 16, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4000/laboreal.16217>.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Análise da redução da alcalinidade de compósitos cimento-madeira em função da substituição parcial do cimento Portland por pozolanas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/QXw5CV7Yn3vjM8Hthvsbcvd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2022.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 84, p. 7-19, 2008.

MACEDO, T. Minas Gerais proíbe comercialização de produtos com amianto. **Jornal da Manhã**, Uberaba, 18 jan. 2014. Disponível em: <https://mppr.mp.br/Noticia/Minas-Gerais-proibe-comercializacao-de-produtos-com-amianto>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MADDAH, H. A. Polypropylene as a promising plastic: a review. **American Journal of Polymer Science**, Rosemead, v. 6, n. 1, p. 1-11, 2016. DOI: [10.5923/j.ajps.20160601.01](https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01).

MARINELLI, A. L. *et al.* Development of polymeric composites with natural fibers: a contribution to the sustainability of Amazon. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, abr./jun. 2008.

MARQUES, E. A. R. **Caracterização de reservatórios petrolíferos**: análise comparativa de dois métodos para a caracterização de propriedades de um reservatório petrolífero. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

MARQUES, V. M.; GOMES, L. P.; KERN, A. P. Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 187-201, jan./mar. 2016.

MEDEIROS, J. M. *et al.* Concreto com substituição de sílica de casca de arroz e sílica ativa: efeitos do ataque por sulfato de magnésio. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, set. 2019. Edição especial.

MENDES, R. F. *et al.* Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 28, p. 37217-37230, 2021a.

MENDES, R. F. *et al.* Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 31, p. 42737-42749, 2021b.

MENESES, C. G.; PAULA, G. de A. Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. **RUnPetro**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 29-38, out. 2014/mar. 2015.

NASCIMENTO, C. A. O.; MORO, L. F. L. Petróleo: energia do presente, matéria-prima do futuro? **Revista USP**, São Paulo, n. 89, p. 90-97, 2011.

NASCIMENTO, J. E. F. *et al.* Calcium-rich biomass ash as a carbonate material in Portland base systems. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 373, jan./mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653732385>.

OLIVEIRA, L. J. C. *et al.* Gestão de resíduos: uma análise sobre os impactos da geração de rejeitos na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 5, p. 24447-24462, 2020.

ONWUKWE, S. I.; NWAKAUDU, M. S. Drilling wastes generation and management approach. **International Journal of Environmental Science and Development**, Lund, v. 3, n. 3, p. 252-257, 2012.

PANISSET, C. M. A. **Novas alternativas para o sistema de separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo: teste de uma unidade de VCS: busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclone e tratamento da borra de centrifugação por microondas.** 2014. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PAULINO, A. A. D. **Degradação térmica e catalítica da borra oleosa de petróleo com materiais nanoestruturados Al-MCM-41 e Al-SBA-15.** 2011. 126 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sonda de petróleo e gás.** 2010. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PEREIRA, M. S. *et al.* Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid. **Separation and Purification Technology**, London, v. 124, p. 68-73, 2014.

PEREIRA, T. G. T. *et al.* Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. **Materials Today: proceedings**, Cleveland, v. 31, n. 2, p. 309-314, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.394>.

PETRI JUNIOR, I. **Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PETRI JUNIOR, I. *et al.* Microwave remediation of oil well drill cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 134, p. 23-29, 2015.

PETROBRAS. **Exploração e produção de petróleo**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 13 dez. 2019.

PILAR, R. *et al.* Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0009>.

PIMENTA, J. A. A. *et al.* Estudo comparativo do desempenho térmico das coberturas de fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, v. 8, n. 3, p. 21-35, 2016. DOI: 10.5747/ce.2016.v08.n3.e163.

QIAN, X. *et al.* Fiber alignment and property Direction dependency of FRC extrudate. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 33, p. 1575-1581, 2003.

RAABE, J. **Compósitos de fibrocimento com fibras de polpa celulósica modificada com nano-sílica**. 2019. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

RADVANEK, M. *et al.* Change of carcinogenic chrysotile fibers in the asbestos cement (Eternit) to harmless waste by artificial carbonatization: petrological and technological results. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 252, n. 1, p. 390-400, May 2013.

RIPA, M. *et al.* The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA): the case of the municipal solid waste management in the metropolitan city Naples (Italy). **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 445-460, 2017.

RODRIGUES, M. S. *et al.* Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1347-1354, 2013.

ROSTAMI, R. *et al.* A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 241, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>.

SANTOS, S. F. *et al.* Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: a review of strategies to improve durability. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 65, n. 317, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.05514>.

SATA, V. *et al.* Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. **Cement e Concrete Composites**, Barking, v. 34, p. 94-100, 2012.

SAVASTANO JUNIOR, H. *et al.* Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction & Building Materials**, Guildford, v. 13, p. 433-438, Aug. 1999.

SCRIVENER, K. L.; WIEKER, W. Advances in hydration at low: ambiente and elevated temperatures. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT*, 1992, New Delhi. **Proceedings** [...]. New Delhi: ICCC, 1992.

SIDDIQUE, S.; LEUNG, P. S.; NJUGUNA, J. Drilling oil-based mud waste as a resource for raw materials: a case study on clays reclamation and their application as fillers in polyamide 6 composites. **Upstream Oil and Gas Technology**, Glasgow, v. 7, p. 100036, 2021.

SILVA, D. W. *et al.* Cementitious composites reinforced with kraft pulping waste. **Key Engineering Materials**, Baech, v. 668, p. 390-398, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.668.390>.

SILVA, D. W. *et al.* Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites. **Materials Today: proceedings**, Cleveland, v. 31, p. S348-S352, 2020.

SILVA, J. B. *et al.* Thermal oxidative stability of biodiesel/petrodiesel blends by pressurized differential scanning calorimetry and its calculated cetane index. **Processes**, Basel, v. 9, n. 1, p. 174, 2021.

SILVA, N. C. *et al.* Lean green concept used in the proposal for recycling gravel from oil and gas wells. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 2, n. 4, p. 1389-1401, jul./set. 2019.

SIMÕES, L. J. *et al.* Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto do cimento em matrizes cimentícias. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n. 22, p. 43-49, out. 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números da indústria: perfil de consumo 2019**. 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 17 fev. 2020.

SOUZA, P. J. B.; LIMA, V. L. **Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo**. 2002. 38 f. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002.

TAKAHASHI, T.; TSURUNGA, Y.; KONDO, T. Fabrication of highly isotactic polypropylene fibers to substitute asbestos in reinforced cement composites and analysis of the fiber formation mechanism. **Applied Polymer Science**, New York, v. 130, n. 2, p. 981-988, July 2013.

TEIXEIRA, J. N. *et al.* Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, New York, v. 11, p. 2193-2200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0536-y>.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres. **Material and Structures**, Oxford, v. 47, p. 433-446, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0070-0>.

TONOLI, G. H. D. *et al.* Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 193-201, 2010.

VIANA, Q. S. *et al.* Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 29, p. 1-11, Feb. 2022.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 262, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

VO, L. T. T.; NAVARD, P. Treatments of plant biomass for cementations building 19 materials: a review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 121, p. 161-176, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125>.

WANG, C. Q. *et al.* Pozzolanic activity and environmental risk assessment of water-based drilling cuttings of shale gas. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 348, p. 128657, 2022.

ZANATTA, H. L.; ROSA, A. B. **A estratégia de uma empresa do setor de fibrocimento: substituição do amianto por fibras alternativas.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/8725/4/A%20estrat%c3%a9gia%20de%20uma%20empresa%20do%20setor%20de%20fibrocimento%20substitui%c3%a7%c3%a3o%20do%20amianto%20por%20fibras%20alternativas.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020.

ZHANG, P.; QINGFU, L.; HAIYANG, Z. Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash. **Reinforced Plastics and Composites**, Westport, v. 30, n. 16, p. 1350-1358, 2011.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1 – PROPRIEDADES DE FIBROCIMENTOS EXTRUDADOS
PRODUZIDOS COM CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com
o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da substituição de calcário por cascalho de perfuração de poço de petróleo (RCP) sobre as propriedades físico-mecânicas, térmicas, microestruturais e de durabilidade de fibrocimentos. O experimento foi conduzido em escala laboratorial por processo de extrusão, executados em cinco tratamentos, sendo um controle e quatro com substituições de calcário por RCP (25, 50, 75 e 100%). Os fibrocimentos foram produzidos nas dimensões de 200 mm x 50 mm x 15 mm (comprimento, largura e espessura), utilizando em sua formulação 65% de cimento Portland CPV-ARI, 30% de calcário, 5% de celulose, 1% de modificador reológico HPMC (hidroxipropilmetilcelulose) e 1% de ADVA (aditivo poliéster carboxílico), ambos em relação a massa de cimento. Após a confecção, foram acondicionados em ambiente saturado por 28 dias para a cura da matriz. Foram avaliadas as propriedades físicas de densidade aparente (DA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA), propriedades mecânicas à flexão estatística de módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e tenacidade (T), aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, para avaliação da durabilidade. Foi realizada análise de variância e de regressão, ambas à 5% de significância para avaliação dos dados. O uso de RCP promoveu, de maneira geral, efeito significativo para as propriedades físicas dos fibrocimentos, proporcionando aumento da DA e diminuição da PA dos compósitos após o envelhecimento acelerado. Quanto a propriedade de AA todos os tratamentos atenderam a norma de comercialização. Na avaliação das propriedades mecânicas, todos os tratamentos avaliados aos 28 dias de cura atenderam as exigências da norma de comercialização para MOR e após o envelhecimento apenas o tratamento controle e o tratamento com 25% RCP se adequaram aos requisitos. A propriedade de MOE aos 28 dias não apresentou efeito significativo com a presença do RCP e após o envelhecimento acelerado, o RCP promoveu melhora na rigidez da matriz. As propriedades de LOP e T, diminuíram para as matrizes mais porosas, após o envelhecimento. Todos os tratamentos avaliados atenderam as normas de condutividade térmica, aos 28 dias e após o envelhecimento. Sendo assim, de maneira geral, o cascalho de perfuração pode ser considerado um material viável para utilização ao fibrocimento, destacando os compósitos produzidos com 25% RCP, sendo uma alternativa ao descarte desse resíduo e para permitir agregação de valor ao mesmo.

Palavras-chave: Resíduo. Compósitos. Matriz cimentícia. Propriedades.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é o recurso mais importante para geração de energia no mundo e sua indústria apresenta-se bastante diversificada e em constante avanço, sendo um dos principais motivadores da economia global (ALMEIDA; ARAÚJO; MEDEIROS, 2017; IKOTUN *et al.*, 2019; KAZAMIAS; ZORPAS, 2021). Seu uso expressivo em vários setores e aplicações, como combustíveis, produtos químicos, asfálticos, plásticos, borrachas, entre outros, confirma sua grande importância econômica (ADEBIYI, 2022; KUMAR; BARUA, 2022; NASCIMENTO; MORO, 2011; SOUZA; TERRA, 2020; SPÍNOLA *et al.*, 2019).

Durante as atividades e operações de exploração do petróleo, há geração de grandes volumes de resíduos considerados como perigosos, mas que se adequadamente tratados, destinados e reciclados, podem ter seus efeitos nocivos ao meio ambiente reduzidos (CHEN *et al.*, 2017; KAZAMIAS; ZORPAS, 2021). Entre esses resíduos, tem-se o popularmente conhecido cascalho de perfuração que merece destaque devido à significativa quantidade gerada e seus contaminantes (ALMEIDA; ARAÚJO; MEDEIROS, 2017; MENESES; PAULA, 2015; NJUGUNA *et al.*, 2022; OLIVEIRA; JUNGER, 2020).

Para o processo de abertura dos poços de petróleo, utiliza-se a rotação de uma broca conectada a uma coluna de perfuração associada a um fluido que é despejado a partir de uma sonda e ao retornar para superfície, retira o cascalho do poço e outros elementos como lodo, areia e gases (ASIM *et al.*, 2021; BALL; STEWART; SCHLIEPHAKE, 2012; PETRI JUNIOR *et al.*, 2015; PETROBRAS, 2019). Este produto misturado ao cascalho de perfuração passa por um processo de separação, em que ocorre a recuperação do fluido para seu reaproveitamento e o cascalho gerado precisa ser descartado (AYATI *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2014; WANG; YAN; KASAL, 2022).

O volume produzido desse cascalho de perfuração é variável e depende da profundidade, diâmetro da abertura do poço e das suas características geológicas, sistemas de fluido utilizados, tipo de broca e velocidade de perfuração, o que causa uma grande dificuldade em quantificar esse resíduo pois, a capacidade de cada poço é diferente (FOROUTAN *et al.*, 2018; INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS - IBP, 2021; INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS - IOGP, 2016; KAZAMIAS; ZORPAS, 2021; LEONARD; STEGEMANN, 2010).

Por consequência desses fatores, existe uma limitação no levantamento de dados em relação a geração de cascalho de perfuração offshore, no entanto estima-se que a quantidade gerada pode ser 20% superior ao volume do poço destinado para produção de petróleo

(FIALHO, 2012; GUIMARÃES; ROSSI, 2007; MENESES; PAULA, 2015). O IBP (2021), para expressar o volume de cascalho de perfuração que pode ser gerado durante o processo de exploração, apresenta os dados levantados por Almeida (2016) para os poços da Bacia de Campos – Brasil, relatando que a cada metro de poço perfurado, em profundidade, pode gerar a quantidade de 0,19 a 0,25 m³ (1,2 a 1,6 barril) de cascalho. No geral, as escavações são de grande profundidade, podendo chegar a 6 km, visto que o volume de cascalho varia e cada poço pode produzir alguns milhares de barris de resíduos de perfuração, essa quantidade significativa de material pode causar um alto impacto social e ambiental (ALMEIDA; RAPÔSO; MARQUES, 2021; ISMAIL *et al.*, 2017; ONWUKWE; NWAKAUDU, 2012; SIDDIQUE; LEUNG; NJUGUNA, 2021).

Diante de normativas brasileiras e internacionais cada vez mais restritas quanto aos requisitos para descarte de resíduos offshore, as limitações para tratamentos nas plataformas, estrutura para o manuseio e armazenamento do material eleva o custo e a complexidade do processo (BORGES-CAMPOS *et al.*, 2016; IBP, 2021). Para conduzir o resíduo até o continente e realizar o tratamento para recuperação do fluido envolve uma grande logística e ainda assim, não garante que o cascalho estará com teor de óleo adequado para que ocorra o descarte no mar (ALMEIDA; ARAÚJO; MEDEIROS, 2017; BALL; STEWART; SCHLIEPHAKE, 2012; PETRI JUNIOR *et al.*, 2015). Assim, o cascalho causa uma poluição secundária que necessita de um gerenciamento ao ser depositado em terra, pois pode gerar alterações na granulometria do solo, contaminações dos lençóis freáticos e ecossistema, além de necessitar de grandes áreas para armazenamento. Dessa maneira, a técnica de aterro não se apresenta viável, sendo necessário um recurso mais seguro para seu destino e aproveitamento (FIALHO, 2012; HU *et al.*, 2020; MENESES; PAULA, 2015; SIDDIQUE *et al.*, 2017; SIDDIQUE; LEUNG; NJUGUNA, 2021).

Atualmente, o reuso e a recuperação de resíduos industriais vêm sendo objeto de estudos visando principalmente sua inserção como matéria-prima em materiais de construção, proporcionando desenvolvimento sustentável e melhor gestão dos resíduos (ALENGARAM, 2022; ASIM *et al.*, 2021; ZHANG; QURESHI; PANESAR, 2022). As pesquisas relacionadas ao uso de cascalho de perfuração dentro da indústria da construção civil apontam possibilidades de utilização para pavimentação (DHIR *et al.*, 2010; TUNCAN; TUNCAN; KOYUNCU, 2000; WASIUDDIN; ALI; ISLAM, 2002), agregados na fabricação de concreto (ABOUTABIKH; SOLIMAN; EL NAGGAR, 2016; AYATI *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2022; MOSTAVI; ASADI; UGOCHUKWU, 2015; WANG *et al.*, 2017), tijolos (LI *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2019) e blocos (MOHAMMED; CHEESEMAN, 2011). Apesar disso, ainda são poucos

os tipos de produtos avaliados considerando a composição, microestrutura e propriedades dos resíduos do petróleo, tornando necessária a busca por novos processos e artefatos que possam viabilizar o uso do cascalho de perfuração de poço de petróleo.

Dentro deste cenário, pode-se destacar o fibrocimento, composto produzido por extrusão que se constitui de uma matriz cimentícia reforçada com fibras naturais ou sintéticas e que ainda não foi avaliado com a utilização de cascalho de perfuração de poço de petróleo. Este produto apresenta destaque na construção civil em função da sua praticidade de produção e versatilidade nas possíveis aplicações, sendo utilizado como cobertura para vários tipos de edificações, placas para paredes, telhas e caixas d'água (EUGÊNIO *et al.*, 2023; FONSECA *et al.*, 2016; LABIB, 2018; MENDES *et al.*, 2021b; PEREIRA *et al.*, 2020; ROSTAMI *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020, 2021; VIANA *et al.*, 2022).

Portanto, a avaliação do cascalho de perfuração de poço de petróleo (RCP) visa a disponibilização de novas matérias-primas para produção de fibrocimentos, permitindo desenvolver novas propriedades aos compostos, influenciando no custo de produção e destinação adequada e agregação de valor ao resíduo. Neste contexto, esse trabalho avaliou o efeito da utilização do cascalho de perfuração de poço de petróleo sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais, térmicas e de durabilidade de fibrocimentos extrudados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

O RCP utilizado passou por um processo de peneiramento com aberturas de 10 a 40 mesh para separá-lo da sua primeira fração e este material foi fornecido pela Petrobras S.A. (Bacia de Campos – RJ, Brasil). A polpa de celulose de eucalipto utilizada foi cedida pela empresa Suzano Papel e Celulose (Limeira – SP, Brasil). O cimento Portland CPV-ARI e CII-F32, o calcário calcítico agrícola e a areia, foram obtidos na cidade de Lavras – MG, Brasil. O hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) foi doado pela empresa Aditex Ltda. (Santana – SP, Brasil) e o poliéster carboxílico (ADVA 175) foi doado pela empresa Grace Brasil Ltda. (Sorocaba – SP, Brasil).

2.2 Caracterização do cascalho de perfuração de poço de petróleo

O RCP foi caracterizado quanto a sua composição granulométrica, conforme a norma NBR7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2016a). Para a determinação da pozolanicidade foram seguidas as premissas da norma NBR 5752 (ABNT, 2014a). O processo utilizado para mistura, moldagem, cura e ruptura dos corpos de prova foram os descritos pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019). O índice de desempenho do RCP em associação com cimento Portland aos 28 dias, foi calculado de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014c).

A análise de compatibilidade de cura do RCP com o cimento foi avaliada de acordo com os procedimentos apresentados por Hofstrand, Moslemi e Garcia (1984), com modificações. A pasta controle (água+cimento) é comparada a uma mistura que contém RCP (água+cimento+material). Avaliou-se também as formulações com RCP em diferentes proporções (0, 25, 50, 75 e 100% em substituição ao calcário), cimento, celulose e água. As misturas foram transferidas para caixas de isopor e tiveram as temperaturas registradas de forma sistemática por um termo sensor conectado a um computador que obteve as temperaturas a cada minuto, durante 24h. As caixas de isopor foram colocadas dentro de uma caixa térmica fechada hermeticamente. O índice de inibição foi calculado de acordo com a metodologia de Hofstrand, Moslemi e Garcia (1984). A compatibilidade do RCP adicionado ao cimento foi classificada de acordo com Okino *et al.* (2004), a qual classifica como baixa inibição índice até 10%, inibição

intermediária índice de 10 a 50%, alta inibição índice de 50 a 100% e muito alta inibição índice maior que 100%.

Para determinação dos teores de água, óleo e sólidos e a densidade do RCP foi utilizado o método da American Petroleum Institute RP-13B-2 (API, 2014). A análise de Fluorescência de Raios X foi realizada para identificar composição e concentração dos elementos do RCP, conforme metodologia de Petri Junior *et al.* (2017).

2.3 Processo de fabricação dos fibrocimentos

A matriz cimentícia utilizada como controle foi composta por cimento Portland do tipo CPV-ARI de alta resistência inicial (ABNT, 2019); 1% HPMC e 1% ADVA 175, ambos em relação a massa do cimento para auxiliar no processo de extrusão como modificadores reológicos (MENDES *et al.*, 2021b; SILVA *et al.*, 2020). Também foi utilizado o calcário calcítico agrícola moído; celulose seca; e água (relação água/cimento de 30%), sendo adicionada aos poucos até o ajuste ideal do ponto de plasticidade e trabalhabilidade da mistura. O cimento, calcário e a celulose foram adicionados nas proporções de 65, 30 e 5%, respectivamente. O RCP foi aplicado nas proporções de 25, 50, 75 e 100% em substituição a quantidade de calcário utilizado para a produção dos fibrocimentos. Os corpos de prova dos fibrocimentos foram produzidos em escala laboratorial por procedimento de extrusão. As variáveis do plano experimental estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Plano experimental.

TRATAMENTO	CIMENTO	CELULOSE	CALCÁRIO	CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO
CONTROLE	65,0%	5,0%	30,0%	0,0%
T1	65,0%	5,0%	22,5%	7,5%
T2	65,0%	5,0%	15,0%	15,0%
T3	65,0%	5,0%	7,5%	22,5%
T4	65,0%	5,0%	0,0%	30,0%

Fonte: Da autora (2022).

As matérias-primas utilizadas nas formulações foram pesadas e separadas, em seguida foram misturadas em uma bateadeira planetária com rotação de 285rpm por um período de 5min para promover a homogeneização da pasta cimentícia. A massa formada foi processada em uma extrusora helicoidal com velocidade de rosca de 25 rpm para moldagem dos corpos de prova com dimensões aproximadas de 200mm x 50mm x 15mm (comprimento, largura e espessura). Após a moldagem, os fibrocimentos foram armazenados em sacos plásticos, simulando ambiente saturado por 28 dias para cura dos fibrocimentos. Foram produzidos quatorze corpos de prova para cada tratamento, sendo sete deles destinados a análises aos 28 dias de cura e os outros sete destinados a análises de durabilidade após o processo de envelhecimento acelerado.

2.4 Envelhecimento acelerado

O método de envelhecimento acelerado usados para os fibrocimentos foi de acordo com a norma NBR 15498 (ABNT, 2016b), por meio de ciclos de aspersão e secagem. Para execução do ensaio foram realizados 25 ciclos, sendo cada fase determinada por aspersão de água durante 2h e 50min; pausa de 10min; secagem em estufa por 2h 50min a 100°C e pausa de 10min. Após os ciclos de envelhecimento acelerado os corpos de prova foram destinados à caracterização das propriedades.

2.5 Propriedades físico – mecânicas dos fibrocimentos

A caracterização das propriedades dos fibrocimentos foi realizada aos 28 dias de cura e após os ciclos de envelhecimento acelerado. As propriedades físicas determinadas foram densidade aparente (DA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA), de acordo com os procedimentos descritos pela norma American Society for Testing and Materials C948-81 (ASTM, 2016). Para avaliação mecânica dos tratamentos, os corpos de prova foram submetidos a testes de flexão estática de três pontos com vão de 150mm realizados a uma velocidade de 2mm/minuto para determinação do módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e tenacidade (T). Os testes mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca Instron (São José dos Pinhas, Brasil), foram baseados nos procedimentos sugeridos pela International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM TECHNICAL COMMITTEE 49 TFR, 1984).

2.6 Propriedade térmica dos fibrocimentos

Para análise da propriedade térmica dos fibrocimentos foi feito o ensaio de condutividade térmica que permite determinar o efeito das diferentes porcentagens do RCP em substituição ao calcário sobre o isolamento térmico dos fibrocimentos. Foi utilizado um equipamento advindo de uma adaptação do método da coluna fracionada, descrita por Eugênio *et al.* (2021). Os fibrocimentos foram posicionados no equipamento e o ensaio foi realizado simulando a exposição do material à temperatura de 50°C, com aquecimento de 1°C/min e ciclo de ensaio para cada tratamento de aproximadamente 3h. O ensaio forneceu valores de temperatura na base do padrão (fonte de energia) e temperaturas na base e no topo do fibrocimento obtido pelos sensores. O resultado de isolamento térmico do material foi obtido pela diferença entre os sensores após estabilização térmica. Por fim, com os dados coletados pelo equipamento Data Collector, modelo IM DC 100-01E, foram calculadas as condutividades térmicas dos fibrocimentos para cada tratamento.

2.7 Propriedades microestruturais dos fibrocimentos

A caracterização microestrutural foi realizada por análises da morfologia das superfícies dos fibrocimentos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento da marca ZEISS, modelo DMS 940 (Oberkochen, Alemanha). Para as análises, os corpos de prova foram revestidos com uma camada de ouro e analisados usando uma tensão de aceleração de 5kV.

A análise de Difração de Raios X (DRX) avaliou as estruturas cristalinas do RCP e dos fibrocimentos mediante a avaliação de padrões de difração obtidos em um difratômetro de raios X modelo X XRD-6000 (Shimadzu, Kyoto, Japão). As amostras foram analisadas de 5 a 45° (2 θ) com taxa de varredura de 1°.min⁻¹. As estruturas cristalinas foram identificadas através da comparação de dados encontrados na literatura.

