



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

CAIO ÁLISSON DINIZ DA SILVA

**SISTEMATIZAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL E PROPOSTA DE DESTINAÇÃO DO  
CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS *ONSHORE* DA BACIA POTIGUAR**

MOSSORÓ

2022

CAIO ÁLISSON DINIZ DA SILVA

**SISTEMATIZAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL E PROPOSTA DE DESTINAÇÃO DO  
CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS *ONSHORE* DA BACIA POTIGUAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água

Orientador: Marcelo Tavares Gurgel, Prof. Dr.

Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586s Silva, Caio Álisson Diniz da .  
Sistematização do risco ambiental e proposta de  
destinação do cascalho de perfuração de poços  
onshore da Bacia Potiguar / Caio Álisson Diniz da  
Silva. - 2022.  
132 f. : il.

Orientador: Marcelo Tavares Gurgel.  
Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Manejo de Solo e Água, 2022.

1. Gestão sustentável . 2. Resíduo da  
perfuração. 3. Potencial poluidor . 4. Substituição  
parcial . 5. Economia circular. I. Gurgel,  
Marcelo Tavares, orient. II. Medeiros, Alisson  
Gadelha de , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CAIO ÁLISSON DINIZ DA SILVA

**SISTEMATIZAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL E PROPOSTA DE DESTINAÇÃO DO  
CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS *ONSHORE* DA BACIA POTIGUAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água

Defendida em: 09/05/2022.

**BANCA EXAMINADORA**


---

Marcelo Tavares Gurgel, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

---

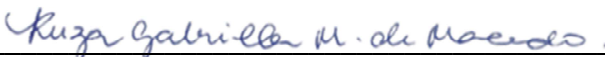
Alisson Gadelha de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)  
Coorientador

---



Walney Gomes da Silva, Prof. Dr. (IFRN)  
Membro Examinador Externo

---



Ruza Gabriela Medeiros de Araújo Macedo, Profa. Dra. (PRH 55.1/ANP-UFERSA)  
Membro Examinador Externo

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida e por repor minhas forças e me proporcionar perseverança para a conclusão de mais uma etapa da minha vida. Os momentos que passamos nos últimos tempos foram difíceis e raros de se explicar, bem mais difícil foi viver e conviver com tamanha dor. O desespero que por muitas vezes nos inundou, trazendo diversos gatilhos, nos apresentou o caminho a seguir. Aos profissionais da saúde, que lutaram com todas as suas forças neste momento, meu agradecimento pessoal fica aqui expresso.

Agradeço aos meus pais, Silésia Maria Diniz e Carlos Alex Gomes da Silva, por me trazerem ao mundo e me ajudar em minha carreira. Especialmente à minha mãe, que se tornou a minha rocha, ajudando e apoiando em todas as fases da minha vida. Você muitas vezes abdicou de si mesma para me auxiliar e ofertar educação necessária à construção do meu carácter. Agradeço aos meus irmãos, Síntya Fernanda Diniz e Carlos Eduardo Diniz, por me conhecerem tão bem, por compartilhar tantos momentos, me fornecendo apoio e conselhos em toda minha vida, com tamanho amor fraterno.

Agradeço a mim, pois a chave de guinada que tive na minha vida ocorreu quando eu consegui reconhecer as minhas limitações e entender que eu não sou perfeito. Bem distante disso. Tive que aprender a melhorar o meu desempenho, compreender que não sou vítima, tampouco devo me responsabilizar e me culpar por todas as situações que ocorrem fora do meu alcance. “Não seja você o seu maior carrasco”, me disse um grande profissional recentemente. Concordo que cheguei em momentos em que eu era aquele que estava me exigindo mais.

Esse momento passou, felizmente. Consegui reconhecer que sou bom naquilo que faço e meus orientadores me mostraram isso com muita calma diante de momentos difíceis nesses últimos tempos. Todos os dias peço para que a vida me surpreenda com coisas positivas. Meus orientadores me deram esse apoio quando eu precisava, à eles o meu muito obrigado. Agradeço a imensamente a eles e a mim por acreditar em minha capacidade. Muito obrigado, universo.

Sou eternamente grato ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Tavares Gurgel, especialmente pela sua paciência para repassar conhecimentos e ensinamentos e por se portar tão acessível, se mostrando um profissional com indescritível destreza na execução de sua profissão. Foi uma das pessoas mais coerentes que conheci em minha vida, por isso, me espelho em você. Agradeço por todo o apoio, compreensão, suporte e exigência para que esse trabalho fosse executado de forma plausível, por contribuir de forma tão significativa para o meu

crescimento enquanto pessoa e profissional e compreender de forma tão consciente o momento que estávamos passando e as limitações existentes.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alisson Gadelha de Medeiros, agradeço por todos os ensinamentos repassados e pela sua disponibilidade, sem ele a realização deste trabalho seria bastante difícil. Este foi sempre meu verdadeiro amigo, me apresentou meus erros com muita habilidade, ao mesmo tempo que me mostrava o caminho para avançar e ser um melhor profissional e pesquisador. Subsidiou por diversas vezes informações que foram integralmente necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa. Seu companheirismo foi ímpar para ultrapassar os obstáculos. Você definitivamente me fez ser um ser humano melhor.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015, por todo o apoio financeiro ao projeto.

Aos professores do PRH 55.1: Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo, Profa. Dra. Ruza Gabriela Medeiros de Araújo Macedo e, em especial, ao Prof. Dr. Fábio Pereira Fagundes, por me acompanhar, por tantas vezes em trabalhos laboratoriais, estabelecendo contatos para viabilizar este trabalho, e por tantos conselhos e ajuda. Sou imensamente grato.

Agradeço a todos os meus amigos que fiz na Universidade e que quero levá-los comigo por toda. Aos amigos de projetos, à exemplo PRH 55.1 (meus tão queridos colegas da graduação, à exemplo de Pâmela, Kidja e Marcos; do Mestrado, à exemplo de Liheberton e Maik e Doutorado, à exemplo de Lizandra) os quais dividimos nossos conhecimentos e angústias; Aos do Acesso à Terra Urbanizada (Em nome do Prof. Dr. Almir Mariano, uma grande inspiração). Vocês sempre estarão em minhas lembranças dando movimento e cor aos meus dias. Obrigado por todos os momentos que passamos juntos.

Não poderia esquecer da minha amiga Eng. Química Luara Morais, por ter sido uma amiga tão sincera e necessária, me auxiliando em todas as minhas fraquezas. Me ouviu, aconselhou e ensinou um dos principais ditados da nossa época: “Está tudo bem!”. Ao meu companheiro, Adailson Araújo. Muitos dias levantei pela manhã e você foi o combustível que eu precisava para continuar estando presente nessa jornada me mostrando que os desafios se tornam ínfimos quando os sorrisos estão sempre em nossos rostos.

Agradeço também à banca examinadora pela inteira disponibilidade em contribuir com a melhoria deste trabalho e com a minha formação acadêmica e profissional.

*“Os dois guerreiros mais poderosos  
são a paciência e o tempo”.*

Liev Tolstói

## RESUMO

As atividades da indústria do petróleo, apesar de promoverem investimento e crescimento econômico, geram resíduos que podem causar impactos ao ambiente, sendo sua reutilização importante parâmetro na efetivação de políticas de gestão sustentável. Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo caracterizar o cascalho de perfuração gerado na perfuração (DC) de poços onshore do semiárido Potiguar e verificar sistematicamente os riscos ambientais da possível disposição inadequada e, em complemento, avaliar solução técnica economicamente viável de reinserção deste resíduo em argamassas. Para tanto, foram realizados ensaios físicos, mineralógicos, químicos e microestruturais dos materiais. Utilizou-se de parâmetros da área provável de descarte e informações sobre o resíduo, além de vasta pesquisa bibliográfica para a sistematização dos riscos ambientais associados com a disposição destes resíduos no ambiente por meio da Matriz de Leopold, correlacionando os efeitos da disposição com os principais riscos ambientais. Na sequência, foi indicada solução técnica de incorporação desse resíduo em argamassas, com concentrações variando de 20 a 35% de substituição parcial da areia (NS) pelo DC. Para melhoria de empacotamento foi utilizado o método de Andreassen modificado. Foram realizados experimentos para analisar as propriedades no estado fresco e endurecido aos 28 dias, com avaliação estatística da absorção e resistência por Análise de Variância (ANOVA). Os efeitos positivos desta reinserção foram verificados do ponto de vista da viabilidade e economia, além de análise pelo uso do Diagrama de Loop Causal (CLD) para verificação da Economia Circular (EC). Os resultados demonstram que o DC pode provocar impactos ambientais se dispostos incorretamente no ambiente, principalmente no solo e na água. O teor de incorporação mais viável foi de 25%, obtendo também melhor curva de ajuste de empacotamento e resultados de resistência à compressão e redução da absorção por capilaridade. Economicamente, a incorporação reduz o custo para produzir 1 m<sup>3</sup> de argamassa e, conseqüentemente, em tratamento do resíduo. Além disso, do ponto de vista da EC, admite-se que é viável a reutilização do cascalho em outra indústria.

**Palavras-chave:** gestão sustentável; resíduo da perfuração; potencial poluidor; substituição parcial; economia circular.



## ABSTRACT

The activities of the oil industry, despite promoting investment and economic growth, generate waste that can impact the environment, and its reuse is an important parameter in the implementation of sustainable management policies. Thus, this research aims to characterize the drill cuttings (DC) generated on onshore wells in the semi-arid Potiguar region of Brazil and systematically verify the environmental risks of possible inadequate disposal and, in addition, evaluate an economically viable technical solution for the reinsertion of this residue in mortars. For that, physical, mineralogical, chemical, and microstructural tests of the materials were carried out. Parameters of the probable area of disposal and information about the residue were used, in addition to extensive bibliographic research for the systematization of the environmental risks associated with the disposal of these residues in the environment through the Leopold Matrix, correlating the effects of the disposal with the main environmental risks. Subsequently, a technical solution for incorporation of this residue in mortars was indicated, with concentrations ranging from 20 to 35% of partial replacement of sand (NS) by DC. For packing improvement, the modified Andreassen method was used. Experiments were carried out to analyze the properties in the fresh and hardened state at 28 days, with statistical evaluation of absorption and strength by Analysis of Variance (ANOVA). The positive effects of this reinsertion were verified from the point of view of feasibility and economy, in addition to analysis using the Causal Loop Diagram (CLD) to verify the Circular Economy (EC). The results demonstrate that DC can cause environmental impacts if disposed incorrectly in the environment, especially in soil and water. The most viable incorporation content was 25%, also obtaining a better packaging adjustment curve and results in compressive strength and reduced absorption by capillarity. Economically, incorporation reduces the cost to produce 1 m<sup>3</sup> of mortar and, consequently, in waste treatment. Furthermore, from the EC's point of view, it is assumed that it is feasible to reuse the gravel in another industry.

**Keywords:** sustainable management; drilling residue; polluting potential; partial replacement; circular economy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Exemplo de matriz de riscos contendo quatro células. ....	34
<b>Figura 2.</b> Exemplo de abordagem sistêmica adotada no CLD para resíduos da construção civil. ....	37
<b>Figura 3.</b> Fluxo de fases do programa experimental .....	42
<b>Figura 4.</b> Escolha de insumo alvo de reinserção. ....	43
<b>Figura 5.</b> Fluxo de atividades para avaliar impactos ambientais gerados pelo cascalho. ....	43
<b>Figura 6.</b> Mapa da cobertura (a) e dos tipos de solo (b) de Mossoró-RN. ....	46
<b>Figura 7.</b> Mapa hipsométrico (a) e de bacias hidrográficas (b) de Mossoró-RN. ....	47
<b>Figura 8.</b> Cascalho seco em condição natural (a) e destorroadado (b). ....	52
<b>Figura 9.</b> Mistura sem substituição de areia pelo cascalho. ....	53
<b>Figura 10.</b> Substituição simples do DC pela NS. ....	54
<b>Figura 11.</b> Comportamento dos testes em proporções de areia na mistura de 10 a 40% de DC. ....	56
<b>Figura 12.</b> Comportamento do Teste C com substituição do DC pela NS de 20 a 35%. ....	57
<b>Figura 13.</b> Tempo na mistura de cada componente na produção da argamassa. ....	58
<b>Figura 14.</b> Fluxograma de relações entre os principais impactos e os sistemas terrestres. ....	70
<b>Figura 15.</b> Matriz de Leopold para impactos ambientais relacionados ao trato com os cascalhos de perfuração no Semiárido. ....	71
<b>Figura 16.</b> Curvas granulométricas da areia, cascalho de perfuração e misturas com agregados e cascalho de perfuração nas porcentagens de 20, 25, 30 e 35%. ....	74
<b>Figura 17.</b> Coeficiente de uniformidade da mistura dos agregados utilizados na produção das argamassas em função do percentual de substituição de cascalho de perfuração. ....	75
<b>Figura 18.</b> Teor de finos (<0,15 mm) das composições com 20%, 25%, 30% e 35% de cascalho de perfuração em relação à areia natural. ....	77
<b>Figura 19.</b> Granulometria a laser do CP V-ARI RS. ....	80
<b>Figura 20.</b> MEVs das partículas da areia, cimento e do cascalho de perfuração. ....	81
<b>Figura 21.</b> Difractometria da amostra de areia natural. ....	82
<b>Figura 22.</b> Difractometria da amostra de Cimento Portland CP V-ARI RS. ....	82
<b>Figura 23.</b> Difractometria da amostra de cascalho de perfuração in natura. ....	83
<b>Figura 24.</b> Adição de ácido clorídrico ao cascalho. ....	85
<b>Figura 25.</b> Consistência dos traços produzidos em relação ao percentual de substituição de DC em relação à NS. ....	87
<b>Figura 26.</b> Resistência à compressão (a) axial e (b) diametral das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 20%, 25%, 30% e 35% de DC pela NS. ....	89
<b>Figura 27.</b> Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 20%, 25%, 30% e 35% de cascalho pela areia natural. ....	91
<b>Figura 28.</b> Absorção de água por capilaridade das argamassas com DC em função do percentual de substituição de DC pela NS. ....	93
<b>Figura 29.</b> Absorção de água por capilaridade das argamassas com DC em função do percentual de substituição em maiores períodos. ....	95
<b>Figura 30.</b> Perfil de ascensão capilar dos corpos de prova com 0 (a), 20 (b), 25 (c), 30 (d) e 35% (e), de substituição parcial de DC por NS. ....	96
A Figura 31 apresenta os resultados de absorção por imersão correlacionando-os com os dados relativos aos índices de vazios nas tipologias confeccionadas. <b>Figura 31.</b> Absorção por imersão e Índice de Vazios por porcentagem de substituição de DC por NS. ....	98

<b>Figura 32.</b> MEV da argamassa de referência. ....	101
<b>Figura 33.</b> MEV da argamassa com substituição de 20% de DC em relação à NS.....	102
<b>Figura 34.</b> MEV da argamassa com substituição de 25% de DC em relação à NS.....	103
<b>Figura 35.</b> MEV da argamassa com substituição de 30% de DC em relação à NS.....	103
<b>Figura 36.</b> MEV da argamassa com substituição de 35% de DC em relação à NS.....	104
<b>Figura 37.</b> Diagrama de <i>Loop</i> Causal para análise da economia circular na reutilização de cascalho de perfuração.....	106

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Tecnologias atuais focadas na separação de contaminantes orgânicos dos cascalhos de perfuração. ....	27
<b>Tabela 2.</b> Critérios avaliados quanto a magnitude do impacto ambiental. ....	44
<b>Tabela 3.</b> Critérios avaliados quanto a importância do impacto ambiental. ....	45
<b>Tabela 4.</b> Porcentagens de substituição de areia por cascalho. ....	53
<b>Tabela 5.</b> Percentuais de substituição das frações no quantitativo total dos agregados. ....	55
<b>Tabela 6.</b> Composições dos traços produzidos. ....	58
<b>Tabela 7.</b> Ensaio realizado no estado endurecido. ....	59
<b>Tabela 8.</b> Parâmetros de avaliação da compensação ambiental e sustentabilidade. ....	60
<b>Tabela 9.</b> Características químicas do cascalho, concentração na amostra em relação à norma e correlações identificadas na literatura. ....	61
<b>Tabela 10.</b> Avaliação de concentração de demais elementos na amostra em relação aos padrões normativos. ....	65
<b>Tabela 11.</b> Possíveis Impactos no solo. ....	66
<b>Tabela 12.</b> Possíveis Impactos na água. ....	68
<b>Tabela 13.</b> Possíveis Impactos na atmosfera. ....	69
<b>Tabela 14.</b> Análise granulométrica dos agregados utilizados. ....	73
<b>Tabela 15.</b> Propriedades físicas da areia e cascalho in natura. ....	76
<b>Tabela 16.</b> Características físicas das misturas utilizadas. ....	77
<b>Tabela 17.</b> Características físicas do Cimento Portland CP V- ARI. ....	79
<b>Tabela 18.</b> Distribuição granulométrica do cimento. ....	79
<b>Tabela 19.</b> Resultados da análise química da amostra de areia com perda ao fogo (P.F). ....	83
<b>Tabela 20.</b> Resultados da análise química da amostra de Cimento Portland CP V-ARI RS, com perda ao fogo (P.F). ....	84
<b>Tabela 21.</b> Resultados da análise química da amostra de cascalho de perfuração com perda ao fogo (P.F). ....	85
<b>Tabela 22.</b> Análise de Variância (ANOVA) para a avaliação da resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa aos 28 dias. ....	91
<b>Tabela 23.</b> Teste de Tukey para avaliação da resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa aos 28 dias. ....	92
<b>Tabela 24.</b> Coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas. ....	93
<b>Tabela 25.</b> Análise de Variância (ANOVA) para a avaliação da absorção por capilaridade aos 28 dias. ....	97
<b>Tabela 26.</b> Teste de Tukey para avaliação da absorção por capilaridade aos 28 dias. ....	97
<b>Tabela 27.</b> Resultados do teste de absorção por imersão em corpos de prova cilíndricos. ....	98
<b>Tabela 28.</b> Resultados de massa específica aos 28 dias para as argamassas produzidas. ....	100
<b>Tabela 29.</b> Propriedade avaliada das argamassas e melhor porcentagem de substituição. ....	100
<b>Tabela 30.</b> Avaliação de custo na produção das argamassas. ....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C – Unidade de Temperatura em Graus Celsius

µm – Unidade de Medida de Comprimento em Micrômetro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHP – *Analytical Hierarchy Process*

AIA – Aditivo Incorporador de Ar

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de Alumínio

ANOVA – Análise de Variância

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustível

API – *American Petroleum Institute*

B – *Loops* de Equilíbrio

BaSO<sub>4</sub> – Baritina (Sulfato de Bário)

BHA – *Bottom Hole Assembly*

bpe – Unidade de Volume em Barril de Petróleo

Br – Bromo

C – Cambissolos

C<sub>3</sub>A – Aluminato Tricálcico

C<sub>3</sub>S – Silicato Tricálcico

C<sub>4</sub>AF – Ferroaluminato tetracálcico

Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de Cálcio, composto no cascalho

Ca<sup>2+</sup> – Íon de Cálcio

Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> -- Silicato Tricálcico

CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

CE -- Condutividade Elétrica

CEF – Caixa Econômica Federal

ci – Índice de Intensidade

CLD – *Causal Loop Diagram*

cm<sup>3</sup> – Unidade de Volume em Centímetros Cúbicos

CO – Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CP – Cimento Portland

CPFT - Porcentagem acumulada de partículas menores que o tamanho D no empacotamento.

**CP V-ARI RS** – Cimento Portland do tipo V de alta resistência inicial e resistente a sulfatos.

**Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de Cromo (III)

**CSH** – Silicato de Cálcio Hidratado

**CTC** – Capacidade de Troca Catiônica

**CTE** – Curva Teórica de Empacotamento

**CU** – Coeficiente de Uniformidade

**CuO** – Óxido de Cobre (II)

**D** – Diâmetro

**d** – Unidade de Tempo em Dia

**DC** – Cascalho de Perfuração (*Drill Cutting*)

**DEFRA** -- *Department for Environment, Food & Rural Affairs*

**DRX** -- Difração de Raios-X

**EC** – Economia Circular

**EIA** – *Environmental Impact Assessment*

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**EMMA** -- *Elkem Materials Mixture Analyser*

**Et** – Etringita

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de Ferro (III)

**FRX** – Fluorescência de Raios-X

**G** – Solo Gleissolos

**g** – Unidade de Massa de Gramas

**H<sup>+</sup>** – Íons de Hidrogênio

**HHRA** – *Human Health Risk Assessment*

**HTP** – Hidrocarbonetos totais de petróleo

**IDEMA** -- Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente

**INSS** – Instituto Nacional do Seguro Social

**ISO** – *International Organization for Standardization*

**K<sup>+</sup>** – Íon de Potássio

**K<sub>2</sub>O** – Óxido de Potássio

**KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>** – Feldspato Alcalino

**Kg** – Unidade de Massa em Kilograma

**L** – Unidade de Volume em Litros

**LA** – Latossolo Amarelo

**LCA** – *Life Cycle Assessment*

**LVA** – Latossolo Vermelho-Amarelo

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura  
**MD** - Chernossolos  
**mg** – Unidade de Massa em Miligramas  
**Mg<sup>2+</sup>** – Íon de Magnésio  
**MgO** – Óxido de Magnésio  
**min** – Unidade de Tempo em Minutos  
**mm** – Unidade de Comprimento em Milímetro  
**MnO** – Monóxido de Manganês  
**MPa** – Unidade de Pressão em Mega Pascal  
**Na<sup>+</sup>** – Íon de Sódio  
**NAAC** – Concreto Aerado Não Autoclavado  
**NaCl** – Cloreto de Sódio  
**NaOH** – Soda Cáustica (Hidróxido de Sódio)  
**NBR** – Normas Brasileiras  
**NS** – Areia Natural Quartzosa  
**P** – Pasta de cimento  
**PbO** – Óxido de Chumbo (II)  
**PCM** – Materiais de Mudança de Fase  
**P.F.** – Ensaio de Perda ao Fogo  
**pH** - Potencial Hidrogeniônico  
**PRH** – Programa de Recursos Humanos  
**PV** – Solo Pozólico Vermelho Amarelo Eutrófico  
**q** – Coeficiente de Distribuição  
**QGIS** – *Software* Livre de Geoprocessamento QGIS  
**R** – *Loops* de Reforço  
**R\$** – Real (Moeda Brasileira)  
**R<sup>2</sup>** – Coeficiente de Determinação  
**RAS** – Razão de Adsorção de Sódio  
**Rb<sub>2</sub>O** – Óxido de Rubídio  
**RCD** – Resíduos de Construção e Demolição  
**RCMG** – Resíduos do Corte de Mármore e Graníticos  
**REF** – Referência  
**S** – Enxofre  
**SDT** – Sólidos Dissolvidos Totais  
**SINAPI** – Sistema Nacional de Pesquisa de Preços e Índices para a Construção Civil

**SiO<sub>2</sub>** – Silício (Dióxido de Silício)

**SO<sub>3</sub>** – Trióxido de Enxofre

**SrO** – Óxido de Estrôncio

**TiO<sub>2</sub>** – Dióxido de Titânio

**U** – Urânio

**UFERSA**- Universidade Federal Rural do Semi-Árido

**UFRRJ** - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**V** – Vertissolos

**V%** – Saturação de Base

**W** – Água Potável

**WFM** – *Waste Flow Mapping*

**ZnO** – Óxido de Zinco

**ZrO<sub>2</sub>** – Dióxido de Zircônio

**ZT** – Zona de Transição



## LISTA DE SÍMBOLOS

\$ - Cifrão

% - Porcentagem

@ - Arroba

® - Marca Registrada

° - Grau

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	23
<b>2.1. Cascalho de Perfuração</b> .....	23
2.1.1. Perfuração dos poços, geração e classificação do cascalho .....	23
2.1.2. Tratamento e a deposição final do cascalho .....	25
2.1.3. Aplicações ou reutilização do cascalho .....	29
<b>2.2. Riscos ambientais relacionados ao cascalho de perfuração</b> .....	31
2.2.1. Impactos do cascalho no sistema solo-água-atmosfera .....	31
2.2.2. Mensuração dos riscos de resíduos do setor petrolífero .....	33
2.2.3. Sustentabilidade de negócios e economia circular .....	35
<b>2.3. Argamassas de cimento Portland</b> .....	38
2.3.1. Substituição parcial no agregado .....	38
2.3.2. Empacotamento de partículas .....	40
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	42
<b>3.1. Avaliação sistemática dos riscos ambientais no sistema solo-água-atmosfera</b> ...	43
3.1.1. Características área de descarte .....	46
<b>3.2. Coleta e caracterização dos materiais</b> .....	49
3.2.1. Agregado miúdo .....	50
3.2.2. Cimento .....	50
3.2.3. Água de amassamento .....	51
3.2.4. Cascalho de Perfuração .....	51
<b>3.3. Delineamento Experimental da Argamassa</b> .....	52
3.3.1. Proporção de misturas e simulações de empacotamento de partículas .....	52
3.3.2. Produção das argamassas e cura .....	58
3.3.3. Análise das propriedades e desempenho .....	59
3.3.4. Análise estatística .....	60
<b>3.4. Avaliação de compensação ambiental, viabilidade e sustentabilidade do produto</b> 60	
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	61
<b>4.1. Rotas de impactos da disposição inadequada de cascalhos de perfuração</b> .....	61
4.1.1. Compostos químicos presentes no cascalho de perfuração .....	61
4.1.2. Possíveis impactos solo, água e ar .....	66
4.1.3. Mensuração dos impactos e seus efeitos .....	70
<b>4.2. Caracterizações dos materiais</b> .....	73

4.2.1.	Composições granulométricas dos agregados.....	73
4.2.2.	Propriedades físicas dos agregados.....	76
4.2.3.	Propriedades físicas do cimento.....	78
4.2.4.	Granulometria a laser do cimento.....	79
4.2.5.	Formato e textura superficial.....	80
4.2.6.	Análise química e mineralógica.....	81
4.3.	Caracterização das argamassas.....	86
4.3.1.	Consumo de água.....	86
4.3.2.	Resistências à compressão e à tração na flexão.....	89
4.3.3.	Absorção por capilaridade.....	92
4.3.4.	Absorção por imersão.....	98
4.3.5.	Densidade de massa aparente.....	99
4.3.6.	Análise microestrutural.....	101
4.4.	Compensação ambiental, viabilidade e sustentabilidade das argamassas.....	105
5.	CONCLUSÕES.....	108
	REFERÊNCIAS.....	110

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades de extração de recursos naturais estão em constante crescimento e concomitante a este processo ocorre a geração de diversos resíduos, decorrentes da produção de bens para o consumo humano (SILVA, 2015). A indústria do petróleo, apesar de promover grande grau de investimento e crescimento econômico, cuja participação governamental em 2021 somou aproximadamente R\$ 74,4 bilhões de reais (ANP, 2022), trata-se de uma das atividades exploratórias que mais geram resíduos. Estes, por sua vez, possuem os mais diversos impactos ao ambiente, que se expressam além dos resultados socioeconômicos (CUNHA et al., 2015; PASTOR; HERNÁNDEZ, 2012; SILVA, 2013).

Dentre esses resíduos, pode-se citar o cascalho de perfuração, cuja origem é vinculada à exploração de poços de petróleo e gás natural (ALMEIDA NETO, 2017). Segundo a Petrobrás (2010 apud FIALHO, 2012), o volume médio de resíduos gerados na operação em terra era de 13 m<sup>3</sup> para cada 100 m de avanço na perfuração, que podem gerar impactos negativos ao meio ambiente. Diante desta realidade, torna-se imprescindível ações sustentáveis, visando a redução, reutilização e reciclagem, constituindo importante parâmetro na efetivação das políticas de gestão na indústria petrolífera (HEIDARZADEH; GITIPOUR; ABDOLI, 2010).

A disposição inadequada do cascalho, por sua vez, pode provocar a contaminação do ambiente depositório e modificar a realidade local, causando um sério problema de poluição ambiental. Não obstante, danos à saúde pública, provenientes dos passivos ambientais vinculados à qualidade do solo, água e ar submetidos à condição de receptáculo desses materiais (RANGEL, 2015). A gestão dos resíduos e de impactos ambientais decorrentes desses, através de práticas corretas, exigem não somente a redução na geração, mas também o seu reaproveitamento avançado, ao invés de descarte no meio físico.

O cascalho de perfuração, ainda que seco, é considerado como resíduo classe I, de acordo com a NBR 10.004/2004, não podendo ser descartado diretamente no ambiente sem tratamento prévio (ABNT, 2004a). O estudo de técnicas de incorporação através de processos de substituição de resíduos provenientes do setor petrolífero em materiais potenciais é um assunto de caráter recente e dialogam com outros temas recentes, caso da economia circular, onde empresas visam a inserção desses materiais, transformando um resíduo proveniente de um determinado setor, em redução de custos e lucro de outro setor, sendo uma alternativa de negócio.

Contudo, as inovações interdependem da caracterização do material no intuito de compreender processos físicos, químicos e biológicos e a viabilidade de tratamentos para atender aos níveis aceitáveis determinados pela legislação ambiental. A avaliação constante da potencialidade e respostas fornecidas experimentalmente de tipologias submetidas à testes laboratoriais, são necessárias para inverter a relação de custo e risco poluidor associado ao transporte e descarte do material e compreender como substituí-lo em outros insumos. O desenvolvimento sustentável e atividades responsáveis no intento de mitigar os impactos da cadeia produtiva são importantes para se prever rotas de sustentáveis de descarte, tratamento e soluções técnicas e economicamente viáveis, socialmente justas e ambientalmente adequadas.

A cidade de Mossoró-RN, está localizada no oeste Potiguar e trata-se dos maiores produtores nacionais de petróleo *onshore* e sua economia tem como destaque a fruticultura irrigada, visando principalmente a exportação. Em um ano, a produção de petróleo realizada por pequenos operadores no Rio Grande do Norte aumentou 300%. Tal produção obteve incremento de 4 mil barris de petróleo equivalente/dia (bpe/d), em 2019, para 16 mil bpe/d, em 2020 (G1, 2021). Campos exploratórios localizados em Mossoró fazem parte da Bacia Sedimentar Potiguar, a qual possui diversos tipos de formação e área sedimentar emersa de aproximadamente 26.700 km<sup>2</sup> e possui grande influência pelas suas características no cascalho gerado na perfuração de poços da região (ANP, 2017).