2.8 Análise estatística

Os resultados das propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos fibrocimentos aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado foram analisados com um delineamento experimental inteiramente casualizado. Os resultados foram submetidos à análise de variância e de regressão,

ambos com significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando o software Sisvar® (Versão 5.6) (FERREIRA, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do cascalho de perfuração de poço de petróleo

3.1.1 Análise granulométrica

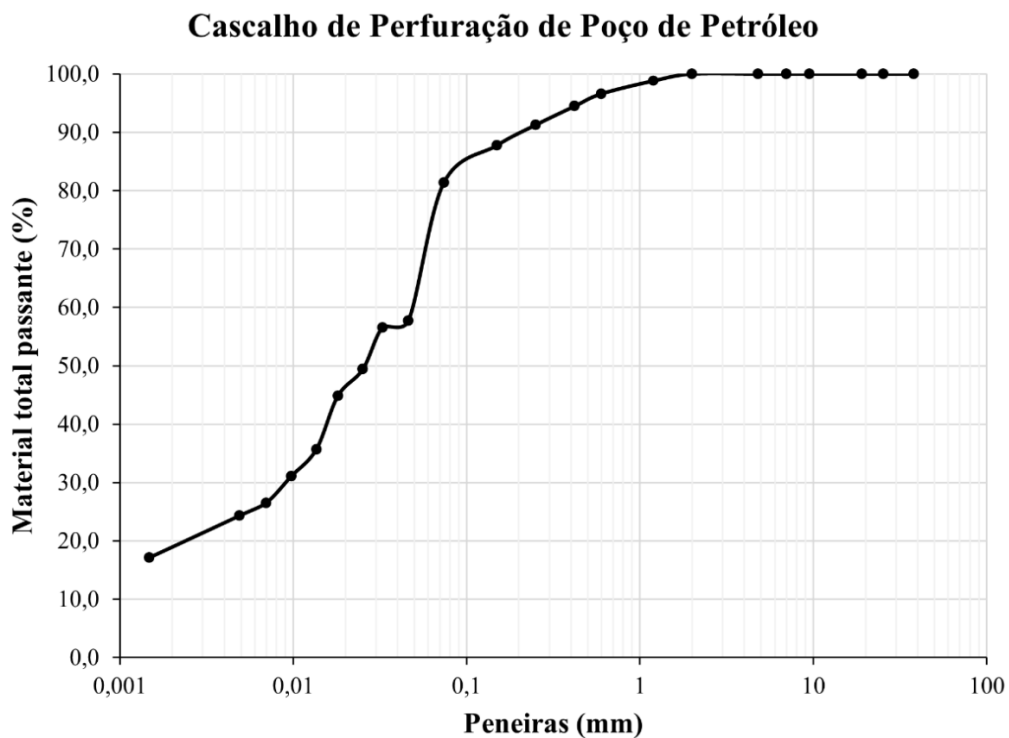
Os valores referentes a composição granulométrica, curva da distribuição das partículas de RCP e a curva granulométrica de percentual retido e retido acumulado, estão apresentados na Tabela 2 e Figuras 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2 - Composição granulométrica do cascalho de perfuração de poço de petróleo.

Composição granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
19	38	33	7	3	0

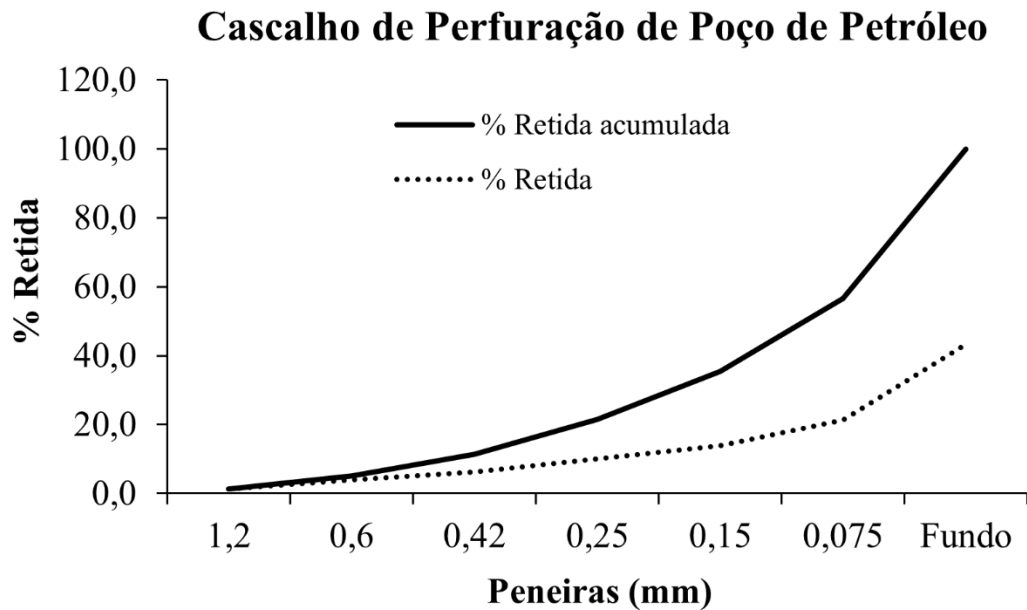
Fonte: Da autora (2022).

Figura 1 - Curva de distribuição das partículas do cascalho de perfuração de poço de petróleo.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 2 - Curva granulométrica de percentual retido e retido acumulado do cascalho de perfuração de poço de petróleo.



Fonte: Da autora (2022).

A maior porcentagem de partículas do RCP está compreendida entre as dimensões de 0,15 a 0,075mm. Também foram determinados o módulo de finura (MF) e dimensão máxima característica (DMC), com valores de 2,32 e 1,2mm, respectivamente.

De acordo com o ensaio de granulometria, o material tem predominância da fração areia correspondendo a 43% da composição do RCP avaliado, a qual contempla partículas de areia fina (0,06 a 0,2 mm), média (0,2 a 0,6mm) e grossa (0,6 a 2,0mm) (ABNT, 2022a). O material avaliado se encontra dentro dos limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022b), uma vez que a maior quantidade de areia fina fica retida na peneira de 0,15mm.

Fialho *et al.* (2012) analisaram o RCP *onshore*, no norte do Estado do Espírito Santo, e para esse resíduo encontrou MF de 1,65 e DMC de 1,18mm. Maia *et al.* (2016) caracterizaram o RCP da Bacia Potiguar, no estado do Rio Grande do Norte – Canto do Amaro e pela distribuição granulométrica encontraram MF de 2,18 e DMC de 4,8mm. Almeida, Rapôso e Marques (2021), ao avaliarem as características granulométricas do RCP advindo da Bacia Sergipe – Alagoas, observou um MF para o material de 2,87, além de ter a maior parte do material caracterizado também como areia. As pequenas variações observadas no MF e na DMC, podem estar associadas ao fato do material ter sido recolhido de regiões e poços

diferentes e com tipos de exploração distintos e, portanto, apresentarem características físicas e químicas variáveis (NJUGUNA *et al.*, 2022).

Eugênio *et al.* (2023) ao avaliarem a substituição de pó de calcário por resíduo de minério de ferro, encontraram valores de módulo de finura para o calcário de 3,73 e se encontra dentro da fração areia, no entanto reforçam que a aplicação de misturas entre o calcário e materiais de partículas mais finas, assim como o RCP, podem melhorar a compactação dos compósitos. Como este trabalho visa a substituição de calcário pelo RCP, essa característica pode auxiliar na melhoria das propriedades de densidade, porosidade e absorção de água da matriz cimentícia.

3.1.2 Ensaio de pozolanicidade

O RCP apresentou propriedade pozolânica de acordo com o resultado obtido de 77,1% da resistência do material referência produzido com 25% de substituição do cimento. A resistência da argamassa controle foi de 30,26MPa e o tratamento avaliado obteve o valor de 23,34MPa. Portanto, de acordo com a norma C618-19 (ASTM, 2019) o RCP apresenta atividade pozolânica, pois para ser considerado um material pozolânico, a resistência à compressão precisa estar acima de 75% do resultado obtido para o controle.

A norma NBR 12653 (ABNT, 2014c) cita que a atividade pozolânica de um material está na sua condição de formar misturas com propriedades ligantes. No geral, são substâncias silicosas ou sílico aluminosas que isoladas possuem baixa propriedade cimentante, mas em contato com umidade reagem com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ formando compostos com capacidades ligantes. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado durante a fase de hidratação dos silicatos reage com a pozolana presente no cimento e gera uma produção complementar de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), o que pode proporcionar aumento da estabilidade mecânica, redução da porosidade e melhoria na conservação da matriz (MADHKHAN; KATIRAI, 2019; PILAR *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2020).

Além disso, a propriedade pozolânica dos materiais está ligada à sua característica física, chamada de reação “*filler*”, que atua no preenchimento dos vazios da matriz cimentícia, diminuindo a permeabilidade do compósito e no efeito de hidratação das partículas de cimento Portland no período inicial de cura (BENJEDDOU *et al.*, 2021). Esta reação garante maior quantidade de hidratos, elevando a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ neste intervalo, incrementando posteriormente a reação pozolânica (ISAIA; RIZZATTI, 2021; SOBOLEV *et al.*, 2009).

Baseado nessa definição, espera-se que o RCP apresente boa interação com o cimento e aumente as características de resistência do fibrocimento. De acordo com a literatura, quanto maior a finura das partículas e menores seus diâmetros, isso pode impactar nas reações químicas da matriz e influenciar no aumento da resistência e compactação do fibrocimento (AQEL; PANESAR, 2020; CORDEIRO *et al.*, 2008; ISAIA *et al.*, 2017), o que demonstra que o RCP pode se comportar também como material de preenchimento para os poros gerados na matriz.

3.1.3 Análise de compatibilidade

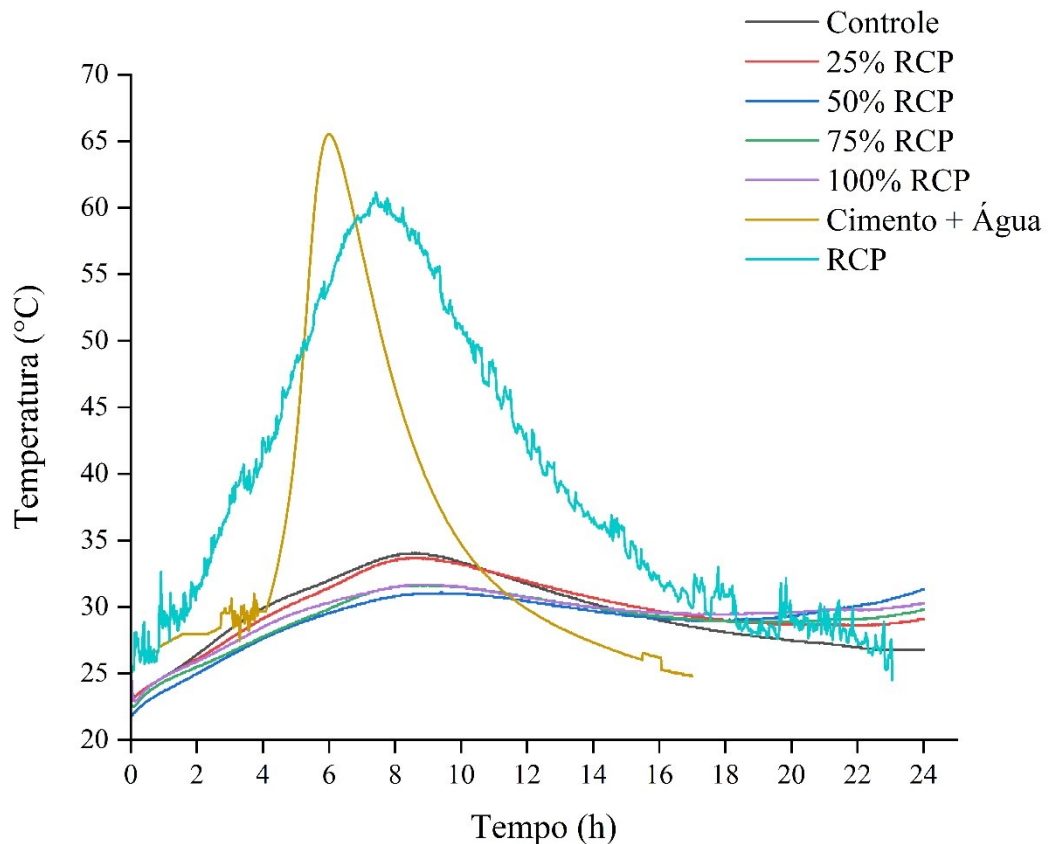
A curva de hidratação da pasta de cimento (cimento + água) como parâmetro de comparação para a curva do tratamento (cimento + água + cascalho de perfuração) apresentou uma temperatura máxima de hidratação inicial próxima a 66°C, a qual ocorreu em um tempo de ensaio de 6h. Para o tratamento com RCP, observa-se que houve uma redução de 6°C da temperatura máxima de hidratação (60°C) e aumento do tempo de cura (7,5h).

Dessa forma, o RCP apresenta pouca influência sob a cura do cimento, sendo que essa pequena inibição observada pode estar relacionada à diminuição da quantidade de cimento na formulação da pasta (MENDES *et al.*, 2017; NASSER; AL-MEFARREJ, 2010).

As curvas foram convertidas em índices de inibição segundo a metodologia usada por Hofstrand, Moslemi e Garcia (1984) e o valor obtido para o tratamento com RCP foi de 4,04%. O RCP apresentou pouca interferência na hidratação inicial do cimento, mostrando-se compatível com o cimento. De acordo com a classificação de Okino *et al.* (2004), o RCP é um material de inibição baixa.

Para os tratamentos avaliados com 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de RCP foram classificados com inibição moderada e os valores dos IH foram de 36,09%, 36,11%, 40,53%, 38,98% e 38,93%, respectivamente. A temperatura máxima diminuiu 50%, aproximadamente, em relação à pasta de cimento e o tempo de ensaio aumentou em média para 8,5h, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Curvas do ensaio de inibição para os materiais e tratamentos utilizados na produção dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

Com o aumento da quantidade de RCP nas misturas do fibrocimento, o IH se apresentou com nível moderado, mas ainda assim, os valores de inibição se apresentaram próximos. Como pode-se observar, o tratamento sem a presença de RCP teve aumento na inibição em comparação à pasta referência, isso porque os componentes da matriz do fibrocimento apresentam outros elementos, como a celulose que de acordo com estudos da composição química dos materiais lignocelulósicos podem interferir na cura da matriz cimentícia (LAVERDE *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2020).

De acordo com Horta, Paula e Calixto (2022), a diminuição da temperatura máxima da pasta de cimento com o resíduo usado pode ter relação com o volume da mistura, resultando na geração de uma quantidade de calor inferior a necessária para a ocorrência da reação exotérmica do cimento que confere melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, principalmente nos primeiros instantes de cura, impossibilitando a nucleação e a formação dos cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A análise de compatibilidade se mostra importante por auxiliar na estimativa de como será a cura do cimento, indicando a possibilidade e a compatibilidade do uso do material na formulação de fibrocimentos e nas suas qualidades finais (EUGÊNIO *et al.*, 2023; NUNES; POLESELLO, 2022).

3.1.4 Teores de água, sólidos e óleo e densidade

Na Tabela 3 estão apresentados os valores obtidos para os teores de água, sólidos e óleo e densidade do RCP.

Tabela 3 - Resultados das análises de teores de água, sólidos e óleo e densidade do cascalho de perfuração de poço de petróleo.

Teor de água (%)	5,97 ± 0,04
Teor de sólidos (%)	80,37 ± 0,92
Teor de óleo (%)	13,66 ± 0,96
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,21 ± 0,10
Densidade Real (g/cm ³)	2,84 ± 0,12

Fonte: Da autora (2022).

Os valores obtidos para densidade do RCP estão próximos aos observados na literatura. Almeida, Araújo e Medeiros (2017), apresentaram valores para densidade de 2,6 g/cm³ para RCP na área do pré-sal na Bacia de Santos, Brasil (*offshore*) e Petri Junior (2014), observou valores de densidade real para RCP *offshore* de 2,68g/cm³ e densidade bulk de 1,29g/cm³.

Petri Junior (2014) ao fazer a caracterização do RCP *offshore* encontrou valores para o teor de água, sólidos e óleo de 5,43%, 87,45% e 7,12%, respectivamente. Esses resultados são muito próximos aos obtidos neste estudo, embora o teor de óleo tenha apresentado uma variação maior, com valor médio de 13,66%, valor acima do permitido em norma.

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2018), para que seja feito o descarte dos RCP *offshore* em ambiente marítimo é necessário que sejam realizados testes de toxicidade no material, que não deve apresentar teor de base orgânica não aquosa acima do limite de 6,9% m/m (média acumulada por poço). No entanto, atualmente a IN nº1/2018 se encontra suspensa e o órgão regulamentador responsável adotou diretrizes mais restritivas adotadas pela *Environmental Protection Agency*

– EPA, que menciona que o cascalho para ser descartado não deverá exceder o limite de 5,9% m/m (massa/massa) (IBP, 2021).

3.1.5 Fluorescência de Raios X

Na Tabela 4 estão apresentados a composição química do RCP.

Tabela 4 - Resultados da análise de composição química do cascalho de perfuração de poço de petróleo.

Cascalho de perfuração de poço de petróleo			
		K (%)	2,74
Si (%)	24,50	Sr (%)	1,84
Ba (%)	16,40	Cl (%)	1,25
Fe (%)	15,59	Zr (%)	1,10
Al (%)	11,04	Ti (%)	0,84
Ca (%)	10,58	Zn (%)	0,14
S (%)	9,92	Outros (%)	1,16
Mg (%)	2,91		

Si – Silício; Ba – Bário; Fe – Ferro; Al – Alumínio; Ca – Cálcio; S – Enxofre; Mg – Magnésio; K – Potássio; Sr – Estrôncio; Cl – Cloro; Zr – Zircônio; Ti – Tálcio; Zn – Zinco.

Fonte: Da autora (2022).

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) mostrou que as concentrações mais significativas do material avaliado são para os elementos químicos de Si, Ba, Fe, Al, Ca, S e Mg, respectivamente, representando uma fração de, aproximadamente, 90% da composição do RCP. O Si é o elemento que possui maior concentração no resíduo, componente do quartzo (SiO₂), amplamente observado em materiais arenosos, se mostrando compatível com a análise granulométrica onde a maior fração do material se apresentou como areia (TABELA 2).

Em um estudo sobre a determinação química e mineralógica de cortes de perfuração, Pereira *et al.* (2012), observaram quantidades significativas de Si (24,0%), Al (10%) e Ca (3,6%), observando que quando o material passa pelo processo de secador de cascalhos, a quantidade de Al tende a ser superior à de Ca. Para os elementos Fe e Na, os autores também observaram quantidades significativas, de 6,1% e 3,8%, respectivamente e os elementos Mg, K e Cl se apresentaram em pequenas quantidades.

A caracterização de RCP (Bacia Sergipe – Alagoas), pelo método FRX feita por Almeida, Rapôso e Marques (2021), apresentaram valores expressivos para os elementos Ca

(65,89%); Si (8,75%); Fe (6,81%) e Mg (6,58%). O alto valor de Ca na amostra, é justificado pelos autores devido ao tipo de rocha dos reservatórios petrolíferos, que neste caso eles mencionam ser rochas carbonáceas.

De acordo com Petri Junior *et al.* (2017), ao avaliarem a composição química dos RCP *offshore* as concentrações observadas foram de 36,0% Fe; 18,1% Si; 11,7% Ba; 10,0% Al; 8,5% Ca; 7,9% Mg; 3,7% Sr; 2,2% Zr e 1,7% Ti. Os valores mais significativos, para Ca, Si, Mg e Al, é justificado pela constituição de suas rochas sedimentares e a grande quantidade de Ba nos RCP *offshore*, eles associam ao fluido de base sintética que foi utilizada no poço de perfuração

Segundo Petri Junior *et al.* (2015), elementos como Si, Fe, Al e Mg, estão diretamente relacionados à composição química dos RCP. Os elementos Fe e Al são observados como hidróxidos $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ e $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ e em associação ao silicato (SiO_2), formam a estrutura cristalina, observada em minerais de argila. As formações cristalinas que são observadas na areia, são principalmente os agregados de quartzo e argila, agregados de minerais de argila (PEREIRA *et al.*, 2012). A presença das fases cristalinas de quartzo pode ser observada na análise de DRX do material (FIGURA 4).

Apesar de nem todas as concentrações dos elementos em destaque observadas nesses estudos serem tão próximas as encontrados neste trabalho, considera-se o fato de que os materiais avaliados são de diferentes regiões, tipos de rochas e tipos de fluidos de perfuração, o que irá interferir diretamente na quantificação dos elementos do cascalho. No entanto, existe uma grande semelhança entre os elementos observados nas análises, sendo as maiores concentrações de Ca, Si, Fe, Mg e Al advindas dos constituintes das rochas sedimentares.

Tais elementos químicos encontrados nos RCP têm potencial para interagirem com os principais componentes do cimento que são os silicatos (silicato tricálcico – C3S; silicato dicálcico – C2S, alita e belita, respectivamente), o aluminato (aluminato tricálcico – C3A), aluminoferrita tetracálcica (C4F) e óxido de cálcio (CaO – conhecido usualmente como cal) (FU *et al.*, 2017).

Todos os elementos necessários para completar as reações de hidratação e desenvolvimento de resistência às matrizes cimentícias, são encontrados no RCP. O elemento Ca em contato com a água (H_2O), forma o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, responsável pela solidificação do cimento; e o elemento Si usados nas formações de compostos de silicatos, que concede resistência à matriz, permite que ocorra as reações pozolânicas entre SiO_2 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que resulta na formação de C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) (GARCIA *et al.*, 2015).

Outros elementos quantificados na análise de FRX, tais como o Ba, Sr e Zn, fazem parte da quantidade de fluido de perfuração que permanece incorporada no cascalho, mesmo após os

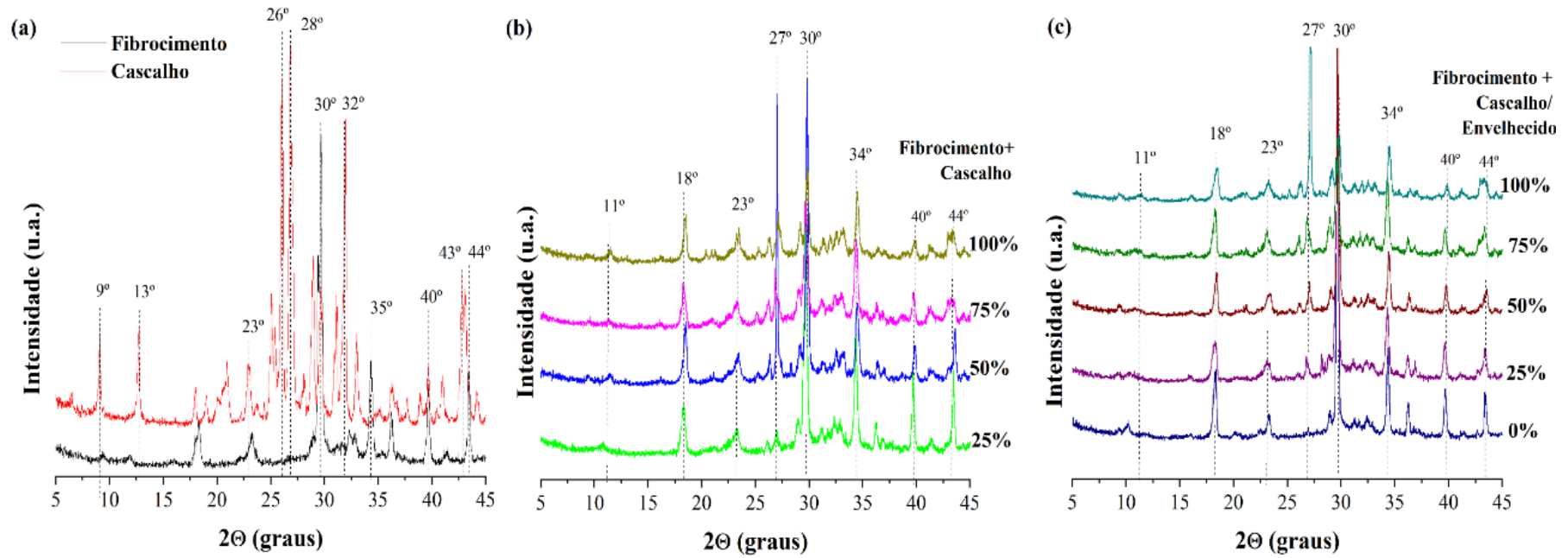
processos de separação da fase líquida e sólida do resíduo de poço de petróleo (NJUGUNA *et al.*, 2022). A presença destes metais pesados no material para descarte, reforça a necessidade de buscar alternativas para sua aplicação e gestão, através de abordagem que possam reduzir significativamente seu impacto ambiental.

3.1.6 Difração de Raios X

Na análise de DRX é possível a identificação dos minerais a partir dos padrões apresentados pelo difratograma que demonstram as fases de cristalinidade do material. A análise cristalina do RCP e dos fibrocimentos aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado, está apresentada na Figura 4.

A presença de quartzo (SiO_2) está fortemente representado em todos os difratogramas das amostras analisadas sendo possível identificá-lo, principalmente para o cascalho de perfuração entre as posições $2\Theta = 26^\circ$, 28° e 30° , podendo ter ocorrências menos intensas, mas ainda presentes nas posições entre $2\Theta = 21^\circ$ e 40° (ALMEIDA *et al.*, 2013; MEDEIROS *et al.*, 2016). Este resultado, corrobora com os valores apresentados pela análise de FRX, onde o material mais predominante foi o Si, que se apresenta no RCP como óxido de silício (SiO_2).

Figura 4 - Difratoformas de raios x do cascalho de perfuração de poço de petróleo e dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

Observando a Figura 4 (a), o difratograma referente ao RCP, a calcita (CaCO_3) está presente nas posições de $2\Theta = 23^\circ$ e 32° . O fibrocimento controle, sobreposto ao difratograma do RCP, representa um padrão em seus picos, principalmente nas posições de 9° e 44° , conforme os padrões associados aos minerais que fazem parte da matriz de cimento, percebe-se que a posição $2\Theta = 44^\circ$, refere-se a calcita (CaCO_3).

Quando os materiais estão associados, conforme Figura 4 B, pode-se observar que alguns picos não se mantiveram e outros foram formados, demonstrando que esses materiais interagem entre si e está ocorrendo a cura da matriz cimentícia. Os picos nas posições $2\Theta = 9^\circ$ e 13° , não se repetem nos fibrocimentos, e surgem dois novos picos nas posições $2\Theta = 11^\circ$ e 18° . Nos fibrocimentos aos 28 dias de cura, representam teores de alumina (Al_2O_3) e silicatos de cálcio hidratados (C - S - H), respectivamente, sendo a alumina um dos constituintes fundamentais do cimento e o C - S - H, o resultado da hidratação dos compostos do cimento (ALMADA *et al.*, 2022).

Outros dois padrões observados são os de 32° e 35° , presentes nos difratogramas de cascalho de perfuração e do tratamento controle e após a inserção do material na composição dos fibrocimentos, formam um novo pico, que está relacionando ao aumento das reações de portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], nos padrões de $2\Theta = 18^\circ$ e 34° (FIGURA 4 B), demonstrando que está ocorrendo hidratação e cura nas matrizes de fibrocimento com RCP (ALMEIDA *et al.*, 2013).

Com a adição de RCP e com continuidade da cura da matriz, a quantidade de portlandita diminui com o tempo e após o envelhecimento acelerado dos fibrocimentos, isso se deve aos processos de hidratação do cimento, podendo ser observado na Figura 4C, nos padrões $2\Theta = 18^\circ$ e 34° que se mantem presentes, mas com intensidade inferior à observada para os fibrocimentos aos 28 dias. Segundo Zhu *et al.* (2013), o pico que se encontra na posição $2\Theta = 27^\circ$ indica a presença de C-S-H, ou seja, demonstra que ainda está havendo cura da matriz e neste caso, o pico após o envelhecimento acelerado se mostra com intensidade mais acentuada.

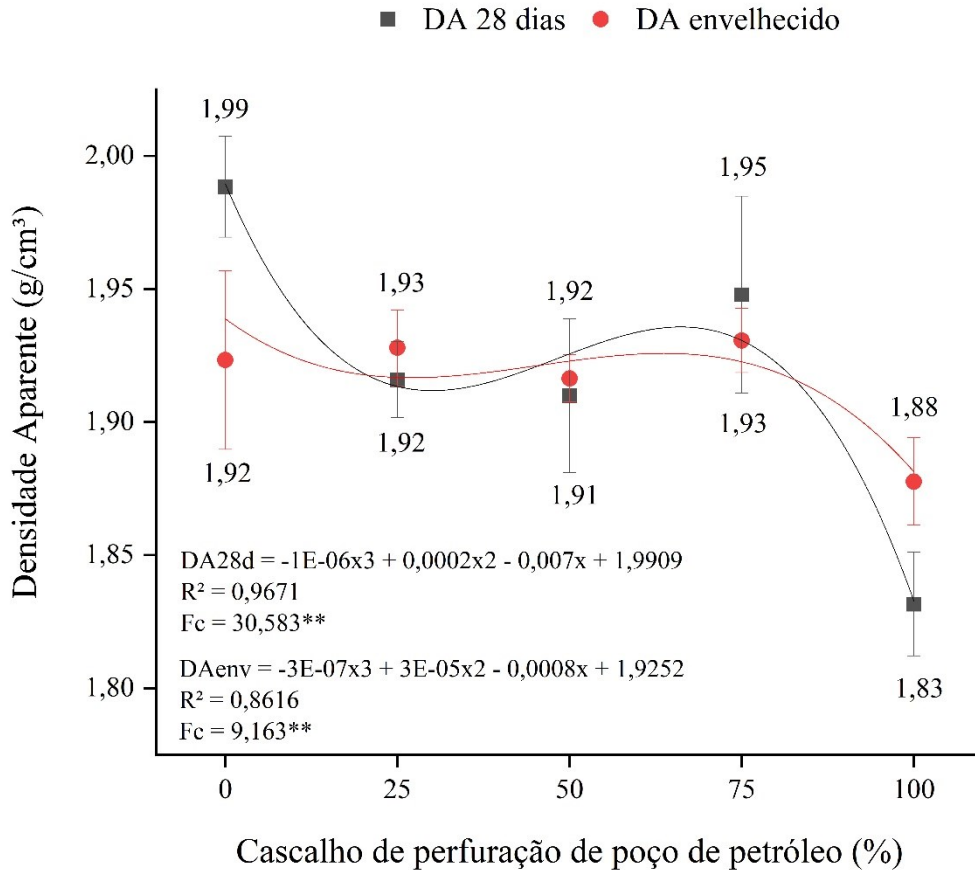
À medida que os elementos se interagem, há a formação de novos elementos e alterações na estrutura cristalina das fases, as curvas se deslocam e aumentam a posição do halo e diminui o pico de intensidade de cristalinidade, como pode ser observado na Figura 4 C, após o envelhecimento acelerado.

3.2 Caracterização física dos compósitos

Na Figura 5 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de densidade aparente dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 5 - Propriedade física de densidade aparente (g/cm^3) para os fibrocimentos.

** Significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Houve efeito significativo da porcentagem de RCP em substituição ao calcário sobre a DA dos fibrocimentos, quando estes foram avaliados aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado. A amplitude dos valores médios encontrados para os fibrocimentos aos 28 dias foi de $1,83 \text{ g/cm}^3$ a $1,99 \text{ g/cm}^3$. Para os fibrocimentos após o envelhecimento acelerado as médias variaram entre $1,83 \text{ g/cm}^3$ a $1,93 \text{ g/cm}^3$.

Observa-se que a DA aos 28 dias de cura diminui com o aumento da substituição de calcário por RCP, exceto para o tratamento com 75%RCP que teve comportamento oposto aos demais, apresentando aumento para essa propriedade em relação aos fibrocimentos com utilização de RCP. A presença de RCP, apesar de apresentar baixo índice de inibição, afeta a cura inicial dos fibrocimentos devido ao aumento das proporções de substituição de calcário pelo RCP e como consequência, retarda a promoção de resistência e compactação da matriz.

Após o processo de envelhecimento acelerado, a DA do tratamento controle diminuiu conforme o esperado pois, um dos efeitos do envelhecimento é a perda da interação entre matriz e fibra, refletida pela degradação do material vegetal e contribuindo para o aumento da porosidade do fibrocimento (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; CLARAMUNT *et al.*, 2016; FONSECA *et al.*, 2016; WANG; YAN; KASAL, 2022). Para os tratamentos com RCP, de forma geral, a DA aumenta em relação aos 28 dias, mas os fibrocimentos envelhecidos mantem valores muito próximos até 75%RCP.

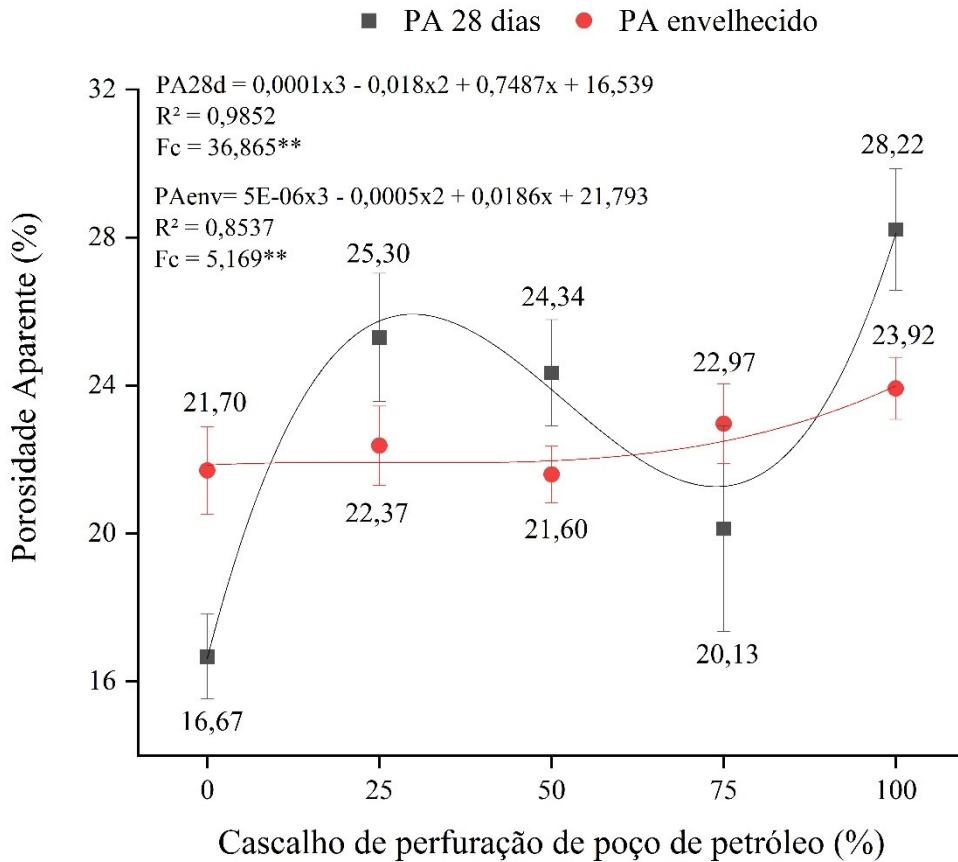
Como o RCP retarda a cura inicial, os ciclos de molhagem e secagem do envelhecimento acelerado permite a continuidade da hidratação e das reações de cura, proporcionando a formação de produtos de hidratação (FIGURA 4C) e aumentando a densificação dos fibrocimentos, relacionado a sua condição pozolânica, suas características físicas e químicas (MEJIA-BALLESTEROS *et al.*, 2021).

Os fibrocimentos com 100%RCP, tanto para a propriedade DA aos 28 dias quanto após envelhecimento acelerado, foram os que apresentaram os resultados de menor densidade. O RCP tem potencial pozolânico, e essa característica se relaciona a capacidade de reatividade desse material com o hidróxido de cálcio, produzido durante os processos de hidratação do cimento (MÁRMOL *et al.*, 2013), sem a presença do calcário (carbonato de cálcio – CaCO_3) que tem função de hidratar o cimento, aparentemente essas reações químicas ocorrem de forma mais lenta, levando mais tempo para completar a cura dos fibrocimentos, interferindo na hidratação, densificação e no desempenho da matriz (MEJIA-BALLESTEROS *et al.*, 2019).

Os valores médios obtidos para a propriedade de porosidade aparente dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado, estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Propriedade física de porosidade aparente (%) para os fibrocimentos.

** Significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Para a propriedade de PA foi observado efeito significativo da substituição do calcário por RCP, tanto para os fibrocimentos aos 28 dias quanto após os ciclos de envelhecimento acelerado. Os valores médios de PA para os fibrocimentos aos 28 dias foram de 16,67% a 28,22% e variaram entre 20,13% e 23,92%, após o envelhecimento acelerado.

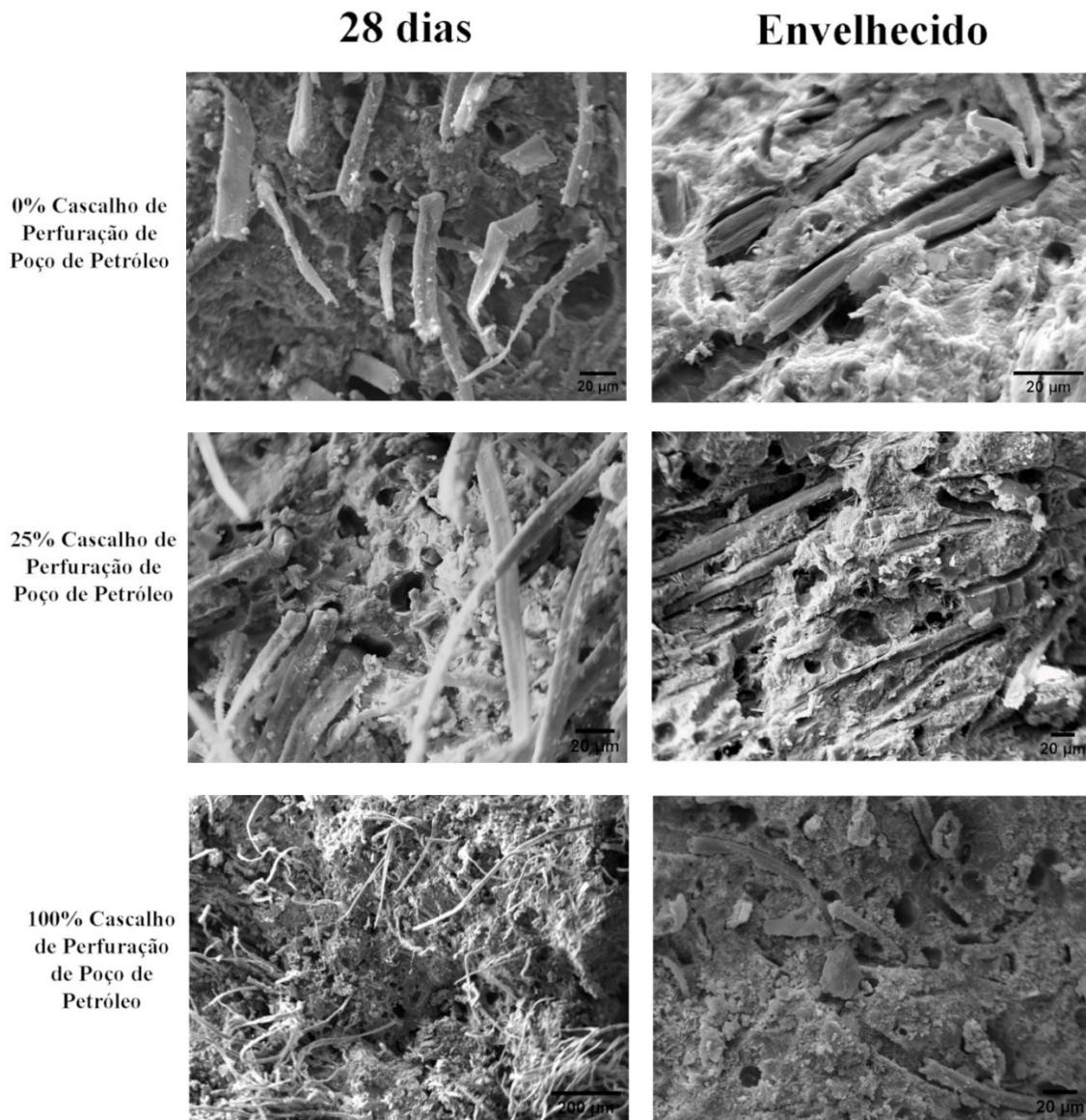
O tratamento controle apresentou o menor valor médio de PA para os fibrocimentos aos 28 dias, a presença do calcário na matriz permite a formação dos produtos de hidratação do cimento, mesmo em idades iniciais e confere uma matriz com menos espaços vazios e mais resistente.

A PA aos 28 dias de cura, dos tratamentos com substituição de calcário pelo RCP, apresenta diminuição dos valores até 75% e aumenta para o tratamento com 100%RCP na matriz. O esperado para essa propriedade é que seja inversamente proporcional a DA, neste caso apenas o tratamento com 100%RCP acompanhou essa tendência, tendo em vista que seu resultado foi o menor para densidade e o maior para porosidade, sua matriz por não ter a

presença de calcário sofre maiores efeitos da inibição da cura do cimento. Para os demais tratamentos, a diminuição dos valores, quando comparados entre si, deve estar relacionado ao efeito da granulometria do RCP que se sobrepõe aos efeitos químicos do material, que por ser muito fino começa a preencher os espaços vazios da matriz.

Outra análise relevante que pode ter relação com a diferença na porosidade dos fibrocimentos, é a aglomeração de fibras de celulose, que segundo alguns autores provoca o efeito “balling”, que é o aumento dos vazios e poros em determinadas regiões da matriz e assim, afetam seu desempenho de forma negativa (CHAKRABORTY *et al.*, 2013; RAABE *et al.*, 2022), o que pode ser observado na microscopia eletrônica de varredura (MEV), na Figura 7.

Figura 7 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura das matrizes controle, com 25% e 100% de cascalho de perfuração de poço de petróleo, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Avaliando o tratamento controle após os ciclos de envelhecimento, a porosidade aumenta, conforme o padrão apresentado para a propriedade de DA, pois está associada à movimentação dimensional das partículas de celulose durante o processo de envelhecimento acelerado, com a geração de microfissuras e aumento da porosidade e consequentemente, diminuição da densidade (FARRAPO *et al.*, 2017).

O comportamento dos fibrocimentos com substituição de calcário por RCP após os ciclos de envelhecimento apresentou redução nos valores de PA para os tratamentos até 50% de RCP e para os tratamentos com 75 e 100% cascalho, houve aumento dos valores avaliados.

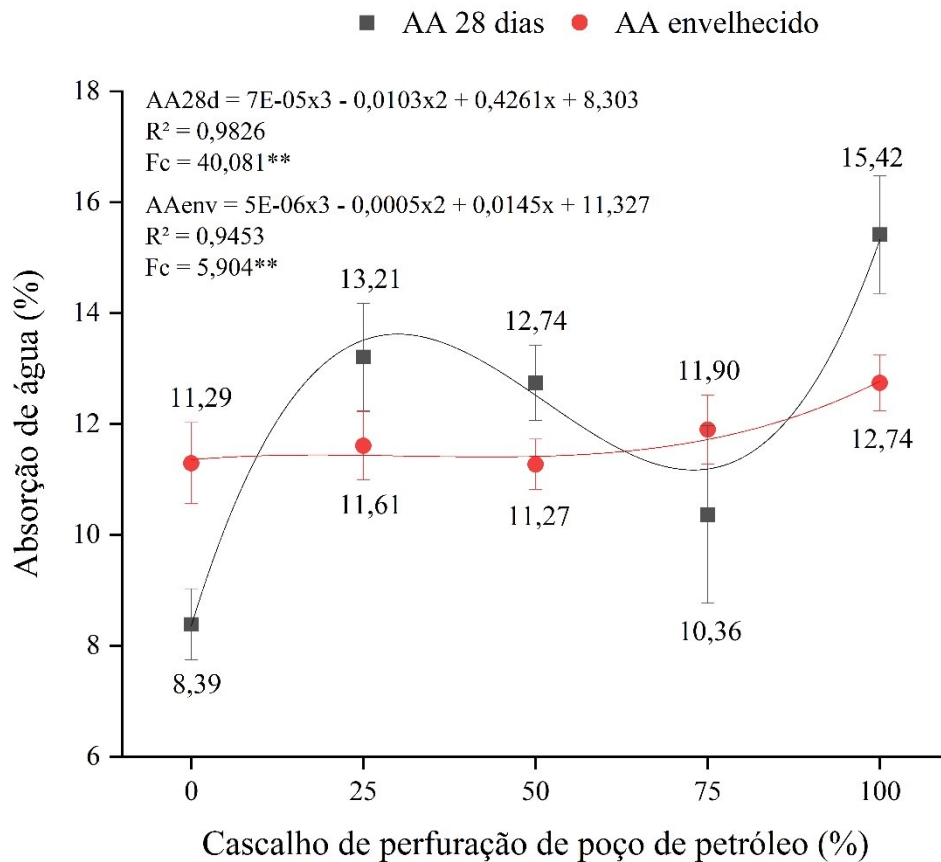
Embora, quando comparados aos seus resultados aos 28 dias de cura, observa-se que há redução na porosidade para os tratamentos após os ciclos de envelhecimento, exceto para os fibrocimentos com 75% RCP. No entanto, o RCP possui granulometria muito fina, o que segundo Mejia-Ballesteros *et al.* (2021), aumenta a demanda de água pelo resíduo, não sendo suficiente para completar as reações de hidratação inicialmente e assim, gera mais porosidade aos 28 dias de cura. Durante os ciclos de envelhecimento, o RCP que possui condição pozolânica contribui para a continuidade da cura da matriz de cimento e para o preenchimento dos poros, conforme pode-se observar na Figura 7.

A PA aos 28 dias e após envelhecimento acelerado, para os fibrocimentos com 100%RCP foram os que apresentaram maiores valores para a propriedade. O aumento de poros gerados, tanto pela degradação das fibras quanto pela perda de aderência entre a fibra e matriz cimentícia, normalmente, se relaciona a etapa de envelhecimento acelerado (SILVA *et al.*, 2020).

Na Figura 8 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de absorção de água dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 8 - Propriedade física de absorção de água (%) para os fibrocimentos.

** Significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Houve efeito significativo da porcentagem de RCP nos fibrocimentos para a propriedade de absorção de água, antes e após envelhecimento acelerado. Os valores médios de AA para os fibrocimentos aos 28 dias foram de 8,39% a 15,42% e variaram entre 11,27% e 12,74%, após o envelhecimento acelerado.

Para os fibrocimentos com maiores porcentagens de substituição de calcário por RCP foram os que apresentaram maiores valores médios de AA, este comportamento corresponde a tendência observada nas demais propriedades físicas dos fibrocimentos, principalmente para propriedade de PA. Com a diminuição dos poros (Figura 7), há também a diminuição da AA após o envelhecimento acelerado.

Esses resultados têm relação com o aumento da porosidade dos fibrocimentos e com as dimensões do RCP (SOBOLEV *et al.*, 2009), como o RCP está classificado como areia e sua maior quantidade tem granulometria de areia fina, preenche os microporos gerados durante o processo de envelhecimento. Outro fator observado, são as fibras de celulose, que tem

características hidrofílicas e com isso, grande capacidade de absorção de água, que contribui para suprir internamente a matriz para a continuidade das reações de hidratação e carbonatação (FARRAPO *et al.*, 2017; FONSECA *et al.*, 2019; FU *et al.*, 2017).

O tratamento com 100%RCP aos 28 dias, conforme pode-se observar na Figura 7, apresenta aglomeração de fibras de celulose refletindo em vazios (aumento da PA e AA) e irregularidades na matriz dos fibrocimentos. Mesmo com a degradação desse material vegetal ao longo dos ciclos de envelhecimento, colaborando para a diminuição da absorção de água pelas fibras (FONSECA *et al.*, 2016), o RCP proporciona boa aderência entre fibra/matriz (Figura 7) e apresenta aumento da sua DA.

A alta alcalinidade das matrizes cimentícias, pela presença dos Ca(OH)_2 , advindos das reações de silicatos e aluminatos de cálcio, interfere na durabilidade e degradação das fibras vegetais bem como na interação entre fibra/matriz (ROSTAMI *et al.*, 2020). Ao observar o tratamento sem a presença de calcário, pode-se compreender que a hidratação dos CaO está ocorrendo de forma mais lenta, diminuindo a alcalinidade da matriz cimentícia e assim, preservando o material lignocelulósico (ALMEIDA *et al.*, 2013; MEJIA-BALLESTEROS *et al.*, 2021).

A continuidade da cura da matriz cimentícia e as dimensões características do cascalho, favorecem o preenchimento dos poros, justificando o aumento da DA após o envelhecimento, proporcionando menos espaços vazios e maior compactação do fibrocimento (FARRAPO *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2021a; TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Eugênio *et al.* (2021), ao avaliarem os efeitos do uso de resíduo de mineração de ferro em substituição ao pó de calcário em telhas de concreto indicam que esse material, por ser pozolânico e ter granulometria muito menores que dos agregados utilizados no seu traço, permitem uma matriz com redução dos poros, melhorando a compactação da matriz, afetando as propriedades físicas e térmicas dos compósitos.