Em face ao exposto, verifica-se que os resíduos da indústria do petróleo, devido ao seu potencial poluidor associado, carecem de estudos de carácter sistemático para avaliação de impactos ambientais. Caracterizá-lo e traçar rotas de impactos para verificar suas influências nas propriedades do ambiente receptáculo e dialogar com o contexto da economia circular, reinserindo em novos materiais, pode ser uma oportunidade de negócio e uma solução para a criação de uma logística racional de uso dos recursos naturais, em vista a realidade climatológica e financeira existente no semiárido brasileiro.

Da compreensão dos possíveis impactos promovidos na deposição direta do cascalho no ambiente, deve-se atentar para soluções viáveis, principalmente em ambientes onde não se dispõe de tecnologias avançadas. A substituição parcial em materiais cimentícios, como argamassas, pode ser uma solução viável ao problema da falta de tecnologia em tratamento e descarte do cascalho. Neste sentido, diversos trabalhos são desenvolvidos com o intento de avaliar as propriedades desses insumos e sua viabilidade econômica e ambiental.

Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de caracterizar o cascalho de perfuração proveniente de poços *onshore* da Bacia Potiguar e verificar sistematicamente os riscos

ambientais agregados à sua possível disposição inadequada no ambiente. De forma complementar, foram analisados os riscos ambientais no solo, água e atmosfera se dispostos, e, no intuito de se promover uma destinação adequada, a incorporação deste resíduo em argamassas sustentáveis através de substituições parciais pelo agregado miúdo. Foram avaliadas propriedades e o desempenho dessas tipologias e, desta forma, proposto um cenário de solução técnica e economia circular.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Cascalho de Perfuração

#### 2.1.1. Perfuração dos poços, geração e classificação do cascalho

A atividade de perfuração de poços de petróleo é possível através da utilização de brocas rotativas fixadas na extremidade de uma estrutura conhecida como coluna de perfuração (MAGALHÃES; SOBRINHO; MAZUR, 2011; FREITAS, 2013). Esta coluna é composta por duas seções: tubos de perfuração e a composição de fundo de poço (do inglês, *Bottom Hole Assembly* - BHA). Os tubos são elementos com torção e resistências necessárias para sustentar o BHA e transmitir rotação do topo da coluna até a broca (THOMAS, 2004a; FIALHO; CALMON; PEREIRA, 2014).

Nesta coluna é injetado o fluido de perfuração, material que passa pela extremidade inferior da broca e carrega consigo resíduos provenientes do rompimento das rochas e camadas de solo, que serão parcialmente separados através do peneiramento ao chegar na superfície. O fluido de perfuração é definido pelo *American Petroleum Institute* – API, como o material utilizado na circulação em perfurações para desempenhar funções como carrear os cascalhos de perfuração, resfriar, lubrificar e balancear as pressões no poço (LUMMUS; AZAR, 1986; DARLEY, H. C. H.; GRAY, 1988; LINS; LUZ, 2003; ZHANG et al., 2019).

O cascalho de perfuração (DC), por sua vez, é uma tradução para o termo em inglês “*drill cutting*” ou “*rock cutting*” e corresponde a fragmentos das rochas deslocados pela broca de perfuração e carregados para superfície pelo fluido de perfuração (BALL; STEWART; SCHLIEPHAKE, 2012; MENA; WALTHER, 2012; OKPARANMA et al., 2018). Por outro lado, a definição do cascalho segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua norma NBR 6502, está relacionada à granulometria, como sendo:

“Solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 mm e 60 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados (...)” (ABNT, 1995).

Na indústria do petróleo, o termo cascalho é utilizado independente da granulometria do sedimento, seja ela mais fina ou mais grossa. Segundo Magalhães (2011) o cascalho geralmente possui granulometria fina e chega à superfície impregnado de fluido de perfuração. Para Pozebon (2005) e Eccard et al. (2018) a sua composição, além de depender do material perfurado e do fluido, varia também pelo equipamento de recuperação deste material, podendo

o teor do fluido no cascalho ficar em torno de 2 e 3%. Caenn et al. (2016) apontam como componentes mais utilizados nos fluidos de perfuração a baritina ( $\text{BaSO}_4$ ), soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e outros componentes sintéticos.

De acordo com Fagundes (2018), as características da rocha da formação que se deseja perfurar, principalmente o grau de dureza e abrasividade, irão ditar o princípio a forma de ataque e o tipo de broca a ser utilizada. Os fluidos de perfuração utilizados nesse processo podem ter base aquosa ou oleosa (HEIDARZADEH; GITIPOUR; ABDOLI, 2010; THOMAS, 2004b). Os aquosos têm potencial para serem utilizados isoladamente ou com aditivos, como bentonita e a barita, e outros produtos químicos, como anticorrosivos, observando-se menores custos e impacto ambiental. Porém, se utilizam argilas hidrofílicas, podem ter como desvantagem a sua expansão (GROWCOCK; HARVEY, 2005). Os que possuem em sua base óleos e produtos sintéticos são utilizados em perfurações de formações com solos altamente reativos, com grande inclinação ou altas pressão e temperatura, a fim de se garantir a estabilidade do poço. Contudo, podem se constatar contaminantes agressivos e o descarte do cascalho obtido pode ter um custo elevado (GUDIMOV, 2021).

O volume pequeno do cascalho que vem para a superfície é utilizado para descrição das litologias e características da rocha perfurada e grande parte deve ser descartada como resíduo. Desta forma, controlar os teores de contaminantes que possam inviabilizar ou encarecer seu descarte torna-se uma prioridade (FAGUNDES, 2018). A separação sólido-líquido é realizada por operações de peneiramento, ciclonagem e centrífugas (conhecidos na indústria pelo nome de secadores). Cada equipamento é designado para remover sólidos com uma determinada granulação (ASME SHALE SHAKER COMMITTEE, 2004).

Ao passo que a perfuração de poços é permitida no contexto legal bem como a alienação desses e contratação de empresas privadas para a produção, pela Resolução ANP N° 699, que estabelece os procedimentos para codificação de poços e pela Resolução ANP N° 817, que dispõe sobre o descomissionamento de instalações de exploração e a inclusão de área terrestre sob contrato em processo de licitação, há também a previsão legal para o envio dos diversos relatórios de acompanhamento das atividades em poços e o adequado gerenciamento de efluentes, resíduos e rejeitos gerados, respeitando os normativos aplicáveis (ANP, 2017, 2020).

No Brasil, a Lei Federal N° 12.305 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, definindo estes, e em seu capítulo 2, como:



“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

A definição ainda é apresentada pela Norma da ABNT NBR 10.004. A referida norma define resíduos sólidos como:

"Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível." (ABNT, 2009a, p. 7).

Não obstante, a Lei Federal Nº 12.305 define a gestão integrada de resíduos sólidos como sendo um conjunto de práticas direcionadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, considerando assim dimensões ambientais, políticas, econômicas, culturais e sociais, com controle social e sob o argumento de garantir o desenvolvimento sustentável. Enquanto a normativa define gerenciamento de resíduos sólidos como o conjunto das ações diretas e indiretas que compreendem as etapas da coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequadas de resíduos e rejeitos (BRASIL, 2010).

Neste sentido, metodologias avançadas de tratamento e reinserção deste material em outros insumos são amplamente discutidas, evitando o contato direto com o ambiente e, conforme expresso por Guedes (2014), Pastor e Hernández (2012), com o intuito de reduzir o potencial de impacto ao solo e a água quando dispostos em locais inadequados e sem receber o devido tratamento.

### **2.1.2. Tratamento e a deposição final do cascalho**

Diversos são os tratamentos dados ao cascalho até a sua deposição final no ambiente ou consequente reutilização. Devido à presença dos sais solúveis, como cloreto de sódio e cloreto de potássio na composição básica dos fluidos de perfuração e resquícios desses materiais na composição dos cascalhos de perfuração, a disposição desse material no solo, pode gerar a dissolução dos sais e trazer consequências negativas ao meio ambiente (GUEDES, 2014).

Os cascalhos que derivam do contato com fluidos à base de óleo carecem de atenção especial, pois devido ao seu alto potencial poluidor, os efeitos adversos do despejo em terra e no mar são expressivos. Nesse contexto, o principal ponto de discussão atualmente é se encontrar soluções aos problemas causados pela contaminação das formações geológicas com as quais o fluido de perfuração entra em contato, especialmente os aquíferos. Desta forma, impactos provenientes dos fragmentos e cascalhos com fluido à base de óleo dispostos inadequadamente são amplamente relatados na literatura (DURGUT et al., 2015; LARSSON et al., 2013; NILSSEN et al., 2015; ZAMORA-LEDEZMA; GARCÍA, 2013).

Usualmente, quando chega à superfície, o cascalho passa por um mecanismo chamado secador, cujo objetivo é reduzir o volume dos resíduos gerados e aumentar a quantidade de fluido de perfuração recuperado. Usualmente, o mecanismo empregado possui a capacidade de processar 60 toneladas de material por hora. O resíduo entra pela parte superior e é submetido a um movimento rotativo, sendo na sequência arremessado contra uma peneira, impedindo a passagem dos sólidos mais grosseiros (PEREIRA, 2010). O cascalho seco é transportado e armazenado, seguindo na sequência para disposição final. O fluido recuperado é submetido às centrífugas com decantadores, devido ainda saírem do secador com alto teor de sólidos (PIPER; HARVEY; MEHTA, 2004).

Hodiernamente, os esforços científicos se concentram no estudo de técnicas para separar o cascalho de perfuração do fluido de perfuração, visando à recuperação deste e conseqüente reinserção no esquema produtivo. De acordo com Motamedimehr e Gitipour (2019) existem atualmente três categorias de tratamento de cascalhos de perfuração, sendo elas: físicas (por desidratação), físico-químicas (extração de solvente, lavagem aprimorada com o uso de surfactantes e extração supercrítica de CO<sub>2</sub>) e termais (dessorção e aquecimento com uso de micro-ondas).

Os cascalhos obtidos com o fluido de perfuração à base de óleo podem ser extremamente tóxicos, mutagênicos e cancerígenos (MA et al., 2019). Neste sentido a combinação de duas ou mais tecnologias ao invés de apenas uma pode ser extremamente favorável. As técnicas mais utilizadas, as características de seus princípios de atuação e estudos que as utilizam encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Tecnologias atuais focadas na separação de contaminantes orgânicos dos cascalhos de perfuração.

Técnica	Princípio	Estudos
Desidratação	Trata-se de uma separação por centrifugação quimicamente aprimorada. A desidratação pode remover até mesmo partículas coloidais e tornar limpa a água utilizada no processo. A presença de óleos ou lubrificantes não afeta a desidratação, uma vez que os sólidos coloidais são removidos, os óleos, lubrificantes ou orgânicos separam-se com o líquido e tendem a flutuar sobre a água, fazendo que em alguns casos, o fluido possa ser reciclado como está.	(GROWCOCK; HARVEY, 2005; ZENKOV, 2017)
Extração com uso de solvente	Podem ser utilizados solventes orgânicos para promover a remoção de hidrocarbonetos em DC. Solventes orgânicos como o glicol éter, metoxi éter e éter de petróleo foram estudados por Liu et al. (2018) para a remoção através de lixiviação. Estes apresentaram boa eficiência em termos de remoção e reciclagem, o que proporcionou grandes benefícios econômicos ao processo. Contudo, as propriedades perigosas dos solventes à base de éter ainda são motivo de grande preocupação. Atualmente são explorados outros solventes alternativos e soluções micro emulsionadas que sejam eficientes.	(BALL; STEWART; SCHLIEPHAKE, 2012; DANTAS et al., 2020; POYAI et al., 2020; RATNAYAKE; SAMPEI, 2019)
Lavagem aprimorada com o uso de surfactantes	Amplamente utilizada na remediação de solos contaminados pela deposição inadequada de materiais ricos em compostos químicos tóxicos, consiste na lavagem do DC com soluções com alguns aditivos químicos como surfactantes, que auxiliarão dissolução dos contaminantes. A solução é pulverizada e os contaminantes lixiviados são recolhidos para tratamento posterior (RODRIGUES, 2011; COELHO, 2018).	(CAREY, 2002; FERNANDEZ et al., 2008; ARPORNPOONG et al., 2020; OLASANMI; THRING, 2020)
Extração supercrítica de CO <sub>2</sub>	O fluido supercrítico utilizado nessa técnica de remoção de hidrocarbonetos é o dióxido de carbono porque é não corrosivo, não explosivo, facilmente disponível e barato, além de ser uma tecnologia muito segura e ambientalmente adequada. O dióxido de carbono supercrítico remove facilmente n-alcenos que contêm de 5 a mais de 30 átomos de carbono, n-álquil-ftalatos de grupos alquílicos que contêm de 4 a 16 átomos de carbono e vários hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) com anéis condensados (GERANMAYEH et al., 2012; ALY; GÓRECKI, 2020).	(GOODARZANIA; ESMAEILZADEH, 2006; ESMAEILZADEH; GOODARZANIA; DANESHI, 2008; ROSENTHAL, 2012; SAINTPERE; MORILLON-JEANMAIRE, 2000 RODRÍGUEZ-LÓPEZ et al., 2021)

Técnica	Princípio	Estudos
Dessorção térmica	Envolve o uso de calor indireto para vaporizar componentes voláteis e semivoláteis sem a necessidade de incinerar o cascalho de perfuração, podendo ocorrer em baixas temperaturas (LTTDU) (250-400°C), com remoção de aromáticos leves (por exemplo, benzeno, tolueno, etil benzeno e xilenos) e alifáticos e à altas temperaturas (HTTDU) (~520°C), usada para remover frações aromáticas mais pesadas, como os HPA (OWENS, 1994; ENVIRONMENTAL STUDIES RESEARCH FUNDS, 2009).	(ONWUKWE, 2014; OKPARANMA et al., 2018; LIU et al., 2019)
Secagem por aquecimento com uso de micro-ondas	No aquecimento por micro-ondas, ocorre um processo de secagem aprimorada, onde a energia é fornecida diretamente para o material por interação molecular com o campo eletromagnético gerado. As micro-ondas são absorvidas por substâncias com alto fator de perda dielétrica (materiais absorventes) e passagem através dos componentes com baixo fator de perda dielétrica (material transparente), resultando em um aquecimento seletivo (LIU et al., 2014).	(SHANG et al., 2005; ROBINSON et al., 2009; PEREIRA et al., 2013; JÚNIOR et al., 2017; ROSSI et al., 2017; PETRI et al., 2019)

Fonte: Autor (2022).

Sharif et al. (2017) entendem que a gestão adequada dos resíduos começa com a prevenção da poluição através da redução das práticas operacionais que resultam em prejuízos ao sistema solo-água-atmosfera. Contudo, se a eliminação de um resíduo não for possível, a minimização deve ser investigada. Os métodos biológicos supracitados visam a gestão responsável para a aplicação hierárquica das práticas de redução, reutilização, reciclagem, recuperação, tratamento e descarte responsável (RODRIGUES et al., 2017; POZZETTI e CALDAS, 2019; ALMEIDA et al., 2022).

O descarte responsável consiste, portanto, em depositar resíduos já tratados na terra ou na água usando métodos apropriados para dada situação. Os métodos de disposição incluem: aterro, enterramento, descarga superficial, espalhamento ou *landfarming* e injeção subterrânea. De acordo com Owens (1994) as opções de descarte em algumas áreas podem ser restritas pela falta das instalações e infraestrutura. Nesses casos, a operadora de óleo e gás pode achar necessário construir e gerenciar as instalações necessárias. Embora essa abordagem possa ser cara no curto prazo, muitas vezes pode minimizar os passivos de longo prazo.

A potencial sensibilidade ecológica da localização das operações é a chave para a seleção de uma prática de gestão apropriada para um resíduo específico. Isso pode exigir informações sobre geologia, hidrologia, clima e comunidades biológicas. Cabe-se

compreender, portanto, quais outras soluções técnicas são viáveis em áreas que não dispõem de tecnologias avançadas, sendo a aplicação/reutilização um possível aliado neste intento.

### **2.1.3. Aplicações ou reutilização do cascalho**

As técnicas de tratamento supracitadas na seção anterior se configuram segundo a classificação proposta por Chen et al. (2017) como técnicas de separação, os autores apontam outras duas técnicas para o tratamento de DC. São as técnicas de contenção ou disposição propriamente ditas, como injeção no solo, aterros e estabilização e por último técnicas de decomposição, como a biorremediação, fitodegradação e incineração, cujo intuito principal é degradar ou destruir os compostos tóxicos e nocivos. Contudo, a depender da técnica utilizada, novos compostos podem ser produzidos gerando ainda mais poluição. Neste intuito, essa seção trata da aplicação do cascalho de perfuração como insumo nas mais variadas finalidades.

Uma das possíveis aplicações dos cascalhos de perfuração é como resíduo orgânico. Outrossim, aumentar os teores de CO e dos nutrientes pode gerar incrementos na produtividade e na qualidade dos produtos agrícolas, bem como redução nos custos de produção (FREITAS, 2013). Contudo, a adição deles ao solo ou à água pode introduzir elementos inorgânicos ou compostos orgânicos tóxicos ou patogênicos na cadeia alimentar.

Neste sentido, o estudo de Freitas (2013) verificou o uso de cascalho de perfuração no cultivo de espécies vegetais. Amostras de cascalho de perfuração dos dois poços coletados nos estados da Bahia e Alagoas. Duas amostras foram escolhidas, uma restritiva e uma promissora. A escolha da amostra restritiva foi embasada nos teores totais dos elementos prejudiciais ao crescimento vegetal. Foram utilizadas plantas de cevada (*Hordeum vulgare L.*) e girassol (*Helianthus annuus L.*), espécies reconhecidas por sua tolerância ao estresse salino. O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e verificou-se que o cascalho contribuiu na soma das bases trocáveis dos substratos avaliados.

De forma análoga Kujawska e Pawlowska (2020) conduziram uma investigação que teve como objetivo identificar o efeito do cascalho de perfuração nas propriedades físico-químicas em um solo ácido e no crescimento de trevo vermelho (*Trifolium pratense L.*). O desenho experimental compreendeu 5 tratamentos, que diferiu na dose dos cascalhos: 0% (controle), 2,5%, 5%, 10% e 15% do peso seco. Os resultados mostraram que os fragmentos e cascalhos de perfuração alteraram adicionalmente o propriedades químicas e físico-químicas do solo, tais como: condutividade elétrica (CE), pH, saturação de base, conteúdo de carbonato,

cátions alcalinos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), níveis de matéria orgânica, entre outros. No entanto, a biomassa de trevo vermelho aumentou de 1,5 para 2,5 vezes dependendo da dose de resíduos. O estudo, portanto, apontou que os resíduos examinados poderiam ser usados para tratamento de solos degradados ácidos e inférteis, mas a quantidade de resíduos não deveria ultrapassar 5% do solo, pois a maior biomassa total de trevo foi observada nesta dose.

Unindo as indústrias agrária, petrolífera e da construção civil, o trabalho de Kogbara (2017) utilizou a técnica de estabilização ou solidificação com a imobilização de contaminantes usando materiais cimentícios, para o reaproveitamento de DC na produção de forragem em solos ácidos. Os cascalhos tinham concentração inicial de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) de 17.125 mg.  $\text{Kg}^{-1}$  e baixas concentrações de metais, sendo tratados com dosagens de 5%, 10% e 20% de cimento. A gramínea utilizada, o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), foi cultivado em solo com e sem mistura. O potencial de biorremediação e crescimento das plantas foram avaliados ao longo de um período de 12 semanas. A capacidade de fitorremediação do capim elefante (juntamente com as perdas abióticas) reduziu o nível de HTP e das concentrações de metais. A grama apresentou melhores alturas e comprimentos de folha em solo contendo cascalhos tratados com dosagem de 5% de cimento do que no solo padrão.

De acordo com um extenso trabalho desenvolvido por Imarhiagbe e Obayagbona (2019) na Nigéria, o problema dos DC contendo óleo é expressivo, visto que cerca de 3.900 bilhões de barris de fragmentos e cascalhos de perfuração são produzidos em uma operação de perfuração típica no país. Os autores apontam, portanto, como uma nova tendência, que resíduos da indústria de petróleo sejam vistos como matéria-prima para reutilização. Se os resíduos sólidos forem devidamente tratados, podem servir como matéria-prima para fábricas de cimento, tijolos e argila expandida e pode ser usada em projetos de restauração de terras. A aplicação dessas tecnologias pode ajudar na geração de empregos localmente.

Se buscado na literatura, diversos trabalhos foram conduzidos neste intento, cuja finalidade principal é a inserção do cascalho de perfuração em relação aos materiais usualmente utilizados na construção civil. O estudo conduzido por Foroutan (2018) objetivou testar a hipótese de que cascalhos de perfuração poderiam ser incorporados como um agregado na produção de concreto e uso em materiais controlados de baixa resistência para aplicações não estruturais, também alvo de estudo de Mneina et al. (2018). No primeiro, foram utilizados cascalhos perfurados com alcatrão de alta resistência e baixa resistência. Em alvos de alta resistência, os autores apontaram que é viável substituir os agregados finos até 20% sem reduzir a resistência à compressão alvo significativamente.

Pesquisas positivas que demonstram o potencial para a reutilização benéfica DC com propriedades melhoradas nos materiais produzidos. Mohammed e Cheeseman (2011) investigaram o uso de resíduos cascalhos no *sandcrete*, importante material de construção na África Ocidental. Os resultados mostram que substituindo até 50% em peso de areia por cascalhos de perfuração ocorria redução na densidade e as resistências à compressão eram comparáveis a amostras de controle. Ocorreu também redução na condutividade térmica desse material, importante parâmetro em locais de climas severos. Para rodovias, Vlasov e Pugin (2020) estudaram o uso de DC na construção da fundação da estrada e para fortalecer encostas. Em estudos preliminares, os autores constataram que a amostra com 20% de cimento e 80% de cascalho apresentavam as características de resistência mais estáveis.

Não obstante, quando se fala em argamassas, o estudo de Aboutabikh, Soliman e El Naggar (2016), avaliaram as características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos de cascalhos de perfuração. Os resultados mostraram que incorporar até 20% de DC em substituição parcial do cimento não afetará adversamente as propriedades da argamassa. Testes de lixiviação evidenciaram redução na liberação de metais pesados, indicando sucesso estabilização. Similarmente, O trabalho de Okparanma, Chikwue e Ayotamuno (2020) trata do potencial pozolânico de cascalhos de perfuração previamente tratados para a produção de argamassas. Os resultados mostraram a formação de dióxido de silício+ óxido de alumínio + óxido de ferro ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nos cascalhos de perfuração aumentaram de 37.96% para 65.3% quando aquecidos em 500°C por 90 minutos e para 70.1% quando aquecido por 180 minutos na mesma temperatura, excedendo o requisito mínimo de 70% para pozolanas.

## **2.2. Riscos ambientais relacionados ao cascalho de perfuração**

### **2.2.1. Impactos do cascalho no sistema solo-água-atmosfera**

Os cascalhos de perfuração podem causar diversos impactos no sistema solo-água-atmosfera. Desta forma, é de extrema importância compreender o seu potencial poluidor e a presença dos hidrocarbonetos, materiais extremamente tóxicos, principalmente em caso da disposição direta no ambiente. Assim, a interpretação da história deposicional da bacia sedimentar com o reconhecimento dos diferentes tipos litológicos do poço e informações sobre os fluidos de perfuração utilizados são material de estudo em diversos trabalhos.

Usualmente, as amostras de cascalho são coletadas em intervalos regulares, previamente definidos pela operadora do poço, para definir parâmetros de perfuração e mudanças das propriedades do fluido de perfuração (FAGUNDES, 2018). De acordo do Spínola (2018) a

representatividade do cascalho de perfuração e a correta identificação da profundidade onde foi gerado é um parâmetro igualmente importante. Para isso, é utilizado o *lag time*, que nada mais é do que o cálculo teórico do intervalo de tempo que o cascalho demora para chegar à superfície.

Na superfície, os cascalhos são obtidos a partir dos fragmentos acumulados na extremidade das peneiras vibratórias, em um anteparo denominado calha, instalado após esta (INTERNATIONAL LOGGING, 2001). Alguns autores, contudo, questionam as amostras obtidas ao final do processo, pois esta contém apenas a fração retida na peneira vibratória, “descaracterizando” o cascalho de perfuração pela perda de fragmentos sub milimétricos como, por exemplo, argilas e siltes passantes pelas telas da peneira. (KARIMI, 2013).

Para avaliar o potencial poluidor do cascalho, uma série de ensaios de caracterização podem ser realizados. A avaliação de hidrocarbonetos, por exemplo, pode ser feita pela técnica de submeter a amostra à fluorescência sob a luz ultravioleta, cujo comprimento onda varia entre 200 a 400nm. Esta técnica é simples e extremamente sensível, e são observadas a intensidade, distribuição e coloração da amostra. Essas características são variáveis em cada acumulação de petróleo. Sua observação pode ser dificultada pela presença de fluido de perfuração ou pela lavagem das amostras e devido à subjetividade, assim, análises mais específicas com aplicação de solventes e com testemunhos são realizadas (GHADERI et al., 2020).

Contaminações no solo associados às atividades de extração de petróleo no Canadá foram verificadas por Arocena e Rutherford (2005). Neste estudo, critérios físicos, químicos, elétricos e mineralógicos de três solos que receberam disposições de cascalho foram analisadas relação aos das adjacências. Os resultados mostraram que propriedades como o carbono total,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e condutividade elétrica foram maiores nos solos de locais onde ocorria deposição em relação ao de controle. A degradação provocada nos solos pode torná-los menos receptivos a culturas agrícolas. Resultados semelhantes, como o acréscimo de metais pesados (bário, cromo, chumbo e zinco), sódio, salinidade e pH foram apresentados por outros pesquisadores (CARLS; FENN; CHAFFEY, 1995; GUTLEB; HELSBERG; MITCHELL, 2002; SWIGART; HEO; WOLF, 2021).

Quando no solo, a disposição indiscriminada de cascalhos pode levar à redução na infiltração, reduzindo a disponibilidade de água para as plantas e aumentando o escoamento superficial e erosão do solo. Solos argilosos são ainda mais prejudicados, pois ocorre dispersão das partículas e desestruturação do solo. Se possuírem altas concentrações de sais, os cascalhos podem limitar a retirada de águas pelas plantas devido à redução do potencial osmótico e da



permeabilidade (ANDRADE et al., 2014; MAGALHÃES et al., 2014; FREITAS et al., 2015). Em subsuperfície, a lixiviação desses sais pela chuva pode contaminar lençóis subterrâneos.

Em corpos d'água, os impactos do descarte inadequado de cascalhos podem ser bem expressivos. Se ocorrer diretamente no oceano, expõem a vida marinha ao perigo. Na produção *onshore* os maiores riscos decorrentes estão na disposição direta no solo, pois os compostos lixiviados podem atingir os lençóis freáticos subterrâneos ou serem carreados por chuvas aos corpos hídricos superficiais e assim comprometer a vida de diversos seres que utilizam aquela fonte de água para seu consumo e lazer. Segundo Sharif et al. (2017), independentemente de qual a técnica de disposição utilizada, com a consciência das vias de migração de poluentes e os riscos associados ao enterramento de resíduos devem ser cuidadosamente considerados. Fatores como a profundidade do lençol freático e o tipo de solo ao redor e mudanças nos níveis de águas subterrâneas rasas e inundações que possam transferir esses contaminantes para solos adjacentes e águas subterrâneas tornam-se prioridades de análises e estudos.

Em termos de poluição do ar, a incineração para a combustão e oxidação dos hidrocarbonetos no cascalho pode ser um fator direto, mesmo que incineradores estejam equipados com dispositivos de controle da poluição. A liberação de poluentes que fatalmente possam ocorrer pelos motores de combustão interna pode tornar o ar inseguro para humanos e animais e alguns de seus efeitos incluem dificuldades respiratórias, danos à vegetação e acidificação do solo (SHARIF et al., 2017). A liberação de sulfeto de hidrogênio, por exemplo, pode ser fatal para os expostos. Indiretamente, a poluição do ar pode ocorrer em processos de tratamento como a lavagem com solvente, cujo método de recuperação mais convencional é a destilação, na qual é aplicada energia térmica maciça, criando uma emissão indesejada de poluentes atmosféricos (POYAI et al., 2020).

### **2.2.2. Mensuração dos riscos de resíduos do setor petrolífero**

Esta pesquisa se ocupa em caracterizar um resíduo que deriva do solo e que, devido a sua composição química, possui grande potencial de contaminação. O cascalho de perfuração carrega consigo contaminantes derivados em sua origem, uma vez que o fluido de perfuração utilizado na sonda possui diversos compostos químicos tóxicos. Desta forma, resguardar este material de seu descarte inadequado no ambiente pode fornecer benefícios a todo o ecossistema. Neste intento, diversos trabalhos utilizam a caracterização realizada do cascalho como um potencial mecanismo para traçar rotas de impacto ambientais (KRZYZANOWSKI, 2012; OKOGBUE; ANYIAM; ADUN, 2016; PAPONG et al., 2017; CHENG et al., 2019).

Desta forma, Puiseux, Guillou e Merzi (2020) utilizaram três abordagens de análise de impactos ambientais para avaliar opções de gerenciamento de cascalhos de perfuração de *offshore* em Mianmar, Congo e Angola, comparando a descarga direta no mar, e três opções terrestres: reinjeção no poço, contenção em aterro e termo dessorção. Estudos de modelagem foram comparados com dados de campo, para avaliar a relevância desses estudos de modelagem na avaliação da aceitabilidade da descarga de perfuração. Para comparação das opções foi utilizada a metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA), que avalia os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de sua vida por meio do inventário de recursos materiais, entradas de energia e questões ambientais (DELGADO, 2014). O trabalho apontou as opções alternativas de manejo de cascalhos e seus impactos. O LCA permitiu a comparação de opções, o que o torna uma ferramenta para a tomada de decisões.