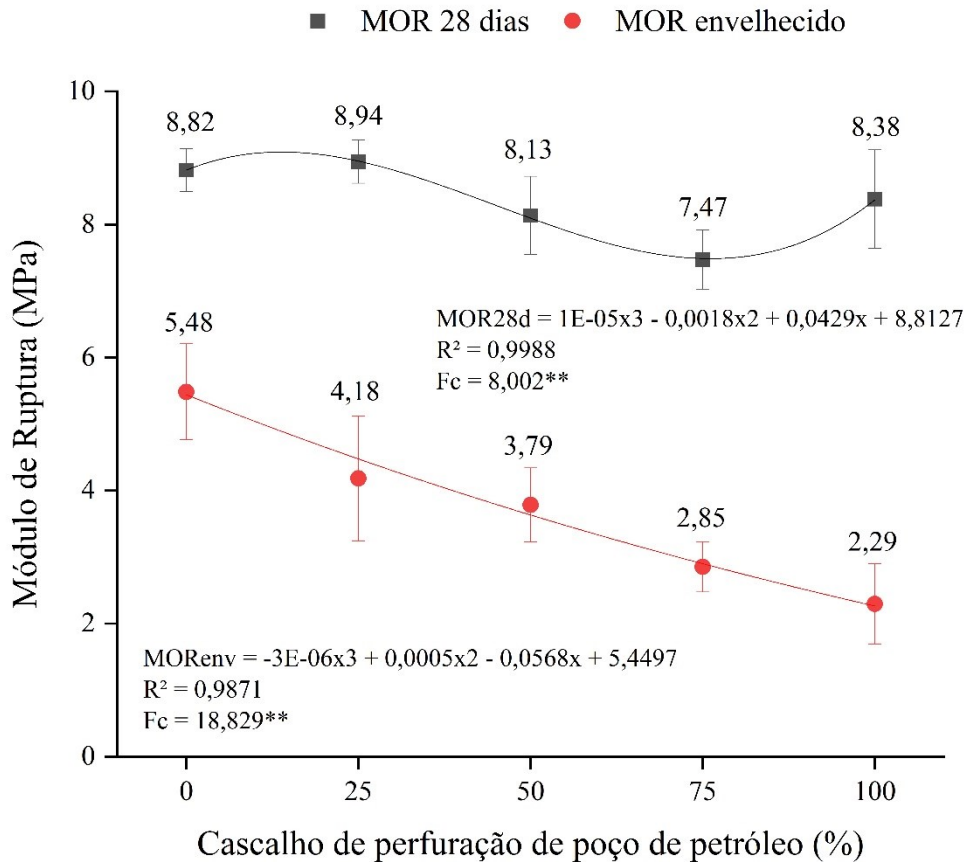
De acordo com a norma NBR 7581-1 (ABNT, 2014b), o valor permitido para absorção de água para telhas de fibrocimentos é menor ou igual a 37% e todos os tratamentos avaliados neste estudo atenderam a esta exigência, tanto 28 dias de cura quanto após o envelhecimento acelerado.

3.3 Caracterização mecânica dos compósitos

Na Figura 9 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de ruptura (MOR) à flexão estática dos fibrocimentos, aos 28 dias e após o envelhecimento.

Figura 9 - Propriedade mecânica de módulo de ruptura (MPa) para os fibrocimentos.

** Significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Houve efeito significativo da porcentagem de substituição de calcário por RCP sobre a propriedade de MOR à flexão estática, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento.

Para essa propriedade, aos 28 dias de cura foi observada um aumento do valor do tratamento com 25%RCP em comparação ao tratamento controle, seguido pela diminuição dos valores conforme adicionou-se o resíduo. Após o envelhecimento foi observado uma redução acentuada dos valores médios de MOR à medida que se aumentou a porcentagem de utilização de RCP. Este fato é associado a porosidade dos fibrocimentos, a qual apresenta influência direta sobre as propriedades mecânicas da matriz, pois a presença de poros aumenta as fissuras e torna a matriz cada vez mais susceptível ao rompimento (ALMEIDA *et al.*, 2013; CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI, 2011; SANTOS; FONTES; LIMA, 2017). No caso do tratamento analisado em questão, o que pode ter ocorrido são microfissuras em sua matriz que foram imperceptíveis as análises de DRX e MEV.

Mostavi, Asadi e Ugochukwu (2015), ao avaliarem o efeito de RCP na resistência à compressão de amostras de concreto, nas proporções de 5, 20 e 35% de RCP em substituição

ao cimento, observou a perda da resistência do seu material, no entanto, mesmo com a diminuição da propriedade mecânica ele observou que a substituição de 20% de cimento por RCP foi o tratamento que obteve melhor desempenho. Os autores mencionam ainda, que a presença de um aditivo mineral na mistura do concreto pode aumentar a resistência das amostras. Esses resultados, se aproximam do que foi observado neste estudo, uma vez que o tratamento que apresentou melhor resistência à flexão, aos 28 dias e após envelhecimento, foi o tratamento com 25% RCP e contém o aditivo mineral, calcário, em sua matriz. Além disso, o processo de produção por extrusão associado ao material com granulometria fina, tem uma melhor compactação na matriz o que impacta diretamente nas propriedades mecânicas do material, como é o caso do MOR (BETIOLI *et al.*, 2020).

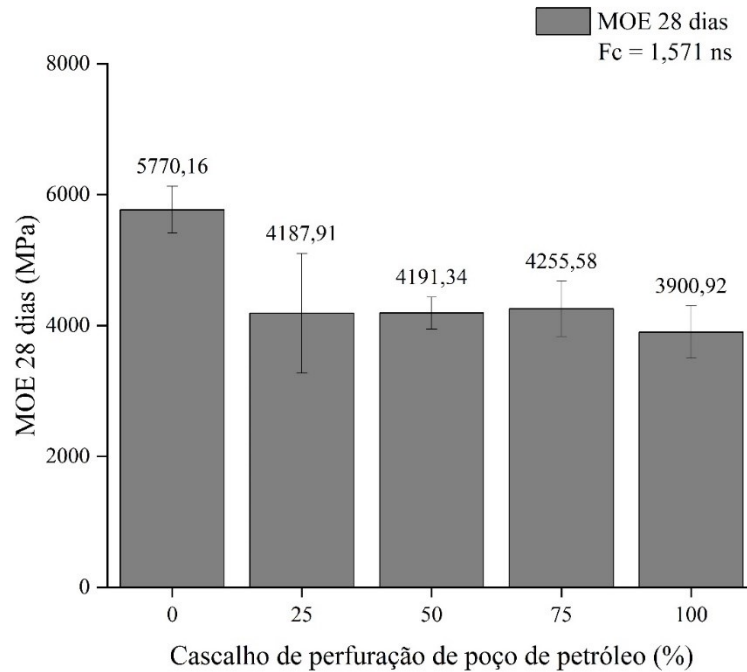
Embora se esperasse melhor desempenho da propriedade mecânica MOR pela diminuição de poros e aumento da densidade dos fibrocimentos após o envelhecimento acelerado, o comportamento da matriz pode estar relacionado a continuidade da cura e formação dos grupos responsáveis por aumentar a resistência do material nos momentos iniciais das reações de hidratação do cimento, como é o caso dos aluminatos (C3A). A (quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), produto da hidratação do cimento, que confere endurecimento ao compósito cimentício é variável de acordo com a idade do material, como a reação pozolânica ocorre somente a partir dessa hidratação é esperado que a quantidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminua após certo tempo (JACÓE; PEDERSOLI; RODRIGUES, 2017).

As placas cimentícias reforçadas com fibras são classificadas de acordo com a norma NBR 15498 (ABNT, 2021). Os fibrocimentos produzidos neste estudo são avaliados conforme os requisitos mínimos para condições saturadas. Todos os tratamentos aos 28 dias de cura se enquadram na categoria A/B – classe 2, que exige o valor mínimo de 7MPa de resistência à flexão. No entanto, após os ciclos de envelhecimento, somente o tratamento controle e o tratamento com 25%RCP atenderam as exigências da norma, sendo classificados na categoria A/B – classe 1, que determina o valor mínimo de 4MPa. A categoria A e B são indicados para ambientes externos, sendo os materiais classificados na categoria B apropriados para locais com exposição moderada ao calor e a umidade.

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento, respectivamente.

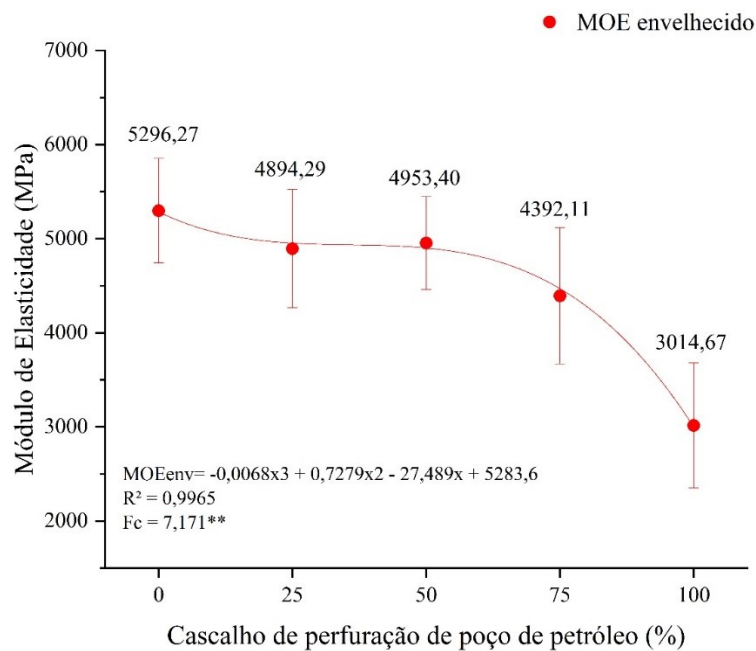
Figura 10 – Propriedade mecânica de módulo de elasticidade (MPa) para os fibrocimentos, aos 28 dias de cura.

Não significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 11 – Propriedade mecânica de módulo de elasticidade (MPa) para os fibrocimentos, após o envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Não houve efeito significativo da porcentagem de substituição de calcário por RCP sobre a propriedade de MOE à flexão estática aos 28 dias de cura. Sendo assim, a presença de RCP não afetou essa propriedade do fibrocimento. Após os ciclos de envelhecimento acelerado houve efeito significativo da substituição de calcário por RCP para essa propriedade mecânica, sendo observado redução dos valores de MOE à medida que houve aumento da porcentagem de RCP utilizado.

O tratamento controle teve o MOE reduzido após o envelhecimento acelerado e de acordo com o que se observa na literatura, em matrizes cimentícias com inserção de fibras vegetais, a alta alcalinidade da matriz contribui para degradação das fibras, aumento dos poros e por consequência, diminuição significativa da resistência e durabilidade (MENDES *et al.*, 2021a; PEREIRA *et al.*, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Quando comparado os tratamentos aos 28 dias e os tratamentos após o envelhecimento, observa-se que os valores médios dos tratamentos com RCP aumentaram até a porcentagem de 75%RCP e diminuíram para o tratamento de 100%, demonstrando que de modo geral houve uma melhora na propriedade e, portanto, os fibrocimentos apresentaram maior rigidez.

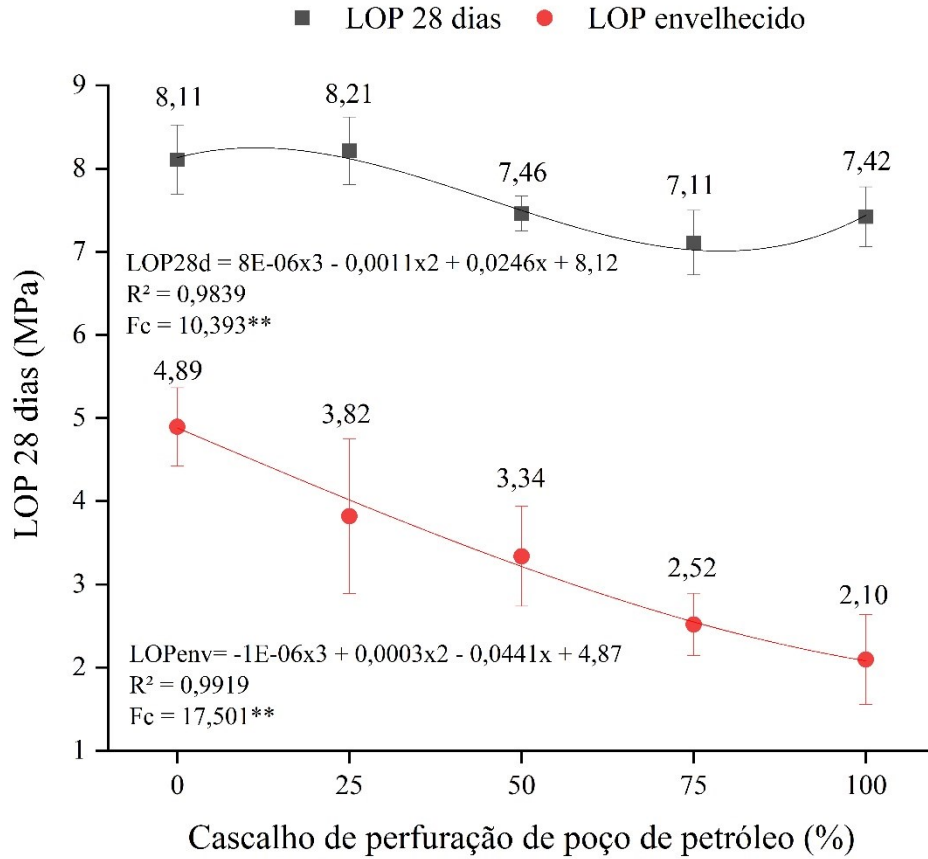
O tratamento com 100%RCP foi o mais afetado pelas propriedades físicas de PA e AA, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, pois a presença de espaços vazios resulta em um material com baixa resistência e capacidade de suportar cargas. Como já citado, a baixa alcalinidade da matriz desse tratamento, diminuiu a degradação das fibras, no entanto a diminuição de $\text{Ca(OH}_2\text{)}$ afetou a resistência da matriz e somente a conservação das fibras como reforço não foi o suficiente para melhorar os resultados desse tratamento.

De modo geral, a composição química do RCP, a rigidez das partículas e o fator de empacotamento na matriz de cimento pode ser responsável pelo efeito causado nessa propriedade (STRECKER; SILVA; PANZERA, 2014). Segundo Rodier, Correia e Savastano Junior (2020), existe maior disponibilidade de água ao redor das fibras, devido a porosidade, o que promove a formação de produtos de hidratação na interface fibra/matriz por meio da reação pozolânica do cascalho de perfuração, por isso o aumento do MOE após o envelhecimento para os tratamentos com 25, 50 e 75% RCP.

Na Figura 12 estão apresentados os resultados de limite de proporcionalidade (LOP), aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.

Figura 12 - Propriedade mecânica de limite de proporcionalidade (MPa) para os fibrocimentos.

** Significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Ao avaliar o LOP, propriedade que indica a tensão máxima atingida na região elástica anterior à primeira fissuração do compósito, observa-se que houve efeito significativo para os tratamentos. Para os fibrocimentos após 28 dias de cura, o tratamento com 75%RCP foi o que apresentou menor valor médio para a propriedade, embora todos os tratamentos tenham apresentado valores abaixo do tratamento controle. Estes resultados podem ser explicados através da cura lenta nas idades iniciais do cimento, causada pela presença de RCP que inibe o as reações de hidratação e afeta o desenvolvimento dos compostos necessários para desenvolvimento da resistência da matriz cimentícia. Apesar de observar no DRX (FIGURA 4) algumas formações de produtos da hidratação do cimento, na análise não é observada de belita, por exemplo, que é um composto que mais conferem resistência nos materiais cimentícios.

Quando observados os tratamentos com presença de RCP, os melhores resultados para a propriedade LOP foram para os tratamentos com 25 e 50% RCP, tanto aos 28 dias quanto

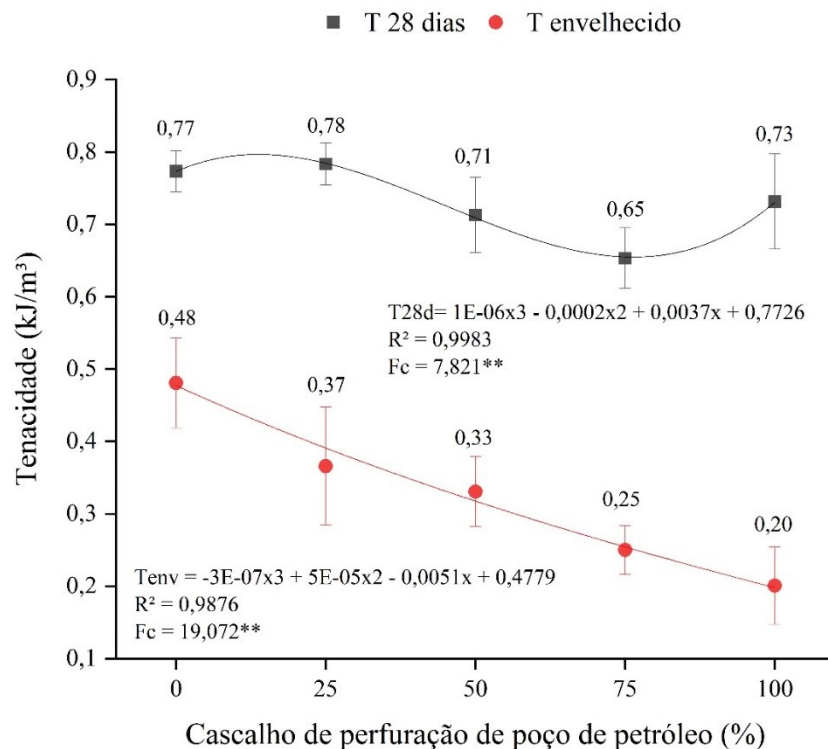
após o envelhecimento acelerado. O tratamento com 100% RCP após o envelhecimento foi o que apresentou menores valores para LOP e MOE e é justamente o tratamento que corresponde aos fibrocimentos mais porosos (FIGURA 6).

De acordo com Rodrigues *et al.* (2013), os materiais cimentícios mais porosos apresentam resistência mecânica e rigidez menores. Eugênio *et al.* (2023), ao avaliarem a inserção de resíduo de mineração de ferro em fibrocimentos substituindo o calcário, observaram os maiores valores médios para MOR, MOE e LOP para tratamentos com 25% do material avaliado, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado e menciona que o tratamento com 100% de resíduo manteve as fibras da matriz mais preservadas, mas ainda assim, após o envelhecimento obteve os menores valores para LOP.

Na Figura 13 estão apresentados os resultados para tenacidade (T) dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento.

Figura 13 - Propriedade mecânica de tenacidade (kJ/m^2) para os fibrocimentos.

Não significativo a 5%.



Fonte: Da autora (2022).

Com relação a propriedade de tenacidades dos fibrocimentos, observou-se que houve efeito significativo da porcentagem de substituição de calcário por RCP aos 28 dias de cura e após os ciclos de envelhecimento acelerado, indicando que a presença de RCP afetou a

tenacidade do material. Após o envelhecimento acelerado observa-se a redução dos valores de tenacidade a medida que se aumentou a concentração de RCP.

Os tratamentos aos 28 dias de cura apresentaram valores médios entre 0,65 e 0,78 KJ/m², sendo o menor valor observado para o tratamento com 75% RCP. Para os tratamentos após o envelhecimento acelerado foi observado a diminuição da propriedade, variando entre 0,20 e 0,48 KJ/m², sendo observado o menor valor para os fibrocimentos com 100%RCP.

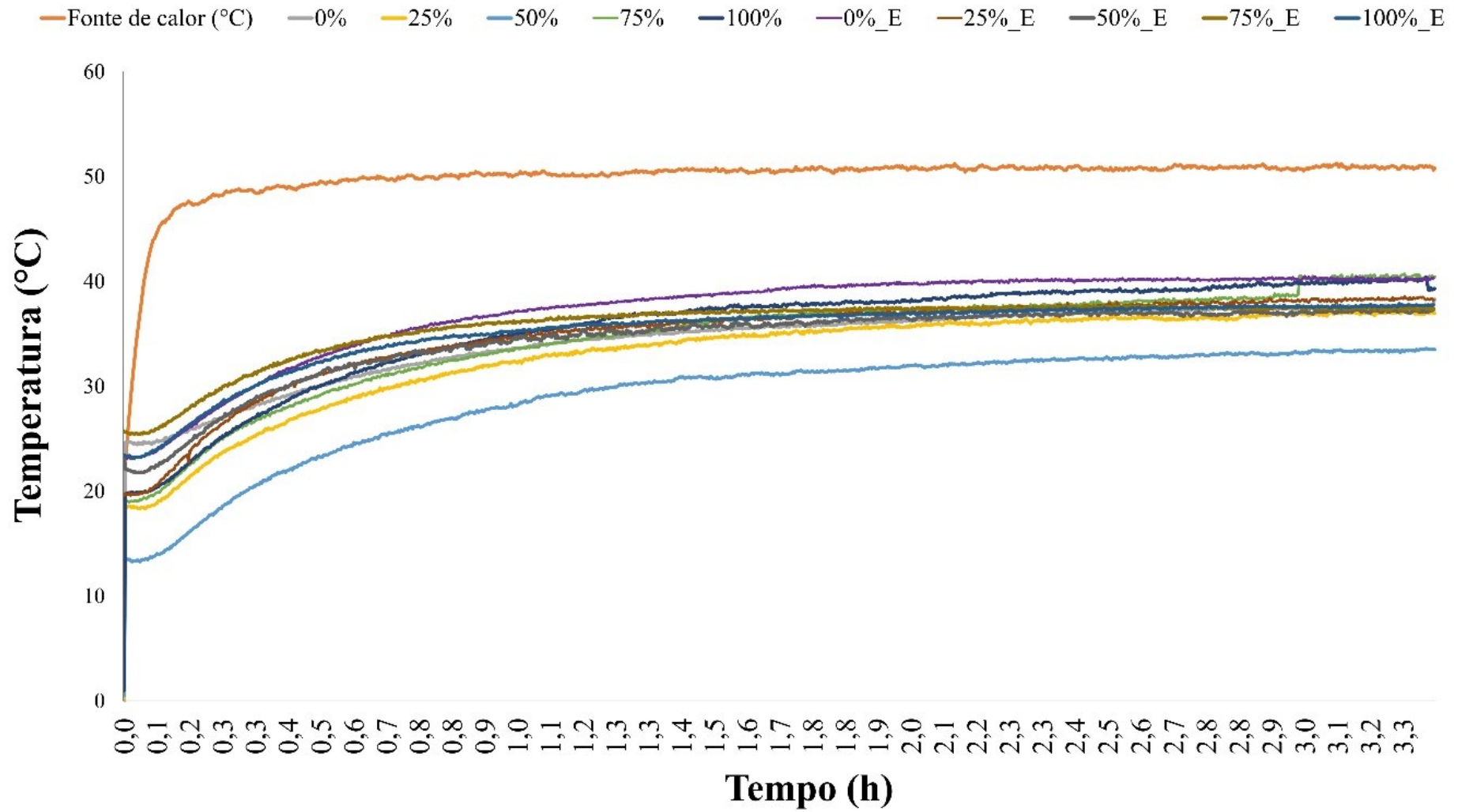
O desempenho mecânico dos fibrocimentos depende não somente das características da matriz e das fibras separadamente, mas também das propriedades de interface entre matriz e fibra. Uma interação que mantenha equilíbrio entre a matriz cimentícia e as fibras usadas, que permite a distribuição de tensões da matriz para a fibra é necessário para obter compósitos de fibrocimento com alta tenacidade (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Apesar de baixa inibição do RCP na matriz do cimento, de modo geral observou-se que as características físicas e químicas do RCP afetaram as propriedades mecânicas dos fibrocimentos, interferindo principalmente na resistência inicial dos compósitos, mesmo que a presença do resíduo tenha preservado as fibras vegetais. Contudo, após os ciclos de envelhecimento e a continuidade da cura da matriz, a movimentação dimensional das partículas gerou uma fragilização nos fibrocimentos.

3.4 Caracterização térmica dos compósitos

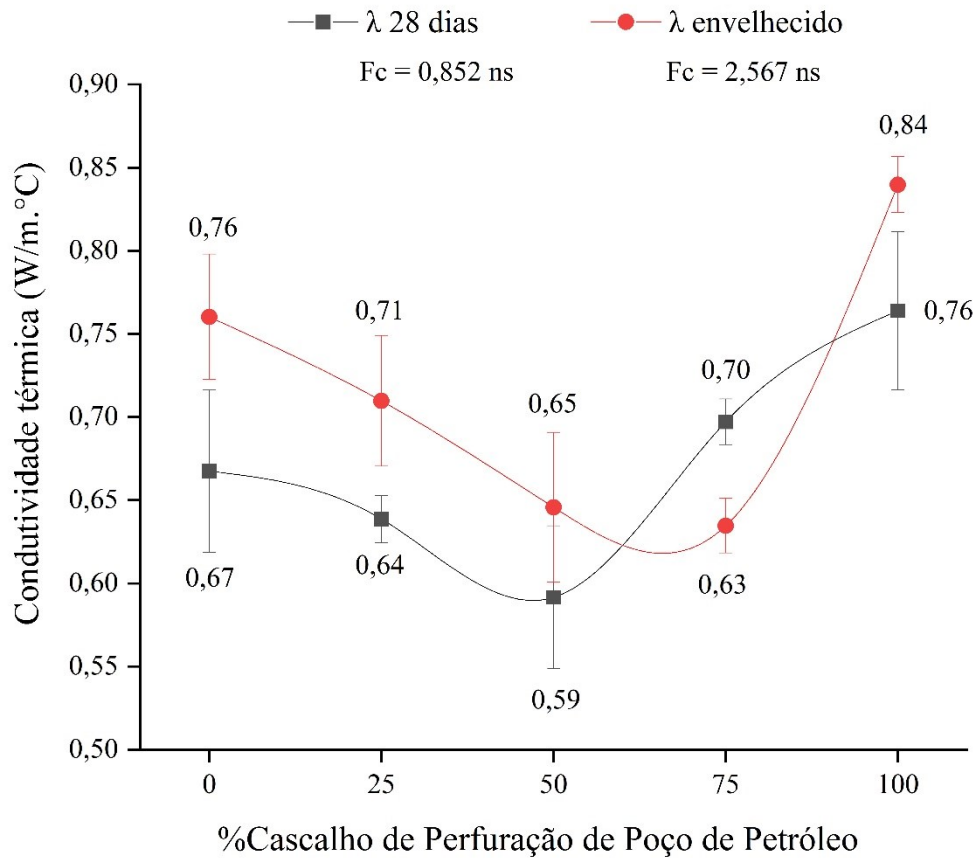
As Figuras 14 e 15, estão apresentadas as curvas de temperatura em relação ao tempo de ensaio para análise térmica e o gráfico com os valores médios para a condutividade térmica (λ) dos fibrocimentos produzidos com RCP, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado, respectivamente.