Analogamente, o trabalho de Susanto e Mulyono (2018) objetivou desenvolver uma abordagem estruturada na identificação dos aspectos e impactos ambientais em indústrias de processamento dos minérios. Os autores realizaram uma abordagem de ciclo de vida por meio da matriz de avaliação de risco ambiental em quatro células. O cálculo do ciclo de vida foi realizado de acordo com a cláusula 6.1.2 da norma internacional ISO 14.001 (ISO, 2015), que define os padrões do sistema de gestão ambiental, cujo método de avaliação de risco considera as condições normais, anormais e emergenciais que podem ocorrer durante os processos (ISO, 2015). O modelo utilizado da matriz de riscos é representado na Figura 1. Os autores apontam que o resultado da avaliação de risco pode ser usado como referência e informação de dados na determinação do controle de operações.

**Figura 1.** Exemplo de matriz de riscos contendo quatro células.



Fonte: Autor (2022), com adaptações de Susanto e Mulyono (2018).

Por outro lado, a avaliação de impactos ambientais, do inglês *Environmental Impact Assessment* (EIA), é um procedimento que visa a tomada de decisão sobre atividades que possam ter influência significativa no ambiente (SPEIGHT, 2017). Vários autores afirmaram que o EIA difere fundamentalmente da LCA. Contudo, Tukker (2000) apresenta que estas não são tão diferentes quanto parecem. Segundo o autor, LCA é uma ferramenta analítica desenvolvida especificamente para avaliar os impactos ambientais relativos a toda a cadeia produtiva de um bem, ou seja, uma estrutura genérica de avaliação ambiental. Já a EIA é um procedimento e não uma ferramenta, que deve apoiar a tomada de decisão em relação aos aspectos ambientais de uma gama muito mais ampla das atividades.

A avaliação probabilística do risco à saúde humana do cascalhos de perfuração à base de óleo (OBDC's) foi avaliada por Hu et al. (2021a) para compreender holisticamente o desempenho do controle de poluição, custos e riscos para a saúde humana por poluentes nocivos em trabalhadores de gestão desses resíduos. A avaliação de risco à saúde humana, derivada do inglês *Human Health Risk Assessment* (HHRA) trata-se uma metodologia robusta para quantificar os riscos à saúde relacionado à exposição humana à produtos químicos tóxicos em meios ambientais (por exemplo, solo, ar, água), considerando o perigo de poluentes, relação dose-resposta, rotas de exposição e condições físicas dos receptores (HU et al., 2020). Verificou-se que os riscos de câncer apresentados foram identificados para exposição a metais pesados tóxicos, mas se depositados em aterro sanitário seguro não eram significativos.

As decisões relacionadas à exploração e produção de petróleo ainda são muito complexas devido ao elevado número de questões envolvidas no processo (SUSLICK; SCHIOZER; RODRIGUEZ, 2009). Ações ambientalmente responsáveis que requerem uma compreensão dos tipos de resíduos, sua geração e uma série de tecnologias de gerenciamento para minimizar e eliminar o efeito no meio ambiente. (SHARIF et al., 2017). Desta forma, a sistematização dos riscos ambientais e a busca de soluções de reinserção que conversem com o contexto local podem reduzir o alto potencial poluidor agregado e custos com diretos e indiretos com disposição, transporte, tratamento etc., corroborando com os conceitos da sustentabilidade e de viabilidade de negócio entre áreas distintas, através da economia circular.

### **2.2.3. Sustentabilidade de negócios e economia circular**

A economia circular (EC) é um conceito que diz respeito a um ciclo de máxima utilização dos recursos ao mesmo tempo em que se protege o ambiente, incluindo intervenção para redução do consumo, eficiência na produção com reciclagem e reaproveitamento para a gestão de materiais (BASSI et al., 2021). De acordo com Witjes e Lozano (2016), a CE trata-

se da introdução de sistemas aos quais integram a utilização máxima de recursos, cujo intuito é transformar o que seria desperdiçado em uma fonte de recursos financeiros, incluindo novos modelos de negócio orientados para a prevenção de desperdícios. Apesar da EC ter evoluído ao longo do tempo, trata-se de uma metodologia pouco conhecida principalmente pelos profissionais que atuam no setor produtivo.

Um trabalho desenvolvido por Behera et al. (2014) possuía como ponto focal encontrar respostas empíricas e estratégicas para manejar corretamente resíduos da construção e demolição (RCD) na Malásia. Um questionário foi enviado para atores da área (agências governamentais, desenvolvedores, consultores e contratantes). Os resultados apontam que a adoção do princípio dos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) pode auxiliar no manejo e sustentabilidade. Além disso, a geração de resíduos deve ser prevista no estágio de planejamento e design visando a redução geração dos resíduos. É necessário revisar as normas vigentes para enfatizar os problemas decorrentes de um manejo ineficiente e é necessário controle e facilidade para a reciclagem, especialmente em áreas foco de geração.

Neste contexto, na forma de evitar geração de resíduos e sua disposição direta no ambiente, instrumentos econômicos podem ser projetados para motivar e otimizar o uso de recursos, de modo que os resíduos sejam evitados, bem gerenciados e tratados de forma otimizada. Usar instrumentos econômicos para encorajar e maximizar o desempenho ambiental dos sistemas de gestão de resíduos, gerando economia de custos para a reciclagem (imposto sobre aterro), uso de materiais reciclados (taxa de agregados) ou sistemas de reembolso podem prevenir e gerenciar o desperdício (GÁLVEZ-MARTOS et al., 2018).

Ainda considerando Gálvez-Martos et al. (2018), que por sua vez, fizeram uma documentação sistemática de práticas atuais observadas na Europa no intuito de promover o manejo de políticas de reutilização dos recursos no setor da construção civil, visando promover a economia circular dos mesmos, cabe-se mencionar que este conceito, por analogia, é válido e estudado para estabelecer-se ações prioritárias na prevenção e gestão de resíduos do setor petrolífero (VARJANI et al., 2021). Neste intento, a construção de quadros sistemáticos para operacionalizar o paradigma da economia circular em fluxos de recursos torna-se importante.

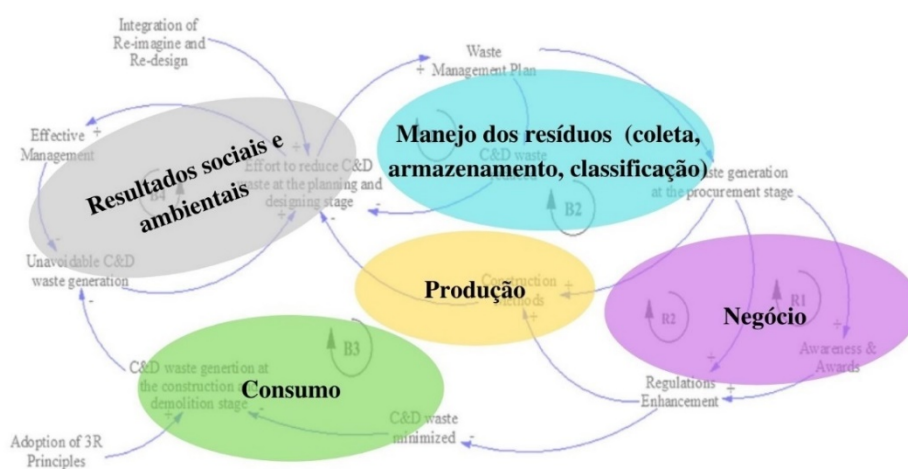
Muitos estudos relacionados à análise de sustentabilidade para gestão de resíduos são conduzidos. Segundo Almeida, Araújo e Medeiros (2017), alguns métodos utilizados na avaliação e integração de aspectos de sustentabilidade, por exemplo, são o: *Waste Flow Mapping* (WFM) (KURDVE et al., 2015), *Analytical Hierarchy Process* (AHP) (ARDJMAND; DANESHFAR, 2020; AWEH; IGBOKWE; EJIKEME, 2021) e o *Life Cycle Assessment* (LCA)

(PUISEUX; GUILLOU; MERZI, 2020; HU et al., 2021b). Além dos supracitados, o método de diagramas de laço causal (CLD), do inglês *Causal Loop Diagram*, pode ser utilizado para um manejo integrado considerando os preceitos da CE e no intuito de promover um manejo circular de resíduos (GNONI et al., 2017).

O CLD inclui várias variáveis, geralmente composto por um indicador e uma intervenção. As intervenções são apresentadas em diferentes cores, de forma a apoiar a identificação das ações implementadas pelos diferentes atores econômicos (GNONI et al., 2017). O CLD mostra as interconexões entre as variáveis, como também os resultados das opções de intervenção, com base nas relações causais representadas no diagrama. Os laços podem ser negativos (balanceamento) ou positivos (reforço). Sinais de “+” e “-” são adicionadas as setas que liga essas duas variáveis, indicando relações de redução e aumento na eficiência e consumo recursos (BASSI et al., 2021). O CLD foi alvo, inclusive, de estudo nas atividades de perfuração e geração de cascalhos (ZHANG et al., 2021; SOLO-GABRIELE et al., 2021).

Algumas áreas de domínio do CLD foram consideradas no trabalho da Convenção da Basileia sobre o Controle de Resíduos Perigosos e sua Eliminação. Conforme Bassi et al. (2021), elas são: (i) consumo, (ii) produção e (iii) manejo dos resíduos, bem como (iv) resultados sociais e ambientais e (v) negócios. O consumo se refere ao comportamento humano que determinará o volume total de produtos e materiais utilizados na economia. Certos impactos ambientais surgirão derivados do consumo e produção, entre eles, emissões atmosféricas e na qualidade da água, resultantes na saúde humana. Finalmente, os resultados socioeconômicos precisam ser considerados. Essa abordagem representada no CLD pode ser vista na Figura 2.

**Figura 2.** Exemplo de abordagem sistêmica adotada no CLD para resíduos da construção civil.



Fonte: Autor (2022) com adaptações de Bassi et al. (2021) e Esa, Halog e Rigamonti (2017).

## **2.3. Argamassas de cimento Portland**

### **2.3.1. Substituição parcial no agregado**

Dados demonstram alta produção de resíduos da construção e demolição (RCD) em toda a Europa, onde são produzidas cerca de 820 milhões de toneladas por ano, cerca de 46% do total de resíduos gerados (EUROSTAT, 2021). Quando se fala em consumo de agregados, a Europa consome em torno de 3 bilhões de toneladas de agregados ao ano (EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION, 2022). Neste sentido, reduzir os resíduos por meio de economia circular e construir um modelo teórico de manejo pode ser uma das soluções, pois poucos trabalhos foram desenvolvidos para compreender todo o rol do ciclo de vida de resíduos como o cascalho de perfuração.

A compreensão das características inerentes a um material, derivado de sua caracterização, são de extrema importância para compreender como se realizar a substituição parcial deste em relação à quantidade de agregados utilizada. Agregados reciclados, por exemplo, por serem mais porosos, requerem mais água para obter a mesma trabalhabilidade ou consistência, da mesma forma ocorre com os mais angulares (RIDZUAN et al., 2001; PADMINI; RAMAMURTHY; MATHEWS, 2009). Foi reportado mundialmente que a resistência a compressão se reduziu 30% quando comparado o uso de agregados naturais a 100% de substituição pelo reciclado, contudo, a redução não é tão alta quando se substitui em até 30% (CHAKRADHARA RAO; BHATTACHARYYA; BARAI, 2011; ABD ELHAKAM et al, 2012; XIAO; LI; POON, 2012).

A substituição de agregados em argamassas é necessária, pois a quantidade de material virgem consumido é muito alta. O consumo global de agregados no mundo excedeu 26 bilhões de toneladas em 2012, a tendência é que esta demanda venha a dobrar nas próximas duas a três décadas (SONAWANE; PIMPLIKAR, 2012). Em 2020 no Brasil, a produção de agregados atingiu 605 milhões de toneladas, 13% acima de 2019, 353 milhões do quantitativo produzido foi somente para areia (ANEPAC, 2021).

Segundo Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) para suprir o déficit ambiental da extração em larga escala nas jazidas, soluções tecnológicas com a substituição parcial do agregado miúdo por outros materiais pode ser uma alternativa sustentável. Do ponto de vista da economia circular, a melhor opção de reutilização no setor da construção é se considerando justamente todo o ciclo de vida dos materiais aplicados. Havendo uma boa separação e

tratamento, agregados reciclados podem substituir até em 100% os agregados naturais (ADAMS et al., 2016).

Diversos trabalhos foram desenvolvidos para avaliar a substituição parcial de materiais alternativos em relação ao quantitativo de agregado miúdo. O trabalho de Saikia et al. (2012) verificou o uso da escória de alto forno contaminada por chumbo (Pb) como substituto parcial do agregado fino em argamassas nos níveis de 25 e 35%, concluindo que à níveis de 35% a substituição pode ser vantajosa para a produção de argamassas de cimento sem afetar as propriedades mecânicas e de lixiviação. Similarmente, Güneyisi et al. (2015), substituiu a areia pelo pó de granito e Silva et al. (2020), finos de cinza volante aglutinados a frio em em argamassas autoadensáveis e avaliaram os efeitos da carbonatação, que se mostraram benéficos.

No trabalho de Cunha et al. (2018) foi utilizado o procedimento de classificação de materiais com base na função de usabilidade. O estudo classificou argamassas à base de diferentes ligantes com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM). Esta incorporação, quando aplicada em argamassas de revestimento em interiores, permite obter edifícios com uma maior eficiência energética. Com base nos resultados foi possível concluir que a incorporação de PCM afeta o desempenho global das argamassas. Estudos nesse sentido são importantes pois fazem com a que indústria seja inovadora e aceite novas soluções construtivas, visando resolver problemas futuros.

Um estudo conduzido por Aboutabikh, Soliman e El Naggar (2016) avaliou as propriedades argamassa utilizadas para rejunte, avaliando características físicas, químicas e minerais. Contudo, a avaliação realizada analisava a incorporação de cascalho em substituição parcial do cimento. Notou-se que não se afetou adversamente as propriedades da argamassa. Por outro lado, Almabrok, McLaughlan e Vessalas (2018) analisaram o efeito de cascalhos de perfuração sintético em substituição à areia em argamassas. Em argamassas com até 25% em peso de substituição, produziu-se argamassas com hidratação acelerada e fluidez e densidade reduzidos.

Entretanto, estudos para avaliarem os impactos da substituição parcial dos cascalhos *in natura* e as propriedades no estado fresco e endurecido com resíduos da indústria do petróleo, em específico, o cascalho, com otimização no empacotamento das partículas ainda são muito escassos na literatura.

### 2.3.2. Empacotamento de partículas

O tamanho e forma dos materiais influenciam em propriedades físicas importantes como porosidade, rugosidade e permeabilidade que dão informações importantes sobre sua origem e relacionadas ao empacotamento de partículas. O empacotamento de partículas, por sua vez, se correlaciona com a correta seleção da proporção e do tamanho dos materiais visando que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, ocorrendo sucessivamente com espaços cada vez menores (FUNK; DINGER, 1994). Além disso, a otimização da densidade de empacotamento é vantajosa pois permite a redução da demanda de água e simultaneamente minimização dos teores de cimento (PROSKE et al., 2013, 2014; PALM et al., 2016;).

Teoricamente, um material com empacotamento máximo possuiria ausência de vazios. Contudo, devido à irregularidade na morfologia e na distribuição granulométrica, o máximo empacotamento teórico é de difícil reprodução. Todavia, é possível aumentar a densidade de empacotamento para melhorar a qualidade de materiais como a argamassa. Estudos corroboram com a ideia de que quanto maior a densidade de empacotamento em materiais cimentícios, menor a porosidade e, maior seria sua resistência (CASTRO; FERREIRA, 2016).

Os modelos de empacotamento de partículas se apresentam através de equações matemáticas que verificam como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente. Dentre os modelos disponíveis na literatura, o modelo de Alfred, também conhecido como modelo de *Andreasen* modificado (Equação 1) da porcentagem acumulada de partículas menores que o tamanho D (CPFT), proposto por (FUNK; DINGER, 1994), se destaca na dosagem de concretos por possuir maior eficiência de empacotamento e ser mais condizente com sistemas particulados reais. Uma das formas de se determinar o melhor empacotamento de partículas é o estabelecimento de curvas granulométricas ideais. Tendo-se uma curva teórica de empacotamento (CTE), busca-se uma combinação visando aproximar o máximo da curva ideal. Isso pode ser por meio da otimização computacional (HERMANN et al., 2020).

$$CPFT (\%) = \left( \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

O coeficiente de distribuição (q), para misturas teóricas, é definido em função do tipo de concreto ou argamassa que se pretende produzir. No modelo de *Andreasen* modificado, o máximo empacotamento ocorre com q igual a 0,37. Contudo, segundo Oliveira et al. (2000), valores de “q” menores que 0,37 aumentam a fluidez por manter uma maior a matriz cimentícia. Para a boa fluidez recomenda-se que o valor do coeficiente de distribuição seja inferior a 0,30.



Segundo Mangulkar e Jamkar (2013) valores próximos a 0,30 devem ser considerados para misturas adensadas sobre vibração, enquanto valores entre 0,20 e 0,25 resultam em misturas autoadensáveis (BROUWERS; RADIX, 2005). No entanto, Oliveira et al. (2018) em seus estudos sobre concretos autoadensáveis usam “q” igual a 0,29 e Wang et al. (2014) recomendam um “q” entre 0,23 e 0,29 para esta finalidade. Podendo, por analogia, ser utilizados valores dentre esses limites para a confecção de argamassas.

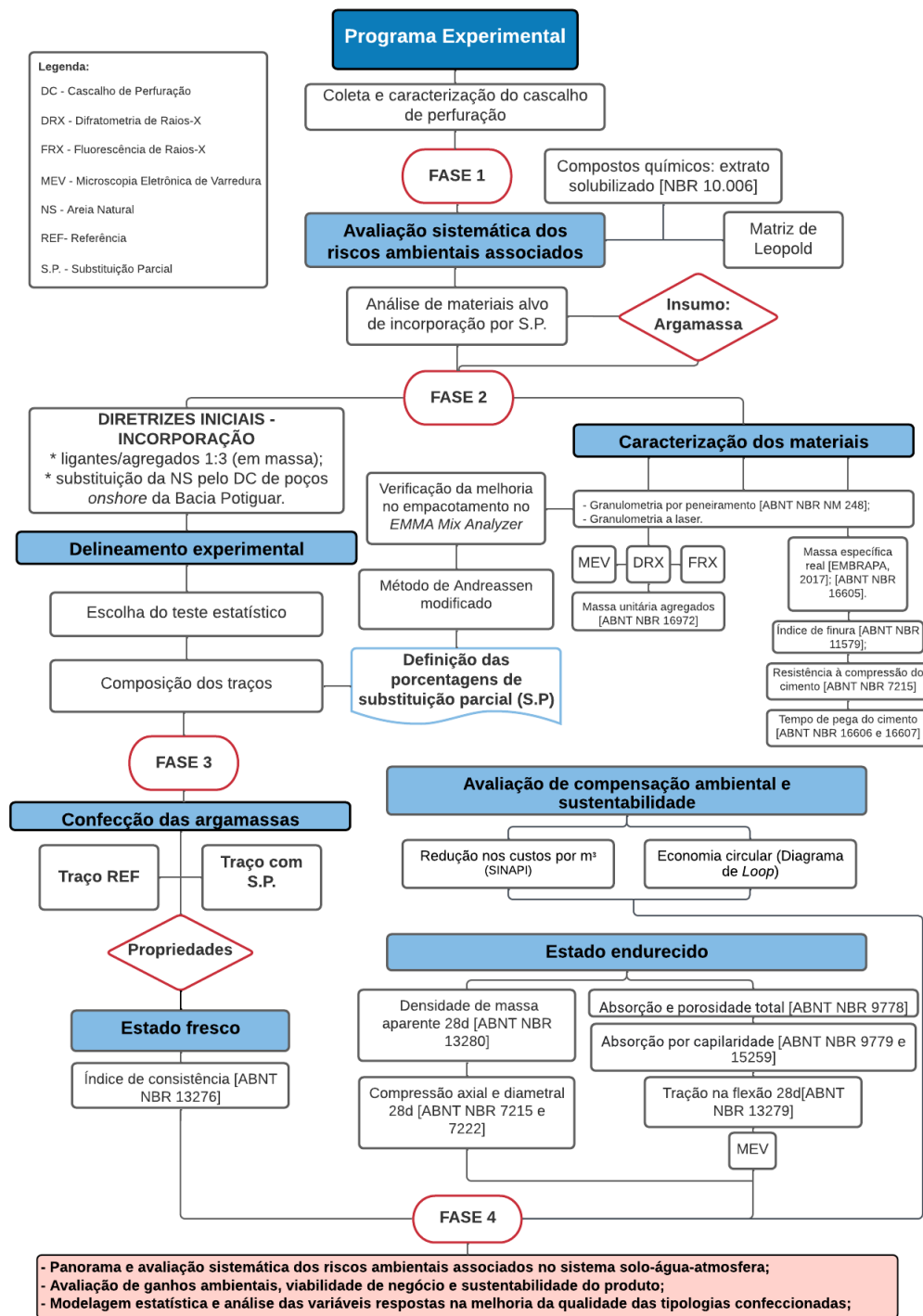
Segundo Teixeira e Cordon (2009), em misturas granulares, como é o caso do concreto, a densidade de empacotamento possui grande influência nas suas características físicas. Ou seja, com um alto empacotamento, o material apresentar resistência mecânica mais elevada. Em um trabalho desenvolvido por estes autores, a dosagem foi realizada a partir do modelo de Andreassen. Foram definidos os valores de 0,27, 0,32 e 0,37 para os coeficientes de empacotamento, gerando 3 formulações distintas. Para aplicação do modelo de Andreassen foi utilizado o *software* chamado *Elkem Materials Mixture Analyser* (EMMA). Os resultados obtidos mostraram que o coeficiente de distribuição ( $q=0,37$ ) permitiu otimizar a distribuição granulométrica dos materiais, indicando um maior rendimento nos concretos.

No trabalho de Fialho (2012) foram avaliados o comportamento de dois tipos de cascalhos em substituição e adição em concretos não armados. Foram utilizadas duas areias para melhor empacotamento da mistura, os limites inferiores e superiores para agregados em concreto da norma NBR 7211 (ABNT, 2019a). As areias foram escolhidas para melhorar o empacotamento das partículas permitindo assim que o concreto obtivesse a textura mais fechada. A escolha da areia fina em substituição ao Cascalho de perfuração nos concretos se deu pela similaridade de suas distribuições granulométricas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental proposto neste trabalho está apresentado na Figura 3. Na busca de delimitar os procedimentos experimentais, a sequência das etapas que compõem cada fase está disposta de acordo com os itens 3.1 a 3.4.

Figura 3. Fluxo de fases do programa experimental

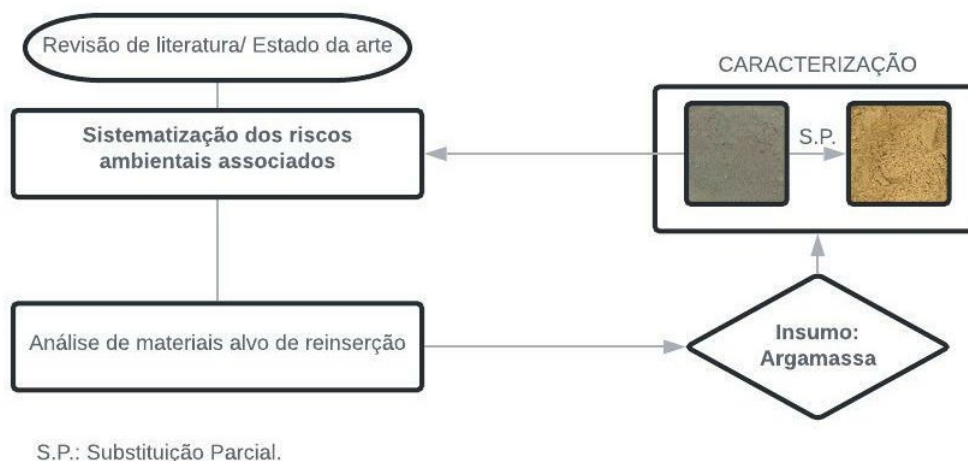


Fonte: Autor (2022).

### 3.1. Avaliação sistemática dos riscos ambientais no sistema solo-água-atmosfera

É importante ressaltar que o estado da arte desenvolvido neste trabalho possibilitou compreender os esforços científicos na compreensão de problemas atuais na reutilização do cascalho de perfuração, devido ao seu alto potencial poluidor quando descartado no ambiente sem tratamento prévio. Desta forma, foi escolhido através da percepção de lacunas na literatura o material alvo de reinsertão, conforme apresentado na Figura 4. Essa seleção preliminar é essencial parâmetro comparativo, para avaliar a importância qualitativa e os benefícios econômicos e ambientais na redução dos impactos ao ambiente pela reinsertão deste resíduo.

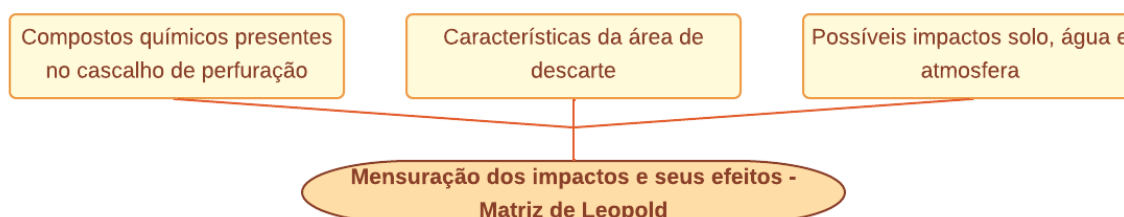
**Figura 4.** Escolha de insumo alvo de reinsertão.



Fonte: Autor (2022).

Diante do exposto, foi construída uma matriz de correlação dos efeitos provocados pela possível disposição do cascalho no ambiente, a partir da sua composição química, derivadas dos ensaios realizados nos cascalhos de perfuração *in natura* da perfuração de poços na Bacia Sedimentar Potiguar, possibilitando compreender os principais riscos ambientais relacionados. A Figura 5 apresenta o fluxo de atividades desenvolvidas no intuito de coletar dados para avaliar os impactos ambientais gerados pelo cascalho de perfuração no semiárido Potiguar.

**Figura 5.** Fluxo de atividades para avaliar impactos ambientais gerados pelo cascalho.



Fonte: Autor (2022).

Neste sentido, informações como o tipo de solo da região alvo de descarte, os corpos hídricos, a velocidade do vento e os dados da formação geológica foram correlacionadas para formar padrões de influência qualitativos e entender os efeitos em âmbito local. Com isso, sendo possível construir o panorama de medidas que possibilitem mitigar tais impactos, dentre elas, a substituição parcial deste resíduo em relação ao agregado miúdo em argamassas, viabilizando uma forma de destinação final na produção da indústria da construção civil.

O cascalho desta pesquisa, em um primeiro momento, foi caracterizado por meio do ensaio para a obtenção do extrato solubilizado, da NBR 10.006 (ABNT, 2004a). Os riscos ambientais foram vinculados à parâmetros comparativos a normativas brasileiras relacionadas à periculosidade e à contaminação pelos teores máximos de químicos. Para tanto, utilizando como referências a NBR 10004 (ABNT, 2004b), NBR 10006 (ABNT, 2004a), NBR 15900 (ABNT, 2009b), NBR 7211 (ABNT, 2019a), as quais auxiliaram na compreensão do quanto este material pode ser ecologicamente correto e seu grau de periculosidade.

Muitos problemas ambientais são causados pelo aumento da produção de resíduos, que ocasiona por consequência a poluição dos sistemas ambientais. O controle e a gestão adequada de resíduos desempenham papel importante na melhoria da qualidade ambiental, promovendo assim a saúde pública e a conservação da vida selvagem. Entre os procedimentos de avaliação de impactos, o método matricial é altamente considerado e tem se mostrado eficaz em muitos projetos. A Matriz de Leopold, introduzida globalmente pelo pesquisador cuja metodologia leva seu nome, é uma técnica teórica que avalia as consequências ambientais, utilizada neste estudo (LEOPOLD, 1971).

A matriz de Leopold serviu possibilitou qualificar e avaliar os impactos ambientais, tanto os positivos quanto negativos, com base em sua magnitude, importância, extensão, duração e reversibilidade, durante as fases de perfuração, manuseio/transporte e disposição do resíduo. Ela se baseia em três critérios: natureza do impacto (positivo ou negativo), magnitude (que se correlaciona com a extensão, área ou volume afetado), e a importância (que dialoga com a duração e a reversibilidade deste, ou seja, sua gravidade). Estes dois últimos estão expressos conforme a Tabela 2 e a Tabela 3.

**Tabela 2.** Critérios avaliados quanto a magnitude do impacto ambiental.

<b>Intensidade</b>	<b>Alteração</b>	<b>Classificação</b>
Baixa	Baixa	1
Baixa	Média	2
Baixa	Alta	3
Média	Baixa	4

<b>Intensidade</b>	<b>Alteração</b>	<b>Classificação</b>
Média	Média	5
Média	Alta	6
Alta	Baixa	7
Alta	Média	8
Alta	Alta	9
Muito Alta	Alta	10

Fonte: Leopold (1971).

**Tabela 3.** Critérios avaliados quanto a importância do impacto ambiental.

<b>Intensidade</b>	<b>Alteração</b>	<b>Classificação</b>
Temporária	Pontual	1
Média	Pontual	2
Permanente	Pontual	3
Temporária	Local	4
Média	Local	5
Permanente	Local	6
Temporal	Regional	7
Média	Regional	8
Permanente	Regional	9
Permanente	Nacional	10

Fonte: Leopold (1971).

Caso o impacto avaliado seja de natureza negativa, os índices relativos à sua magnitude podem possuir pontuações negativas. Cabe-se mencionar que a magnitude se refere à extensão do impacto ambiental e como este vai alterar o local alvo, enquanto a importância mensura a intensidade e a reversibilidade de tal ação. A gravidade do impacto ambiental calculada viabiliza o diagnóstico para os componentes ambientais avaliados na matriz.

Os impactos totais podem variar numericamente, sendo o intervalo entre 1 a 301 estabelecido como o valor de agrupamento representativo de baixo impacto, de 301 a 601, considerado como agrupamento de médio, de 601 a 1001 sendo considerado o de alto impacto ambiental e acima de 1001, de impacto crítico. Desta forma, verifica-se a possibilidade de alteração ser assimilada pelo meio ambiente, mensurável a curto, médio ou longo prazo, bem como dos reparos em sua totalidade pela ação natural e humana.

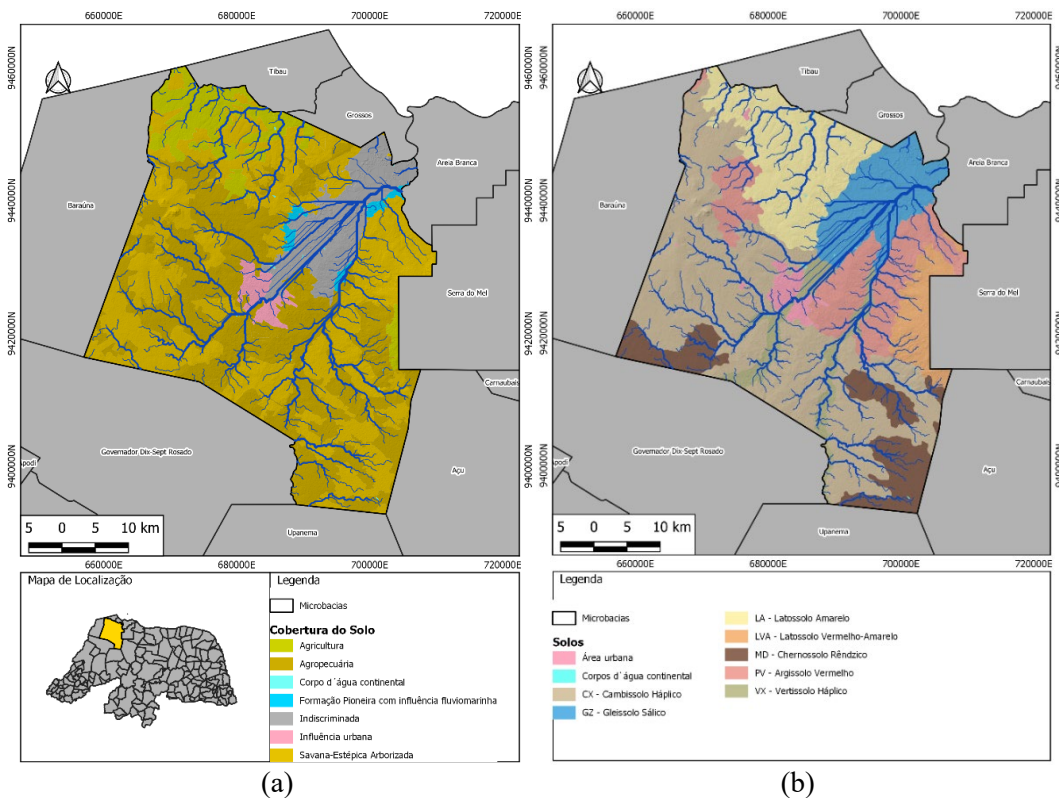
Quanto aos resultados, foram divididos em três grupos de componentes, fatores físicos, bióticos e socioeconômicos, segundo a natureza dos indicadores. Sendo possível estabelecer em quais grupamentos há maior necessidade de mitigação.

### 3.1.1. Características área de descarte

Para o caso da exploração de petróleo e perfuração de poços, a geração de cascalho de perfuração constitui sério risco aos sistemas ambientais (água, solo e atmosfera). Entretanto, o seu tratamento e a implementação de tecnologias para o seu manejo constituem uma saída viável para alcançar a sustentabilidade ambiental, ademais providencia uma cadeia de impactos positivos na economia local, com a geração de renda direta e indireta nesses processos. Neste sentido, verificar as variáveis ambiental da área provável de descarte, município de Mossoró, será o objetivo principal do contexto abordado nesta seção.

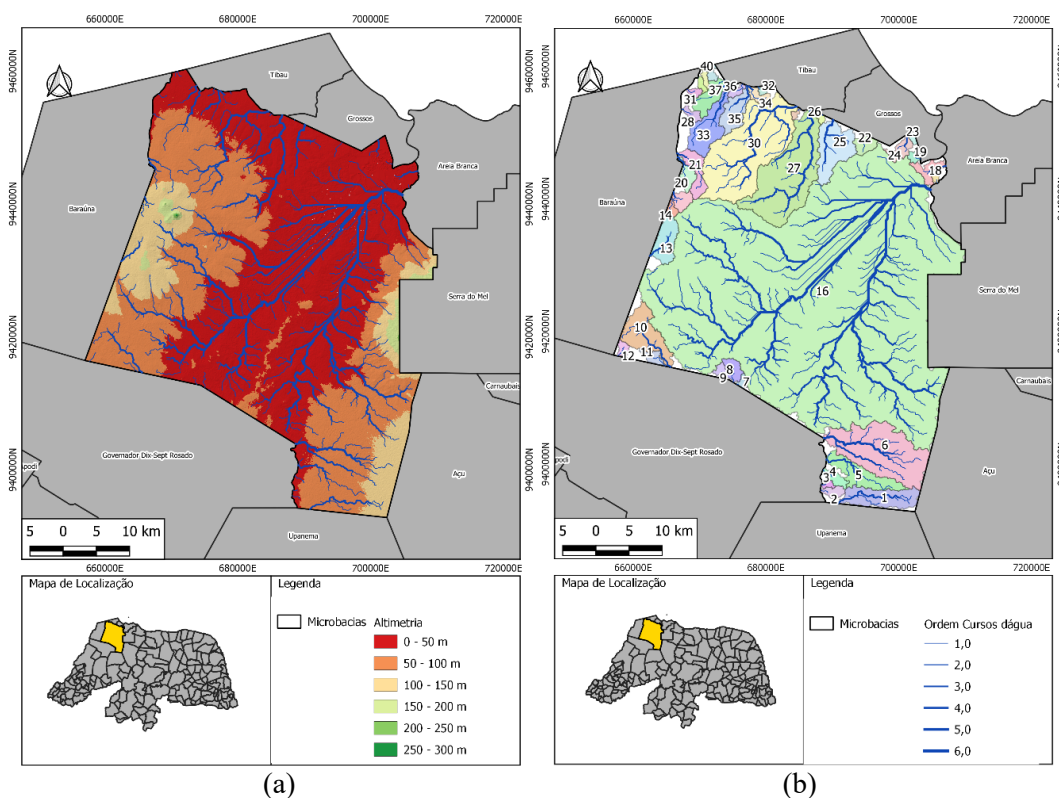
Os seis principais solos da cidade de Mossoró de acordo com a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em seu Mapa Exploratório-Reconhecimento de solos do município em questão são: Latossos (LA e LVA), Podzólicos (PV); Vertissolos (V); Cambissolos (C); Gleissolos (G) e Rendizinas ou Chernossolos (MD) (EMBRAPA, 2006). Desta maneira, em posse de arquivos vetorizados, foi desenvolvido Mapa temático com a cobertura do solo e dos tipos de solo no *software* livre de geoprocessamento QGIS®, apresentado na Figura 6 (a e b). De forma análoga, a Figura 7 (a e b) determina a preferência de fluxo das águas e as bacias hidrográficas do município, respectivamente.

**Figura 6.** Mapa da cobertura (a) e dos tipos de solo (b) de Mossoró-RN.



Fonte: Autor (2022).

**Figura 7.** Mapa hipsométrico (a) e de bacias hidrográficas (b) de Mossoró-RN.



Fonte: Autor (2022).

Os Latossolos amarelos (LA) e vermelho-amarelo (LVA) são solos que ocorrem em grandes áreas na cidade de Mossoró, especialmente em locais que são utilizados para a agricultura e pecuária (Figura 6a) e pode ser descrito, segundo a EMBRAPA (2022) como um tipo de solo que ocorre em ambientes bem drenados, sendo muito profundo e uniforme em características de cor, textura e estrutura em profundidade.

Além disso, esses solos são muito utilizados para agropecuária, visto que apresentando limitações de ordem química em profundidade ao desenvolvimento do sistema radicular e forem álicos, distróficos ou ácidos. A agricultura neles é limitada pela baixa quantidade de água disponível às plantas e teores de fósforo, sendo indicada a adubação fosfatada. No entanto, quando eutróficos, apresentam condições adequadas para um bom desenvolvimento radicular em profundidade, por serem profundos e porosos ou muito porosos, apresentam condições sendo ampliadas (ALMEIDA, SANTOS E ZARONI, 2022).

Estudos apontam que a compactação neste tipo de solo, aumenta a resistência mecânica do solo à penetração, quando submetido a diferentes técnicas de manejo. Analogamente, a disposição de cascalhos de perfuração sobre esse solo, podem causar uma sobrecarga que venha a provocar alterações físicas que comprometam a produtividade das culturas (VALADÃO et al., 2017). Essa compactação normalmente ocorre a poucos centímetros abaixo da superfície do

solo e compromete o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas (DRESCHER et al., 2012; ROSSETTI, CENTURION, 2017). Silva et al. (2020) analisaram a resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos e verificaram que estes têm grande influência nas propriedades físicas do solo e estão relacionados com a compactação do solo.

Já o solo do tipo Podzólico Vermelho Amarelo eutrófico (PV), intitulados Argissolos na Figura 6, compreende solos com horizonte B textural, não hidromórficos e com argila de atividade baixa. Apresentam de média a alta saturação de bases (V%), baixa saturação com alumínio, menor acidez, bem como conteúdo mineralógico que encerra, comumente, quantidade significativa de minerais primários facilmente decomponíveis, os quais constituem fontes de nutrientes para as plantas (FUNCENE, 2014).

Como esses solos são moderadamente ou bem drenados, a disposição de cascalhos de perfuração pode desestabilizar as bases trocáveis e comprometer as culturas cultivadas, visto que os fluidos de perfuração contidos no cascalho, que conferem um efeito selante às paredes do poço pode potencializar nas amostras superficiais de Argissolo uma maior compactação, maior dificuldade de infiltração de água e por consequência, maior dificuldade de crescimento das raízes, prejudicando o desenvolvimento das plantas que cresceram nesses substratos (FREITAS, 2013).

Os Vertissolos (V), por sua vez, são solos minerais com séria restrição temporária à percolação de água. Devido a presença de argilas expansivas, podem apresentar fendas de retração largas e profundas que se abrem desde o topo do perfil e superfícies de fricção (*slickensides*). Apesar de apresentarem elevado potencial nutricional para as plantas, demonstram elevada pegajosidade, quando molhados, e a alta dureza, quando secos, demandam um esforço de tração muito grande, limitando a utilização desses solos (JARBAS et al., 2022).

A restrição de drenagem em Vertissolos e sua baixa permeabilidade são características desejáveis para a disposição de cascalhos, visando que os compostos químicos não atinjam camadas subsuperficiais e cursos d'água subterrâneos. As diferentes classes de solos apresentam características diferenciadas quanto aos processos hidrológicos, mesmo em condições semelhantes de topografia, cobertura vegetal e práticas de manejo. Um estudo desenvolvido por Araújo e Mamede (2018) verificou a geração de escoamento superficial e subterrâneo em bacias hidrográficas semiáridas e constatou que o solo do tipo Vertissolo, apresentou a menor permeabilidade média, cerca de 24 mm.dia<sup>-1</sup>.

Outros solos minerais presentes na região são os Cambissolos (C), que apresentam textura média ou mais fina e ausência de grande desenvolvimento pedogenético, sendo solos



com pequena profundidade, elevado teor de minerais primários; os Geissolos (G), por sua vez, são formados em condições de saturação com água tendência, com cores acinzentadas, textura e fertilidade variável (JARBAS et al., 2022; NETO; SILVA, 2022).

Os Chernossolos Rendzênicos, anteriormente denominados Rendzina, apresentam uma camada superficial escura rica em matéria orgânica, altos teores de nutrientes que lhes conferem alta fertilidade natural, assente sobre camada de material mineral rico em carbonato de cálcio (SANTOS; ZARONI; ALMEIDA, 2022). Apesar do DC apresentar carbonato de cálcio em sua composição (vide FRX na Tabela 21), este material possui compostos químicos nocivos e com alta toxicidade derivados do fluido de perfuração e do contato com a rocha geradora que mesmo em baixas concentrações, pode prejudicar usabilidade deste solo na agricultura, devendo ser evitado o contato.

A Figura 7b apresenta a distribuição dos cursos hídricos superficiais na cidade de Mossoró até a sexta ordem. Nota-se um cruzamento do centro urbano da cidade pela Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró. O Mapa hipsométrico de Mossoró apresentado na Figura 7a, por sua vez, apresenta que cerca de 80% da área do município está localizada em altitudes de até 100 metros em relação ao nível do mar. Tal constatação se reflete no comportamento dos ventos e temperatura na região alvo.

O trabalho de Medeiros, Cavalcante e Pinheiro (2018), associou a variação espacial entre a pluviometria e relevo em Mossoró-RN, para verificar a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, utilizando uma série de dados temporais de precipitação pluviométrica (mm) entre os anos de 1983 a 2013, de 38 postos de monitoramento localizados ao longo da área de estudo, inferindo estatisticamente uma média de precipitação anual acumulada de 657,5 mm e verificando áreas com maior ocorrência de chuvas estão localizadas nos trechos de maior altitude (alto curso fluvial).

Enquanto análises realizadas por Cosme et al. (2018) que avaliaram a qualidade da água subterrânea de 22 comunidades da zona rural do município e verificaram grandes variações na condutividade elétrica (CE), razão de adsorção de sódio (RAS) e sólidos dissolvidos totais (SDT) dessas águas, indicando que a maioria das águas analisadas apresentam restrições de uso na irrigação com relação a toxicidade por cloretos.

### **3.2. Coleta e caracterização dos materiais**

A metodologia proposta neste estudo foi inicialmente focada na caracterização dos materiais utilizados visando compreender os possíveis impactos decorrentes disposição direta de cascalhos de perfuração (DC) no ambiente. Partindo-se da hipótese de uma consequente

mitigação destes através da incorporação desse material na produção de argamassas sustentáveis, com ênfase na substituição parcial no quantitativo de areia, foram realizados ensaios de laboratório visando a caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural do resíduo e dos materiais constituintes da mistura.

Para a análise pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), as amostras de areia, cascalho e cimento foram quarteadas e pulverizadas até passar na peneira de #150, sendo conduzida utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu, com limite de detecção do Na (11) ao U (92) (>0,001%). Para a avaliação da perda ao fogo, a amostra primeiramente foi seca em estufa por 24 h em temperatura de 110°C e posteriormente foi aquecida até 1000°C por 60 minutos. Para identificação das fases cristalinas da amostra, parte de cada material foi submetido à análise de Difração de Raios-X (DRX) utilizando o equipamento XRD-6000 da SHIMADZU. No MEV as amostras foram submetidas ao vácuo no D-35615 Asslar da PFEIFFER e utilizou-se o TESCAN VEGA 3 LMU.

### **3.2.1. Agregado miúdo**

O agregado miúdo empregado na produção das argamassas foi a areia natural quartzosa (NS) proveniente de jazida local, obtida em loja de materiais de construção na cidade de Mossoró/RN. Ensaios de caracterização foram conduzidos conforme preza as regulamentações normativas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), visando obter os parâmetros físicos e a classificação do agregado, de acordo com a dimensão de suas partículas.

Foram, portanto, realizados os ensaios de análise granulométrica conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa específica unitária de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021a) e através do método do balão volumétrico, prática indicada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (VIANA; TEIXEIRA; DONAGEMMA, 2017) devido à indisponibilidade de se realizar a técnica conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021b) ocasionado pelos efeitos decorrentes da pandemia de Covid-19. Outrossim, análises mineralógica, química e microestrutural foram obtidas através dos ensaios respectivamente de Difractometria de Raios X (DRX), Florescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### **3.2.2. Cimento**

O cimento aplicado nesta pesquisa foi do tipo Portland CP V ARI RS de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos (CP) regulamentado pela NBR 16697 (ABNT, 2018a) da marca

MIZU, fabricado pela MIZU Cimentos Especiais. Para sua caracterização, foram utilizadas as regulamentações da ABNT e, com isso, desenvolvidos os ensaios a fim obter sua caracterização e propriedades. Os ensaios realizados foram de granulometria a laser, índice de finura pela NBR 11579 (ABNT, 2013), tempo de pega pelas NBR 16606 e NBR 16607 (ABNT, 2018b, 2018c), resistência à compressão aos 1, 3 e 7 dias pela NBR 7215 (ABNT, 2019b), massa específica real, NBR 16605 (ABNT, 2017), DRX, FRX e MEV.

### **3.2.3. Água de amassamento**

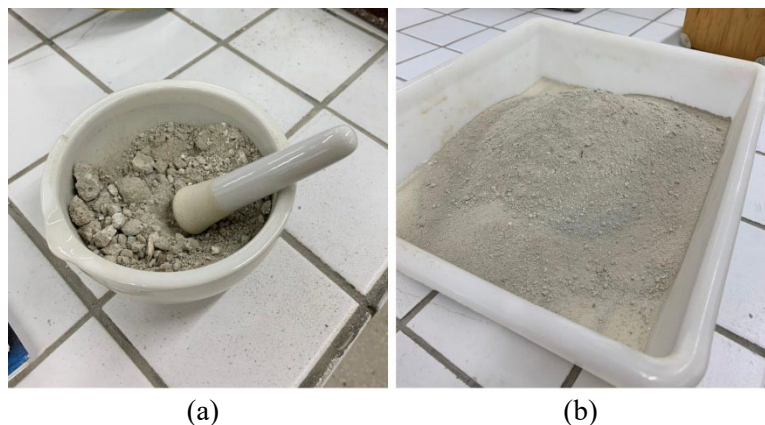
Água potável oriunda do sistema de abastecimento público (W) disponível no Centro de Engenharias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) do campus Mossoró, em conformidade com Portaria Nº 888 do Ministério da Saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021) e conseqüentemente com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009b) a qual prescreve os requisitos da água de amassamento para concretos sendo por analogia, válida para argamassas.

### **3.2.4. Cascalho de Perfuração**

As amostras de DC foram fornecidas por uma empresa especializada no desenvolvimento de estratégias voltadas ao gerenciamento ambiental com filial na cidade de Natal-RN e que atua no tratamento de resíduos semissólidos gerados na perfuração *onshore* da Bacia Potiguar. A amostra, portanto, é constituída principalmente de rocha calcária triturada e fluido de perfuração do tipo aquoso. Para que fosse possível realizar a incorporação de cascalho de perfuração por meio de substituição parcial no agregado miúdo, foram realizados ensaios de caracterização física e granulométrica, visando melhorar o empacotamento das partículas e proporcionar uma argamassa com a textura mais fechada.

Para secagem completa foi necessário submeter o cascalho a estufa à 210°C durante 24h, o dobro da temperatura usualmente utilizada na secagem da areia para o ensaio de granulometria preconizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), uma vez que a temperatura de 105°C em 24h não foi suficiente para secá-lo completamente. Devido à presença de torrões, o material foi destorroado previamente ao ensaio de análise granulométrica, conforme apresentado na Figura 8 (a) e (b), respectivamente. Os procedimentos de caracterização física foram executados de forma similar ao da areia (dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica real e massa unitária e volume de vazios), tendo em vista que a substituição parcial ocorreria neste material. Além disso, foram obtidas suas características mineralógicas, químicas de DRX, FRX e MEV.

**Figura 8.** Cascalho seco em condição natural (a) e destorroado (b).



Fonte: Autor (2022).

### 3.3. Delineamento Experimental da Argamassa

#### 3.3.1. Proporção de misturas e simulações de empacotamento de partículas

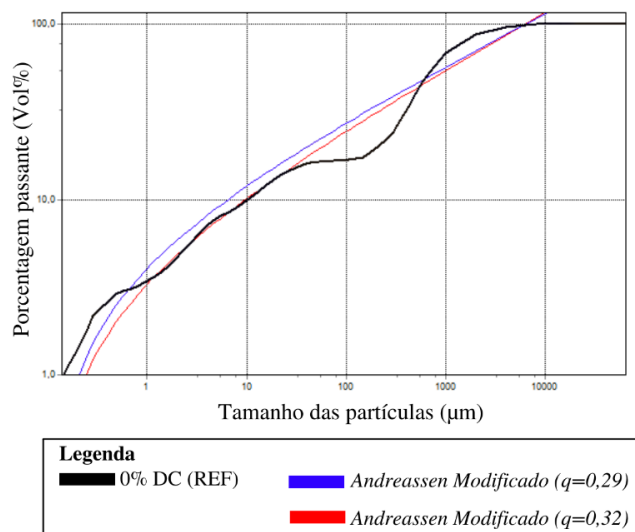
Um traço base de Referência (REF) de consumo entre de 300 e 400 kg.m<sup>-3</sup> foi fixado, com proporções em massa de 1:3 (cimento e areia, em massa) e relação água/cimento de 0,85, com utilização de 1% aditivo super plastificante (MC Power 1105, da MC-Bauchemie). Desta forma, na busca de obter argamassas com propriedades analisadas similares à mistura convencional, utilizou-se o empacotamento como critério para a escolha do teor de resíduo nas substituições propostas entre os materiais.

O método de empacotamento utilizado foi o de *Andreassen* modificado utilizando o *software* EMMA Mix Analyzer® da *Elkem Materials*. Tal *software* permite a verificação do empacotamento de partículas através do método por meio de uma análise da influência deste modelo de seleção teórica das porcentagens de substituição na melhoria das características empíricas das tipologias de argamassas produzidas. Os dados foram manipulados inicialmente em *software* de planilhas eletrônicas para se obter a distribuição média granulométrica da areia e do cascalho, derivadas das repetições nos ensaios de granulometria.

Para a administração da mistura preliminar, foram adicionados os seguintes materiais ao *software*: “Areia Natural Média” e “Cascalho de Perfuração Médio”, que correspondem à média de duas determinações das porcentagens de material retido em cada abertura de peneiras da série normal e intermediária conforme preconiza NBR NM 248 (ABNT, 2003). A distribuição granulométrica foi interpolada após a importação, a massa específica real foi adicionada para cada material, respectivamente, bem como a quantidade de água, em kg/m<sup>3</sup> de

argamassa produzida. O material “Cimento Médio” foi inserido em seguida, representando a média granulométrica obtida em dois ensaios de granulometria a laser. A mistura simples de areia e cimento, sem substituição de DC é apresentado na Figura 9.

**Figura 9.** Mistura sem substituição de areia pelo cascalho.



Fonte: Autor (2022).

Considerou-se um fator ( $q=0,29$ ), maior valor indicado pela literatura para misturas autoadensáveis, e ( $q=0,32$ ), referente à mistura de concretos de ultra alta resistência (CUAR), que se assemelha a argamassas. Visando garantir a consistência adequada e considerando que o maior empacotamento ocorre para valores de “q” maiores (TEIXEIRA, CÓRDON, 2009). Selecionou-se para análise o ( $q=0,32$ ). Na sequência, procedeu-se com a substituição dos quantitativos em massa da areia pelo equivalente em massa de cascalho relativo ao percentual, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4.** Porcentagens de substituição de areia por cascalho.

Traço <sup>(1)</sup>	%DC	Composição em massa (Kg/m <sup>3</sup> )				
		PC	DC	NS	W	w/s
REF	0	353,24	0,00	1536,57	300,25	0,85
T(%DC)/90	10	353,24	153,66	1382,92	300,25	0,85
T(%DC)/80	20	353,24	307,31	1229,26	300,25	0,85
T(%DC)/70	30	353,24	460,97	1075,60	300,25	0,85
T(%DC)/60	40	353,24	614,63	921,94	300,25	0,85
T(%DC)/50	50	353,24	768,29	768,29	300,25	0,85
T(%DC)/40	60	353,24	921,94	614,63	300,25	0,85
T(%DC)/30	70	353,24	1075,60	460,97	300,25	0,85
T(%DC)/20	80	353,24	1229,26	307,31	300,25	0,85
T(%DC)/10	90	353,24	1382,92	153,66	300,25	0,85
T(%DC)/0	100	353,24	1536,57	0,00	300,25	0,85

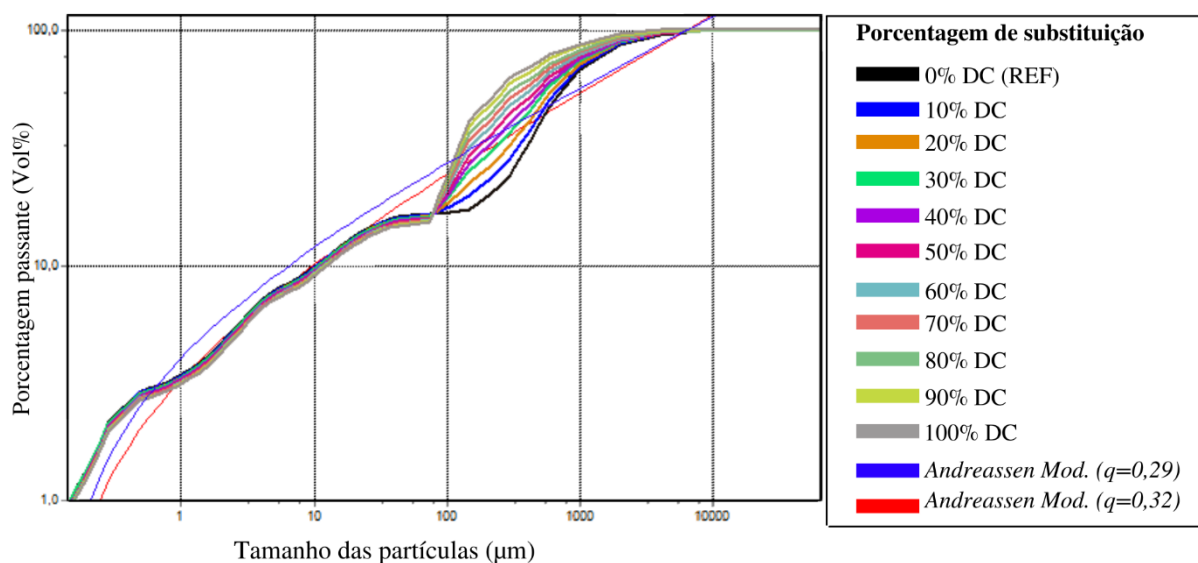
<sup>(1)</sup> Os traços das misturas indicam: T- Traço; (%DC)/(%NS) – Porcentagem do DC seguido da porcentagem da NS.

Fonte: Autor (2022).

O comportamento do gráfico da mistura em relação ao melhor empacotamento (linhas vermelha e azul) em diversos níveis de substituição está representado na Figura 10. Notou-se que quanto maior o nível de substituição, maior o afastamento da curva de mistura em relação à curva teórica de empacotamento (CTE). Entretanto, a distância entre os modelos de substituição e a CTE mais expressiva em níveis superiores a 40% de substituição.

Novas misturas teóricas foram conduzidas no intervalo de 0 a 40% de substituição, visando aprimorar o modelo e aproximar a curva de mistura a CTE do modelo de *Andreassen* modificado. As melhores misturas se localizaram no intervalo 20-40%. Deste pressuposto, traçou-se a estratégia de particionar o quantitativo de areia adicionado à mistura, utilizando-se duas novas faixas granulométricas da areia, sendo essas intituladas “Areia Natural 4,8mm” e “Areia Natural 2,36mm”, referente aos percentuais de material retido nas peneiras de 4,75 e 2,36 mm, respectivamente.

**Figura 10.** Substituição simples do DC pela NS.



Fonte: Autor (2022).

Coube-se determinar o teor percentual respectivo de cada uma das misturas contendo as novas faixas granulométricas em relação ao total de agregado na mistura com o cascalho. Foram conduzidos 4 testes, conforme apresentado na Tabela 5, para se determinar o percentual de areia de cada fração. Após sucessivas análises, verificou-se que o percentual de cada fração em relação ao quantitativo total de agregados que melhor se ajustava a curva era o do teste C, que considerava a inserção de 50% da Areia Média e 25% de cada fração para compor o total de agregados da argamassa produzida, em relação ao ( $q=0,32$ ), conforme pode ser verificado na Figura 11.