Figura 14 - Curvas da análise térmica dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 15 - Propriedade de condutividade térmica para os fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Para a propriedade térmica dos fibrocimentos produzidos com RCP, observou-se que não houve efeito significativo da porcentagem de substituição de calcário pelo RCP, nos tratamentos avaliados aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.

A condutividade térmica média dos fibrocimentos aos 28 dias de cura, variou entre 0,59 e 0,76 W/m.°C. Após o envelhecimento acelerado os valores médios de condutividade térmica variaram entre 0,65 e 0,84 W/m.°C.

Os fibrocimentos com 50%RCP, aos 28 dias de cura, foram os que apresentaram os menores valores médios de condutividade térmica entre os compósitos avaliados. Já para os fibrocimentos após o envelhecimento acelerado, o que apresentou melhor propriedade térmica foi o tratamento com 75%RCP, com os menores valores médios para condutividade térmica.

Embora as propriedades térmicas estejam relacionadas a propriedade física de PA (FIGURAS 6 e 7), nos tratamentos avaliados, principalmente, na formulação com 100%RCP que apresentou a menor PA para os fibrocimentos tanto aos 28 dias de cura quanto após

envelhecimento acelerado, não foi possível observar relação entre PA e condutividade térmica, o que pode estar relacionado com a interação de interface e a presença de microfissuras da matriz.

De acordo com a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2022c) a condutividade térmica dos fibrocimentos com densidade de $1,90\text{g/cm}^3$, aproximadamente, deve ser de até $0,95\text{W/m}\cdot\text{°C}$. Considerando que os fibrocimentos produzidos tiveram suas densidades aparentes variando entre $1,88$ e $1,96\text{g/cm}^3$ e a condutividade máxima observada foi de $0,8396\text{ W/m}\cdot\text{°C}$, conclui-se que todos os tratamentos com substituição de calcário por RCP atenderem às exigências para comercialização.

4 CONCLUSÃO

O RCP promoveu baixa influência na cura da matriz e foi compatível com o cimento utilizado na produção dos fibrocimentos. Devido a sua propriedade pozolânica o RCP demonstrou grande potencial de utilização para fibrocimentos.

A aplicação desse resíduo, de maneira geral, apresentou melhoria nas propriedades físicas, diminuindo a porosidade aparente da matriz até certa proporção de RCP. Todos os tratamentos avaliados com a presença do RCP atenderam aos requisitos normativos para a propriedade física de absorção de água, mesmo após a realização dos ciclos de envelhecimento acelerado.

As propriedades mecânicas foram mais influenciadas pelo uso do RCP, sendo o MOR a principal propriedade mecânica afetada. Ainda assim, ao avaliar a propriedade MOR para todos os tratamentos dos fibrocimentos antes do envelhecimento acelerado, atenderam a norma de comercialização. No entanto, somente o tratamento com substituição de 25%RCP, atendeu as exigências normativas após a avaliação de durabilidade da matriz.

Para as propriedades térmicas, o RCP também se mostrou eficiente, uma vez que seus resultados de condutividade térmica atenderam as normas vigentes.

Sendo assim, a utilização de 25% a 50%RCP se apresenta tecnicamente viável para produção de fibrocimentos, uma vez que essa faixa de aplicação do RCP apresentaram as melhores médias de desempenho entre as propriedades avaliadas e atendeu às normas de comercialização, apresentando os melhores resultados para propriedade MOR, mesmo após o envelhecimento e com bom desempenho para a propriedade térmica.

Diante desses resultados, se comprova que a utilização do RCP é promissora, agregando valor e dando uma destinação adequada a este resíduo. Para futuras aplicações deste material na fabricação de compósitos cimentícios são necessários novos estudos abrangendo a faixa de utilização mencionada para obtenção de melhores resultados e aprofundamento das propriedades do RCP. Assim, novos métodos e materiais podem ser produzidos e comercializados industrialmente de maneira avançada e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e o apoio financeiro e tecnológico dos órgãos de fomento – Fundação de Financiamento à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

ABOUTABIKH, M.; SOLIMAN, A. M.; EL NAGGAR, M. H. Properties of cementitious material incorporating treated oil sands drill cuttings waste. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 111, p. 751-757, May 2016.

ADEBIYI, F. M. Air quality and management in petroleum refining industry: a review. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, London, v. 4, p. 89-96, 2022.

ALENGARAM, U. J. Valorization of industrial byproducts and wastes as sustainable construction materials. *In*: COLANGELO, F.; CIOFFI, R.; FARINA, I. (ed.). **Handbook of sustainable concrete and industrial waste management: recycled and artificial aggregate, innovative eco-friendly binders, and life cycle assessment**. Sawston: Woodhead, 2022. p. 23-43.

ALMADA, B. S. *et al.* Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 1947-1962, May/June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.070>.

ALMEIDA, A. E. F. de S. *et al.* Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 42, p. 49-58, Sept. 2013.

ALMEIDA, J.; RAPÔSO, A.; MARQUES, S. Caracterização do cascalho de perfuração dos poços de petróleo da bacia Sergipe - Alagoas para produção de concreto permeável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 12, n. 7, p. 585-598, July 2021.

ALMEIDA, P. C. de. **Análise técnico-ambiental de alternativas de processamento de cascalho de perfuração offshore**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, P. C. de; ARAUJO, O. de Q. F.; MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 165, p. 143-156, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.062>.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended practice 13B-2 recommended practice for field testing oil-based drilling fluids**. 5th ed. Washington, DC: API, 2014. Disponível em: <https://www.api.org/~media/files/publications/whats%20new/13b-2%20e5%20pa.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618-19**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C948-81**: standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken: ASTM, 2016.

AQEL, M.; PANESAR, D. Physical and chemical effects of limestone filler on the hydration of steam cured cement paste and mortar. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 10, n. 2, p. 191-205, Apr. 2020.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 79, p. 115-128, Mar. 2015.

ASIM, N. *et al.* Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: opportunities, limitations, and directions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 284, p. 125459, Feb. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: rochas e solos: terminologia ABNT. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos ABNT. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581-1**: telha ondulada de fibrocimento: parte 1: classificação e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placa de fibrocimento sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placa de fibrocimento sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos ABNT. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AYATI, B. *et al.* Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 208, p. 252-260, Jan. 2019.

- BALL, A. S.; STEWART, R. J.; SCHLIEPHAKE, K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. **Journal Waste Management & Research**, London, v. 30, p. 457-473, May 2012.
- BENJEDDOU, O. *et al.* Effects of limestone filler fineness on the rheological behavior of cement: limestone filler grouts. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 12, n. 4, p. 3569-3578, Dec. 2021.
- BETIOLI, A. M. *et al.* Efeito da composição granulométrica e de área superficial específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autodensáveis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, jul./set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300435>.
- BORGES-CAMPOS *et al.* **Análise quantitativa de cascalhos com FPBNA descartados ao mar e destinados em terra conforme padrões anteriores e novos requisitos do órgão ambiental brasileiro - IBAMA**. Rio de Janeiro: IBP, 2016.
- CASTRO, A. L. de; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas: revisão. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 22-31, mar. 2011.
- CHAKRABORTY, S. *et al.* Improvement of the mechanical properties of jute fibre reinforced cement mortar: a statistical approach. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 38, p. 776-784, Jan. 2013.
- CHEN, Z. *et al.* Supercritical water oxidation of oil-based drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 332, p. 205-213, June 2017.
- CLARAMUNT, J. *et al.* Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 115, p. 230-239, July 2016.
- CORDEIRO, G. C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 30, n. 5, p. 410-418, May 2008.
- DHIR, R. K. *et al.* Cleaned oil-drill cuttings for use as filler in bituminous mixtures. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 3, p. 322-325, Mar. 2010.
- EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (IOT) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 279, p. 122484, Apr. 2021.
- EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Journal of Building Engineering**, New York, v. 63, part A, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105547>.
- FARRAPO, C. L. *et al.* Cellulose associate whit pet bottle waste in cement based composites. **Material Research**, São Carlos, v. 20, n. 5, p. 1380-1387, Oct. 2017.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 529-535, dez. 2019.

FIALHO, P. F. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás**: estudo do potencial de aplicação em concreto. 2012. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

FIALHO, P. F. *et al.* Substituição de areia em concretos por resíduos da perfuração de poços de petróleo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais** [...]. Maceió: CBC, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319330440_Substituicao_de_areia_em_concretos_p_or_residuos_da_perfuracao_de_pocos_de_petroleo. Acesso em: 10 mar. 2022.

FONSECA, C. S. *et al.* Eucalyptus cellulose micro/nanofibrils in extruded fiber-cement composites. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 59-68, mar. 2016.

FONSECA, C. S. *et al.* Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 211, p. 517-527, June 2019.

FOROUTAN, M. *et al.* Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 164, p. 400-409, Mar. 2018.

FU, T. *et al.* Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials. *In*: JAWAID, M.; BOUFI, S.; KHALIL, A. (ed.). **Cellulose-reinforced nanofibre composites**: production, properties and applications. London: Elsevier, 2017. p. 455-482.

GARCIA, E. *et al.* Evaluation of the pozzolanic activity of heavy clay ceramic waste from main ceramic clusters of S. Paulo State, Brazil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, abr. 2015.

GUIMARÃES, I. B.; ROSSI, L. F. dos S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração**: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta. Campinas: PDPETRO, 2007.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.

HORTA, R. A. dos S.; PAULA, J. N. de; CALIXTO, J. M. F. Avaliação do perfil térmico e calor de hidratação de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/tkkLhBPLmc5m9jz5WgZW9PN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2023.

HU, G. *et al.* Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 251, p. 119594, Apr. 2020.

IKOTUN, J. O. *et al.* Physicochemical and mineralogical characterization datasets from oil drill cuttings in comparison with other cement types for cement partial-replacement in concrete. **Chemical Data Collections**, New York, v. 19, p. 100176, Feb. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Avaliação de opções para a destinação do cascalho gerado na perfuração de poços marítimos no Brasil**: fascículo 2. Rio de Janeiro: IBP, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 1, de 2 de janeiro de 2018**. Altera a Instrução Normativa 10, de 20 de setembro de 2011. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacoes&ano=2018&norma=92030>. Acesso em: 10 mar. 2022.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. **Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations**. London: IOGP, 2022.

ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural: parte II: durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, jun. 2017.

ISAIA, G. de A.; RIZZATTI, E. O filer calcário no concreto: uma revisão. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, ano 5, v. 15, n. 12, p. 132-172, jan. 2021.

ISMAIL, A. R. *et al.* Drilling fluid waste management in drilling for oil and gás wells. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 56, p. 1351-1356, 2017.

JACÓE, R. B.; PEDERSOLI, S. P.; RODRIGUES, C. D. S. Caracterização de fibrocimentos com fibra de bambu obtida por diferentes métodos de polpação. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, MG, v. 3, n. 8, p. 1088-1096, Sept. 2017.

KAZAMIAS, G.; ZORPAS, A. A. Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 322, p. 129098, Nov. 2021.

KUMAR, S.; BARUA, M. K. Modeling and investigating the interaction among risk factors of the sustainable petroleum supply chain. **Resources Policy**, Guildford, v. 79, p. 102922, Dec. 2022.

LABIB, W. A. Fibre reinforced cement composites. **Cement Based Materials**, New York, v. 31, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.75102.

LAVERDE, V. *et al.* Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 340, p. 127729, July 2022.

LEONARD, S. A.; STEGEMANN, J. A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: leaching studies. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 174, n. 1/3, p. 484-491, Feb. 2010.

LI, X. G. *et al.* Influence of sintering temperature on the characteristics of shale brick containing oil well-derived drilling waste. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 18, n. 9, p. 1617-1622, May 2011.

LIU, W. *et al.* Using water-based drilling cuttings from shale gas development to manufacture sintered bricks: a case study in the southern Sichuan Basin, China. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 23, p. 29379-29393, June 2021.

LIU, Y. *et al.* Water-based drill cuttings, a shale gas extraction waste as supplementary cementitious material and optimization. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 346, p. 128419, Sept. 2022.

MADHKHAN, M.; KATIRAI, R. Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 225, p. 146-158, Nov. 2019.

MAIA, E. Y. de M. *et al.* Análise da adição de resíduos do green supply chain management da indústria petrolífera em artifício da construção civil. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 36., 2016, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ENEGEP, 2016.

MÁRMOL, G. *et al.* Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. **Industrial Crops and Products**, London, v. 49, p. 422-427, Aug. 2013.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Resíduo de cerâmica vermelha e filer calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 282-300, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0028> .

MEJIA-BALLESTEROS, J. E. *et al.* Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 98, p. 49-60, Apr. 2019.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E. *et al.* Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 124, p. 104280, Nov. 2021.

MENDES, R. F. *et al.* Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. *In: SAVASTANO JUNIOR, H.; FIORELLI, J.; SANTOS, S. F. dos (ed.). Sustainable and nonconventional construction materials using inorganic bonded fiber composites*. London: Elsevier, 2017. v. 1, p. 3-16.

MENDES, R. F. *et al.* Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 28, p. 37217-37230, July 2021a.

MENDES, R. F. *et al.* Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 31, p. 42737-42749, Apr. 2021b.

MENESES, C. G.; PAULA, G. de A. Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. **RUnPetro**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 29-38, out. 2014/mar. 2015.

MOHAMMED, B.; CHEESEMAN, C. R. Use of oil drill cuttings as an alternative raw material in sandcrete blocks. **Waste and Biomass Valorization**, New York, v. 2, n. 4, p. 373-380, Nov. 2011.

MOSTAVI, E.; ASADI, S.; UGOCHUKWU, E. Feasibility study of the potential use of drill cuttings in concrete. **Procedia Engineering**, New York, v. 118, p. 1015-1023, 2015.

NASCIMENTO, C. A. O.; MORO, L. F. L. Petróleo: energia do presente, matéria-prima do futuro? **Revista USP**, São Paulo, n. 89, p. 90-97, 2011.

NASSER, R. A.; AL-MEFARREJ, H. A. Evaluation of using midribs of date palm fronds as a raw material for wood-cement composite panels industry in Saudi Arabia. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 882, p. 1071-1082, Dec. 2010.

NJUGUNA, J. *et al.* The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. **Waste Management**, Oxford, v. 139, p. 362-380, Feb. 2022.

NUNES, J. S.; POLESELLO, E. Estudo experimental da compatibilidade entre aditivos químicos e cimento Portland em misturas cimentícias através de calorimetria. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/x49LwjFr6PzyXPBNpmMPB4F/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2023.

OKINO, E. Y. A. *et al.* Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 26, n. 6, p. 729-734, Aug. 2004.

OLIVEIRA, R. C. de; JUNGER, A. P. Utilização de combustíveis fósseis no Brasil e suas consequências ambientais. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 9, p. e466997537, Aug. 2020.

ONWUKWE, S. I.; NWAKAUDU, M. S. Drilling wastes generation and management approach. **International Journal of Environmental Science and Development**, Lund, v. 3, n. 3, p. 252-257, 2012.

PEREIRA, M. S. *et al.* Determination of the chemical and mineralogical composition of drilled cuttings at different points throughout the solids control process. **Materials Science Forum**, Aedermannsdorf, v. 727-728, p. 1677-1682, 2012.

PEREIRA, M. S. *et al.* Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid. **Separation and Purification Technology**, London, v. 124, p. 68-73, Mar. 2014.

PEREIRA, T. G. T. *et al.* Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. **Materials Today: proceedings**, Cleveland, v. 31, p. S309-S314, Jan. 2020.

PETRI JUNIOR, I. **Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PETRI JUNIOR, I. *et al.* Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 196, p. 659-665, July 2017.

PETRI JUNIOR, I. *et al.* Microwave remediation of oil well drill cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 134, p. 23-29, Oct. 2015.

PETROBRAS. **Atividades de perfuração marítima nos blocos BM-BAR-3 e BM-BAR-5 Relatório de Impacto Ambiental - RIMA**. Brasília, DF: Petrobras, 2019.

PILAR, R. *et al.* Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 92-104, Mar. 2016.

RAABE, J. *et al.* Impact of nanosilica deposited on cellulose pulp fibers surface on hydration and fiber-cement compressive strength. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 326, p. 126847, Apr. 2022.

RILEM DRAFT RECOMMENDATIONS. Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections. **Materials and Structures**, New York, v. 17, n. 6, p. 441-456, Nov. 1984.

RODIER, L.; CORREIA, V. da C.; SAVASTANO JUNIOR, H. Elaboration of eco-efficient vegetable fibers reinforced cement-based composites using glass powder residue. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 110, p. 103599, July 2020.

RODRIGUES, M. S. *et al.* Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1347-1354, dez. 2013.

ROSTAMI, R. *et al.* A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 241, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>.

SANTOS, D. O. J. dos; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/8K5VYP4xM9jmWDwGFYKfj3S/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2022.

SIDDIQUE, S. *et al.* Oil based drilling fluid waste: an overview on environmentally persistent pollutants. **IOP Conference Series: materials science and engineering**, Philadelphia, v. 195, p. 012008, May 2017.

SIDDIQUE, S.; LEUNG, P. S.; NJUGUNA, J. Drilling oil-based mud waste as a resource for raw materials: a case study on clays reclamation and their application as fillers in polyamide 6 composites. **Upstream Oil and Gas Technology**, Glasgow, v. 7, p. 100036, Sept. 2021.

SILVA, D. W. *et al.* Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites. **Materials Today: proceedings**, Cleveland, v. 31, p. S348-S352, Jan. 2020.

SILVA, M. A. da *et al.* Efeito das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e bambu sobre qualidade de fibrocimentos extrudados. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, Chapecó, v. 18, n. 1, p. 146-155, Mar. 2021.

SOBOLEV, K. *et al.* Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. *In: BITTNAR, Z. et al. (ed.). Nanotechnology in construction 3.* Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 139-148.

SOUZA, J.; TERRA, D. Migrações, pendularidades e mercado de trabalho no segmento upstream da indústria do petróleo na Bacia de Campos. **Eure**, Santiago, v. 46, n. 137, p. 157-180, jan. 2020.

SPÍNOLA, D. C. S. *et al.* Preparation of glass-ceramic materials using kaolin and oil well drilling wastes. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 3459-3465, July 2019.

STRECKER, K.; SILVA, C. A.; PANZERA, T. H. Fabricação e caracterização de compósitos a base de cimento com incorporação de poliestireno expandido (isopor). **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 354, p. 310-315, jun. 2014.

TEIXEIRA, J. N. *et al.* Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, New York, v. 11, n. 5, p. 2193-2200, May 2020.

TUNCAN, A.; TUNCAN, M.; KOYUNCU, H. Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction. **Waste Management & Research: the journal for a sustainable circular economy**, Oxford, v. 18, n. 5, p. 489-505, Oct. 2000.

VIANA, Q. S. *et al.* Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 29, n. 32, p. 48964-48974, July 2022.

WANG, B.; YAN, L.; KASAL, B. A review of coir fibre and coir fibre reinforced cement-based composite materials (2000-2021). **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 338, p. 130676, Mar. 2022.

WANG, C. *et al.* Performance of non-fired bricks containing oil-based drilling cuttings pyrolysis residues of shale gas. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 206, p. 282-296, Jan. 2019.

WANG, C. Q. *et al.* Environmental performance, mechanical and microstructure analysis of concrete containing oil-based drilling cuttings pyrolysis residues of shale gas. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 338, p. 410-427, 2017.

WANG, C. Q. *et al.* Pozzolanic activity and environmental risk assessment of water-based drilling cuttings of shale gas. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 348, p. 128657, Sept. 2022.

WASIUDDIN, N. M.; ALI, N.; ISLAM, M. R. Use of offshore drilling waste in Hot Mix Asphalt (HMA) concrete as aggregate replacement. *In*: ENGINEERING TECHNOLOGY CONFERENCE ON ENERGY, PARTS A AND B, 2002, Houston. **Anais [...]**. Houston: ASMEDC, 2002. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/ETCE/proceedings/ETCE2002/3591X/451/295372>. Acesso em: 20 out. 2022.

ZHANG, D. *et al.* Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 244, p. 118360, May 2020.

ZHANG, R.; QURESHI, T. S.; PANESAR, D. K. Use of industrial waste in construction and a cost analysis. *In*: COLANGELO, F.; CIOFFI, R.; FARINA, I. (ed.). **Handbook of sustainable concrete and industrial waste management: recycled and artificial aggregate, innovative eco-friendly binders, and life cycle assessment**. London: Elsevier, 2022. p. 615-635.

ZHU, H. *et al.* The effects of phase changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 48, p. 124-130, Nov. 2013.

**ARTIGO 2 – FIBROCIMENTOS EXTRUDADOS PRODUZIDOS COM CASCALHO
DE PERFURAÇÃO E FIBRAS DE CELULOSE E POLIPROPILENO**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com
o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da substituição de celulose por microfibras de polipropileno (PP) sobre as propriedades físico-mecânicas, térmicas e microestruturais de fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo. O delineamento experimental consistiu em seis tratamentos, sendo avaliado um tratamento controle (5% de celulose) e cinco substituições de celulose por PP (1, 2, 3, 4 e 5%). O tratamento controle dos fibrocimentos foram produzidos utilizando 65% de cimento Portland CPV-ARI; 22,5% de calcário e 7,5% de cascalho de perfuração; 5% de celulose; e de 1% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e 1% de aditivo poliéster carboxílico (ADVA), ambos em relação a massa de cimento. Os fibrocimentos foram extrudados nas dimensões de 200 mm x 50 mm x 15 mm (comprimento, largura e espessura). Após a produção, foram acondicionados em ambiente saturado por 28 dias para a cura. Foram avaliadas as propriedades de densidade aparente (DA), porosidade aparente (PA), absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão estática (MOR), módulo de elasticidade à flexão estática (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e tenacidade (T), aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. A avaliação microestrutural foi feita a partir com uso de microscópio óptico e difração de raios X (DRX). Para a avaliação dos dados foi realizado análise de variância e de regressão, ambas à 5% de significância. Diante da avaliação das propriedades físicas dos fibrocimentos as microfibras de PP todos os tratamentos atendem a norma de comercialização, no entanto não apresentaram melhorias na matriz cimentícia, uma vez que a presença do material aumentou a PA e AA dos fibrocimentos. A utilização de PP apresentou melhorias das propriedades mecânicas dos fibrocimentos, sendo o MOR e o MOE as propriedades mais afetadas. Contudo, dentro da viabilidade desse estudo em busca do viés de sustentabilidade, a formulação com 2%PP em substituição a celulose foi o que apresentou melhor resultados para aplicabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Resíduo. Fibras alternativas. Material de reforço. Compósitos.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da indústria da construção civil, o consumo de cimento Portland vem aumentando e com isso, a necessidade e o interesse do setor em buscar por materiais pozolânicos que apresentem uma condição ótima para suprir a demanda (RODIER; CORREIA; SAVASTANO JUNIOR, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2013). A procura por matéria-prima, aliada aos interesses econômicos, técnicos e ambientais, motiva os estudos envolvendo resíduos industriais com potencial de utilização nas matrizes cimentícias.

O cascalho de perfuração é um resíduo oriundo das operações de perfuração dos poços de petróleo bastante complexo e devido ao seu grande volume gerado representa um problema para a indústria petrolífera diante da dificuldade de descarte e armazenamento deste material (CAMPOS *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2013; MAIA *et al.*, 2016). Atrélado a necessidade do mercado, pesquisas apontam a reutilização do cascalho de perfuração em materiais de construção civil como boa alternativa para incorporação no cimento (CALMON *et al.*, 2017; CAVALCANTE *et al.*, 2011; CHEN; LIN; LIN, 2007; LIU *et al.*, 2022; MARQUES; ACCHAR, 2014).

Contudo, grandes variações na composição do cimento podem afetar a cura da matriz e, por consequência, a resistência do material, interferindo diretamente no processo de produção (FU *et al.*, 2017; GIORDANO; SOUZA; JOHN, 2009; SCRIVENER; WIENER, 1992). Dessa forma, explorar substituições de outros componentes da matriz, podem trazer benefícios e proporcionar condição de utilização de resíduos, como é o caso do cascalho de perfuração de poço de petróleo.

Nesta perspectiva, os fibrocimentos se apresentam com características desejáveis para incorporação do cascalho de perfuração em sua matriz, sendo um produto amplamente utilizado na indústria da construção civil e na edificação rural, principalmente como materiais de cobertura, telhas, planos de revestimento de interiores e exteriores e caixas d'água (EUGÊNIO *et al.*, 2021, 2023; FONSECA *et al.*, 2016; ROSTAMI *et al.*, 2020). Esses materiais são compósitos constituídos de uma matriz cimentícia com adições minerais e reforçada com fibras, as quais podem ser de origem sintética ou natural (ALREKABI *et al.*, 2017; COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017; LABIB, 2018; MARQUES; GOMES; KERN, 2016; MENDES *et al.*, 2021).

O surgimento desses compósitos partiu da necessidade de um material que fosse menos quebradiço quando submetido a esforços mecânicos de tração e que apresentasse menor formação de fissuras, uma vez que apesar da matriz cimentícia apresentar alta dureza, elas

possuem baixa tenacidade o que condiciona uma baixa durabilidade (ALREKABI *et al.*, 2017; COUTTS, 2005; JO; CHAKRABORTY; YOON, 2014).

As características mecânicas dos fibrocimentos são determinadas pelas propriedades das fibras utilizadas e pela dispersão das mesmas na matriz cimentícia (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2016). Dessa maneira, o material que é usado como reforço deve ocasionar uma ligação com a matriz de forma que a transmissão de carga seja absorvida pelo reforço (PEREIRA *et al.*, 2020; SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012; TEIXEIRA *et al.*, 2012).