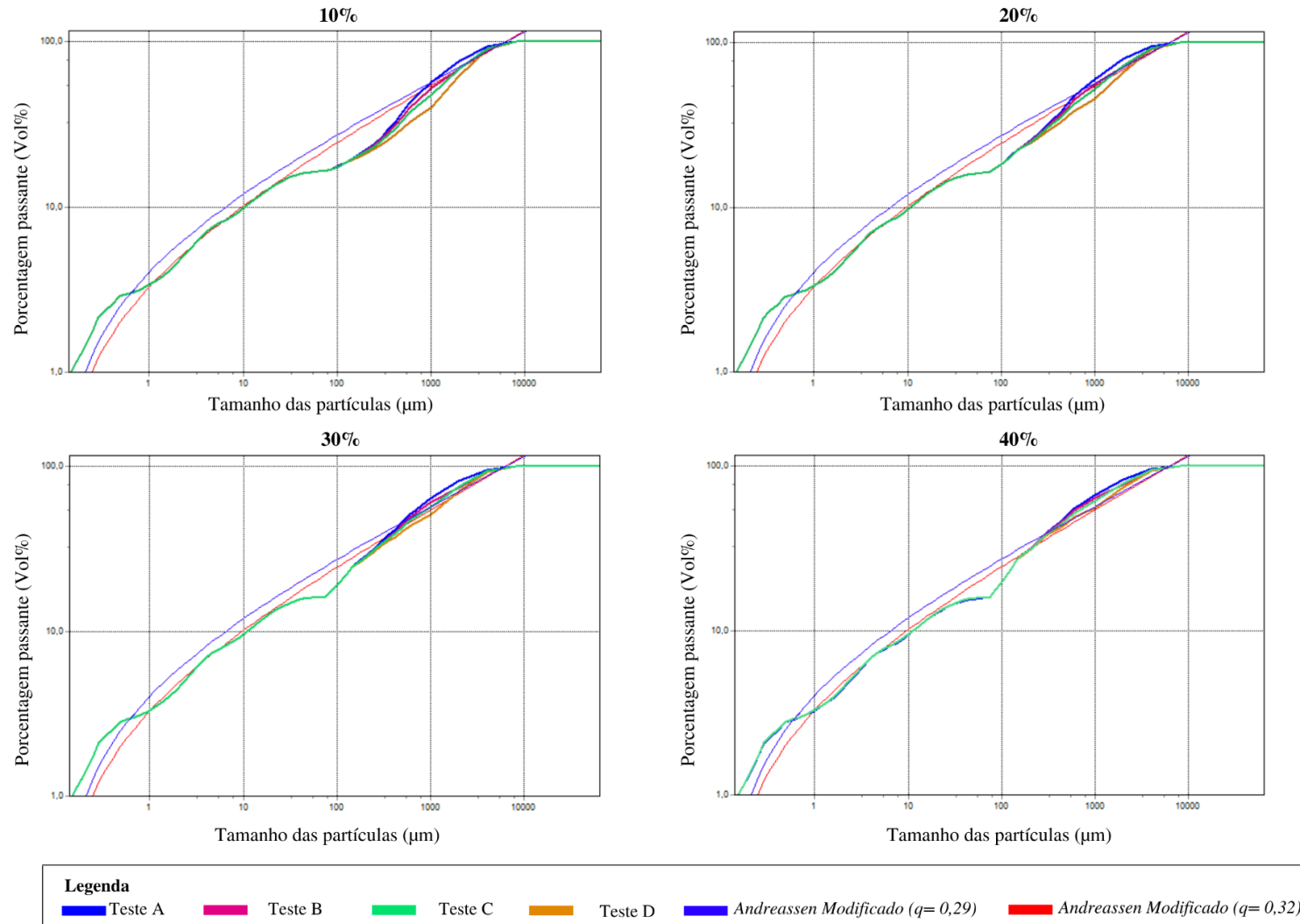
A partir da análise da Figura 11, é notório para os teores maiores de substituição de DC em relação à NS particionada, o teste C foi o que melhor se ajustou a CTE. Contudo, o percentual de 30% de DC em relação à NS particionada foi o que indicou maior proximidade à CTE, conforme apresentado na Figura 11. A Figura 12, por sua vez, apresenta os teores mais interessantes de substituição de acordo com o modelo de empacotamento avaliado.

**Tabela 5.** Percentuais de substituição das frações no quantitativo total dos agregados.

Teste	Percentuais (Material/Total dos agregados) (%) <sup>(1)</sup>		
	Areia Natural Média	Areia Natural 4,8mm	Areia Natural 2,36mm
A	70	15	15
B	60	30	10
C	50	25	25
D	33,33	33,33	33,33

<sup>(1)</sup> Quantitativo de material de cada porção em relação ao quantitativo de areia adicionado à mistura.  
Fonte: Autor (2022).

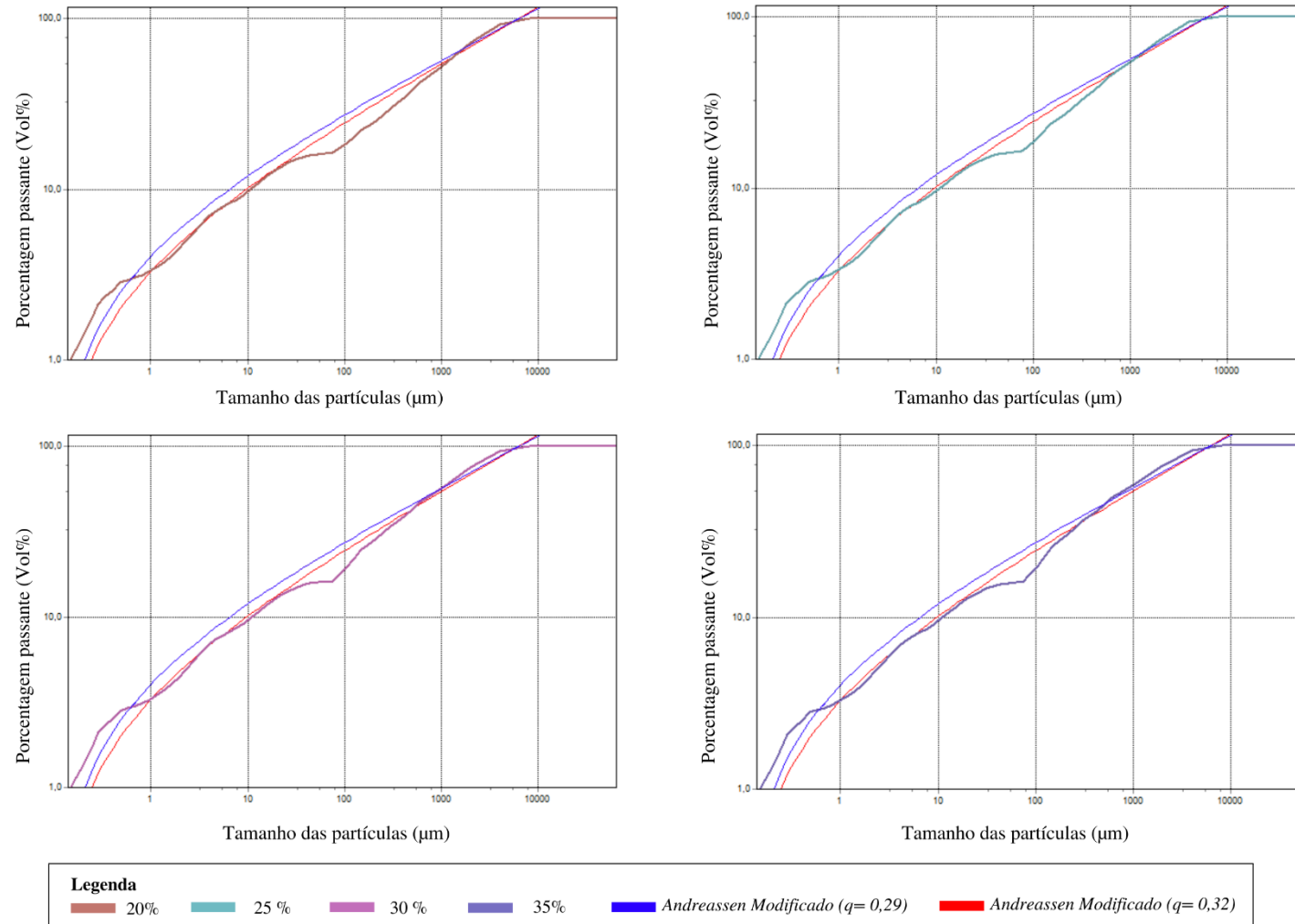
Figura 11. Comportamento dos testes em proporções de areia na mistura de 10 a 40% de DC.



Fonte: Autor (2022).



Figura 12. Comportamento do Teste C com substituição do DC pela NS de 20 a 35%.



Fonte: Autor (2022).

Para a produção de argamassas sustentáveis com as substituições parciais do DC e avaliação das suas propriedades no estado fresco e endurecido, foram produzidos quatro traços a partir do convencional, ou seja, do REF, considerando ( $q=0,32$ ). Em posse desta análise preliminar teórica foi possível determinar o esquema experimental de porcentagens de substituição, conforme apresentado na Tabela 6. Os teores referentes aos quantitativos foram testados empiricamente nas etapas subsequentes, quanto a critérios técnicos, por meio dos procedimentos experimentais conduzidos nas tipologias confeccionadas.

**Tabela 6.** Composições dos traços produzidos.

Traço <sup>(1)</sup>	%DC	Composição em massa (Kg/m <sup>3</sup> )							
		PC	DC	NS	W	w/s	Areia natural média	Areia natural 4,8mm	Areia natural 2,36mm
REF	0	353,24	0,00	1536,57	300,25	0,85	-	-	-
T(%DC)/80	20	353,24	307,31	1229,26	300,25	0,85	614,63	307,31	307,31
T(%DC)/75	25	353,24	384,14	1152,43	300,25	0,85	576,22	288,11	288,11
T(%DC)/70	30	353,24	460,97	1075,60	300,25	0,85	537,80	268,90	268,90
T(%DC)/65	35	353,24	537,80	998,77	300,25	0,85	499,39	249,69	249,69

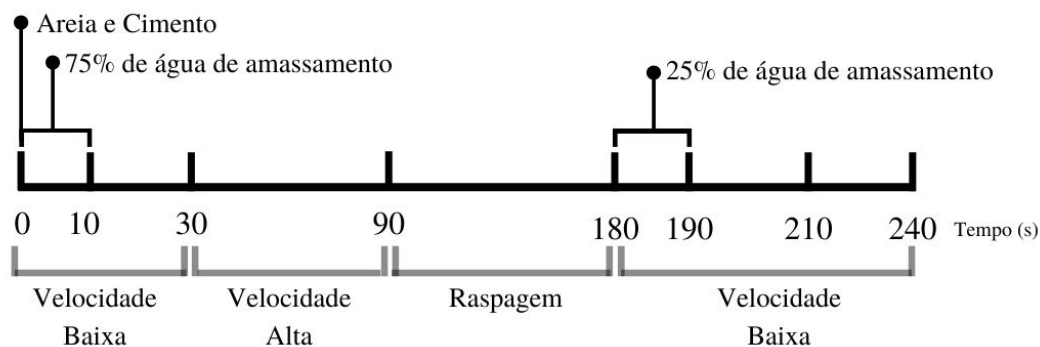
<sup>(1)</sup> Os traços das misturas indicam: T- Traço; (%DC)/(%NS) – Porcentagem do DC seguido da porcentagem da NS.

Fonte: Autor (2022).

### 3.3.2. Produção das argamassas e cura

Com relação a produção da argamassa, foi utilizado o método convencional conforme preconiza a NBR 7215 (ABNT, 2019b) e a NBR 16541 (ABNT, 2016a), com a seguinte sequência de mistura: areia e cimento. A adição de água de amassamento contendo a diluição do aditivo super plastificante foi executada conforme a Figura 13.

**Figura 13.** Tempo na mistura de cada componente na produção da argamassa



Fonte: Autor (2022) com adaptações de Oliveira (2018).

Para os traços em que houve substituição parcial do resíduo pelo agregado miúdo, esses foram misturados previamente, o DC com a NS em um recipiente metálico com volume compatível e com auxílio de colher de pedreiro. Os corpos de prova, moldados de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016b), ficaram em repouso por 24 horas e, após este período, foram desmoldados e submetidos ao processo de cura com submersão em tanque com água adicionada de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , até a data de realização dos ensaios da argamassa do estado endurecido. Para este estudo foram produzidos 13 corpos de prova: 10 cilíndricos de dimensões 5x10 cm e 3 corpos de prova prismáticos, de dimensões 4x4x16 cm para cada traço. Destes, os 3 prismáticos foram utilizados para os ensaios de absorção por capilaridade e tração na flexão. Enquanto dos 10 cilíndricos, 3 foram utilizados para o ensaio de absorção e porosidade por imersão e 6 para os ensaios de resistência à compressão e para os ensaios de MEV, DRX e FRX, totalizando 65 corpos de prova.

### 3.3.3. Análise das propriedades e desempenho

As argamassas produzidas foram submetidas aos ensaios de consistência com uso da *Flow Table*, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016b). No estado endurecido, a Tabela 7 ilustra a classificação dos ensaios realizados em físicos, mecânicos e análises: mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica. Para os traços, os ensaios foram realizados na idade da argamassa de 28 dias.

**Tabela 7.** Ensaios realizados no estado endurecido.

Propriedades	Ensaio	Normativa
Física	Densidade de massa aparente	NBR 13280 (ABNT, 2005a)
	Absorção e porosidade total (imersão)	NBR 9778 (ABNT, 2005b)
	Absorção por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2012) e NBR 15259 (ABNT, 2005c)
Mecânica	Resistência à compressão axial e diametral	NBR 7215 (ABNT, 2019b) e NBR 7222 (ABNT, 2011)
	Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005d)
Análise microestrutural	MEV.	-

<sup>(1)</sup> MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura.

Fonte: Autor (2022).

Para o MEV utilizou-se o TESCAN VEGA 3 LMU, as amostras foram submetidas ao vácuo no D-35615 Asslar da PFEIFFER. As amostras de argamassa foram obtidas por meio de corte por lâmina diamantada em geometria diametral da porção central dos corpos de prova, em dimensões de 5x3 cm. Logo após, foram cortadas em dimensões de 4x3x3. Com auxílio de

talhadeira, foram reduzidas em cubos e submetidos a estufa a 105°C por 24 horas, metalizadas com ouro em procedimento à vácuo utilizando o Q150R da Quorum Technologies Ltd., para melhoria do contraste das imagens a serem obtidas e submetidas à microscopia aos 28 dias.

### 3.3.4. Análise estatística

As propriedades da argamassa no estado endurecido foram avaliadas através de análise de variância (ANOVA). Os efeitos dos fatores foram determinados por teste de Tukey pela comparação entre valores calculados e tabelados da função de distribuição de probabilidade, com influência à um fator com 95% de confiança sobre as propriedades obtidas de: absorção por capilaridade e resistência à compressão, visando identificar a argamassa com os melhores resultados dessas características em relação ao teor de DC substituído.

### 3.4. Avaliação de compensação ambiental, viabilidade e sustentabilidade do produto

Foi realizada uma análise de cunho econômico e ambiental, em vista a compreender a viabilidade de negócio, proveniente da substituição parcial do cascalho de perfuração, um resíduo da indústria do petróleo em um insumo comumente utilizado na construção civil, a areia, corroborando com os preceitos da economia circular (MIES; GOLD, 2021). A avaliação foi conduzida em congruência com os resultados provenientes dos ensaios conduzidos no estado fresco e endurecido das argamassas produzidas. Os critérios quanti-qualitativos estão discriminados na

**Tabela 8.** Parâmetros de avaliação da compensação ambiental e sustentabilidade.

Fatores	Metodologia
Redução nos custos p/ m <sup>3</sup>	Cálculo de custo.
Economia Circular	Diagrama de <i>Loop</i> .

Fonte: Autor (2022).

Os dados utilizados para o cálculo da análise de custos foram provenientes do Sistema Nacional de Pesquisa de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI) da Caixa Econômica Federal (CEF) (CAIXA, 2022). Os valores obtidos foram com desoneração, ou seja, sem considerar os encargos sociais referentes a contribuição de 20% do INSS, para o mês de referência de fevereiro de 2022. Foi considerado o custo do m<sup>3</sup> para o item 370 (Areia Média – Posto Jazida/Fornecedor), retirado na jazida, sem considerar valores relativos ao transporte.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Rotas de impactos da disposição inadequada de cascalhos de perfuração

#### 4.1.1. Compostos químicos presentes no cascalho de perfuração

Por meio de ensaio para a obtenção de extrato solubilizado, o cascalho de perfuração desta pesquisa foi avaliado quanto aos níveis de compostos químicos presentes em sua composição para indicar possíveis impactos desses compostos em contato com o ambiente provável de descarte.

A Tabela 9 apresenta os principais compostos químicos presentes, sua concentração e uma breve avaliação desse quantitativo com base em observações na literatura e em normativos vigentes em âmbito nacional. Com isso, validando as informações com impactos que podem provocar aos sistemas ambientais, bem como no intuito de indicar a possibilidade de uso em argamassas de cimento Portland como alvo de encapsulamento.

**Tabela 9.** Características químicas do cascalho, concentração na amostra em relação à norma e correlações identificadas na literatura.

Composto	Concentração na amostra	Concentração na Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a)	Correlações identificadas na literatura
Cianetos	0,041	0,070	Ozdemir e Piskin (2012) avaliaram óleo galvanizado, e por meio de DRX não conseguiram por padrão metais pesados e cianeto, uma vez que a mineralogia do lodo galvânico era muito complexa. Além disso, a porcentagem em massa, inferior a 5%, fazia com que os compostos fossem difíceis de serem detectados. Wang et al. (2018), aproveitaram resíduos da pirólise de cascalhos de perfuração à base de petróleo de gás de xisto para a preparação de concreto aerado não autoclavado (ODPR), ao obter os resultados do texto de lixiviação a partir da substituição desse resíduo em 50% em massa, mostraram que o valor de cianetos (31,86 mg/L) estava abaixo do limite normalizado de 100 Mg/L. Norma GB8978-1996, da china. Os resultados também mostraram que ODPR tinha uma certa atividade pozolânica e do ponto de vista da técnica, não seria substância de contaminação ambiental.; O cianeto, pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), é considerado um constituinte perigoso, cuja características de periculosidade são a toxicidade e

Composto	Concentração na amostra	Concentração na Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a)	Correlações identificadas na literatura
Cloretos	2.399,20	250,00	<p>a reatividade. O limite máximo no ensaio de solubilização é de 0,07 mg/L.</p> <p>Por analogia temos que o teor de cloreto na água de amassamento, para concreto simples (sem armadura), podendo ser representativo também para a argamassa, é de 4.500 mg/L, segundo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009). Isso significa, teoricamente, que a concentração, mesmo que para um material diferente, não superaria o limite normativo.</p> <p>O teor de cloratos não deve exceder 0,2% no concreto simples, de acordo com a Tabela 4 da NBR 7211 (ABNT, 2019a) e o procedimento conduzido pela NBR 9917 (ABNT, 2009), para garantir os padrões de durabilidade. Isso vale para os agregados provenientes de regiões litorâneas, ou extraído de águas salobras ou com suspeita de contaminações naturais ou industriais. Os limites máximos podem ser obtidos pela ABNT NBR 9917 e ABNT NBR 14832.</p> <p>A difusão de cloratos e o seu transporte em materiais cimentícios é uma temática amplamente discutida, pois existe uma relação estreita com a durabilidade de produtos como concretos e argamassas. Logo, Jasielec et al. (2020), testaram uma solução numérica para esta reação, usando o método dos elementos finitos. As investigações, conduzida no cimento Portland comum e em cimento de alto-forno. O modelo desenvolvido foi comparado ao modelo de difusão clássico e coeficientes encontrados de difusão foram considerados apropriados. O trabalho apresentou parâmetros importantes que influenciam na longevidade de estruturas de concreto e, conseqüentemente, em argamassas.</p> <p>No trabalho de Meneses e Paula (2014), o valor médio de cloreto foi 1.561 mg/l, quando o limite máximo permitido pela norma é 250 mg/l. Logo, o desvio médio correspondeu a 6,244 vezes o limite da norma, o que gerou não conformidades em todas as amostras analisadas. Cabe-se mencionar que o trabalho se propunha a indicar alternativas para o descarte adequado de resíduos derivados das operações do setor de Petróleo no Oeste Potiguar. Os dados avaliados são de cascalhos provenientes de poços perfurados no campo de Canto do Amaro, concluída em 04/12/2009, feita por empresa interessada na caracterização de resíduo segundo parâmetros da NBR 10004 (ABNT, 2004a) constantes do processo de requerimento de licença de operação no 2008-021678/ TEC/LO-0387 ao</p>

<b>Composto</b>	<b>Concentração na amostra</b>	<b>Concentração na Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a)</b>	<b>Correlações identificadas na literatura</b>
			IDEMA, tendo como objetivo a instalação para recebimento e disposição final de resíduos situados no Município de Mossoró/RN.
Fenóis	0,002	0,010	<p>No trabalho de Pires (2009), foram utilizados materiais provenientes do Recôncavo Baiano para a produção de peças cerâmicas, estando entre eles cascalho de perfuração e solos da região. Os solos que serviram como matriz terrosa, ou seja, encapsulante do resíduo. Um deles, proveniente da Indústria de Cerâmicas FEDERBA, no ensaio de solubilização, apresentou limite superior ao máximo normativo permitido. Entre as 5 amostras de cascalho analisadas, apenas uma apresentou teores de fenol superior ao parâmetro máximo estabelecido em norma.</p> <p>No trabalho desenvolvido por Casali et al. (2018) os pesquisadores identificaram que argamassas produzidas com resíduo de areia de fundição fenólica, apresentaram menor concentração de ferro, fluoreto e maior de alumínio, cromo total e fenóis totais. Apontando a possibilidade de os aglomerantes terem encapsulado ou envolvido os componentes, não permitindo sua solubilização. Autores como Brito e Soares (2009) já apontavam aglomerantes na retenção física de contaminantes.</p>
Fluoretos	<0,5	1,5	<p>A norma ABNT 7211 (2019a) trata das especificações de agregados para concreto. No rol dos agregados miúdos, deve-se atentar, dentre outras impurezas, o teor de impurezas orgânicas, na NBR 7221 (ABNT, 2019a).</p> <p>O limite máximo no extrato para o ensaio de solubilização, no caso de Fluoretos, é de 1,5 mg/L. Neste caso, a concentração existente, não ultrapassa o limite. Cabe-se mencionar a solubilidade como a capacidade máxima da qual uma substância pode se dissolver em um líquido.</p> <p>Mendes, Effting e Schackow (2020) utilizaram resíduos do corte de mármore e graníticos (RCMG) para analisar a dosagem de argamassa autonivelante, no ensaio de solubilização realizado, o fluoreto apresentou concentração superior ao limite da NBR 10004 (ABNT, 2004a), contudo, ainda assim o resíduo se classificou como um resíduo Classe II- Não Inerte. E além disso, o fluoreto não uma substância tóxica, desta forma, não proporcionaria periculosidade ao resíduo.</p>
Nitratos	<1,1	10,0	<p>Por analogia tem-se o teor de nitratos na água de amassamento. Contaminações na água de amassamento por esses materiais podem alterar os tempos de pega e resistências do concreto. O limite de nitratos, indicados na Tabela 3 da referida norma</p>

<b>Composto</b>	<b>Concentração na amostra</b>	<b>Concentração na Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a)</b>	<b>Correlações identificadas na literatura</b>
			é de 500 mg/L. O ensaio químico para determinação da concentração desse material é dado pela ABNT NBR 15900-10 (ABNT, 2009c).
Sulfatos	444,8	250,0	O limite de sulfatos, indicados no item 4.3.2 da norma que trata da água de amassamento é de 2000 mg/L. O ensaio químico para determinação da concentração desse material é dado pela ABNT NBR 15900-7 (ABNT, 2009d). Com relação aos agregados utilizados, a ABNT NBR 7211 (2019a) estabelece que o limite máximo de sulfatos presentes no agregado utilizado deve ser <0,1% em relação à massa de agregados utilizada. O método de Ensaio segue a ABNT NBR 9917 (ABNT, 2009c).
Surfactantes	0,4	0,5	O trabalho de Mendes (2016) testou a viabilidade técnica do uso de um agente surfactante (Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio) como um aditivo incorporador de ar (AIA) na argamassa, visando melhorar características no estado fresco e endurecido. Os resultados apontaram que houve aumento no teor de ar incorporado da matriz, melhoria na trabalhabilidade, redução na sua massa específica e nos picos de hidratação do cimento. Contudo, houve redução no que tange as propriedades mecânicas e retardo no tempo de fim de pega.

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 9, nota-se que as concentrações que ultrapassaram o limite normativo foram de cloretos e sulfatos. Alguns tipos de compostos que utilizam cloreto, à exemplo do cloreto de potássio, são utilizados em fertilizantes e apesar de seu uso advir do intuito de repor nutrientes no solo, este também pode ocasionar salinização. Pereira et al. (2019), verificaram que excesso de alguns íons desencadeia uma série de distúrbios fisiológicos, tornando-se um potencial biocida para o solo.

Materiais sulfídricos, à exemplo dos sulfetos, quando presentes no solo e expostos de alguma outra maneira às condições aeróbicas, podem se oxidar e formar ácido sulfúrico. Como consequência, o valor de pH pode cair para valores abaixo de 3,0, tornando estes solos extremamente ácidos (SANTOS et al., 2018). Logo, a presença de materiais sulfídricos nos solos deve ser controlada, pois restringe severamente o seu uso devido aos teores de enxofre tóxicos à maioria das plantas e ao elevado nível de acidez provocado pela drenagem.



Na Tabela 10 encontram-se os demais elementos presentes na amostra, verificando-os quanto aos padrões normativos.

**Tabela 10.** Avaliação de concentração de demais elementos na amostra em relação aos padrões normativos.

Elemento	Concentração na amostra	Concentração na Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a)	Avaliação normativa
Alumínio	<0,4	Até 0,2.	Superou limite.
Arsênio	<0,005	Até 0,010	Não ultrapassou.
Bário	0,151	Até 0,700	Não ultrapassou.
Cádmio	<0,001	Até 0,005	Não ultrapassou.
Chumbo	0,003	Até 0,010	Não ultrapassou.
Cobre	0,031	Até 2,0	Não ultrapassou.
Cromo	<0,001	Até 0,050	Não ultrapassou.
Ferro	0,17	Até 0,30	Não ultrapassou.
Manganês	<0,005	Até 0,10	Não ultrapassou.
Mercurio	<0,0002	Até 0,0010	Não ultrapassou.
Prata	<0,005	Até 0,050	Não ultrapassou.
Selênio	<0,008	Até 0,010	Não ultrapassou.
Sódio	<0,08	Até 200,00	Não ultrapassou.
Zinco	0,03	Até 5,00	Não ultrapassou.

Fonte: Autor (2022).

A partir da avaliação da Tabela 10, nota-se que os teores de alumínio superaram o limite normativo. O alumínio natural faz parte das camadas de solo, principalmente os solos argilosos. Quando liberado, este permanece na forma trocável e desloca íons  $H^+$  adsorvidos no solo ou pode ir diretamente para a solução do solo. Estando na solução do solo, se for absorvido pelas plantas, pode causar sérios problemas para o desenvolvimento do sistema radicular, quando ultrapassa percentagens toleradas na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Logo, teores de alumínio externos aos naturais devem ser evitados pois reduz a disponibilidade de fósforo, enxofre e cátions (BARATTO, 2021).

Com relação à NBR 15900 (ABNT, 2009e) que menciona as concentrações máximas dos elementos químicos na água de amassamento, os teores de chumbo, sódio e zinco na amostra de cascalho de perfuração foram inferiores a 100, 1.500 e 100 mg/L (vide Tabela 10). Logo, mesmo não se tratando da água utilizada na mistura, supõe-se que este material, se adicionado, não colaboraria para superar os limites estabelecidos em norma, prejudicando o desempenho.

#### 4.1.2. Possíveis impactos solo, água e ar

Em vista a elucidar os efeitos práticos e partir como parâmetro para construção do estudo de impacto no solo da localidade foco, Mossoró-RN, traçou-se uma avaliação de diversos estudos, que correlacionam os possíveis impactos que podem ocorrer nos solos das regiões que recebem disposição de cascalho de perfuração. Tais informações estão dispostas na Tabela 11.

**Tabela 11.** Possíveis Impactos no solo.

<b>Aspecto</b>	<b>Tipo de Impacto</b>	<b>Impacto</b>
Geração e disposição de cascalho ou subprodutos	Ambiental	Alteração de características do solo nos entornos do poço (PAGE et al., 2013; LEONARD; STEGEMANN, 2010; SWIGART; HEO; WOLF, 2021). Impacto nos organismos por meio do consumo de substâncias tóxicas (SAMEDOV et al., 2011; KHALILOVA, 2015).
Risco no armazenamento temporário	Ambiental	Contaminação do ambiente terrestre no caso de vazamentos (BALL; STEWART; SCHLIEPHAKE, 2012; WISEN et al., 2019).
Risco à saúde	Saúde	Intoxicação e desenvolvimento de doenças ocupacionais por trabalhadores e população exposta ou acidentes envolvendo o manuseio (GARDNER, 2003; RANA, 2008; ADGATE; GOLDSTEIN; MCKENZIE, 2014). Risco direto e indireto de contaminação através da exposição ou consumo de produtos derivados de solos contaminados à população geral ou por animais (BAMBERGER, 2012; KRZYZANOWSKI, 2012).
Aumento da área de armazenamento	Econômico	Aumento dos custos de operação (UKOOA, 2002, COBB; IRVINE; FICHERA, 2019).
Extrapolação da capacidade de armazenamento	Econômico	Possível parada na produção (OGP, 2003).
Necessidade de contratação adicional de pessoal	Econômico	Aumento de custos. Geração de empregos (UKOOA, 2002, COBB; IRVINE; FICHERA, 2019).
Acondicionamento temporário do resíduo no solo ou em aterros.	Ambiental	Possível contaminação do solo e dos lençóis freáticos (ISAEV et al., 2007; KHALILOVA, 2013). Tornar o solo improdutivo, com altas taxas de compostos químicos (JOEL; AMAJUOYI. 2009; SOMEE et al., 2018).

Fonte: Autor (2022).

Evitar a disposição de cascalhos de perfuração, sem tratamento prévio, deve ser prioridade para evitar prejuízo aos sistemas ambientais, pois os compostos químicos nocivos presentes podem prejudicar a qualidade do solo, dificultando o crescimento de culturas, ou atingir os cursos hídricos superficiais e subterrâneos, através do solo ou da água de precipitação, sendo de interesse coletivo soluções viáveis de reuso desses resíduos.

Contaminações associadas às atividades de extração de petróleo estão presentes em todos os sistemas terrestres, seja no solo, na água ou na atmosfera. Quando se analisa o solo de áreas que receberam disposições de cascalho em relação aos das adjacências, nota-se alterações físicas, químicas, elétricas e a mineralógicas.

Arocena e Rutherford (2005), em seu estudo, avaliaram esses critérios em três solos do Canadá que receberam deposição de cascalho de perfuração, e verificaram alterações em propriedades como o teor de carbono total e em íons como o  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Além disso, condutividade elétrica foram maiores nos solos de locais onde ocorria deposição em relação ao controle. O aumento da condutividade elétrica, em solos da cidade de Mossoró-RN, principalmente os Argissolos, podem torná-los salinos, caso ocorra lixiviação de íons para as camadas subjacentes.

A degradação dos solos decorrente de depósitos de cascalho pode torná-los menos receptivos a culturas agrícolas e florestais. Resultados semelhantes, como o acréscimo de metais pesados (bário, cromo, chumbo e zinco), sódio, salinidade, pH e / ou hidrocarbonetos de petróleo foram confirmados por outros pesquisadores (CARLS; FENN; CHAFFEY, 1995; GUTLEB; HELSBERG; MITCHELL, 2002; SWIGART; HEO; WOLF, 2021).

Também pode ocorrer redução na infiltração, reduzindo a disponibilidade de água para as plantas e aumentando o escoamento superficial e a erosão do solo. Em solos argilosos pode ocorrer dispersão das partículas e desestruturação do solo, quando submetidos à altas concentrações de sais. O cascalho pode, portanto, limitar a retirada de águas pelas plantas devido à redução do potencial osmótico e da permeabilidade. Esses resultados foram também verificados por Andrade et al. (2014), Magalhães et al. (2014) e Freitas et al. (2015), quando do trato com DC.

Não obstante, em corpos hídricos, os impactos do descarte inadequado de cascalhos podem ser bem expressivos. Neste sentido, de forma análoga, a Tabela 12 apresenta os possíveis impactos que a deposição direta ou indireta de cascalhos de perfuração pode provocar em corpos d'água.

**Tabela 12.** Possíveis Impactos na água.

Aspecto	Tipo de Impacto	Impacto
Geração de cascalho na perfuração	Ambiental	Impacto nos organismos do entorno por meio, por exemplo, do consumo de substâncias tóxicas (BALL, STEWART, SCHLIEPHAKE, 2012). Alteração momentânea da qualidade da água no entorno (ROSSEL, 2012).
Depósito direto do cascalho ou subprodutos no solo	Ambiental	Possível contaminação dos lençóis freáticos por meio da infiltração e lixiviação (ONWUKWE; NWAKAUDU, 2012) Contaminação dos corpos hídricos superficiais através do carreamento provocado por precipitações (BAKKE et al., 2013; KENJEGALIEV et al., 2014). Dificuldade nos processos de osmose e retenção de água nos solos e absorção de água das plantas, especialmente em solos com textura argilosa (CROGNALE et al., 2020; SANDU et al., 2017).
Risco à saúde	Saúde	Consumo de água contaminada por animais e seres humanos (BILSTAD et al., 2013; SHARIF et al., 2017).
Vazamentos do resíduo	Ambiental	Possível contaminação do ambiente aquático (WANG, 2018).

Fonte: Autor (2022).

Na produção *onshore* os maiores riscos com cascalhos estão na disposição direta no solo, pois os compostos presentes no cascalho podem ser lixiviados pela precipitação que ocorrem nessas áreas e atingir os lençóis freáticos subterrâneos ou carreados aos corpos hídricos superficiais e assim comprometer a vida de diversos seres que habitam aquela fonte ou fazem seu uso para consumo e lazer.

Independentemente de qual a técnica de disposição utilizada, a consciência das vias de migração de poluentes e os riscos associados ao enterramento e/ou disposição direta de resíduos devem ser cuidadosamente considerados. Fatores como a profundidade do lençol freático na área de deposição e o tipo de solo ao redor e mudanças nos níveis de águas subterrâneas rasas e inundações que possam transferir esses contaminantes para solos adjacentes.

Por este motivo, parâmetros quanto às condições dos recursos hídricos na área de estudo, Mossoró-RN, são importantes para validar a mensuração de impactos. Tal fato foi também constatado por Sharif et al. (2017). Se atingirem os cursos hídricos, e conseqüentemente, a bacia hidrográfica local, do Rio Apodi-Mossoró, os hidrocarbonetos aromáticos presentes no

cascalho, podem imitar os hormônios, causando efeitos deletérios no desenvolvimento e na reprodução dos organismos vivos. Colborn et al. (1996) concluíram que resíduos de perfuração geram impacto em organismos aquáticos.

Em termos de poluição do ar, a incineração para a combustão e oxidação dos hidrocarbonetos no cascalho, pode ser uma seqüela direta à degradação do ambiente, mesmo que incineradores sejam frequentemente equipados com dispositivos de controle da poluição. A liberação de poluentes que fatalmente possam ocorrer pelos motores de combustão interna pode tornar o ar inseguro para humanos e animais e alguns de seus efeitos incluem dificuldades respiratórias, verificados por Sharif et al. (2017), além de danos à vegetação e acidificação do solo, que em Mossoró-RN pode prejudicar nos cultivos extensivos e de exportação de culturas como o melão, além de critérios térmicos, visto que sensação térmica é um problema, principalmente no ambiente urbano.

A liberação de sulfeto de hidrogênio, por exemplo, pode ser fatal para os expostos. Indiretamente, a poluição pode ocorrer em processos de tratamento como a lavagem com solvente, cujo método de recuperação mais convencional é a destilação, na qual é aplicada energia térmica maciça, criando uma emissão indesejada de poluentes atmosféricos (POYAI et al., 2020).

Nota-se que ainda que se deseje estabelecer uma maneira indireta de resolver os problemas causados pelo cascalho, novamente se recai no fardo da poluição ambiental, como consequência final aos tratamentos. Neste sentido, na Tabela 13, são elencadas as principais seqüelas ambientais na atmosfera, relacionados ao manejo do cascalho de perfuração.

**Tabela 13.** Possíveis Impactos na atmosfera.

Aspecto	Tipo de Impacto	Impacto
Transporte dos resíduos	Ambiental	Poluição atmosférica, emissão de gases nocivos (GOUW et al., 2014; AHAMMAD e MAHMUD, 2017) Poluição sonora (NISTOV et al., 2012; MEHMOOD, 2016).
Tratamentos no cascalho: incineração	Ambiental	Volatilização dos gases e compostos presentes no cascalho e fluido de perfuração (BREUER et al., 2014).

Fonte: Autor (2022).

Da mesma forma, a correta disposição dos cascalhos provoca impactos positivos ao ambiente e no contexto socioeconômico pode gerar fontes de renda, que são fatores desejáveis

à economia local. Por fim, construiu-se um resumo de interações entre os sistemas, mesclando seus impactos relacionados, apresentado na Figura 14.

**Figura 14.** Fluxograma de relações entre os principais impactos e os sistemas terrestres.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.1.3. Mensuração dos impactos e seus efeitos

A matriz de Leopold para avaliação dos impactos ambientais do cascalho de perfuração em todas as suas etapas de vida é apresentada na Figura 15.

Figura 15. Matriz de Leopold para impactos ambientais relacionados ao trato com os cascalhos de perfuração no Semiárido

COMPONENTE	FATORES AMBIENTAIS		PERFURAÇÃO			MANUSEIO E TRANSPORTE			DISPOSIÇÃO E DESTINAÇÃO							TOTAL		Impacto por componente	Impacto Total			
			Perfuração do poço	Derramamento de fluidos e infiltrações	Modificação da textura e estrutura do terreno	Intoxicação no manuseio	Modificação do clima	Pavimentação, ruído e vibrações	Transporte de cargas	Acondicionamento temporário do resíduo	Alteração da cobertura vegetal	Alteração do fluxo de água subterrânea	Alteração do padrão de drenagem	Operações de corte e aterro	Utilização de aterros sanitários	Armazenamento à céu aberto	Armazenamento com injeção no terreno			Alterações paisagísticas	Negativos	Positivos
FÍSICO	SOLO	Recursos Minerais	-8	-4	-2	/	-2	4	/	-1	1	/	/	-4	3	-9	-5	2	8	8	-977	
		Qualidade do Solo	-2	-2	-3	-2	-3	-4	-5	-4	-8	6	-5	-6	-6	-9	-8	-4	15	15		
		Formas do Terreno e erosão	-1	1	-6	3	-8	-8	4	4	-9	-5	-6	-5	-6	-7	6	5	10	10		
		Deposição (sedimentação e precipitação)	/	-3	-5	3	-6	4	6	-1	-9	3	6	5	-5	5	6	3	8	8		
		Adsorção (intercâmbio iônico)	/	-7	3	2	-5	5	/	-3	-9	6	6	5	-6	6	5	6	5	5		
		Compactação	/	2	/	/	5	5	/	1	6	/	/	5	-6	5	6	/	4	4		
	AGUA	Cursos superficiais	/	-9	/	-4	-4	2	-3	-3	-6	5	-5	-6	3	-9	-5	/	10	10	-1017	
		Cursos subterrâneos	-4	-8	8	-2	-4	2	4	-5	-6	-9	-7	5	6	-8	-9	5	10	10		
		Qualidade da água	-1	-8	7	-5	2	/	/	-6	-4	-2	3	6	-8	8	-6	6	8	8		
		Salinização de recursos hídricos	/	-6	6	/	/	/	/	-3	2	-8	6	5	-8	6	-9	8	6	6		
	ATMOSFERA	Qualidade do ar (gases e partículas)	/	/	/	/	-5	4	4	/	/	/	-5	-6	-9	6	5	/	4	4	-282	
		Clima e temperatura	/	/	-2	4	-9	6	4	/	-6	5	/	-6	6	-5	5	5	6	6		
	BIÓTICO	FLORA	Agricultura no semiárido	-8	6	/	-5	-3	8	-4	-9	-8	-6	-7	5	-9	-8	-5	11	11	-462	
			Espécies nativas	/	/	/	/	-8	6	4	4	6	8	6	5	-6	5	2	5	5		
FAUNA		Animais e insetos do semiárido	-2	-3	-5	5	-4	-2	-2	-4	-5	2	/	-6	-2	-7	3	5	11	11	-428	
		Microfauna	-2	-2	-5	-6	-8	-3	-3	1	-6	3	/	-6	-3	-8	2	6	11	11		
		Espécies em perigo	/	3	5	-6	-8	-5	2	1	3	/	/	-7	5	2	6	/	4	4		
ECONÔMICO	USO DA TERRA	Mineração e extração de materiais	5	7	/	/	5	6	/	/	/	-2	3	/	-1	3	/	2	6	-28		
		Deposição de materiais e resíduos	/	-6	-5	/	-6	6	/	-4	-5	4	-5	2	6	-8	3	-5	8		12	
		Manejo de resíduos	/	-8	3	5	-9	6	/	8	5	4	5	6	6	-8	5	5	5		11	
		Geração de Renda	9	7	/	3	6	6	6	6	2	2	5	6	8	9	8	/	0		12	
		Riscos à saúde	-7	-5	/	-6	4	5	4	-6	-3	4	/	5	5	-4	-9	5	7		7	

Fonte: Autor (2022).

A avaliação geral das atividades relativas ao ciclo do cascalho de perfuração na região do semiárido potiguar apresentou valores que variaram de baixo a impacto crítico. Isto era esperado, pois as atividades exploratórias impactam em vários níveis e em todos os sistemas e características inerentes, seja direta ou indiretamente.

Os fatores analisados foram indiretamente, por meio da literatura, para detecção dos fatores ecológicos representantes na matriz dos elementos naturais importantes do meio ambiente. A topografia do local, o solo, a água, a qualidade do ar, a vegetação e os animais foram avaliados através da investigação na literatura e alguns materiais de apoio previamente existentes, como análises de solo das agências de estudo. Os dados relativos ao cascalho foram obtidos dos ensaios realizados nas amostras. Correlacionou-se todas as etapas, desde a perfuração do poço (origem) até o destino dado a este material.

As principais variações de propriedade a propriedade, ocorreram no grupo de indicadores físicos, mais especificamente nos subcomponentes solo, água e atmosfera, variando entre -282 e -1017. A análise dos resultados encontrados denota que houve médias variações de magnitude, na maioria dos casos. Os impactos ambientais negativos de maior magnitude concentrados em um indicador couberam aos danos causados nesses sistemas ambientais.

Dessa forma, a análise dos fatores ambientais relacionados ao solo é bastante afetada pelas atividades e fatores vinculados à perfuração, transporte e disposição desse cascalho, que pode afetar diretamente em diversos componentes quanto à sua qualidade gerando prejuízo no intercâmbio iônico, que irá impactar diretamente à atividade da flora. No solo, a avaliação sugere que essas atividades podem provocar altos impactos de natureza negativa (-977).

Por sua vez, os impactos que influenciam no solo da região, acabam influenciando indireta e diretamente na captação de água dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos do local, influenciando localmente até regionalmente nesse subcomponente, sugere-se um nível de altíssima magnitude (-1017), resultando em crítico impacto ambiental. Para a atmosfera, os fatores foram avaliados quando às alterações da qualidade do ar e de clima e temperatura decorrente do trato com o DC, resultando em um impacto baixo neste sentido (-282).

Nota-se maior impacto na água e no solo, visto que esses sistemas dialogam entre si, pois qualquer alteração, mínima que seja, afeta ambos simultaneamente. Tal situação foi percebida também por outros autores que utilizaram a matriz de Leopold para análise de impactos decorrente do trato com resíduos (GEBLER; LONGHI, 2018; FALK et al., 2019).



Também foram avaliados indicadores para gerar um valor numérico para os impactos bióticos (na flora e fauna da região) e econômicos, decorrente do uso da terra que dá geração ao cascalho, considerando o ciclo de vida desse material e como este impacta de forma positiva à economia local e regional, quando da geração de empregos e fontes de renda direta e indireta. O valor determinado quanto aos componentes de fauna e flora foram, respectivamente, -462 e -428. Pode-se concluir que nesses sistemas ocorre médio impacto.

Nos impactos de natureza socioeconômica, houve impactos positivos, principalmente da geração de renda. No entanto, o impacto final resultante de todos os subcomponentes e fatores resultou em um valor negativo (-28), que representa um impacto mínimo negativo, decorrente principalmente das relações que interferem à saúde pública e dos trabalhadores relacionados à essa indústria. No entanto, o valor de impacto evidencia que do ponto de vista socioeconômico, a geração de cascalhos não promove tantas alterações sociais negativas. Evidenciando os motivos para que a preocupação ambiental das atividades de perfuração sejam alvo em relação aos desastres e acidentes e não com a geração de resíduos propriamente.

## 4.2. Caracterizações dos materiais

### 4.2.1. Composições granulométricas dos agregados

Os resultados da composição granulométrica da areia, do cascalho de perfuração e das misturas estão expostos na Tabela 14 e suas respectivas curvas granulométricas encontram-se na Figura 16.

**Tabela 14.** Análise granulométrica dos agregados utilizados.

Abertura da peneira (mm)	% retida						% retida acumulada					
	NS	DC	M20%	M25%	M30%	M35%	NS	DC	M20%	M25%	M30%	M35%
4,75	2,1	1,1	15,8	12,8	11,5	10,8	2,1	0,0	15,8	12,8	11,5	10,8
2,36	7,1	5,8	25,4	24,5	22,6	21,3	9,2	2,2	41,2	37,3	34,0	32,2
1,18	17,8	11,6	13,6	12,5	13,4	12,4	27,1	11,8	54,8	49,8	47,4	44,6
0,6	34,9	16,3	15,5	16,0	15,8	15,7	61,9	25,6	70,3	65,8	63,2	60,3
0,3	28,9	21,1	15,7	17,3	17,5	17,5	90,8	43,8	85,9	83,1	80,7	77,9
0,15	8,3	28,6	8,4	9,8	10,9	12,5	99,1	68,7	94,3	92,9	91,6	90,4
Fundo	0,9	30,8	5,7	7,1	8,4	9,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

NS- Areia Natural; DC- Cascalho de perfuração; MX%- Mistura do teste C com X% de incorporação do DC ao invés da NS.

Fonte: Autor (2022).

Foi notado que a NS possuía composição granulométrica diferente do DC e das respectivas misturas dos agregados particionados nas quantidades relativas ao teste C junto ao cascalho nas quantidades de 20, 25, 30 e 35%. No tocante aos materiais individuais, a areia apresentou frações de maiores dimensões, com maior quantidade de material retido nas peneiras de 1,18 mm a 0,3 mm, enquanto o cascalho detinha uma granulometria mais fina, concentrando maior quantidade nas peneiras de 0,15 mm e fundo. Desta forma, o DC apresentou grãos menores quando comparado a NS.

Ao analisar a influência do percentual de substituição da NS pelo DC nas composições predefinidas do Teste C, verifica-se na Figura 16, que as misturas que contém DC possuem retas com menor ângulo de inclinação, sugerindo que sua substituição proporciona uma melhor distribuição dos grãos. Contudo, visando classificar as curvas granulométricas das misturas em uniforme e desuniforme, usou-se o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), definido pela Equação 2.

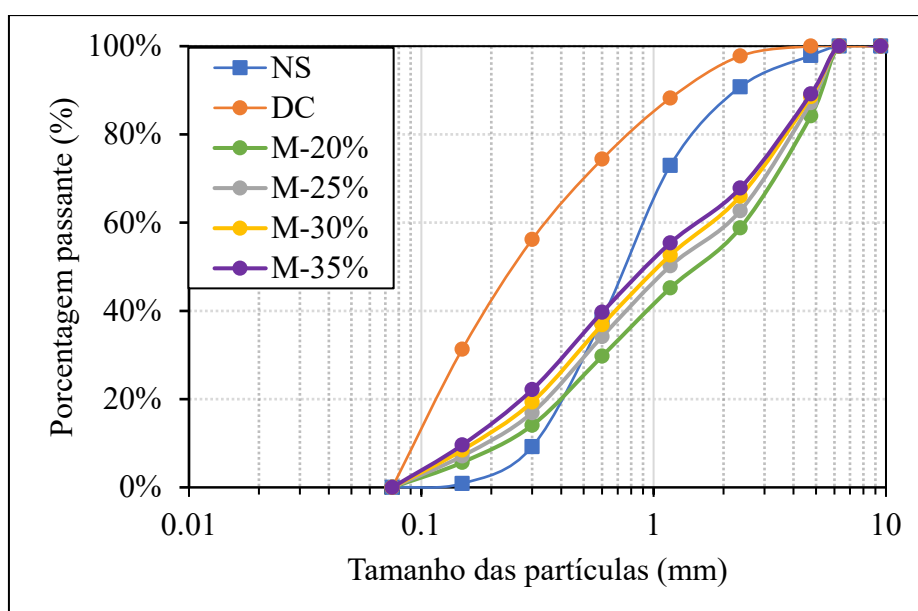
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$D_{60}$  e  $D_{10}$  – correspondem à abertura da malha de peneira em que passam 60 e 10%, respectivamente, em massa do material total peneirado, obtido na curva granulométrica.

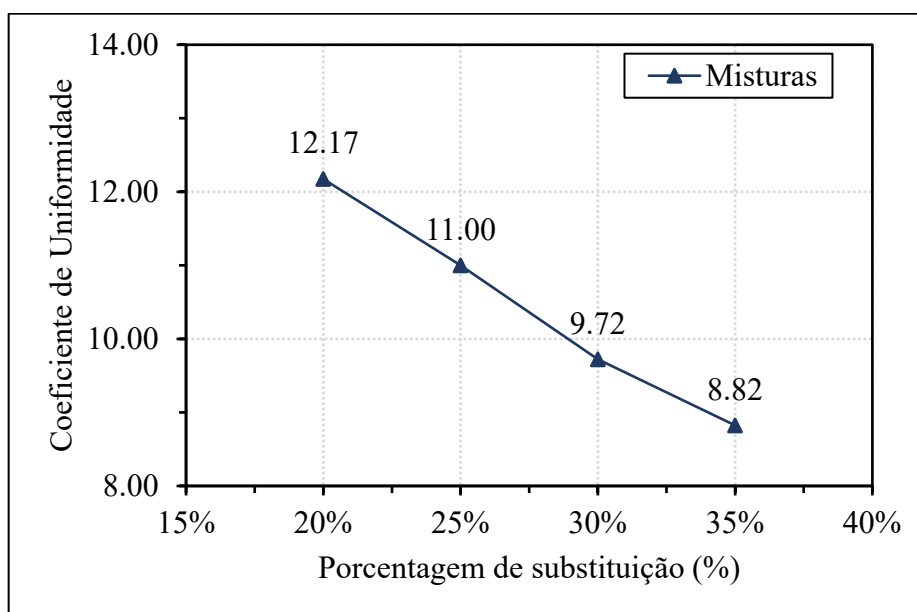
Considera-se, para fins de análise, que o agregado é muito uniforme quando possui  $C_u < 5$ , de uniformidade média se  $5 < C_u < 15$  e, menos uniforme, se  $C_u > 15$  (CAPUTO, 2015). Os coeficientes de uniformidade são mostrados na Figura 17.

**Figura 16.** Curvas granulométricas da areia, cascalho de perfuração e misturas com agregados e cascalho de perfuração nas porcentagens de 20, 25, 30 e 35%.



Fonte: Autor (2022).

**Figura 17.** Coeficiente de uniformidade da mistura dos agregados utilizados na produção das argamassas em função do percentual de substituição de cascalho de perfuração.



Fonte: Autor (2022).

Verificando os resultados apontados na Figura 17, percebe-se que todas as composições da mistura dos agregados apresentam coeficiente de uniformidade (CU) superior a 5 e inferior a 15 e, portanto, podem ser classificadas, em relação ao seu comportamento granulométrico, como sendo medianamente uniformes. Verifica-se adicionalmente, por meio da Figura 16, que a transição das misturas com cascalho adicionado produz uma redução no valor do diâmetro efetivo (0,23mm – 25% de substituição; 0,17- 35% de substituição), evidenciando que as misturas estão se tornando mais uniformes.

A substituição de DC a partir de 20%, resultou em redução linear do CU. Para as misturas com o agregado particionado, entre as substituições de 25 e 30%, ocorreu diminuição linear de 11,63%. Esta redução do coeficiente de uniformidade é devida à quantidade de finos incorporados e às frações retidas das peneiras de 2,36 e 4,75mm, incorporadas no Teste C, a fim de melhorar o empacotamento, que podem tornar o material mais uniforme. Para 35% de substituição, novamente ocorreu diminuição em relação à substituição de 30%, cujo valor foi de 9,25%. A variação do total do CU, na substituição de 35% em relação à de 20% foi de 27,52%. O CU para a areia em seu estado natural foi igual a 3,0 (três) e para o cascalho in natura, 3,5 (três e meio), indicando tratar-se, portanto, de materiais naturais.

O decréscimo no valor do CU indica, portanto, que para as composições estudadas, o aumento na substituição parcial de DC proporciona uma distribuição bem graduada, considerando-se os agregados particionados de acordo com o Teste C, aproximando os valores ao coeficiente com maior uniformidade, corroborando com melhor empacotamento. No

trabalho desenvolvido por Santos et al. (2015), os autores perceberam que o cascalho submetido ao peneiramento possuía distribuição mais uniforme, evidenciando a distribuição de tamanho de partículas contínua, possibilitando maior interação. Além disso, observou-se que grande parte das partículas projetava a área quase circular.

#### 4.2.2. Propriedades físicas dos agregados

Na Tabela 15 encontram-se resultados da caracterização física da NS e do DC, a partir do qual se pode observar que os materiais estudados possuem características diferentes. Esses resultados são esperados, pois são agregados obtidos de diferentes maneiras, ou seja, um é extraído naturalmente dos rios e o outro é obtido da perfuração de poços de petróleo, respectivamente.

**Tabela 15.** Propriedades físicas da areia e cascalho in natura.

<b>Propriedades</b>	<b>NS</b>	<b>DC</b>
Dimensão máxima (mm)	4,75	2,36
Módulo de finura (MF)	2,9	1,52
% de finos (<0,15 mm) (%)	0,87	31,31
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,33
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	0,81
Porosidade (%)	99,01	99,01

Fonte: Autor (2022).

Cabe-se ressaltar que apesar das diferenças entre as propriedades físicas da NS em relação ao DC, não torna a perspectiva de substituição inviável, visto que o segundo material, com características que indicam menor tamanho de partícula, contribuirá no empacotamento das partículas da argamassa produzida, podendo influenciar nos aspectos de resistência, durabilidade e sustentabilidade do material.

De acordo com a ASTM C144 (ASTM, 2018), norma americana que classifica agregados para argamassa, em termos de classificação e com base no módulo de finura, a areia pode ser classificada como um agregado de granulometria média, enquanto o cascalho tem granulometria fina. Apesar da dimensão máxima da areia ser de 4,75mm, visto que a argamassa produzida tem a finalidade de promover a incorporação do cascalho de perfuração, por meio de encapsulação desse material no processo de secagem e formação dos produtos de hidratação da argamassa, as partículas maiores não constituiriam um problema, mesmo que se apresentasse uma superfície rugosa e rugosa do revestimento. Contudo, o material mais fino, como é o caso do cascalho de perfuração, requer mais água para se realizar a mistura.

Ao mesmo tempo, outro aspecto significativo é a quantidade de finos presentes, determinada neste estudo pela passagem do material na peneira de 0,15 mm (#100). Constatou-se, então, que o DC apresentou um teor finos maior (31%) em relação à NS (Tabela 15). Esses resultados são esperados e evidenciados pela composição granulométrica e origem do cascalho de perfuração. O alto teor de finos pode implicar em misturas que venham a demandar maior quantidade de água e, conseqüentemente, em argamassas com desempenho inferior tanto no estado fresco quanto no endurecido.

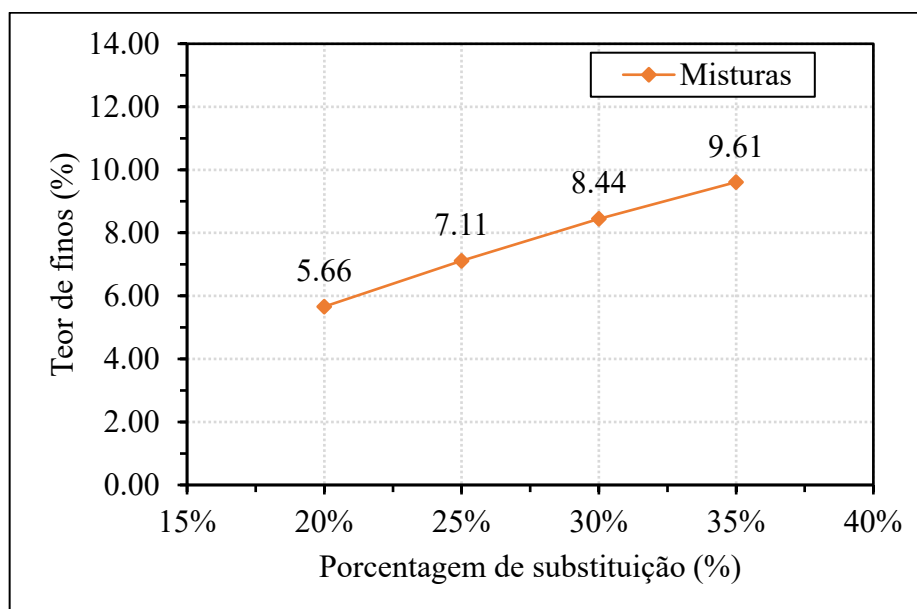
A partir dos resultados da composição granulométrica das misturas dos agregados (Tabela 16), foram obtidos seus respectivos teores de finos, conforme se observa na Figura 18.

**Tabela 16.** Características físicas das misturas utilizadas

Propriedades	M-20%	M-25%	M-30%	M-35%
Dimensão máxima (mm)	4,75	4,75	4,75	4,75
Módulo de finura (MF)	3,62	3,42	3,28	3,16
% de finos (<0,15 mm) (%)	5,66	7,11	8,44	9,61

Fonte: Autor (2022).

**Figura 18.** Teor de finos (<0,15 mm) das composições com 20%, 25%, 30% e 35% de cascalho de perfuração em relação à areia natural.



Fonte: Autor (2022).

As composições das misturas possuem maior quantidade de finos em relação à referência, devido às menores dimensões do DC. No geral, a incorporação do DC resultou no aumento da quantidade de finos, apesar da construção do modelo de empacotamento considerando faixas granulométricas específicas de areia com maior granulometria que foram

adicionadas. Os finos, mesmo sendo considerados por diversos autores como a principal razão para o surgimento de fissuras em argamassas, pode melhorar a zona de transição entre a matriz e o agregado e contribuir para a maior compacidade das misturas (DUAN et al., 2013; SILVA; BRITO; DHIR, 2016; FERREIRA et al., 2019).

O DC apresentou menor massa específica e unitária em relação ao que comumente é encontrado na literatura para a NS, o que também foi observado por outros autores, incluindo Fialho (2012) e Calmon et al. (2017). A maior massa unitária do NS pode ser atribuída ao formato de seus grãos, que são mais arredondados que os do DC (angulosos e alongados), o que por sua vez proporciona melhor preenchimento dos vazios devido ao menor atrito, proporcionando maior capacidade de rolamento de partículas e, portanto, superior massa unitária. A menor massa específica do DC é esperada, por se tratar de um material com propriedades e composição mineral diferenciadas, em que se destaca a alta porosidade dos materiais que a compõem, principalmente as rochas de origem calcárias.

Os resultados de massa específica obtidos nessa pesquisa são semelhantes aos obtidos por outros autores ao estudarem a incorporação do DC em materiais cimentícios, à exemplo de Aboutabikh, Soliman e El Naggari (2016), cujo valor encontrado foi de 2,23 g/cm<sup>3</sup> e muito se aproxima dos trabalhos que mencionam agregados de origem calcária, como o de Assis e Melo (2014), cujo valor determinado foi de 2,20 g/cm<sup>3</sup>. No entanto, o valor é inferior ao obtido por Fialho (2012), com massa específica de 2,58 e 2,67 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 1,19 e 1,16 g/cm<sup>3</sup> para duas fases de perfuração, e são superiores ao de superior ao de Calmon et al. (2017), no qual a massa específica foi de 2,58 g/cm<sup>3</sup>.

Essas variações ocorrem devido à grande heterogeneidade de resíduos obtidos, visto que cada ambiente possui características litológicas distintas. A massa específica do DC tem relação direta com os materiais constituintes e valores menores de massa específica desse material, que podem estar relacionados à alta presença de finos e pó do aderido aos grãos. A alta porosidade aumenta a capacidade de absorção de água do DC, o que influi na resistência mecânica, nas propriedades físicas e na massa específica aparente dos concretos e argamassas (ONUAGULUCHI; PANESAR, 2014; ANGELIM et al., 2017).

#### **4.2.3. Propriedades físicas do cimento**

Visando utilizar um cimento que possui maior teor de clínquer e sem adições pozolânicas em sua composição, optou-se pelo uso do Cimento Portland CP V – ARI (alta resistência inicial), cujas informações das características físicas estão dispostas na Tabela 17.