O material mais usado como reforço de fibrocimentos foi, por muitos anos, as fibras minerais de amianto, porém o fato dessa fibra apresentar características prejudiciais à saúde fez com que o uso de fibras alternativas aumentasse (AGOPYAN *et al.*, 2005; GIANNINI *et al.*, 2012; RADVANEC *et al.*, 2013). Com isso, as fibras de polipropileno passaram a ser usadas em grande escala pela indústria por serem mais baratas que as demais fibras sintéticas e por apresentarem baixa toxicidade e alta resistência (SAVASTANO JUNIOR *et al.*, 1999; TAKAHASHI; TSURUNGA; KONDO, 2013; ZHANG; QINGFU; HAIYANG, 2011). No entanto, as fibras sintéticas têm suas próprias limitações como comprimento, diâmetro, razão de aspecto, ligação com a zona de interface do cimento, baixa consistência com a matriz de cimento e ainda, representam um alto custo na produção dos compósitos, o que torna sua aplicação mais limitada (CHENG *et al.*, 2018). Sendo assim, as fibras naturais de origem vegetal, em razão da sua disponibilidade, baixo custo e atoxicidade se tornaram uma opção interessante para o mercado (COUTTS, 2005; SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012; TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Muitos estudos buscam por avaliar o potencial de utilização de fibras celulósicas nas placas de fibrocimento (CHENG *et al.*, 2018; TEIXEIRA *et al.*, 2014, 2020; XIE *et al.*, 2015; XIE; ZHOU; YAN, 2019). Entretanto, o uso de fibras vegetais pode comprometer as propriedades dos compósitos em função da degradação dessas fibras na matriz cimentícia. Devido ao ambiente altamente alcalino causado pelas reações de hidratação do cimento, as fibras de celulose se apresentam suscetíveis e podem reduzir a durabilidade dos compósitos, diante do enfraquecimento das fibras (CHENG *et al.*, 2018; KHORAMI *et al.*, 2017).

De acordo com Khorami *et al.* (2016), ao avaliarem a resistência à flexão em compostos de fibrocimento reforçado com fibras de celulose, concluíram que com o aumento do conteúdo de fibra, a tenacidade à fratura aumenta e assim, identificaram que as fibras de polipropileno poderiam ser usadas para melhorar a capacidade de carga do fibrocimento se apenas misturadas com fibras de celulose.

Nesse contexto, visando buscar uma alternativa viável para a produção de fibrocimentos com cascalho de perfuração de poço de petróleo, propõe-se avaliar o uso de fibras sintéticas de polipropileno associada as fibras vegetais de celulose, visando um produto com a boa durabilidade e alta resistência das fibras sintéticas e com o baixo custo das fibras de celulose, buscando entender os efeitos dessas substituições sobre as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e térmicas dos compósitos, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria-prima

Os materiais utilizados foram o cascalho de perfuração de poço de petróleo *offshore* cedido pela Petrobras S.A. (Bacia de Campos – RJ, Brasil); cimento Portland CPV-ARI e CPII-F32, areia, calcário agrícola moído, adquiridos na cidade de Lavras – MG, Brasil; modificadores reológicos do tipo HPMC (hidroxipropilmetilcelulose) fornecido pela empresa Aditex Ltda (Santana – SP, Brasil) e ADVA 175 (poliéster carboxílico) doado pela empresa Grace Brasil Ltda (Sorocaba – SP, Brasil); polpa celulósica de eucalipto disponibilizada pela empresa Suzano Papel e Celulose (Limeira – SP, Brasil) e microfibras de polipropileno (PP) da marca Neo.Matex Ltda (Taboão da Serra – SP, Brasil). com comprimento de 6 a 12mm e densidade relativa de 0,91g/cm³.

As fibras foram escolhidas para incorporação dos fibrocimentos devido ao seu uso já consolidado na indústria como materiais de reforço de compósitos à base de cimento, atuando, principalmente, na fase plástica da matriz cimentícia reduzindo a propagação de fissuras.

2.2 Produção dos compósitos

Os fibrocimentos foram produzidos na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG, Brasil, em escala laboratorial por processo de extrusão. A matriz cimentícia foi composta por cimento Portland CPV – ARI com alta resistência inicial, de acordo com a norma NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2018); HPMC e ADVA 175, ambos em relação a massa de cimento; calcário; cascalho de perfuração de poço de petróleo; celulose; e água (relação água/cimento de 30%, conforme orientações do fabricante), sendo adicionada à pasta aos poucos até o ajuste ideal do ponto de plasticidade e trabalhabilidade da mistura.

A formulação utilizada como controle foi elaborada nas proporções de 65% de cimento, 22,5% de calcário, 7,5% de cascalho de perfuração de poço de petróleo e 5% de celulose. O calcário é um componente bastante utilizado na indústria dos fibrocimentos para redução de custos, substituindo parcialmente o cimento (MENDES *et al.*, 2021) e neste estudo, a utilização do cascalho de poço de petróleo com características pozolânicas se apresenta como uma alternativa para destinação e agregação de valor desse resíduo, demonstrando grande potencial de utilização na indústria da construção civil.

Os fibrocimentos foram produzidos com diferentes porcentagens de reforço, sendo as microfibras de polipropileno (PP) avaliadas em concentrações de 1, 2, 3, 4 e 5% em substituição a polpa de celulose, essas concentrações foram estabelecidas para manter as características da formulação controle. A homogeneização dos componentes foi feita em uma batedeira planetária com rotação de 285rpm por 3 a 5min e a pasta foi processada em uma extrusora helicoidal com vácuo a uma velocidade de rosca de 25rpm. Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 200mm x 50mm x 15mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente), em seguida foram conservados em ambiente saturado por 28 dias para cura dos compósitos (FIGURA 1).

Figura 1 - Sequência de produção dos fibrocimentos.



A) Mistura dos materiais. B) Extrusão da massa cimentícia. C) Armazenamento dos compósitos em ambiente saturado para cura. D) Corpo de prova após 28 dias de cura. E) Ensaio de propriedades físicas. F) Ensaio de flexão mecânica. G) Ensaio de propriedade térmica.

Fonte: Da autora (2022).

Foram produzidos a quantidade de 14 corpos de prova por tratamento, sendo 7 deles destinados a análises aos 28 dias de cura e os outro 7 para análises de durabilidade. Após a cura dos corpos de provas, os fibrocimentos foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e microestruturais, tanto aos 28 dias de cura quanto após envelhecimento acelerado.

2.3 Caracterização dos compósitos

A caracterização física dos fibrocimentos aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, determinou as propriedades de densidade aparente (DA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA), de acordo com os procedimentos descritos pela norma American Society for Testing and Materials C948-81 (ASTM, 2016). Para a avaliação dessas propriedades, os corpos de prova passam por uma preparação para garantir condições saturadas da matriz, portanto os compósitos ficaram submersos em água por 24h e assim, foi determinada a massa imersa e úmida. Em seguida, ocorre o ensaio mecânico e posteriormente, o acondicionamento em estufa com circulação forçada de ar, com temperatura de $75 \pm 5^\circ\text{C}$, por 24h, até atingir massa constante. Após este procedimento, os corpos de prova foram mensurados para determinação da massa seca.

A avaliação mecânica dos compósitos foi realizada no Departamento de Engenharia – DEG/UFLA, em uma máquina de ensaios universal com célula de carga de 20kN, da marca Instron (São José dos Pinhas, Brasil), seguindo os procedimentos descritos pela International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, 1984), mediante ensaio de flexão estática com configuração de três pontos, vão de 150mm e velocidade de ensaio de 2mm/min, para determinação do módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e tenacidade (T).

Para determinação da propriedade térmica dos fibrocimentos foi realizado o ensaio de isolamento térmico com auxílio de um equipamento adaptado para o método da coluna fracionada, descrito e executado por Eugênio *et al.* (2021), que permite determinar o efeito das diferentes porcentagens de microfibras de polipropileno em substituição a celulose associada ao cascalho de perfuração de poço de petróleo na matriz cimentícia.

Nesse método considera-se as perdas de calor lateral e o ensaio finaliza quando a estabilidade da temperatura é atingida, sendo as variações registradas por sensores conectados a um dispositivo que armazena esses dados, modelo IM DC 100-01E. Os compósitos são posicionados no interior do equipamento e os termopares são acoplados nas suas superfícies (base e topo). O ensaio simula a exposição do material à temperatura de 50°C (base padrão – fonte de energia), com razão de aquecimento de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ e ciclo de ensaio para cada tratamento de aproximadamente 3,5h. O resultado de isolamento térmico do material é obtido pela diferença entre os sensores e condutividade térmica dos fibrocimentos é determinada pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2022).

A caracterização microestrutural realizada por análises da morfologia das superfícies dos fibrocimentos controle (5% de celulose), foi por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento da marca ZEISS, modelo DMS 940

(Oberkochen, Alemanha). Para as análises, os corpos de prova foram revestidos com uma camada de ouro e analisados usando uma tensão de aceleração de 5kV. A análise microestrutural das superfícies dos fibrocimentos com 3% e 5% de PP foi realizada com uso de microscópio digital, da marca *Colling Tech*, com aumento de 50 a 1600x, nos pontos onde ocorreram a ruptura durante o ensaio de flexão, para analisar o comportamento do reforço e interação fibra/matriz.

Foi realizada ainda, a avaliação das estruturas cristalinas formadas nas matrizes com cascalho de perfuração de poço de petróleo e interação das mesclas entre as fibras utilizadas e a matriz, mediante a avaliação de padrões de Difração de Raios X (DRX), utilizando um equipamento do modelo X XRD-6000 (Shimadzu, Kyoto, Japão). As amostras analisadas foram identificadas por meio de comparação em dados encontrados em literatura.

O envelhecimento acelerado por meio de ciclos de aspersão e secagem foi realizado de acordo com as premissas da norma NBR 15498 (ABNT, 2016). Os ciclos de envelhecimento são determinados por aspersão durante 2h e 50min; pausa de 10min; secagem em estufa por 2h 50 min a 100°C e pausa de 10min, no total foram realizados 25 ciclos para avaliação do comportamento dos fibrocimentos. Este procedimento tem a finalidade de simular a eventual degradação dos materiais pela exposição prolongada às intempéries naturais (MENDES *et al.*, 2021; TEIXEIRA *et al.*, 2020). Após o envelhecimento acelerados os corpos-de-prova foram destinados à caracterização física, mecânica, térmica e microestrutural.

2.4 Análise estatística

Para análise das propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos compósitos foi realizado delineamento inteiramente casualizado. Para avaliar as variações dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo e diferentes porcentagens de fibras vegetais e sintéticas, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e análise de regressão, ambos a 5% de significância ($p < 0,05$), utilizando o software Sisvar® (versão 5.6) (FERREIRA, 2019).

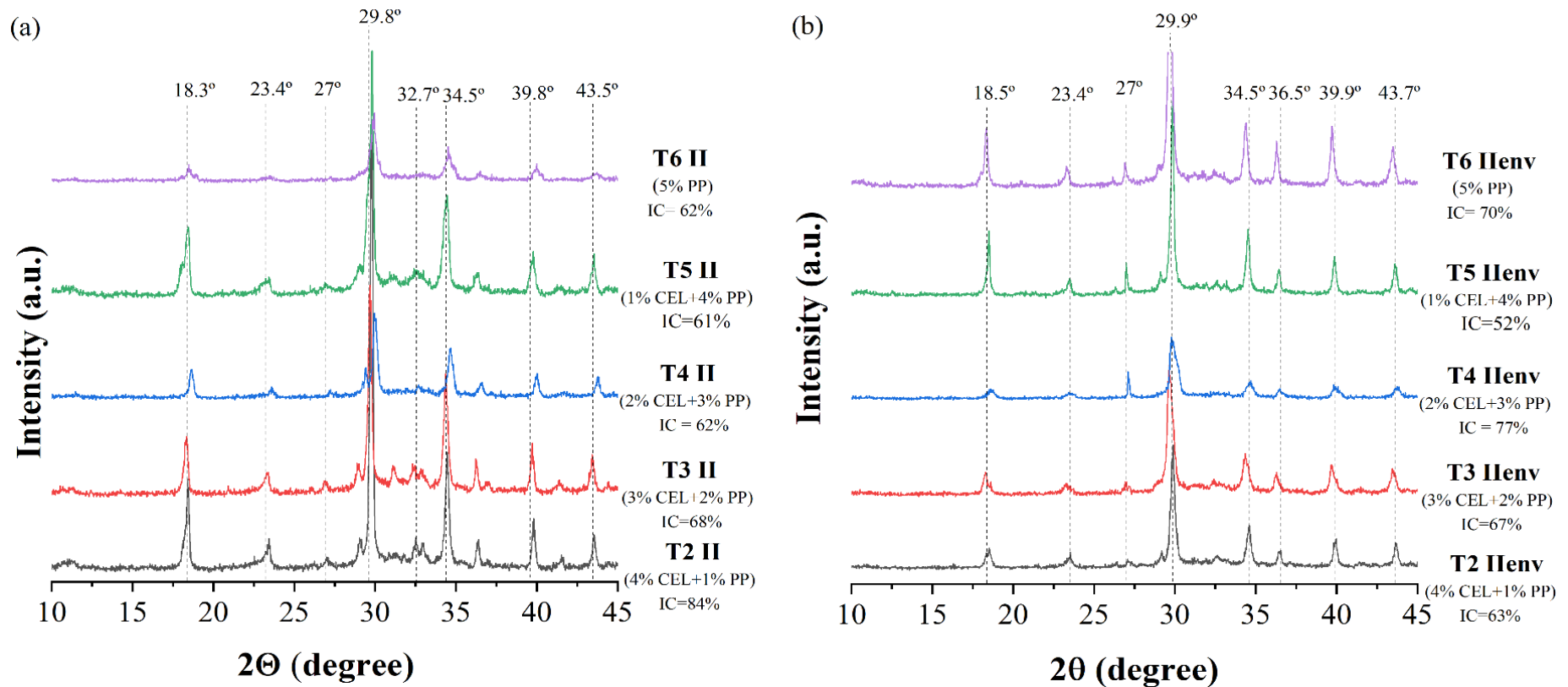
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Difração de Raios X

As propriedades microestruturais dos compósitos permitem a análise de possíveis interações entre a matriz cimentícia com cascalho de perfuração de poço de petróleo e a sua compatibilidade com as fibras utilizadas, celulose e PP.

A Figura 2 mostra os espectros de DRX para os fibrocimentos que foram extrudados com a substituição do calcário pelo cascalho de poço de petróleo e para os tratamentos com substituição de celulose por PP.

Figura 2 - Difractogramas de raios X dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.



(a) DRX dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração e fibras de PP, aos 28 dias de cura. (b) DRX dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração e fibras de PP, após envelhecimento acelerado.

Fonte: Da autora (2022).

Nos difratogramas apresentados para os fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo e fibras de celulose e polipropileno, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, existe uma grande quantidade de picos bem definidos, relacionados as fases de hidratação das matrizes cimentícias.

Nas posições $2\Theta = 18^\circ$ e 34° , observa-se indicações de fase cristalina da portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], comparando as Figuras 2A, aos 28 dias e 2B, após envelhecimento, observa-se que existe um aumento na intensidade dos picos, de $18,3^\circ$ e $18,5^\circ$, provavelmente devido as interações durante a cura o do cimento, proporcionando maior formação de cristais. Contudo, nos fibrocimentos, aos 28 dias e menores porcentagens de PP, observa-se um pico em $32,7^\circ$, mais perceptível nos compósitos com menores teores de PP e que após o envelhecimento, não há evidências dessas formações, mostrando que pode ter ocorrido interação entre materiais.

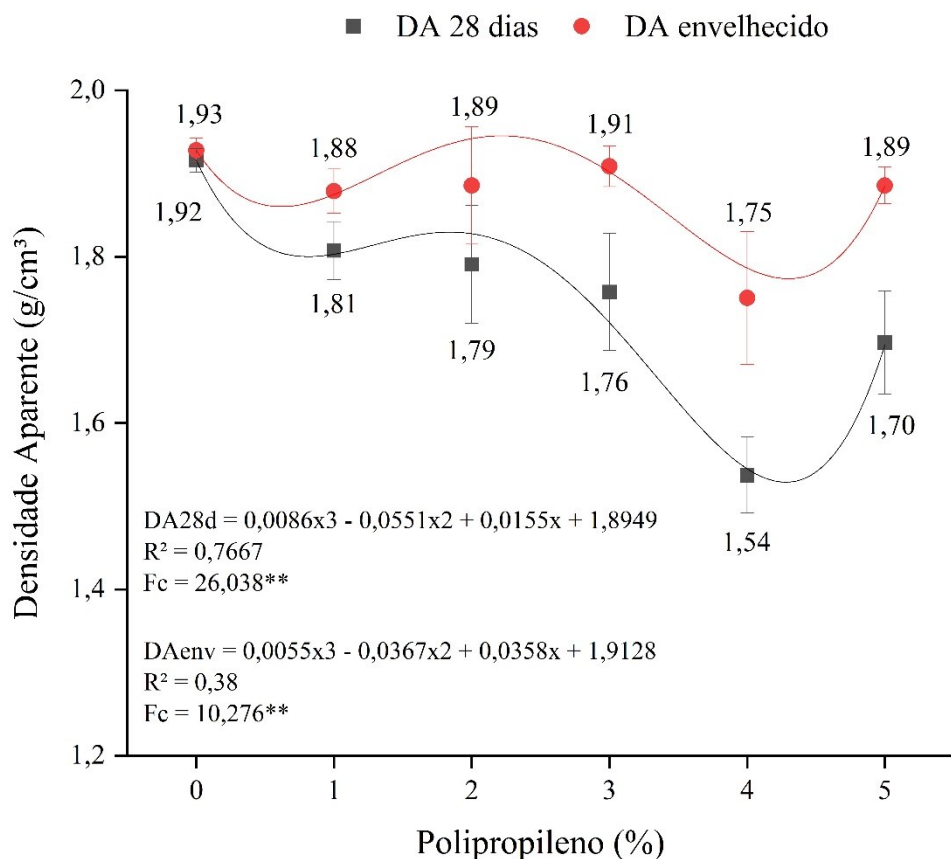
O pico na posição de $2\Theta = 27^\circ$ é característico do material quartzo (SiO_2) abundante no cascalho de perfuração, mas que também é possível ser identificado entre picos de 20° a 39° . A continuidade da cura, após os ciclos de envelhecimento se compreende na região de $2\Theta = 28^\circ$ a 40° , indicando o aumento da formação de calcita (CaCO_3), surgindo um pico em $2\Theta = 36,5^\circ$.

De acordo com a literatura, o PP sua forma principal (α) tem fase cristalina correspondentes aos picos de difração de em $2\Theta = 13,52^\circ$; $16,33^\circ$; $17,89^\circ$ e $21,19^\circ$ (LIBANO *et al.*, 2012). Especificamente, nessas posições não apareceram ocorrências nesta avaliação, devido a interação do PP com os demais materiais da matriz de cimento. Mas, na sua forma cristalina de β ele pode ser encontrado dentro da faixa de $2\Theta = 16$ a 17° e na forma γ entre $2\Theta = 19,2$ e $20,5^\circ$. A mudança nas intensidades das reflexões que indicam o material sintético, pode ser atribuída a ocorrência da modificação na natureza cristalográfica do PP, à presença de cimento (ÉLIS *et al.*, 2003; LÍBANO *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2007).

3.2 Propriedades físicas dos compósitos

A Figura 3 apresenta os valores médios obtidos para a propriedade de densidade aparente dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo e diferentes porcentagens de substituição de polpa celulósica por microfibras de polipropileno, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 3 - Propriedade física de densidade aparente para os fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

A propriedade de DA apresentou efeito significativo na porcentagem de substituição de celulose por PP, quando os fibrocimentos foram avaliados aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado. Os valores observados para essa propriedade variaram entre 1,47 e 1,90g/cm³ e entre 1,75 e 1,93g/cm³, para os compósitos aos 28 dias e após o envelhecimento, respectivamente. Sendo os maiores valores de médias atribuídos aos tratamentos controle e os menores valores aos tratamentos com 4% de PP na matriz, tanto aos 28 dias quanto após o envelhecimento.

Os compósitos aos 28 dias de cura tiveram sua densidade diminuída em razão da inserção das microfibras sintéticas nos fibrocimentos. À esta característica pode-se atribuir à formulação avaliada nesse estudo, onde foi substituída a celulose pelo PP em massa e não em volume, o que representa uma porção elevada desse material dentro da matriz, afetando o processo de produção e distribuição das fibras dentro da matriz.

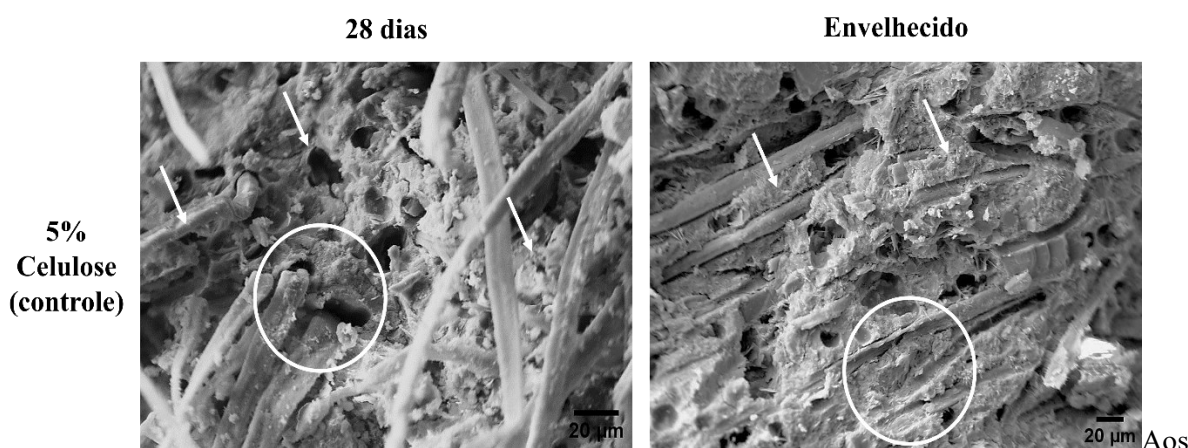
Os materiais sintéticos como nylon, álcool polivinílico (PVA), polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET) e o PP, no geral, têm como característica a baixa densidade

comparados a outras fibras (aço e vidro) (ALBERT *et al.*, 2016) que podem ser incorporadas em matrizes cimentícias, sendo um requisito desejável no setor da construção civil para conseguir um produto mais leve sem perder seu bom desempenho físico e mecânico (ROSTAMI *et al.*, 2020).

No entanto, a baixa densidade dessas fibras pode acarretar problemas de flutuação dentro da matriz cimentícia podendo reduzir a trabalhabilidade e aderência. Conforme as especificações do fabricante as fibras de PP utilizadas nesse estudo têm densidade de $0,90\text{g/cm}^3$ e a densidade da polpa celulósica, conforme alguns autores (FIGUEIREDO, 2011; MEJIA-BALLESTEROS *et al.*, 2021; TONOLI *et al.*, 2010), varia entre $0,8$ e $1,05\text{g/cm}^3$. Sendo o PP um material mais leve, pode ter ocorrido uma flutuação das microfibras dentro da matriz compósitas e reduzindo sua aderência ao fibrocimento, gerando mais poros ao invés de gerar mais interação.

O tratamento controle, sem a presença de PP mostra um comportamento esperado para essa propriedade, pois a presença do cascalho de perfuração de poço de petróleo, material caracterizado como pozolânico e que apresenta baixa inibição na cura do cimento, conforme análise de compatibilidade desse resíduo, indica a continuidade da densificação da matriz com idades mais avançadas, ocorrendo após os ciclos de envelhecimento (FIGURA 4).

Figura 4 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura do tratamento controle, produzido com cascalho de perfuração de poço de petróleo, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.



28 dias: setas indicam porosidade e os círculos baixa densificação da matriz. Envelhecido: setas e círculos indicam densificação da matriz do material.

Fonte: Da autora (2022).

Para os demais tratamentos, com substituição de celulose por microfibras de PP, também foi observado aumento da densidade, indicando que a cura ainda está ocorrendo e,

portanto, as hidratações do cimento e as reações necessárias para carbonatação natural acontecem à medida que avança o tempo (FARRAPO *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2021).

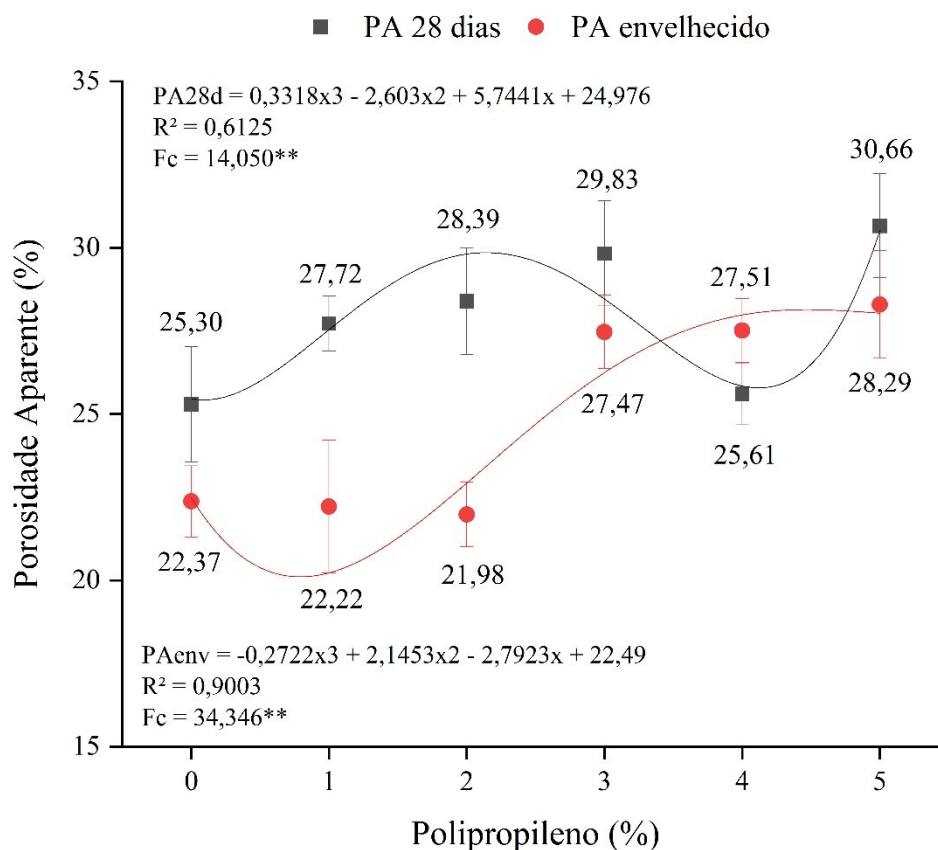
Albert *et al.* (2016), ao avaliarem o comportamento de fibras poliolefinicas (PE e PP) embutidas em argamassa e matrizes de concreto autodensável, mencionam que a matriz cimentícia por ser altamente alcalina, pode afetar na degradação das fibras poliméricas utilizadas na engenharia civil. Durante essa avaliação os autores esclarecem que algumas fibras são quimicamente inertes, e com isso, são estáveis na matriz, garantindo a interação entre fibra/matriz. Segundo a ASTM C 1116-03 (ASTM, 2015), as fibras de PP se mostram quimicamente duráveis quando utilizadas em formulações de concreto.

Assim como as fibras sintéticas podem ser afetadas pela alcalinidade da matriz cimentícia, os materiais lignocelulósicos em ambientes alcalinos têm seu processo de degradação bastante acentuado a partir da mineralização da parede celular das fibras, que ocorre pela entrada dos produtos de hidratação da matriz cimentícia, como o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ (LAVERDE *et al.*, 2022).

Outro fato a ser destacado, é que a incorporação de material pozolânico em matrizes cimentícias tendem a reduzir a alcalinidade, devido ao alto teor de alumina e sílica interferindo diretamente na interação fibra/matriz, criando uma zona de proteção ao redor das fibras, retardando a sua decomposição (ROSTAMI *et al.*, 2020), justificando assim a preservação das fibras de celulose e PP nos tratamentos avaliados.

Na Figura 5 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de porosidade aparente dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 5 - Propriedade física de porosidade aparente para os fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

A propriedade de PA apresentou efeito significativo da substituição de celulose por microfibras de PP, tanto para os fibrocimentos aos 28 dias quanto após os ciclos de envelhecimento acelerado. Os valores médios de PA para os fibrocimentos aos 28 dias foram de 25,30% a 30,66% e variaram entre 22,37% e 28,29%, após o envelhecimento acelerado.

Para os tratamentos aos 28 dias de cura, observa-se que com o aumento de PP, ocorre o aumento da porosidade na matriz cimentícia, exceto para os fibrocimentos com 4% PP que apresentou a menor média entre os tratamentos. O aumento avaliado foi de 17% entre os tratamentos controle e com 100% PP aos 28 dias. Após o envelhecimento acelerado, houve diminuição da PA para os tratamentos com 1, 2, 3 e 5% PP.

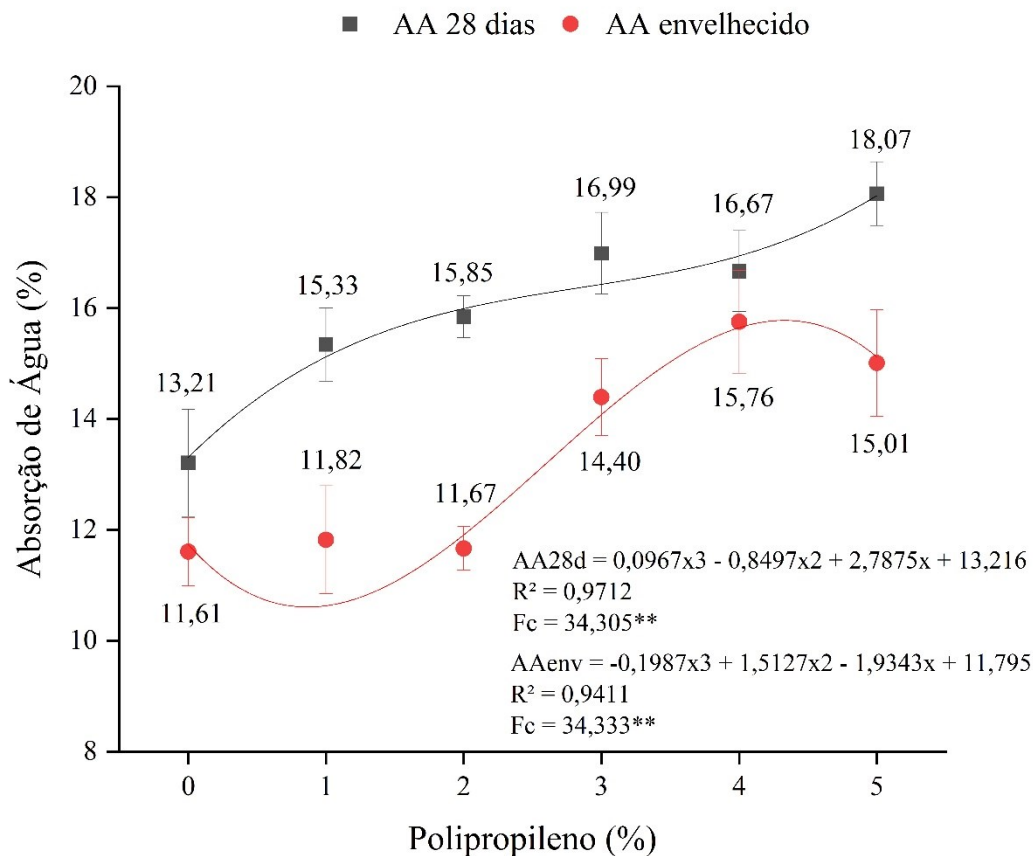
O tratamento com 4% PP apresentou aumento dos valores de PA após o envelhecimento. No entanto, a propriedade de DA que está diretamente relacionada as demais propriedades físicas, teve um aumento para este tratamento nas mesmas condições avaliadas e com isso, não se esperava que fosse ocorrer o aumento da PA. O que pode estar relacionado a este fato é o comprimento e entrelaçamento das fibras durante o processo produtivo, que tendem a se

aglomerar em certos pontos da matriz, formando áreas livres de fibras e/ou com baixa interação entre fibra/matriz, aumentando o número de poros no material mesmo com a continuidade da cura (MENDES *et al.*, 2021; TEIXEIRA *et al.*, 2020; TONOLI *et al.*, 2010).

A presença do cascalho de perfuração de poço de petróleo na matriz dos fibrocimentos, também contribui para o aumento da porosidade aos 28 dias de cura, o que se deve a granulometria do resíduo que por ser muito fina demanda de uma quantidade maior de água e impede que as reações de hidratação iniciais do cimento ocorra e assim, nesse período se tem maior porosidade. Já após os ciclos de envelhecimento acelerado, o material contribui para a continuidade da cura da matriz, liberando a água absorvida pelas partículas do cascalho, ficando disponível na mistura para dar sequência às reações de hidratação e, conseqüentemente, pelo preenchimento dos poros (BENJEDDOU *et al.*, 2021; HERMANE *et al.*, 2016; MEIJABALLESTEROS *et al.*, 2021).

Na Figura 6 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de absorção de água dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 6 - Propriedade física de absorção de água para os fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

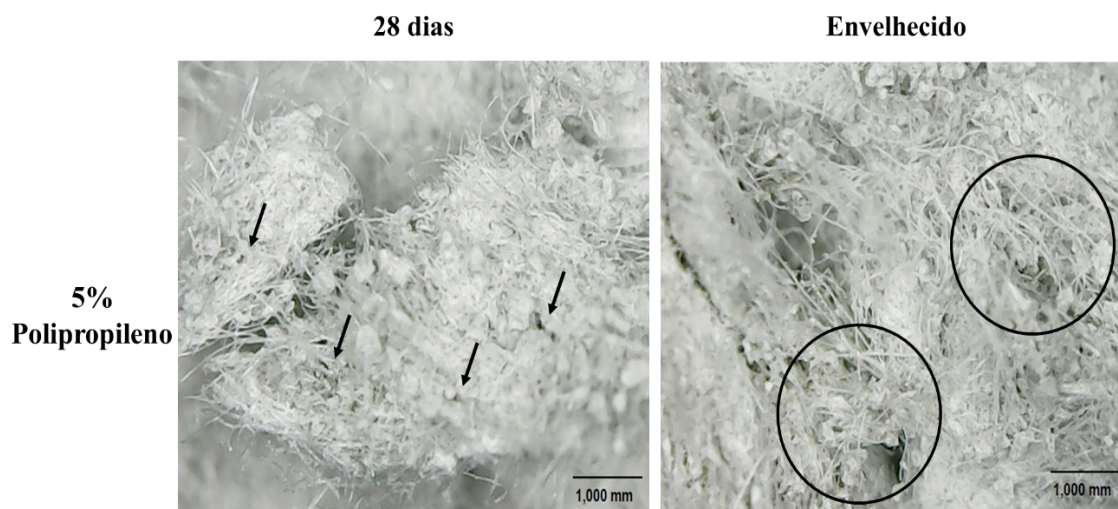
Houve efeito significativo da porcentagem de PP nos fibrocimentos para a propriedade de AA, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado. Os valores médios variaram entre 13,21% e 18,07% e foram de 11,61% a 15,76%, para os tratamentos aos 28 dias e após envelhecimento, respectivamente.

Os fibrocimentos com maiores concentrações de microfibras de PP (3%, 4% e 5%) foram os que apresentaram os maiores valores para AA, aos 28 dias. Essa característica acompanha as expectativas das propriedades de DA e PA, uma vez que com a diminuição da densidade com a inserção das fibras, espera-se que ocorrerá o aumento da PA e AA. Após o envelhecimento acelerado, a AA teve redução dos valores médios para todos os tratamentos avaliados, mesmo para o tratamento com 4% PP que teve sua PA aumentada após o envelhecimento.

As microfibras de PP apesar de apresentarem baixa absorção de água, devido às suas características hidrofóbicas que implicam diretamente na má dispersão dessas fibras na mistura e na baixa adesão na matriz, resulta em fissura e trincas, que podem ser áreas para entrada de água e conseqüentemente, representa o aumento da AA dos fibrocimentos avaliados. Devido a essa particularidade, o PP não prejudica a hidratação do cimento, mas apenas confere a matriz cimentícia melhoria no desempenho das propriedades mecânicas, assim percebe-se que de fato, as fibras de PP não contribuíram para melhoria do desempenho das propriedades físicas avaliadas (EHRENBRING *et al.*, 2022; RANADE *et al.*, 2014; ROSTAMI *et al.*, 2020).

Portanto, o fato dos fibrocimentos com maiores teores de PP apresentarem os maiores valores de AA, pode estar relacionado a distribuição das fibras na matriz, durante o processo de extrusão, que além de aglomerar o material em regiões específicas causa má dispersão nas fibras, suficientes para aumentar a absorção de água, mesmo sem a presença da polpa celulósica que é um material hidrofílico e ao seu grande volume na mistura, que não permitiu boa interação entre fibra/matriz, gerando maior quantidade de vazios e com isso, maior absorção de água (FIGURA 7).

Figura 7 – Imagem de microscopia óptica dos tratamentos com 5% PP, produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.



Aos 28 dias: setas indicam porosidade e baixa densificação da matriz. Envelhecido: círculos indicam a aglomeração de fibras de PP na matriz.

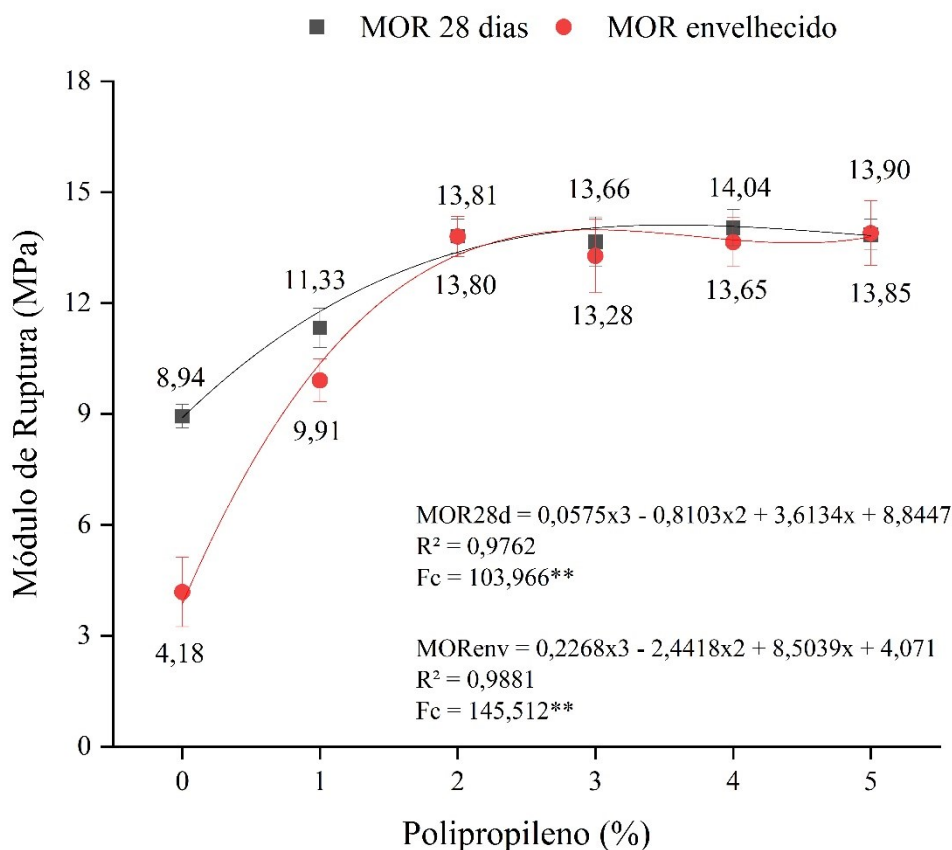
Fonte: Da autora (2022).

Para a propriedade física de AA, a norma NBR 7581-1 (ABNT, 2014) estipula o valor máximo de 37% para produtos de fibrocimentos. Diante dos resultados avaliados, todos os tratamentos atendem aos requisitos mínimos da normativa, tanto aos 28 dias de cura quanto após os ciclos de envelhecimento acelerado.

3.3 Propriedades mecânicas dos compósitos

Na Figura 8 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de módulo de ruptura dos fibrocimentos, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.

Figura 8 - Propriedade mecânica de módulo de ruptura para os fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

O MOR à flexão estática dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo e substituição de celulose, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, apresentaram efeito significativo na inserção das fibras sintéticas na matriz cimentícia.

Os valores médios variaram entre 8,94 e 14,04MPa para os fibrocimentos aos 28 dias de cura e entre 4,18 e 13,85MPa após envelhecimento acelerado. Foi observada uma pequena variação nas médias quando houve inserção de PP. O tratamento controle, para ambas as condições avaliadas foram os que apresentaram menores valores de resistência. A inserção de PP nas proporções de 2 a 5%, aos 28 dias e após o envelhecimento tiveram um aumento expressivo em relação ao tratamento controle, mas permaneceram bem próximos entre si, sendo o tratamento com 2% PP após envelhecimento, sendo o que obteve melhor desempenho para MOR.

Tonoli *et al.* (2010) estudaram a possibilidade da utilização de fibras celulósicas de eucalipto como reforço alternativo para compósitos cimentícios da engenharia e o potencial de

substituição parcial de fibras sintéticas utilizadas amplamente na indústria por polpa de eucalipto. Neste estudo, ao avaliarem os compósitos reforçados com 1% e 0,5% de fibras de PP e 9% de polpa de eucalipto ou 9,5% de polpa de pinus, eles observam que não há diferenças significativas no desempenho mecânico dos materiais reforçados com fibras de eucalipto e PP, mesmo após ciclos de envelhecimento.

Em uma pesquisa sobre o comportamento mecânico e durabilidade de concretos reforçados com polipropileno e fibras de sisal, Castoldi *et al.* (2019) ressaltam que as fibras podem ser incorporadas no concreto de forma homogênea ou dispersas aleatoriamente e que dentre as possibilidades de uso as fibras de PP têm sido amplamente empregadas, devido a sua capacidade de reforço e controle de propagação de fissuras. Após ensaios de resistência à flexão, os autores concluem que as fibras absorvem as tensões de tração e que quanto maior o teor de fibras, menor a redução da tensão após fissura inicial, sendo os tratamentos com presença de PP os que exibiram maiores resistências à flexão.

Mendes *et al.* (2021) ao fazerem um estudo sobre o uso de resíduo polimérico como reforço para fibrocimento extrudado, observaram que as partículas de PET inseridas nas proporções de 4 e 5% aos 28 dias de cura, permaneceu estável e após ciclos de envelhecimento observou que houve o aumento para essa propriedade em compósitos com porcentagens entre 1 e 3% PET, o que associaram as condições de granulometria e dimensões das partículas utilizadas.

As fibras ao serem inseridas nas matrizes cimentícias atuam como reforço, com condições de suportar e controlar a abertura de fissuras e trincas na microestrutura do material através da sua capacidade de absorver impactos, evitando que uma matriz frágil apresente uma resposta imediata de ruptura em sua estrutura (BALAGOPAL *et al.*, 2022; BOLAT *et al.*, 2014; FONSECA *et al.*, 2019), quando são bem distribuídas e utilizadas em quantidades ajustadas, proporcionam melhoria nas características mecânicas de resistência a tração, tenacidade, ductilidade e durabilidade (AKIN *et al.*, 2022; BOLAT *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2018; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

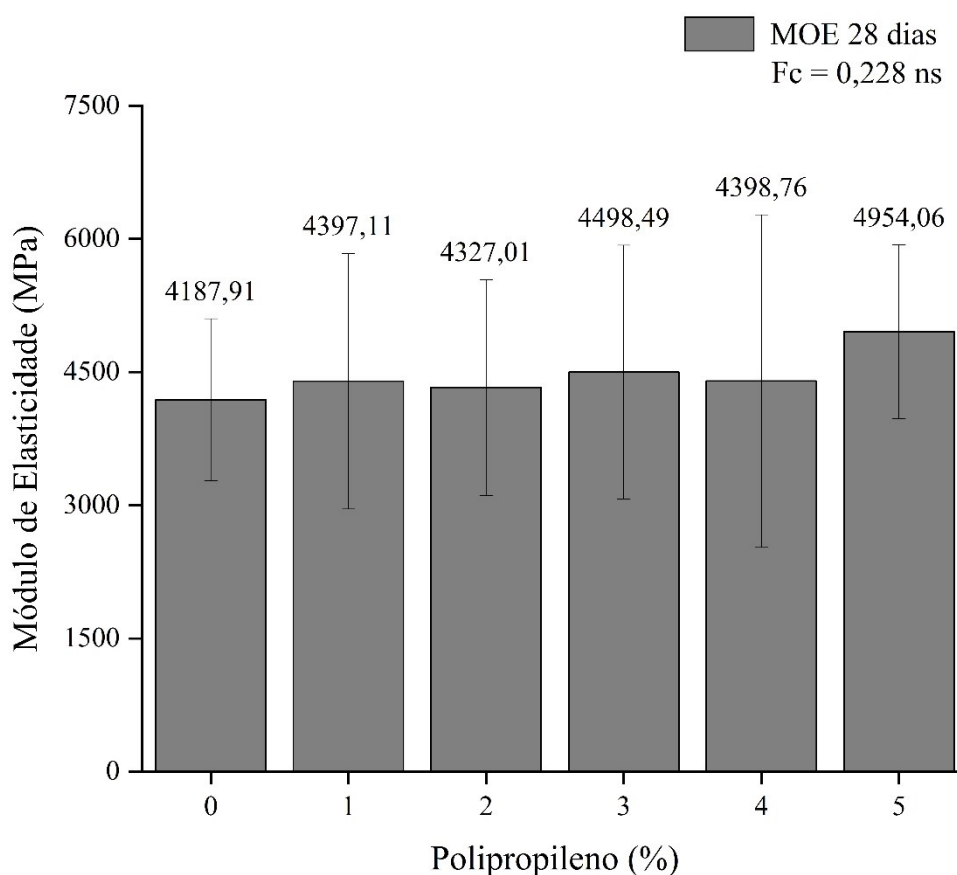
O desempenho dos compósitos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo e microfibras de PP se apresentou satisfatório, considerando que comumente, após o envelhecimento das matrizes, existe uma grande variação na resistência mecânica. Neste caso, fica evidente que as fibras inseridas não foram afetadas pela alcalinidade da matriz cimentícia mesmo com a continuidade da cura, impactando positivamente na durabilidade da matriz.

De acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2021), as placas cimentícias reforçadas com fibras podem ser catalogadas conforme os métodos de ensaio. Os compósitos produzidos foram

avaliados em condições saturadas e, portanto, devem corresponder aos requisitos mínimos das categorias A/B. Os fibrocimentos aos 28 dias, se enquadraram em diferentes classes, sendo os tratamentos controle e com 1% PP correspondentes a classe 2 que exige o valor mínimo de MOR à flexão estática de 7MPa; os demais tratamentos com 2%, 3%, 4% e 5% PP, adequaram-se a classe 3 que tem como requisito mínimo o valor de 13MPa para resistência à tração na flexão. Após os ciclos de envelhecimento acelerado, para avaliação da durabilidade dos compósitos, o tratamento controle atendeu às exigências da classe 1, que determina o valor mínimo de 4MPa e os demais tratamentos mantiveram suas classificações. Segundo a norma, as categorias definem as aplicações do material, sendo nesse caso indicados para uso e aplicações externas.

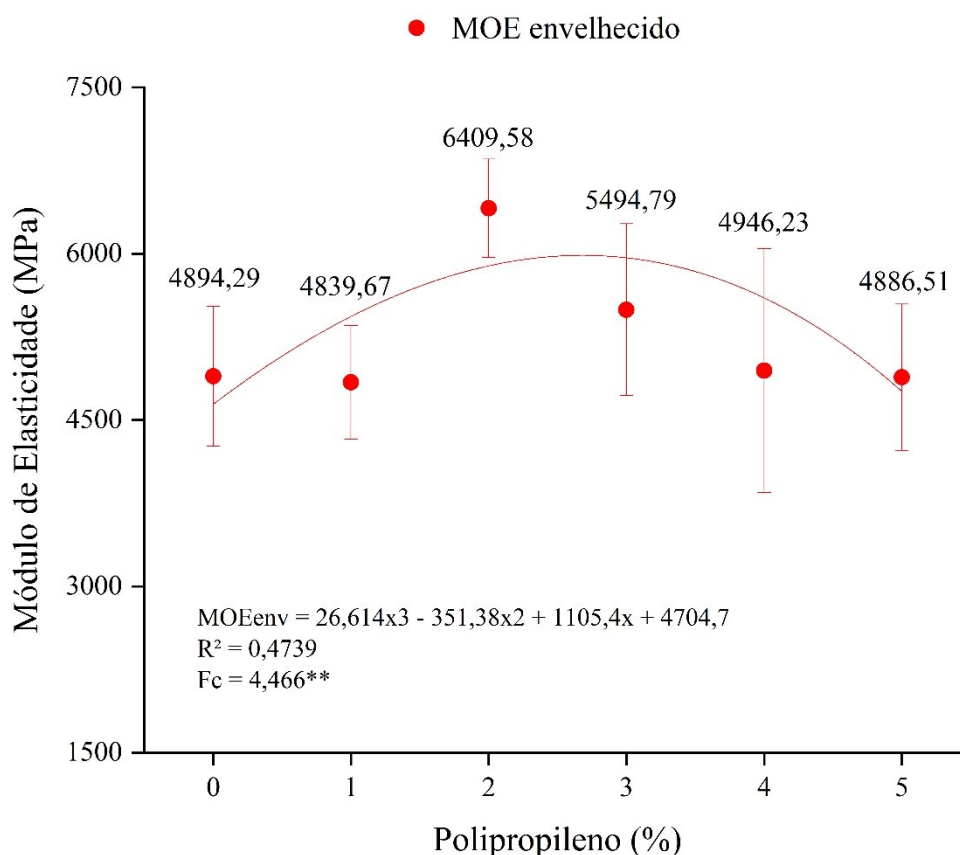
Nas Figuras 9 e 10 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de módulo de elasticidade dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, respectivamente.

Figura 9 - Propriedade mecânica de módulo de elasticidade dos fibrocimentos aos 28 dias de cura.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 10 - Propriedade mecânica de módulo de elasticidade dos fibrocimentos após envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Não houve efeito significativo da porcentagem de microfibras de PP nos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo sobre a propriedade de MOE aos 28 dias de cura. Sendo assim, a presença das fibras sintéticas não afetou o desempenho dessa propriedade. Contudo, para os fibrocimentos após o envelhecimento acelerado, houve efeito significativo da substituição da polpa celulósica pelas microfibras de PP.