**Tabela 17.** Características físicas do Cimento Portland CP V- ARI

<b>Propriedades</b>	<b>Resultado</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,05
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5121,30
Índice de Finura (%)	1,33
Início de pega (min)	82,11
Fim de pega (min)	133,40
Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	16,05
3 dias	24,14
7 dias	31,61

Fonte: Autor (2022).

Os resultados das características físicas do aglomerante, obtidas neste estudo, são semelhantes aos valores determinados por outros pesquisadores para o CP V-ARI RS, a exemplo de Teixeira (2020) cujo valor de massa específica foi de 3,06 g/cm<sup>3</sup>, mas inferior ao obtido por Castro, Libório e Pandolfelli (2011), cujo valor foi de 3,16 g/cm<sup>3</sup>. Os valores das outras características físicas também são indicativos válidos quando comparados em relação aos valores comumente fornecidos pelo fabricante e indicados na literatura (CORINALDESI; MAZZOLI; MORICONI, 2011; HALBINIAK et al., 2020; TEIXEIRA, 2020).

#### 4.2.4. Granulometria a laser do cimento

Com o objetivo de avaliar o tamanho das partículas do cimento, comumente inferiores a 150 µm, realizou-se o ensaio da granulometria a laser, cujos resultados estão indicados na Tabela 18 e na Figura 19.

**Tabela 18.** Distribuição granulométrica do cimento

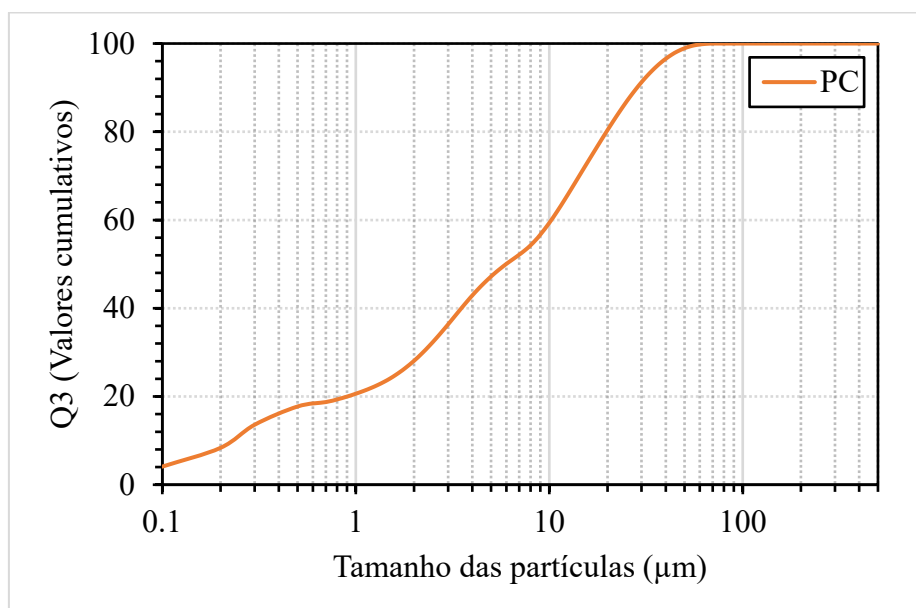
<b>Elemento</b>	<b>D10</b>	<b>D50</b>	<b>D90</b>	<b>D médio</b>
CP V-ARI RS	0,24 µm	5,71 µm	28,11 µm	9,03 µm

CP V-ARI RS – Cimento Portland do tipo V de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos; D10, D90- Diâmetros de corte da curva de distribuição acumulada em 10% e 90%, respectivamente; D50, D médio- Diâmetros correspondente a mediana e média da distribuição de partículas, respectivamente.

Fonte: Autor (2022).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 18 e a curva granulométrica da Figura 19, constata-se conforme esperado, que o cimento é o material de menor granulometria e possui curva com comportamento contínuo.

**Figura 19.** Granulometria a laser do CP V-ARI RS.



Fonte: Autor (2022).

Partículas de diferentes tamanhos resultam em composição mais compacta da mistura (empacotamento das partículas), portanto, além de aumentar a densidade e a resistência à compressão da matriz, reduz a absorção de água e a porosidade, mesmo a atividade pozolânica do material seja baixa (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; HAFID et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018).

#### 4.2.5. Formato e textura superficial

Com relação a forma das partículas (Figura 20), a areia possui formato esférico e estrutura maciça e o cimento lamelar, já o cascalho apresenta forma esférica e diversos tamanhos, alguns com superfície lisa, outros com superfície rugosa, conforme microscopias realizadas por (FIALHO, 2012; ABOUTABIKH et al., 2016; WANG et al., 2018; LIU et al., 2018). Calmon et al. (2017) utilizaram resíduos de cascalho de perfuração in natura oriundo das atividades de perfuração de poços no Brasil, como substituto parcial do agregado miúdo em concreto, e constataram por microscopia que, as partículas finas tinham formatos semelhantes das partículas do cascalho utilizado nesta pesquisa, ou seja, diferentes formas e tamanhos, sendo esse resultado justificado pelo tipo de ferramenta utilizada na perfuração.

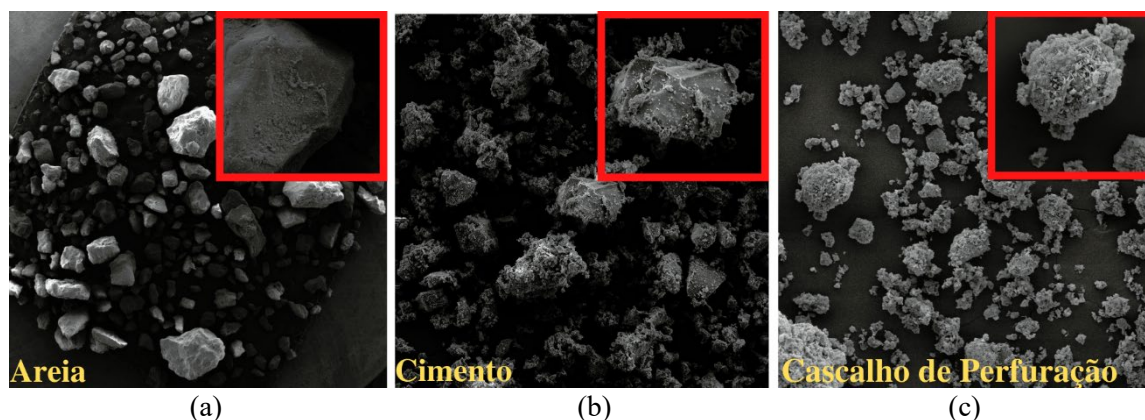
A Figura 20a ilustra o MEV da areia para 30 e 300x (em detalhe), enquanto a Figura 20b ilustra o MEV do cimento e a Figura 20c do cascalho de perfuração em 1000 e 4000 (em detalhe). A partir dessas imagens, verifica-se que os grãos de areia são esféricos e os de cimento



são lamelares com material fino aderido em sua superfície, enquanto os grãos de cascalho possuem formato aproximadamente esférico, com partículas aglutinadas e material fino aderido à superfície.

O cascalho foi utilizado neste estudo como substituto parcial da areia e, portanto, suas propriedades foram analisadas como fator que influencia as propriedades físicas da argamassa produzida. O ensaio de microscopia desenvolvido por Thongsanitgarn et al. (2014) no pó de calcário corrobora com a morfologia desse material com o cascalho de perfuração utilizado nesse estudo, derivado da Folha Mossoró, que engloba rochas mesozoicas e cenozoicas relacionadas à Bacia Potiguar, dentre elas, o calcário.

**Figura 20.** MEVs das partículas da areia, cimento e do cascalho de perfuração.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.2.6. Análise química e mineralógica

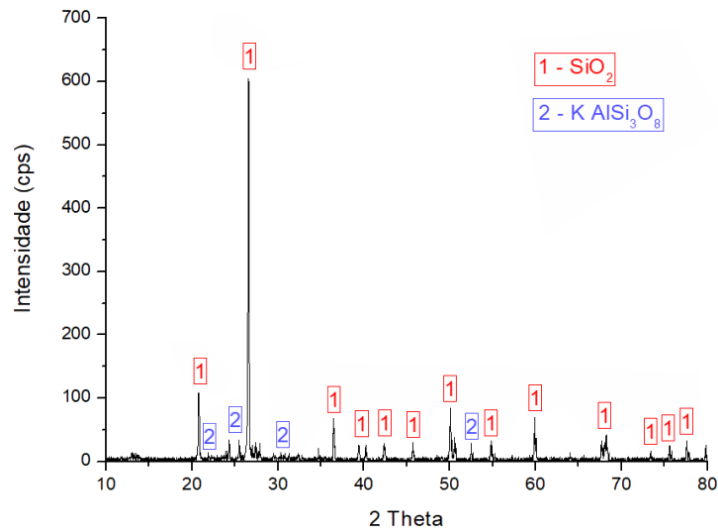
As interpretações análises de DRX estão ilustradas nas Figuras 21, 22 e 23. Os resultados efetuados na areia natural sugerem a presença de majoritariamente de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), também conhecido como sílica e picos de feldspatos alcalinos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), principalmente o ortoclásio e o microclínio (Figura 21). A forma cristalina mais comum do dióxido de silício é o quartzo, mineral abundante neste agregado e presente no silicato de cálcio hidratado (CSH), principal fase do cimento Portland hidratado.

Enquanto no cimento foi sugerida a presença de silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), conforme se verifica nos picos da Figura 22. O silicato tricálcico promove aumento da bioatividade e nas propriedades mecânicas do cimento. No entanto, a adição de grandes quantidades eleva o pH local em estágios iniciais, o que retarda a precipitação da hidroxiapatita e produz perda da resistência mecânica (ALONSO; CARRODEGAS; SANTOS, 2011; DUARTE et al., 2018).

No cascalho de perfuração in natura ocorreu a presença de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), também denominado de calcita (Figura 23), consistindo em um tipo de sal praticamente insolúvel em água, por este mesmo motivo os ensaios de caracterização que tratavam da massa específica foram de tão difícil execução, sendo necessário utilizar solução de álcool absoluto.

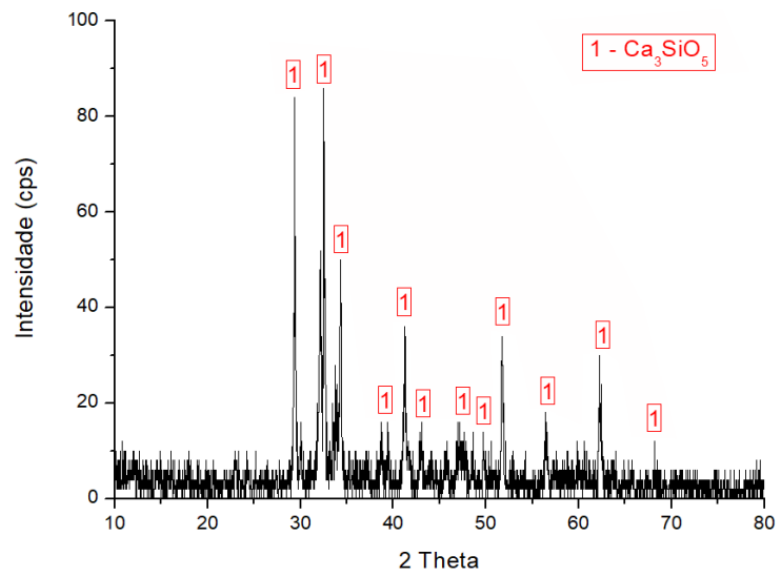
Além disso, observou-se presença de dióxido de silício, presente também na areia e de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), composto preponderante na composição da cal hidratada, sendo um dos principais componentes da argamassas de assentamento e revestimento. Analogamente, o hidróxido de cálcio é um composto comum nas reações de hidratação do cimento, proveniente da maior quantidade de cálcio oriunda da composição química do CP V ARI RS.

**Figura 21.** Difratometria da amostra de areia natural.



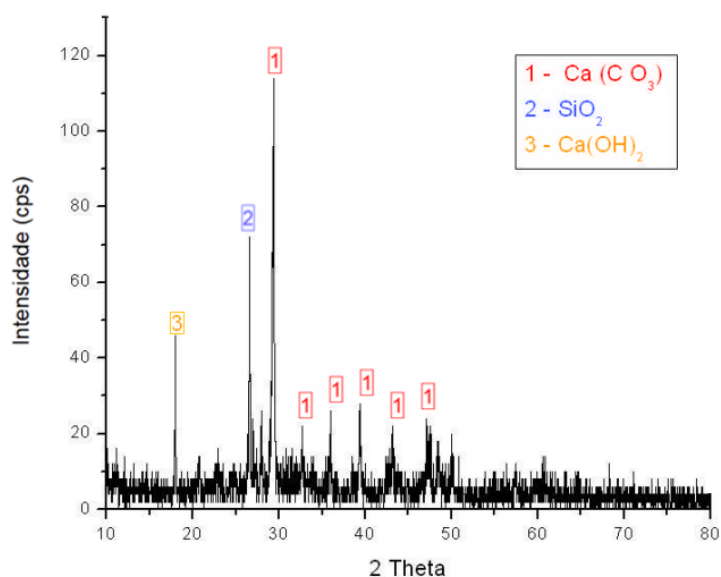
Fonte: Autor (2022).

**Figura 22.** Difratometria da amostra de Cimento Portland CP V-ARI RS.



Fonte: Autor (2022).

**Figura 23.** Difratometria da amostra de cascalho de perfuração in natura.



Fonte: Autor (2022).

A presença de carbonato de cálcio no cascalho demonstra seu teor calcário e é derivado especialmente da formação geológica da qual o cascalho é concebido. Este também é um mineral inorgânico quimicamente inerte, triturado e dimensionado para uso em fluidos de perfuração para aumentar a sua densidade. Partículas do tamanho de carbonato de cálcio, juntamente com polímeros, controlam a perda de fluido dos reservatórios. O carbonato de cálcio insolúvel é o subproduto precipitado dos tratamentos usados para remover  $\text{Ca}^{+2}$  ou  $\text{CO}_3^{-2}$  pela adição de outros íons (SCHLUMBERGER, 2022).

Tais resultados são convergentes com as análises de FRX, pois o dióxido de silício (83,80%- areia; 12,61%- cimento; 11,74%- cascalho) e óxido de cálcio (68,57%-cimento; 48,14%- cascalho), representaram as maiores porcentagens em algumas composições dos materiais, conforme as Tabelas 19, 20 e 21. Óxidos de ferro e alumínio também estão presentes nas composições químicas da areia, no cimento e no DC.

**Tabela 19.** Resultados da análise química da amostra de areia com perda ao fogo (P.F).

Óxidos	(%)
SiO <sub>2</sub>	83,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,57
K <sub>2</sub> O	3,63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74
CaO	0,69
SO <sub>3</sub>	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,12

<b>Óxidos</b>	<b>(%)</b>
ZrO <sub>2</sub>	0,04
SrO	0,03
Rb <sub>2</sub> O	0,01
CuO	0,01
<b>P.F.</b>	<b>24,0</b>

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 20.** Resultados da análise química da amostra de Cimento Portland CP V-ARI RS, com perda ao fogo (P.F).

<b>Óxidos</b>	<b>(%)</b>
CaO	68,57
SiO <sub>2</sub>	12,61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,86
SO <sub>3</sub>	2,33
MgO	1,89
K <sub>2</sub> O	0,71
MnO	0,22
TiO <sub>2</sub>	0,22
SrO	0,04
ZrO <sub>2</sub>	0,02
<b>P.F.</b>	<b>4,59</b>

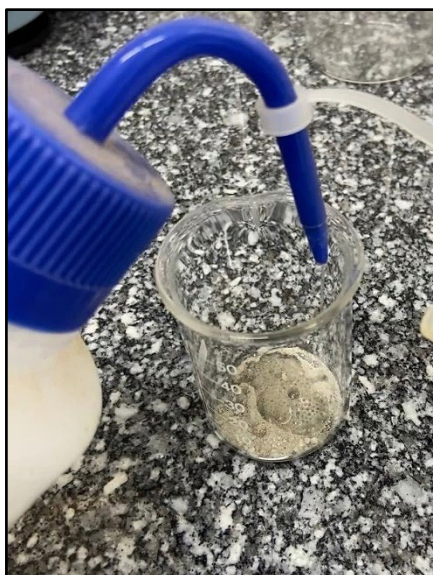
Fonte: Autor (2022).

As amostras analisadas apresentaram elevados teores dos óxidos de silício, variando de 11,74 a 83,80%, e de alumínio, variando de 3,24 a 10,57%. Esses valores indicam a presença de argilominerais e minerais acessórios (FIGUEIRÊDO et al., 2019). A relação de massa entre SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para as amostras é de (7,92- areia; 3,26 – cimento; 3,62- cascalho), mais elevadas que as encontradas para amostras com pureza de caulinita (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,18) e montmorilonita (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,36), o que é indicativo da presença do mineral quartzo, de acordo com Silva et al. (2017). A relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para a amostra desse estudo foi superior ao identificado em outras amostras de cascalho de perfuração de outros estudos (IBRAHIM; YAO; DIGBEHI, 2020). Valores altos dessa relação e concordância dos resultados do DRX e FRX revelam a presença dos minerais siliciosos, em especial o quartzo e pode indicar pequenas quantidades de argilas do tipo 2:1, como esmectita e ilita (SCRIVENER et al., 2016).

A grande quantidade de CaO presente no DC, conforme apresentado na Tabela 21, foi indicado por outros autores que trabalharam com cascalhos da bacia potiguar, correlacionando esse teor principalmente das rochas carbonáceas dos reservatórios petrolíferos da bacia sedimentar potiguar (MEDEIROS et al., 2013; APOLÔNIO; AMORIM; LEAL, 2020). Para a

amostra desse estudo, tal reação foi confirmada pelo teste de submissão ao contato com ácido clorídrico (a 10%), conforme a efervescência apresentada na Figura 24.

**Figura 24.** Adição de ácido clorídrico ao cascalho.



Fonte: Autor (2022).

Este composto pode provocar na argamassas redução da porcentagem de dióxido de silício, em face do possível aumento de óxido de cálcio, derivado do cascalho na mistura, principalmente no traço T(%DC)/65. Além disso, essa mudança pode indicar a evolução da hidratação do cimento nas argamassas, formação de CSH e, em específico, a formação de portlandita e calcita, como possível influência do DC, já presente em sua composição (BEUTLER; LUZ; BONINI, 2020).

**Tabela 21.** Resultados da análise química da amostra de cascalho de perfuração com perda ao fogo (P.F).

Óxidos	(%)
CaO	48,14
SiO <sub>2</sub>	11,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,24
SO <sub>3</sub>	1,33
K <sub>2</sub> O	0,71
MnO	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,22
SrO	0,09
CuO	0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
Br	0,04
PbO	0,03

<b>Óxidos</b>	<b>(%)</b>
ZnO	0,03
ZrO <sub>2</sub>	0,01
Rb <sub>2</sub> O	0,01
<b>P.F.</b>	<b>28,37</b>

Fonte: Autor (2022).

Sugere-se que a presença do óxido de magnésio verificada no DC não é prejudicial à argamassa quanto a expansões tardias, pois são compatíveis com a porcentagem existente no cimento. No entanto, outros compostos químicos tóxicos foram identificados, mesmo que em pequenas quantidades (abaixo de 0,1%), como os óxidos de chumbo, rubídio e os dióxido de zircônio e titânio, por exemplo, que podem provocar efeitos deletérios nas argamassas. O intuito deste trabalho é, inclusive, incorporar estes compostos, para evitar o seu contato com o ambiente.

Paralelamente, os materiais avaliados foram submetidos à perda ao fogo (P.F.), submetidos até 1000°C por 60 minutos. Os resultados apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21 demonstram que o cimento foi o material que possuiu menor perda de massa (4,59%), seguido da areia (24,0%) e do cascalho (28,37%). A decomposição de massa do cascalho foi aproximadamente seis vezes maior que a do cimento. Uma possível explicação para o aumento da porcentagem de perda ao fogo pode estar relacionada a elevada presença de C e pela elevada quantidade da matéria orgânica presente (MENDONÇA; FERREIRA; PAVAN, 2017; TORRES et al., 2018).

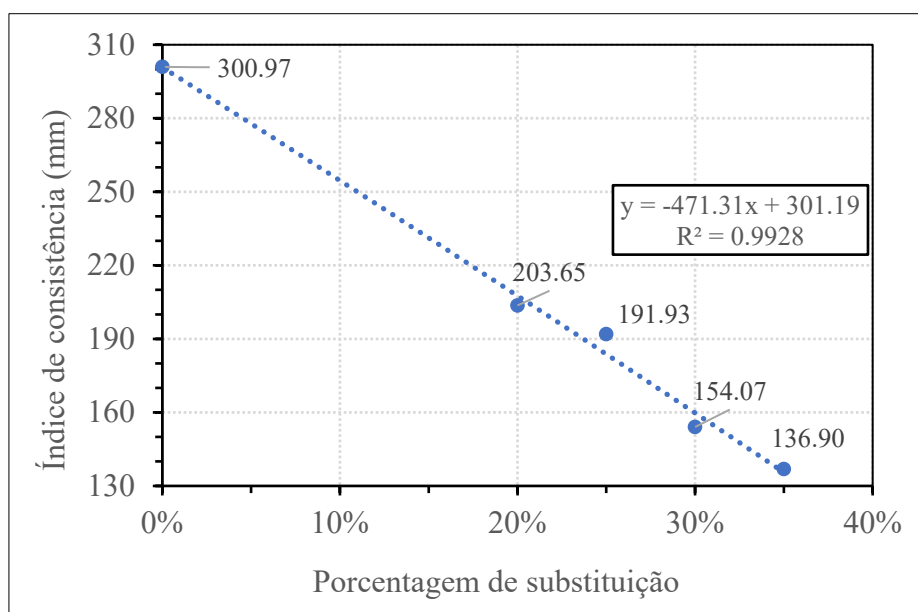
### **4.3. Caracterização das argamassas**

#### **4.3.1. Consumo de água**

A consistência da argamassa de referência foi fixada inicialmente em 300mm, devidos a testes realizados previamente com a mistura, visando garantir a fluidez da mistura contendo a substituição. No estado fresco foi verificado o espalhamento das argamassas produzidas através do ensaio consistência, a partir da utilização da mesa de consistência. Mediante a Figura 25, pode-se verificar as consistências das argamassas produzidas durante o ensaio.

Diante desses resultados, os traços com substituição que tiveram melhores espalhamentos foram aqueles com substituições de 20 a 25% de DC, visto que apresentaram reduções menores na consistência. A mistura com melhor comportamento, nesse critério, foi a mistura de 20%, apesar de não ser a mistura que apresente melhor empacotamento.

**Figura 25.** Consistência dos traços produzidos em relação ao percentual de substituição de DC em relação à NS.



Fonte: Autor (2022).

O fato da consistência reduzida nos traços com maior teor de resíduo incorporado pode ser atribuído ao formato das partículas, pois partículas que possuem pó aderido superfície, como o DC, podem aumentar o atrito que existe entre elas. O tamanho menor do DC em relação à areia, atrelado à presença de pó e sua alta porosidade, identificada no MEV, também pode ter afetado essa propriedade, pois partículas finas e porosas tendem a aumentar o consumo de água, podendo inclusive aumentar o montante de grãos não hidratados (MURTAZAIIEV et al., 2015) e diminuir a retenção de água (NENO; BRITO; VEIGA, 2014).

Em complemento, relacionado à dificuldade de hidratação dos grãos de cascalho, pode-se citar que a Formação Jandaíra, formação geológica deposicional da qual o cascalho de perfuração obtido neste estudo foi coletado, é composta majoritariamente por calcário, rocha sedimentar com altos teores de carbonato de cálcio e com alta capacidade selante, fundamental para o acúmulo de óleo (BEZERRA, SRIVASTAVA, SOUSA, 2014). Estas rochas são muito utilizadas na correção de solos, principalmente por meio do método de calagem, além de ser também matéria prima para a produção do cimento. Diversos autores correlacionam o calcário, seus resíduos e derivados à capacidade de gerar um alto calor de hidratação e, conseqüentemente, aumentar o consumo de água em pastas e materiais cimentícios (THONGSANITGARN et al., 2014; MENG; YU; WANG, 2017).

Aboutabikh, Soliman e El Naggar (2016) avaliaram a consistência de argamassas com substituição de resíduos de cascalho de perfuração proveniente de areias betuminosas em

substituição ao cimento com porcentagens que variavam até 50%. Verificou-se que houve diminuição dessa propriedade à medida que a porcentagem de substituição aumenta. Como resultado, segundo os autores, uma adição de 20% poderia ser considerada como o valor limite nessas condições, estando correlacionada e dependente ao tamanho das partículas. Para misturas de pastas incorporando 20% e 30% de cascalho houve uma redução na demanda de água para consistência normal com cerca de 6,7% e 4,3% do que a pasta pura mistura. Os autores atribuíram a dois efeitos: a finura, que aumenta a superfície específica e o tamanho de partículas que aumenta a densidade e reduzir os vazios intersticiais.

Calmon et al. (2017), entretanto, substituiu de 0 a 100% de DC para a produção de concreto em relação a massa de areia e verificaram que a fluidez dos concretos reduziu, de modo que o tamanho e a porosidade foram fatores influenciadores no aumento da demanda de água e, conseqüentemente, na redução da trabalhabilidade. A redução da trabalhabilidade de concretos com DC substituído no cimento foi de até 73% em relação ao concreto de referência.

Fialho (2012), por sua vez, avalia que a substituição da areia por cascalho de perfuração altera a trabalhabilidade. Em seu trabalho, quanto maior a quantidade substituída, maior o travamento das partículas, mesmo com o incremento do aditivo. Neste caso, uma substituição de 20% de cascalho reduziu a trabalhabilidade em 20%. A autora complementa com algumas motivações para a ocorrência de tal fato como a composição do fluido de perfuração, a presença de mica que por seu formato lamelar pode modificar o fluxo e o menor módulo de finura que aumenta a superfície específica e, por conseqüência, demanda mais água. Cabe-se mencionar que o módulo de finura do cascalho deste estudo é de 1,52, enquanto o da areia, 2,90.

Por meio da Figura 25, constata-se diminuições nas consistências, de modo que a redução aumentou de forma linear com a introdução de porcentagens maiores de substituição de DC nas argamassas produzidas. Em argamassa produzidas com os menores teores de substituição, 20 e 25%, esses traços apresentaram redução de 32,33 e 36,23% em relação a argamassa de controle. No caso de maiores teores de substituição, à exemplo de 30 e 35% de substituição de DC em relação à NS, a consistência aferida foi de 15,4 e 13,6 cm, o que representa uma redução de 48,8 e 54,51%, respectivamente, em relação à referência.

Os efeitos da alta absorção da água de amassamento nas argamassas, decorrente da presença do cascalho de perfuração pode ser atribuído a dois efeitos induzidos: por se tratar de um material muito fino, portanto, a adição dessas partículas finas aumentará a área superficial específica do pó, levando a maior demanda de água. Simultaneamente, o tamanho de partículas pequenas aumenta a densidade de empacotamento do pó e reduz o vazio intersticial, diminuindo



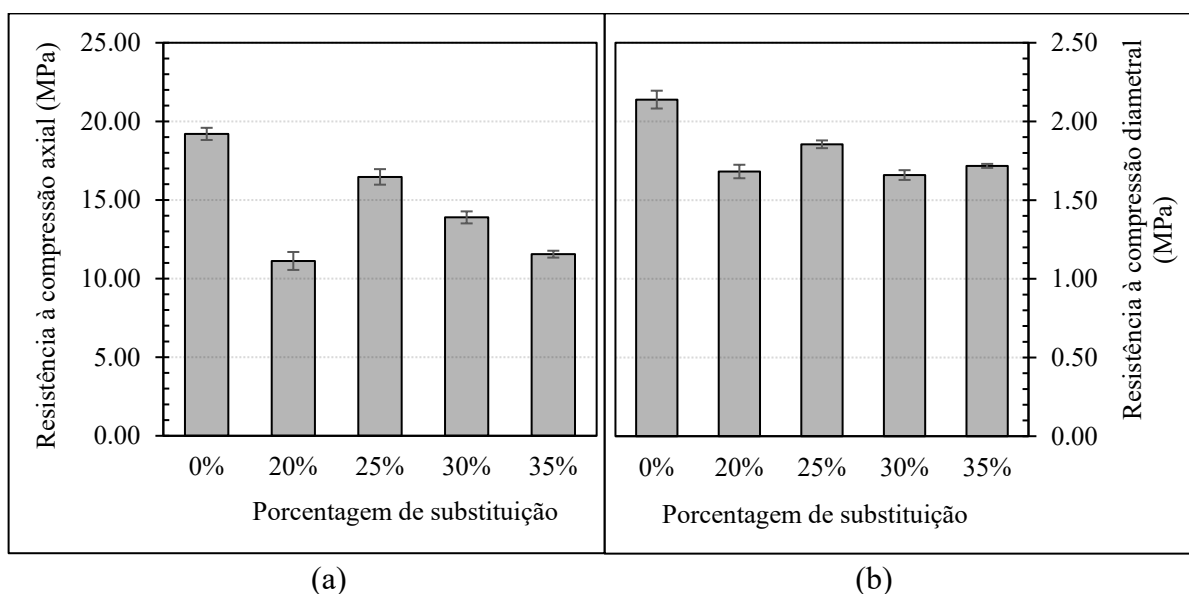
assim a água aprisionada entre as partículas de cimento e tornando-a disponível, levando a menor resistência ao fluxo (YAHIA; TANIMURA; SHIMOYAMA, 2005; JIAO et al., 2017).

#### 4.3.2. Resistências à compressão e à tração na flexão

Os resultados do teste de resistência à compressão axial e diametral para 28 dias de cura são mostrados na Figura 26a e b, respectivamente. A substituição de cascalho de perfuração em relação à areia demonstrou resultar na diminuição da resistência à compressão da argamassa, como esperado dada a maior absorção de água do DC e o teor de finos presentes. Esses resultados corroboram os obtidos por outros autores que notaram tal redução (HUANG et al., 2022). Aboutabikh, Soliman e El Naggar (2016) verificaram que, para os 28 dias houve uma redução que chegou à 50% na resistência à compressão axial de corpos de prova de concreto com incorporação de cascalho de perfuração. Para 20% e 30% de substituição, mesmas porcentagens utilizadas neste trabalho, os autores detectaram uma redução de 14% e 33% nesta propriedade para a idade mencionada.