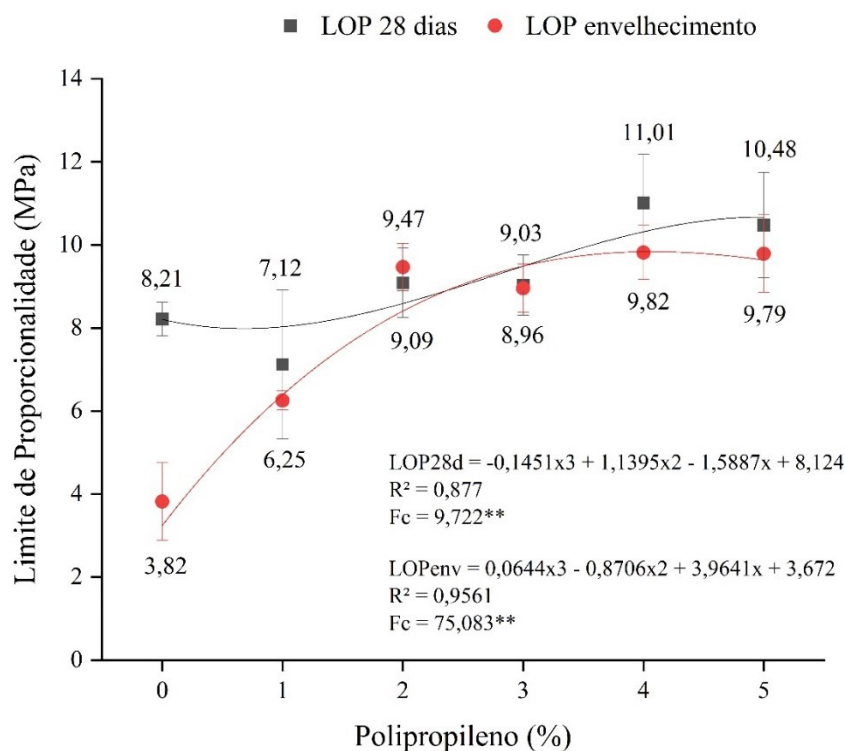
O tratamento controle após o envelhecimento acelerado teve melhora de seu desempenho para propriedade mecânica de MOE à flexão estática, demonstrando que com os ciclos de molhagem e secagem, proporcionando a continuidade da cura da matriz, houve aumento da rigidez dos compósitos e como já mencionado, houve a diminuição da PA e AA. Os tratamentos avaliados com 2%, 3% e 4% de microfibras de PP também apresentaram melhora no desempenho de MOE após o envelhecimento, destacando os compósitos com 2% PP que apresentou média 28% superior ao tratamento controle.

Observa-se que apesar da melhora na propriedade de MOE após o envelhecimento acelerado, os valores médios tendem a diminuir com o aumento do teor de fibras. Mendes *et al.* (2021) ao avaliarem o uso de pneu e fibras de PET como material de reforço em fibrocimentos, também observaram uma redução significativa dos valores da propriedade MOE quando havia maior quantidade de material de reforço.

As propriedades físicas interferem diretamente no comportamento mecânico dos materiais, uma vez que o aumento da PA compreende em uma matriz com mais espaços vazios e como consequência, menor densidade, podendo apresentar uma menor resistência. O tratamento que apresentou o melhor desempenho para as propriedades mecânicas (MOR e MOE), após o envelhecimento acelerado, é também o tratamento que teve os menores valores de porosidade e absorção de água para os fibrocimentos com fibras de PP. Além disso, a propriedade de MOE pode estar sendo afetada pela falta de aderência entre o grande volume de fibras de PP e matriz, impactando na capacidade de absorver os impactos da matriz e, por consequência, controlar a fissuração na estrutura.

Na Figura 11 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de limite de proporcionalidade, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.

Figura 11 - Propriedade mecânica de limite de proporcionalidade dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

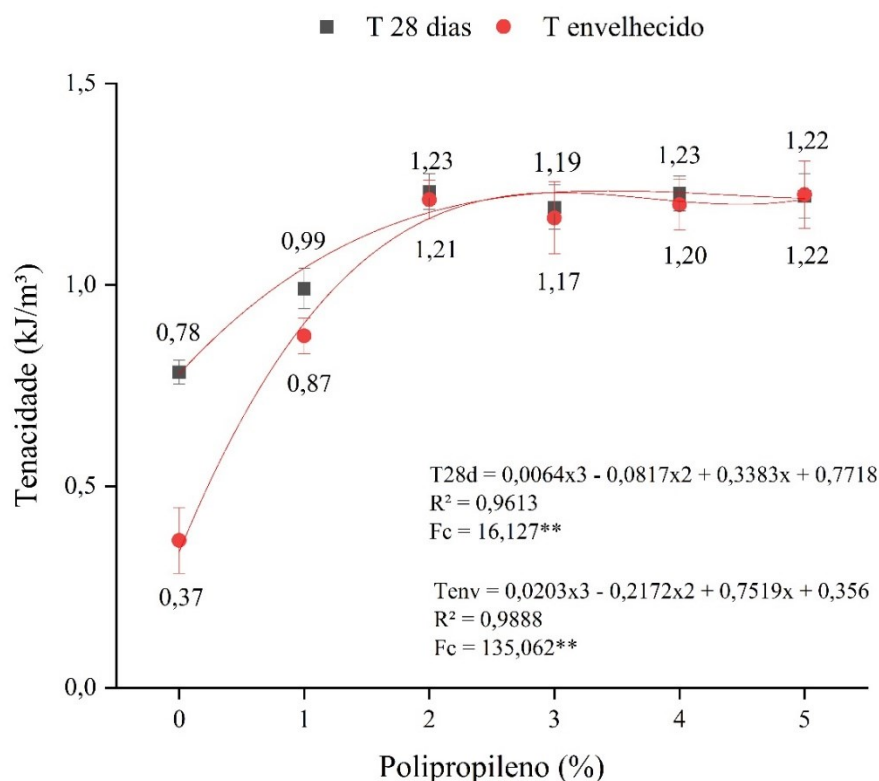
A propriedade LOP à flexão estática aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado apresentou efeito significativo para a substituição de celulose por microfibras de PP nos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo.

O LOP para os fibrocimentos aos 28 dias de cura apresentou valores médios entre 7,12 e 11,01MPa após o envelhecimento acelerado, os valores médios variaram entre 3,82 e 9,79MPa, sendo o tratamento controle o que apresentou menor valor e o tratamento com 4% PP o que registrou o valor máximo. No entanto, os demais tratamentos apresentaram valores superiores ao tratamento referência.

De acordo com Mendes *et al.* (2021), Niu *et al.* (2019) e Tonoli *et al.* (2013), os valores de LOP podem demonstrar se houve uma boa adesão entre fibra e matriz, sendo que quanto maior o valor da propriedade melhor representado estará a interação dos materiais. No caso dos tratamentos aos 28 dias de cura, que não houve efeito significativo, os autores relacionam esse resultado a uma quebra das fibras, mas sem ocorrer seu deslocamento, indicando uma boa interação com a matriz. Essa característica não foi comprovadamente observada neste trabalho, uma vez que a propriedade MOE parece ter sido mais efetivamente afetada pela falta de interação entre fibras e matriz. O que poderia explicar esse resultado para LOP é o grande volume de fibras de PP aglomeradas, que teria conseguido manter por mais tempo a resistência ao escoamento.

Na Figura 12 estão apresentados os valores médios obtidos para a propriedade de tenacidade, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.

Figura 12 - Propriedade mecânica de tenacidade dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2022).

A propriedade mecânica de tenacidade dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração de poço de petróleo, tanto aos 28 dias de cura quanto após os ciclos de envelhecimento acelerado, houve efeito significativo para a propriedade, indicando que a presença de microfibras de PP afeta a tenacidade do material.

Os valores médios observados para T aos 28 dias de cura, variaram entre 0,78 e 1,23KJ/m³, sendo o valor máximo para os fibrocimentos com 2 e 4% de PP. Após o envelhecimento acelerado a T variou de 0,37 a 1,22KJ/m³, sendo o tratamento com 5% PP a apresentar a maior média. Os valores de T, no geral, tenderam a diminuir após o envelhecimento acelerado, apenas no tratamento com 5% PP após o envelhecimento acelerado foi observado que os valores médios se mantiveram iguais.

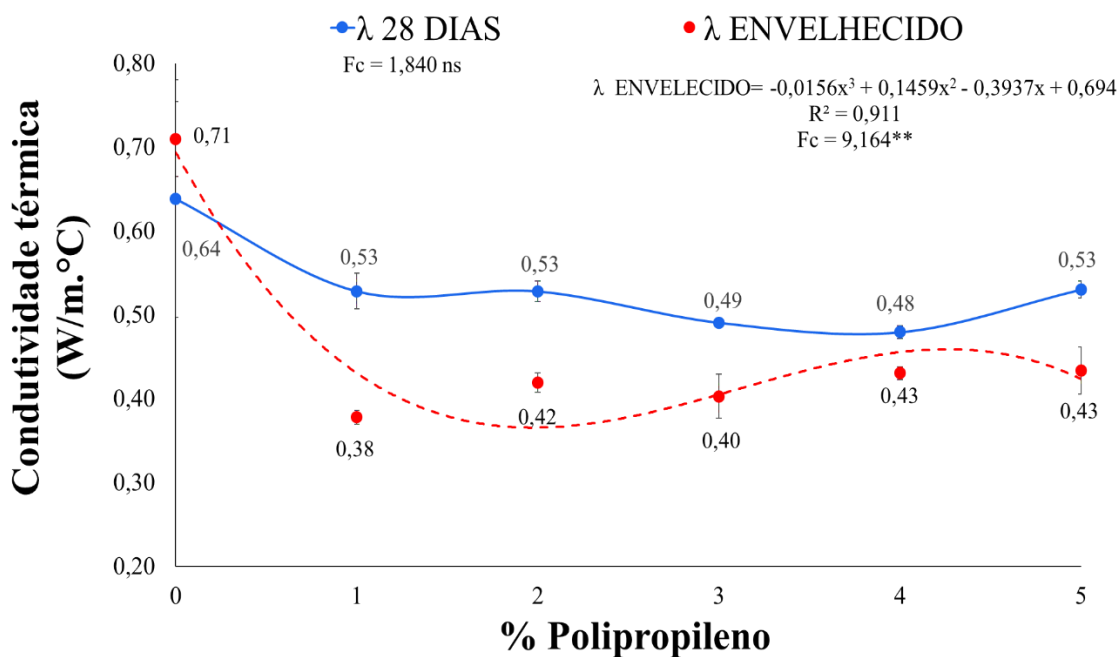
Essa propriedade pode ser relacionada a diminuição do MOE, devido ao aumento do teor de fibras e, portanto, aumento da tenacidade. A T compreende na capacidade de absorção de energia até a fratura, o que é condizente com a função da presença de reforço em uma matriz cimentícia. Vários estudos comprovaram que a adição de fibras em matrizes cimentícias melhoram a tenacidade, resistência a tração, impacto e flexão após a fissuração dos materiais

cimentícios, além de ter muita influência no desempenho mecânico a partir das características da fibra como tipo, comprimento, diâmetro e volume (BALAGOPAL *et al.*, 2022; PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017; SOUFEIANI *et al.*, 2016).

3.4 Propriedade térmica dos compósitos

A Figura 13 apresenta os valores médios para condutividade térmica (λ) dos fibrocimentos produzidos com cascalho de perfuração e fibras de celulose e microfibras de polipropileno (PP).

Figura 13 – Propriedade de condutividade térmica dos fibrocimentos, aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora (2022).

Para a propriedade térmica avaliada dos compósitos produzidos com cascalho de perfuração e fibras de celulose associadas as fibras sintéticas de polipropileno, observou-se que não houve efeito significativo para os fibrocimentos aos 28 dias de cura, mas para a propriedade após os ciclos de envelhecimento, foi observado o efeito significativo da presença do PP na matriz cimentícia.

Os valores médios de condutividade térmica para os fibrocimentos aos 28 dias de cura variaram entre 0,4794 e 0,6387 W/m.°C, sendo o valor máximo atribuído ao tratamento controle que tem em sua composição apenas fibras de celulose. Para os fibrocimentos após o

envelhecimento acelerado, os valores variaram entre 0,3778 e 0,7097 W/m.°C e o valor mais alto, novamente, está relacionado ao material que não possui fibras sintéticas em sua matriz.

As propriedades térmicas estão diretamente relacionadas as propriedades físicas de DA e PA, pois a presença de poros e a menor densificação da matriz de cimento, contribui para o isolamento térmico e, conseqüentemente, menor condutividade de calor. Para materiais a serem utilizados na construção civil, o conforto térmico é uma característica decisiva para atribuição da utilização desses materiais.

O tratamento controle, tanto aos 28 dias quanto após o envelhecimento acelerado, foi o que apresentou maior DA e menor PA dentro todos os tratamentos avaliados, o que justifica ser o compósito com maior condutividade térmica. Enquanto, o tratamento com 4% PP na matriz aos 28 dias de cura, foi o que apresentou a menor média para condutividade e o tratamento com 1% PP após o envelhecimento acelerado, foi o que teve melhor desempenho da propriedade térmica.

De acordo com a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2022) a condutividade térmica de fibrocimentos deve ser no máximo de 0,95 W/m.°C. Considerando a média de densidade dos compósitos produzidos neste experimento com média entre 1,47 e 1,93g/cm³ e a norma considera o valor de condutividade térmica aceitável para os compósitos com densidade aproximada de 1,90g/cm³, todos os tratamentos avaliados atendem as exigências da norma e de utilização em edificações, demonstrando bom desempenho no isolamento do calor.

4 CONCLUSÕES

Buscando reduzir os impactos causados pela geração de resíduos de cascalho de petróleo, uma alternativa foi sua utilização na matriz cimentícia de fibrocimentos visando aproveitamento, agregação de valor e desenvolvimento técnico-científico. Contudo, o uso desse resíduo deve ser associado a outros materiais que possam garantir alta resistência mecânica, boa tenacidade e alta durabilidade dos compósitos.

Com isso, a definição do uso de fibras sintéticas e vegetais, que já são materiais consolidados na indústria visou avaliar as propriedades dos fibrocimentos com cascalho de perfuração buscando bom desempenho nas propriedades físico-mecânicas, térmicas e de durabilidade.

A utilização do resíduo de cascalho de perfuração em associação as fibras vegetais e as fibras sintéticas, atenderam todas as normas de comercialização e de utilização em edificações, mesmo após os ciclos de envelhecimento acelerado, comprovando sua eficiência e durabilidade.

As propriedades mecânicas com a utilização da mescla de fibras, sendo o MOR e o MOE as principais propriedades afetadas, obtiveram bom desempenho, apresentando uma conservação significativa da resistência a tração e na melhoria da rigidez da matriz, aumentando o módulo elástico do material.

Contudo, para definir a melhor formulação dentro dos viés de sustentabilidade que sustentam esse trabalho, precisa-se observar o aproveitamento do cascalho de perfuração de poço de petróleo direcionando este material que necessita de destinação adequada para não ser um poluente em áreas marinhas e terrestres, agregando valor agregado ao resíduo; considerar o alto custo das fibras sintéticas na indústria da construção civil e a utilização de um material vegetal atóxico, de baixo custo e com alta disponibilidade sem gerar impacto ambiental. A opção que se apresenta mais atrativa economicamente, socialmente e ambientalmente, é a formulação com cascalho de poço de petróleo e 2% de fibras de polipropileno em substituição às fibras de celulose.

Diante desses resultados, se comprova que a utilização desses materiais em conjunto é promissora para o desenvolvimento em escala industrial de um produto inovador, baixo custo e bom desempenho físico-mecânico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e o apoio financeiro e tecnológico dos órgãos de fomento – Fundação de Financiamento à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. *et al.* Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 527-536, May 2005.
- AKIN, S. K. *et al.* Macro and micro polupropylene fiber effect on reinforced concrete beams with insufficient lap splice. **Case Studies in Construction Materials**, London, v. 16, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01005>.
- ALBERTI, M. G. *et al.* Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 112, p. 607-622, June 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.128>.
- ALREKABI, S. *et al.* Mechanical performance of novel cement-based composites prepared with nanofibres, and hybrid nano and microfibres. **Composite Structures**, Oxford, v. 178, p. 145-156, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 116-03**: standart specification of fiber-reinforced concrete and shotcrete. West Conshohocken: ASTM, 2015. v. 04.02.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 948-81**: standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken: ASTM, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581-1**: telha ondulada de fibrocimento: parte 1: classificação e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 30 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placa de fibrocimento sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placa de fibrocimento sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 27 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos ABNT. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BALAGOPAL, V. *et al.* Influence of fibers on the mechanical Properties of cementitious composites: a review. **Materials Today**: proceddings, Cleveland, v. 65, p. 1846-1850, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.023>.

BENJEDDOU, O. *et al.* Effects of limestone filler fineness on the rheological behavior of cement: limestone filler grouts. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 12, n. 4, p. 3569-3578, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.020>.

BOLAT, H. *et al.* The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical Properties of concrete. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 61, p. 191-198, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CALMON, J. L. *et al.* Characterization of pre-treated drill cutting waste and its use as fine aggregate in concrete. **African Journal of Environmental Science and Technology**, Maiduguri, v. 11, n. 9, p. 461-470, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJEST2015.1910>.

CAMPOS, L. F. de *et al.* Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de petróleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental**, Campos dos Goytacazes, v. 10, n. 1, p. 119-138, 2016. DOI: 10.19180/2177-4560.v10n12016p119-138.

CASTOLDI, R. de S. *et al.* Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 2011, p. 617-628, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.282>.

CAVALCANTE, E. H. *et al.* Construção de trecho monitorado com utilização do resíduo cascalho de perfuração. *In*: CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DO ASFALTO, 16., 2011, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2011.

CHEN, T. L.; LIN, S.; LIN, Z. S. An innovative utilization of drilling wastes as building materials. *In*: SPE E&P ENVIRONMENTAL AND SAFETY CONFERENCE, 2007, Galvesion. **Proceedings [...]**. Galvesion: SPE, 2007.

CHENG, X. W. *et al.* A new approach to improve mechanical properties and durability of low-density oil well cement composite reinforced by cellulose fibers in microstructural scale. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 177, p. 499-510, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.134>.

COELHO, T. da C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 147-161, jan./mar. 2017.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fiber cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 518- 526, May 2005.

EHRENBRING, H. Z. *et al.* Influência da variação de materiais pozolânicos no comportamento mecânico de Engineered Cementitious Composites. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 11, n. 7, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.29927.

ÉLIS, T. S.; ÂNGELO, J. S. d'. Thermal and mechanical properties of a polypropylene nanocomposite. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 90, p. 1639, Sept. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.12830>.

EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (IOT) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 279, p. 122484, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122484>.

EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Journal of Building Engineering**, New York, v. 63, part A, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105547>.

FARRAPO, C. L. *et al.* Cellulose associate whit pet bottle waste in cement based composites. **Material Research**, São Carlos, v. 20, n. 5, p. 1380-1387, Oct. 2017.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 529-535, dez. 2019.

FERREIRA, M. M.; BARBOZA, A. S. R. Estudo do aproveitamento do cascalho de perfuração de poços como material de construção. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 9, n. 1, p. 181-187, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/19800827912013604>.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 247 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FONSECA, C. S. *et al.* Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 211, p. 517-527, June 2019.

FONSECA, C. S. *et al.* Micro/nanofibrilas celulósicas de eucalyptus em fibrocimentos extrudados. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 59-68, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201622012084>.

FU, T. *et al.* Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials. *In*: JAWAID, M.; BOUFI, S.; KHALIL, A. (ed.). **Cellulose-reinforced nanofibre composites**: production, properties and applications. London: Elsevier, 2017. p. 455-482. DOI: 10.1016/B978-0-08-100957-4.00020-6.

GIANNINI, M. B. *et al.* Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data. **Italian Journal of Remote Sensing**, Milano, v. 44, n. 1, p. 27-37, Feb. 2012.

GIORDANO, B. L.; SOUZA, R. B.; JOHN, V. M. Influence of binder in the drying shrinkage of fiber cement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 7-16, out./dez. 2009.

HERMANN, A. *et al.* Particle packing of cement and sílica fume in paste using na analytical model. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000100004>.

JO, B.; CHAKRABORTY, S.; YOON, K. W. A hypothetical model based on effectiveness of combined alkali and polymer latex modified jute fibre in controlling the setting and hydration behaviour of cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 68, p. 1-9, 2014.

KHORAMI, M. *et al.* Improvement of flexural performance of fibre cements composite board through fibre impregnation. **Sustainable Construction Materials and Technologies**, Istanbul, v. 2, p. 693-699, 2016.

KHORAMI, M. *et al.* Utilisation of waste cardboard and Nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 152, p. 746-755, 2017.

LABIB, W. A. Fibre reinforced cement composites. **Cement Based Materials**, New York, v. 31, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.75102.

LAVERDE, V. *et al.* Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 340, p. 127729, July 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>.

LIBANO, E. V. D. G. *et al.* Propriedades térmicas de compósitos de polipropileno e bentonita organofílica. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000063>.

LIU, Y. *et al.* Water-based drill cuttings, a shale gas extraction waste as supplementary cementitious material and optimization. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 346, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128419>.

MAIA, E. Y. de M. *et al.* Análise da adição de resíduos do green supply chain management da indústria petrolífera em artifício da construção civil. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 36., 2016, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ENEGEP, 2016.

MARQUES, S. K. J.; ACCHAR, W. Incorporação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para fabricação de tijolos solo-cimento. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Gandhinagar, v. 21, p. 1-189, 2014.

MARQUES, V. M.; GOMES, L. P.; KERN, A. P. Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 187-201, jan./mar. 2016.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E. *et al.* Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 124, p. 104280, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104280>.

MENDES, R. F. *et al.* Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 31, p. 42737-42749, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13707-x>.

- MONTEIRO, V. *et al.* On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 188, p. 280-291, 2018.
- NIU, Y. *et al.* Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under bending by digital image correlation technique. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 125, p. 105821, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105821>.
- PAKRAVAN, H.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 142, p. 280-294, July 2017. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059).
- PEREIRA, T. G. T. *et al.* Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. **Materials Today: proceedings**, Cleveland, v. 31, n. 2, p. 309-314, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.394>.
- RADVANEK, M. *et al.* Change of carcinogenic chrysotile fibers in the asbestos cement (Eternit) to harmless waste by artificial carbonatization: petrological and technological results. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 252, n. 1, p. 390-400, May 2013.
- RANADE, R. *et al.* Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 58, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.002>.
- RILEM TECHNICAL COMMITTEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Materials and Structures**, London, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984.
- RODIER, L.; CORREIA, V. da C.; SAVASTANO JUNIOR, H. Elaboration of eco-efficient vegetable fibers reinforced cement-based composites using glass powder residue. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 110, p. 103599, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103599>.
- RODRIGUES, A. W. *et al.* Desenvolvimento de nanocompósitos polipropileno/argila bentonita brasileira: I tratamento da argila e influência de compatibilizantes polares nas propriedades mecânicas. **Polímeros**, São Carlos, v. 17, n. 3, set. 2007. DOI: [10.1590/S0104-14282007000300011](https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300011).
- RODRIGUES, M. S. *et al.* Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1347-1354, 2013.
- ROSTAMI, R. *et al.* A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 241, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>.
- SAVASTANO JUNIOR, H. *et al.* Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction & Building Materials**, Guildford, v. 13, p. 433-438, Aug. 1999.

SCRIVENER, K. L.; WIEKER, W. Advances in hydration at low: ambiente and elevated temperatures. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT*, 1992, New Delhi. **Proceedings** [...]. New Delhi: ICCC, 1992.

SOROUSIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂: cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 34, p. 44-53, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.016>.

SOUFEIANI, L. *et al.* Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading: a review. **Engineering Structures**, Guildford, v. 124, p. 405-417, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.029>.

TAKAHASHI, T.; TSURUNGA, Y.; KONDO, T. Fabrication of highly isotactic polypropylene fibers to substitute asbestos in reinforced cement composites and analysis of the fiber formation mechanism. **Applied Polymer Science**, New York, v. 130, n. 2, p. 981-988, July 2013.

TEIXEIRA, J. N. *et al.* Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, New York, v. 11, p. 2193-2200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0536-y>.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres. **Material and Structures**, Oxford, v. 47, p. 433-446, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0070-0>.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibers. **Key Engineering Materials**, Zurich, v. 517, p. 450-457, 2012.

TONOLI, G. H. D. *et al.* Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 193-201, 2010.

TONOLI, G. H. D. *et al.* Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. **Cement and Concrete Composite**, Barking, v. 37, p. 68-75, Mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.004>.

XIE, X. *et al.* Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 78, p. 153-161, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.086>.

XIE, X.; ZHOU, Z.; YAN, Y. Flexural properties and impact behaviour analysis of bamboo cellulosic fibers filled cement based composites. **Construction and Building Materials**, Guildford v. 220, p. 403-414, 2019.

YAN, L.; KASAL, B.; HUANG, L. A review of recente research on the use of cellulosic fibers, their fibre fabric reinforced cementitious, geopolymer and Polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 92, p. 94-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.

ZHANG, P.; QINGFU, L.; HAIYANG, Z. Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash. **Reinforced Plastics and Composites**, Westport, v. 30, n. 16, p. 1350-1358, 2011.