Os valores de resistência à compressão axial determinados nesta pesquisa são compatíveis com os obtidos por outros trabalhos com argamassas, à exemplo dos de Ferreira (2017), que variaram entre 7,8 e 5,8 Mpa utilizando Cimento Portland do Tipo II na substituição de resíduos reciclados variando de 0 a 100%. E os valores encontrados por Liu et al. (2018), 12,9 e 10,2 MPa para porcentagens que variaram entre 0 e 60% de substituição.

**Figura 26.** Resistência à compressão (a) axial e (b) diametral das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 20%, 25%, 30% e 35% de DC pela NS.



Fonte: Autor (2022).

No entanto, para percentagens que tendem a 25%, há o aumento da resistência à compressão quando comparada às demais porcentagens de substituição. Embora todas as composições tenham maior consumo de água e menor consumo de cimento, o aumento da resistência pode estar relacionado à melhoria do empacotamento dessa mistura e ao efeito fíler, que torna a argamassa mais densa e, conseqüentemente, mais resistente. Esses resultados se confirmam o que foi observado em alguns estudos (CHEN et al., 2020; SHEN et al., 2021; FANG et al., 2021; ZHU et al., 2021).

Além disso, a partir da análise dos MEV das argamassas no estado endurecido (Figura 34 e Figura 35), sugere-se, possivelmente, que o acréscimo de resistência observado para composições com 25 e 30% de DC, em relação aos outros, a geração de locais de carbonatação e nucleação também estão relacionados. A maior finura do DC promove a formação de locais de nucleação, que juntamente com a carbonatação nos grãos do DC, favorece cristais de Portlandita [ $Ca(OH)_2$ ], que juntamente ao ar incorporado na mistura justificando ganho de resistência dessas argamassas.

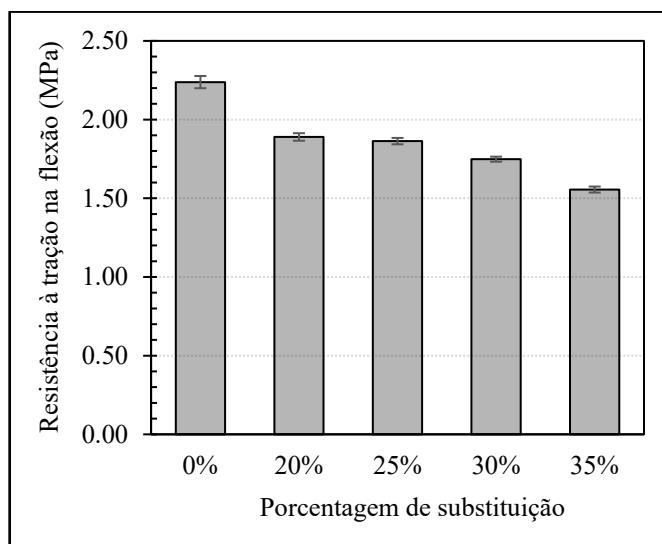
Contudo, outros efeitos podem estar sobrepostos que justificam a redução das resistências das argamassas estudadas em relação à de referência. Pode-se citar, desta forma, a presença de maior área superficial dos DC, assim como seu formato com arestas pouco definidas que pode dificultar a zona de transição entre a matriz e o agregado, apesar da inserção das frações de areia retidas em peneiras específicas (SILVA; BRITO; DHIR, 2016; HUANG et al., 2022).

O tamanho do grão influencia diretamente, e os grãos de cascalho ficaram retidos, em sua maioria, nas últimas peneiras da série. A redução nas dimensões poderia reduzir consideravelmente a resistência mecânica das argamassas. Além disso, devido à característica carbonática do cascalho, é possível que tenha ocorrido dificuldades na reação química de hidratação do cimento, quando em contato com o cascalho (GHASEMI et al., 2017) contribuindo para a redução da resistência.

No entanto, ao contrário de concretos, a resistência à compressão não é uma propriedade tão apreciável para argamassas, pois a elevada resistência indica alta rigidez e, com isso, poderá ocorrer o surgimento de fissuras. De forma análoga, a argamassa desenvolvida nesse estudo não pode apresentar fissura em excesso, visto a sua finalidade de encapsular o cascalho de perfuração em sua matriz cimentícia. O surgimento de fissuras poderá ser um indicativo da possível ascensão capilar decorrente dessas tipologias submetidas à ambientes com altos índices pluviométricos e, conseqüentemente, constituir uma tendência à lixiviação. Dessa forma, no geral, as argamassas com menor resistência à compressão apresentaram melhor desempenho.

Outra propriedade de interesse à avaliação da argamassa, dependente do seu uso, é a resistência à tração na flexão. Os resultados da resistência à tração das argamassas são apresentados na Figura 27a e b.

**Figura 27.** Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 20%, 25%, 30% e 35% de cascalho pela areia natural.



Fonte: Autor (2022).

As argamassas com DC apresentaram bons resultados, contudo, a resistência à tração não foi superior à das argamassas de referência. Houve redução linear de resistência para cada aumento nos percentuais de substituição. Tais resultados podem ser sugeridos devido à possível dificuldade na aderência física entre a pasta e os DC e, sobretudo, pela irregularidade dessas partículas.

A avaliação estatística dos resultados da resistência à compressão axial encontra-se nas Tabela 22 e Tabela 23.

**Tabela 22.** Análise de Variância (ANOVA) para a avaliação da resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa aos 28 dias.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor p
<b>Tratamentos</b>	4	139,328	34,832	63,520	4,523E-07
<b>Resíduos</b>	10	5,483	0,548	-	-
<b>Total</b>	14	144,812	-	-	-

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 23.** Teste de Tukey para avaliação da resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa aos 28 dias.

Tratamento	REF	20%	25%	30%	35%
REF	-	8,20E-07	0,007593	3,94E-05	1,38E-06
20%	18,9000	-	3,72E-05	0,0070	0,9485
25%	6,3970	12,5100	-	0,0113	7,79E-05
30%	12,4200	6,4810	6,0250	-	0,0204
35%	17,8900	1,0100	11,5000	5,4710	-

Fonte: Autor (2022).

A partir da análise da Tabela 22, sabe-se que a soma de quadrados total mede a variação total nos dados e a soma de quadrados dos tratamentos mede a variação entre as porcentagens de substituição das argamassas produzidas, sendo a soma dos quadrados dos resíduos a variação dentro de cada tratamento. Além disso, pode-se concluir que existe pelo menos dois tratamentos com desempenho significativamente diferentes ao avaliar o Valor-p =  $4,523 \times 10^{-7}$  (menor que o nível de significância estabelecido de 0,05). Além disso, o valor de da estatística F supera o valor tabelado, confirmando o resultado obtido.

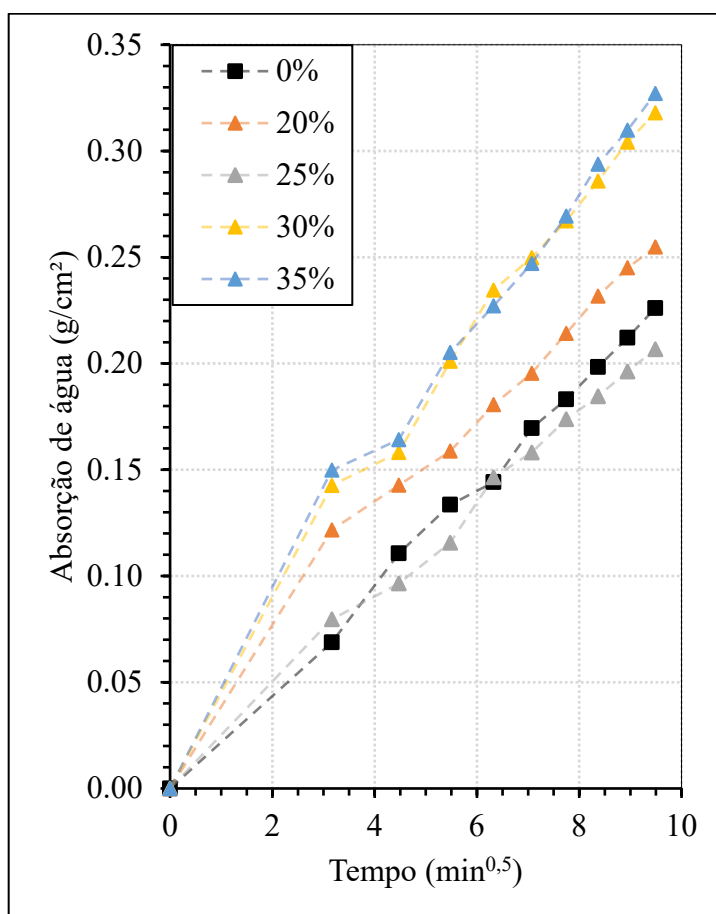
Desta forma, complementarmente, a Tabela 23 apresenta o teste de Tukey para a análise entre os tratamentos com as porcentagens de substituição e a referência. Os valores em destaque trata-se dos que possuem diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Nota-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre a argamassa de referência e todas as porcentagens de substituição. Entre os tratamentos com substituição, também houve diferenças significativas.

A argamassa com 25% de substituição não indicou diferença estatisticamente significativa com a de referência e pode ser assumida como a melhor tipologia confeccionado quanto a esta propriedade, pois apresenta a menor variância em relação à de referência.

### 4.3.3. Absorção por capilaridade

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos relativos às argamassas moldadas em corpos de prova prismáticos e submetidas ao ensaio da NBR 15259 (ABNT, 2005c). Observa-se que ao longo do período de realização do ensaio, 0 a 90 minutos, a maioria das argamassas com DC apresentaram maior absorção de água por capilaridade, especialmente nos casos de maiores percentuais de substituição das composições com a presença de cascalho de perfuração.

**Figura 28.** Absorção de água por capilaridade das argamassas com DC em função do percentual de substituição de DC pela NS.



Fonte: Autor (2022).

A partir da análise da Figura 28 tem-se que o período mais intenso da absorção capilar, ocorre nos primeiros 10 minutos de imersão parcial. O parâmetro que caracteriza o comportamento de absorção é o coeficiente de capilaridade, cujos resultados são apresentados na Tabela 24. Além disso, nota-se que a argamassa com substituição de 25% de DC apresentou resultados de absorção por capilaridade melhores que a de referência, para os primeiros estágios de absorção.

**Tabela 24.** Coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas.

Porcentagem de substituição	Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )
0%	3,62
20%	4,08
25%	3,31
30%	5,09
35%	5,23

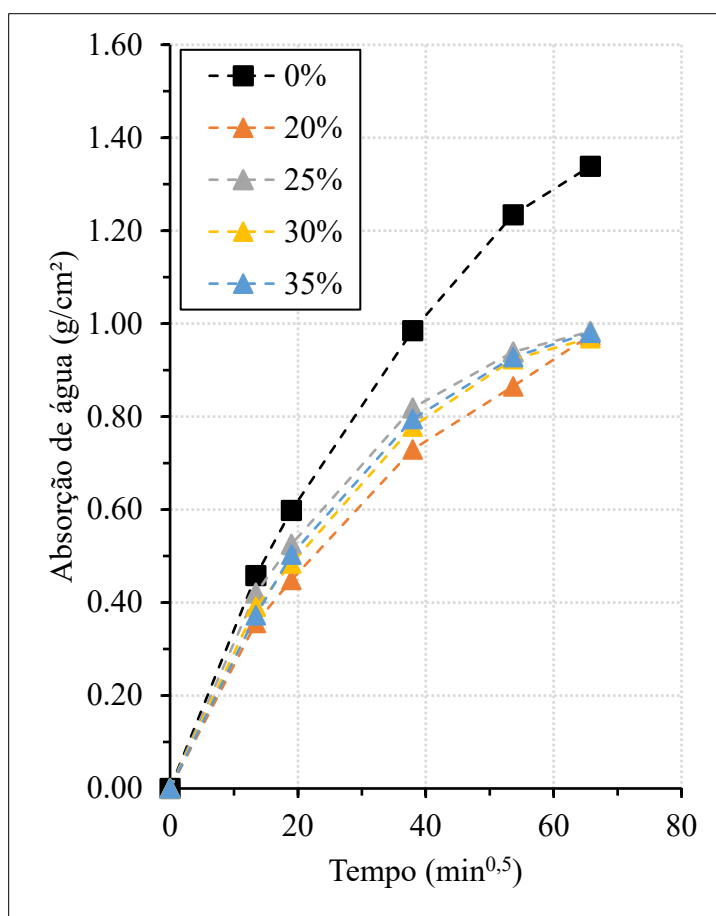
Fonte: Autor (2022).

Para substituições de até 35% de DC, há aumento do coeficiente de capilaridade, o que era esperado, uma vez que o cascalho possui elevada porosidade. No entanto, cabe-se mencionar que o coeficiente de capilaridade da substituição de 25%, especificamente, apresentou o menor coeficiente de capilaridade, tal fato pode indicar que essa argamassa possui menor conexão de poros entre si, em comparação às outras argamassas e até mesmo à de referência, ao menos nos primeiros estágios, tal fato corrobora com o resultado decorrente de empacotamento de partículas determinado no *software EMMA Mix Analyzer*, visto que neste percentual de substituição indicava um comportamento da curva de empacotamento mais próximo da curva ótima.

As demais argamassas apresentaram maiores taxas de absorção em relação à referência, este indicativo pode ser um pressuposto para que estas composições, possivelmente, possuam maior potencialidade para ascensão capilar da água e, conseqüentemente, podem ter menor durabilidade.

Tendo em vista esse comportamento, foi imprescindível avaliar a absorção de água para maiores períodos, visto que a utilização de argamassas com maior permeabilidade, prejudica os diversos usos, apesar da finalidade da argamassa deste estudo se deter a consideração de encapsular esse resíduo. No entanto, mesmo tendo em vista tal finalidade, torna-se importante compreender esses aspectos em vista o comportamento da argamassa contra os agentes agressivos, especialmente quando são expostos à ambientes externos. Neste sentido, o ensaio da NBR 9779 (ABNT, 2012), foi conduzido com corpos de prova cilíndricos, no período de 0 a 72h e os resultados obtidos são apresentados na Figura 29.

**Figura 29.** Absorção de água por capilaridade das argamassas com DC em função do percentual de substituição em maiores períodos.



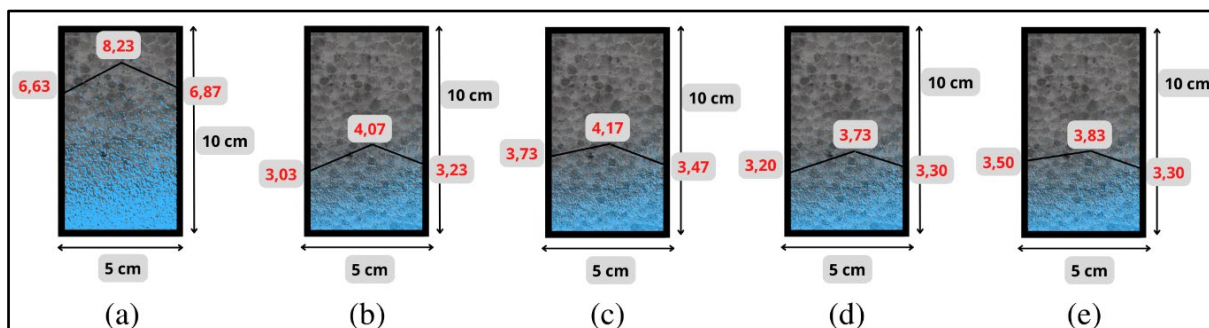
Fonte: Autor (2022).

A partir da análise da Figura 29, verifica-se que para maiores períodos, o comportamento ascensão por capilaridade se torna mais expressivo para a argamassa de referência; em compensação, as argamassas com substituição parcial de DC possuem menor ascensão, ou seja, menor conexão de poros e conseqüentemente, podem possuir maior durabilidade. Embora esses resultados pareçam ser contraditórios quando comparados às análises para períodos menores, eles podem ser explicados, sobretudo, pelo efeito de micro empacotamento proporcionado pela presença dos finos deste material. Resultados semelhantes foram obtidos por outros pesquisadores (SANTOS et al., 2018; ARULMOLY; KONTHESINGHA; NANAYAKKARA, 2021).

Essa ação pode apontar, possivelmente, para um melhor desempenho em maiores idades das argamassas contendo substituição, quando expostas à ambientes com alta umidade. Tal fato pode estar correlacionado com a forma dos DC (mais esférico), que dificulta a passagem da água (MACIEL et al., 2018; LOPES, 2019). Adicionalmente, após o ensaio da NBR 9779 (ABNT, 2012), os corpos de prova foram submetidos à rompimento por compressão diametral,

conforme a NBR 7222 (ABNT, 2015), para determinação do perfil de ascensão capilar, conforme se observa na Figura 30.

**Figura 30.** Perfil de ascensão capilar dos corpos de prova com 0 (a), 20 (b), 25 (c), 30 (d) e 35% (e), de substituição parcial de DC por NS.



Fonte: Autor (2022).

Foram tomadas três dimensões (central e extremidades) e definidas as médias, em relação à profundidade de penetração capilar da água nos poros contidos na seção meridiana dos corpos de prova cilíndricos. Apesar da proximidade entre tais valores, dispostos graficamente na Figura 30, foi verificada a menor dimensão central na argamassa com 30% de substituição; com relação às extremidades, a que apresentou melhores resultados possuía 20% de substituição de DC.

Cabe-se mencionar que na seção 4.2.1 deste estudo, verificou-se que houve decréscimo no coeficiente de uniformidade (CU) das misturas analisadas, que poderia indicar uma melhor distribuição dos grãos e conseqüentemente, melhor empacotamento. No entanto, os valores de CU variaram de 12,17 a 8,82, entre 20 e 35% de substituição, indicando que quanto maior a porcentagem de substituição, menor seria a variação dos tamanhos e maior seria a uniformidade entre os materiais secos. Contudo, por meio do comportamento verificado por meio da Figura 30, constata-se que as argamassas que continham substituição desempenharam melhores quando comparada com a de referência quanto à esta propriedade. No entanto, como os valores de ascensão capilar foram muito próximos, torna-se imprescindível, portanto, avaliar se existem diferenças estatisticamente significativas.

Desta forma, foi aplicada ANOVA para verificar o desempenho quanto a esta propriedade, seja entre as argamassas com substituição e a de referência ou entre os pares com substituição. Os efeitos dos fatores foram determinados por teste de Tukey pela comparação entre valores calculados e tabelados da função de distribuição de probabilidade, com 95% de confiança, conforme apresentado na Tabela 25 e Tabela 26.



**Tabela 25.** Análise de Variância (ANOVA) para a avaliação da absorção por capilaridade aos 28 dias.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor p
Tratamentos	4	33,063	8,266	31,190	1,27E-05
Resíduos	10	2,650	0,265	-	-
Total	14	35,713	-	-	-

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 26.** Teste de Tukey para avaliação da absorção por capilaridade aos 28 dias.

Tratamento	REF	20%	25%	30%	35%
REF	-	8,05E-05	7,10E-05	2,82E-05	3,87E-05
20%	12,7800	-	0,9170	1,0000	0,9992
25%	11,6200	1,1660	-	0,8890	0,9741
30%	12,9000	0,1121	1,2780	-	0,9974
35%	12,4500	0,3364	0,8299	0,4486	-

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 25 apresenta a variância entre as médias de ascensão capilar em relação às porcentagens de substituição das argamassas produzidas. Pode-se concluir que existe pelo menos dois tratamentos com desempenho significativamente diferentes ao avaliar o valor-p =  $1,27 \times 10^{-5}$  (menor que o nível de significância estabelecido de 0,05).

Neste sentido, a Tabela 26 apresenta o teste de Tukey para a análise das diferenças estatisticamente significativas entre as argamassas com substituição ou entre elas e a de referência. Os valores em destaque trata-se dos que possuem diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Nota-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre a argamassa de referência e todas as porcentagens de substituição. No entanto, as argamassas com substituição não apresentam variação significativa entre elas, nem quando comparadas à de referência. Logo, pode-se admitir, neste caso, que não existe diferença entre a escolha da melhor porcentagem de substituição para esta variável.

Com isso, o indicativo da porcentagem de substituição mais adequada para a absorção por capilaridade pode ser a da maior porcentagem (ou seja, 35%), visto que estatisticamente não existem diferença entre essa tipologia e as demais, com exceção da referência, que apresentou maior ascensão capilar, neste caso. Desta forma, essa seria a porcentagem mais adequada neste critério, pois a inserção de maior quantidade de material na mistura condiz com a redução de seu descarte no ambiente.

#### 4.3.4. Absorção por imersão

Os valores de absorção de água por imersão, porosidade (índice de vazios) e as massas específicas das argamassas estão apresentados na Tabela 27. Observa-se que as tipologias de argamassas com DC absorvem maior quantidade de água quando imersas e, portanto, são mais porosas. Esses resultados corroboram com outras pesquisas (LIU et al., 2018; HUANG et al., 2022) e apontam que a porosidade dos DC conduz as argamassas a apresentarem maior porosidade em seu estado endurecido. Nota-se ainda uma redução na massa específica dessas argamassas, indicando relação com a massa específica do DC.

**Tabela 27.** Resultados do teste de absorção por imersão em corpos de prova cilíndricos.

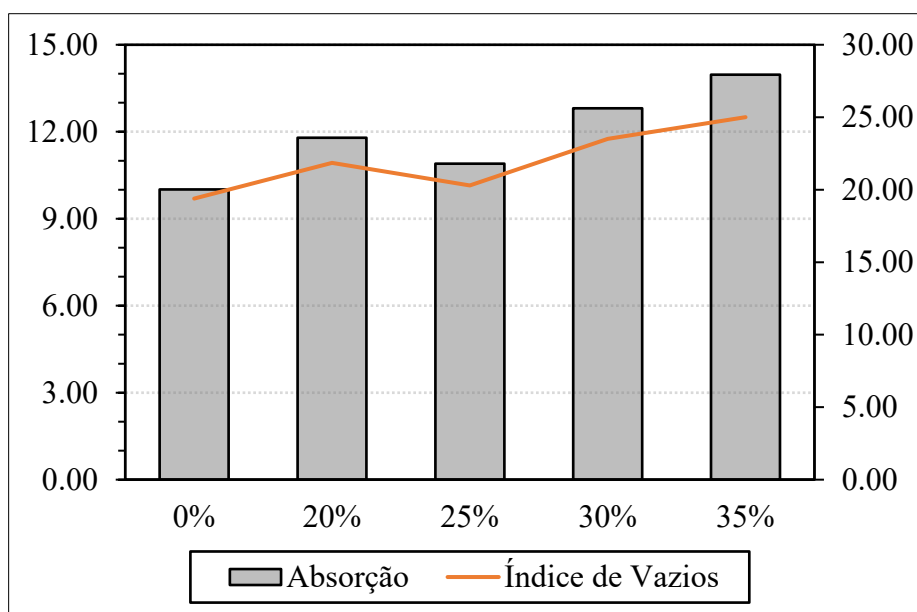
Porcentagem de substituição	Absorção	Índice de Vazios	Massa Específica da amostra seca	Massa Específica da amostra saturada	Massa Específica Real
0%	10,01	19,39	1,94	2,13	2,40
20%	11,79	21,85	1,85	2,07	2,37
25%	10,90	20,30	1,86	2,07	2,34
30%	12,81	23,50	1,84	2,07	2,40
35%	13,97	25,00	1,79	2,04	2,39

Fonte: Autor (2022).

Ainda de acordo com a Tabela 27, as argamassas com 25% de substituição apresentaram menor absorção de água, índice de vazios e massa específica real, quando comparadas as argamassas com outras porcentagens de substituição. O bom desempenho corrobora com o estudo de empacotamento desenvolvido nos procedimentos metodológicos desta pesquisa.

A Figura 31 apresenta os resultados de absorção por imersão correlacionando-os com os dados relativos aos índices de vazios nas tipologias confeccionadas.

**Figura 31.** Absorção por imersão e Índice de Vazios por porcentagem de substituição de DC por NS.



Fonte: Autor (2022).

Da análise da Figura 31, nota-se que porcentagens de substituição superiores a 25% apresentaram os maiores índices de absorção e porosidade. Esse comportamento pode estar correlacionado a alta porosidade do cascalho de perfuração e da suposição de ter ocorrido um menor empacotamento dos grãos dessas composições, devido ao formato do resíduo. Do mesmo modo, ocorre para as argamassas com 20%, pois quando comparadas as argamassas com 25%, essas composições apresentam menor quantidade de grãos, que pode reduzir o empacotamento.

Desta forma, nota-se que a argamassa que apresenta melhor desempenho quando comparada à de referência relativo a esta propriedade, trata-se da que possui 25% de substituição. No entanto, a argamassa de 20% ainda apresenta resultados satisfatórios, visto que possui resultados compatíveis com a argamassa de referência e de 25% no estado endurecido, e complementarmente, possui melhor desempenho em fluidez no estado fresco.

#### 4.3.5. Densidade de massa aparente

É importante ressaltar que o ensaio da densidade de massa aparente foi executado para verificar o quanto a mistura se adensou no processo de mistura. Estes dados são de grande valia para analisar o comportamento das argamassas quanto ao empacotamento da mistura no seu estado endurecido. A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos para esta propriedade.

**Tabela 28.** Resultados de massa específica aos 28 dias para as argamassas produzidas.

<b>Traços</b>	<b>Densidade de massa (g/cm<sup>3</sup>)</b>
REF	2.081,77
T(%DC)/80	1.982,94
T(%DC)/75	2.008,27
T(%DC)/70	1.927,71
T(%DC)/65	1.881,26

Fonte: Autor (2022).

Os resultados encontrados corroboram com todas as outras análises realizadas para as propriedades que dialogam com o empacotamento, à exemplo da absorção e resistência e são capazes de explicar o porquê do comportamento das argamassas quanto à essas propriedades. Ocorreu redução da densidade de massa pela incorporação do DC, nota-se quando se compara à argamassa de referência.

Esse comportamento, entretanto, é contraposto, pois a densidade volta a aumentar quando a porcentagem é acrescida para 25% e finaliza em queda para porcentagens maiores. Evidenciando que 25% de substituição é a porcentagem mais adequada de incorporação de cascalho à mistura e corroborando com os resultados obtidos no modelo teórico de empacotamento conduzido no *software EMMA Mix Analyzer*.

O comportamento traduz que a argamassa de 25% é a mais adensada entre as avaliadas, diferindo em apenas 3,5% da argamassa de referência quanto à densidade de massa. O comportamento é validado quando as demais propriedades vinculadas ao empacotamento dialogam entre si, mais especificamente a resistência da argamassa e a absorção total de água e porosidade e absorção por capilaridade, todos aos 28 dias, que apresentaram melhores configurações de resultados conforme apresentado na Tabela 29.

**Tabela 29.** Propriedade avaliada das argamassas e melhor porcentagem de substituição

<b>Propriedade avaliada</b>	<b>Porcentagem com melhor resultado</b>
Consumo de Água	20%
Resistência à compressão axial	25%
Resistência à compressão diametral	25%
Resistência à tração	20%
Absorção por capilaridade	35%
Absorção por imersão	25%
Densidade de massa aparente	25%

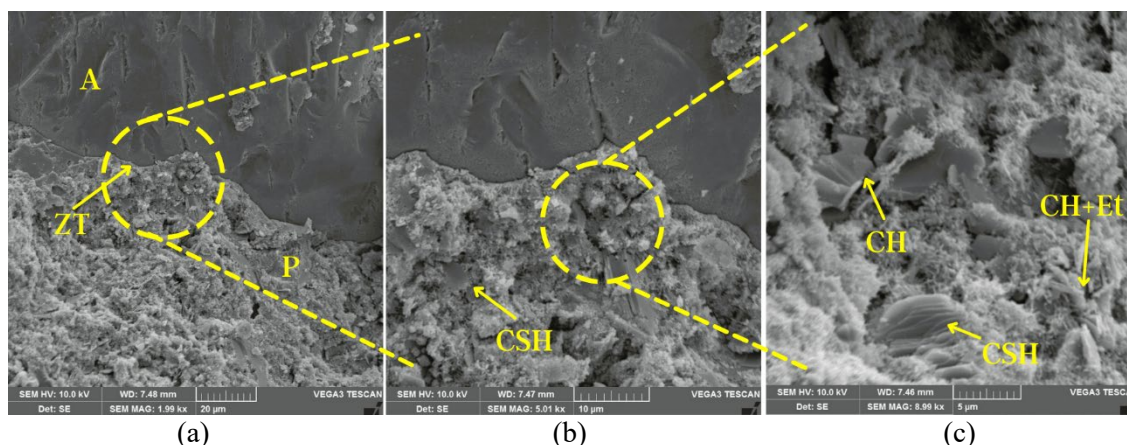
Fonte: Autor (2022).

#### 4.3.6. Análise microestrutural

Os MEVs da argamassa de referência aos 28 dias na Figura 32 supõe a presença dos componentes de hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH) e etringita (Et). A Figura 32a, com ampliação de 2kx, indica a interface da zona de transição (ZT) entre pasta (P) e o agregado (A) e algumas placas de portlandita, que corresponde ao hidróxido de cálcio. Na Figura 32b nota-se maior formação de CSH rodeados de aglomerados de cristais de etringita. Em detalhe na Figura 32c, que apresenta com ampliação de 9kx, nota-se a presença de todos os produtos de hidratação do cimento CH, CSH e Et.

Com relação a etringita, percebe-se que sua detecção não é simples, necessitando assim de maiores ampliações conforme a Figura 32c (9kx). A presença de etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), como formato de “agulhas pontiagudas”, verificada no MEV das argamassas ocorre devido a cinética das reações (VENTURA, 2015; BONFIM et al., 2021). Segundo Barbosa e Portela (2019), acredita-se que o ferroaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) se hidrate na forma de aluminato de cálcio hidratado e uma fase amorfa, bem como o dióxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) faça parte em sua fase sólida, formando produtos de hidratação.

**Figura 32.** MEV da argamassa de referência.



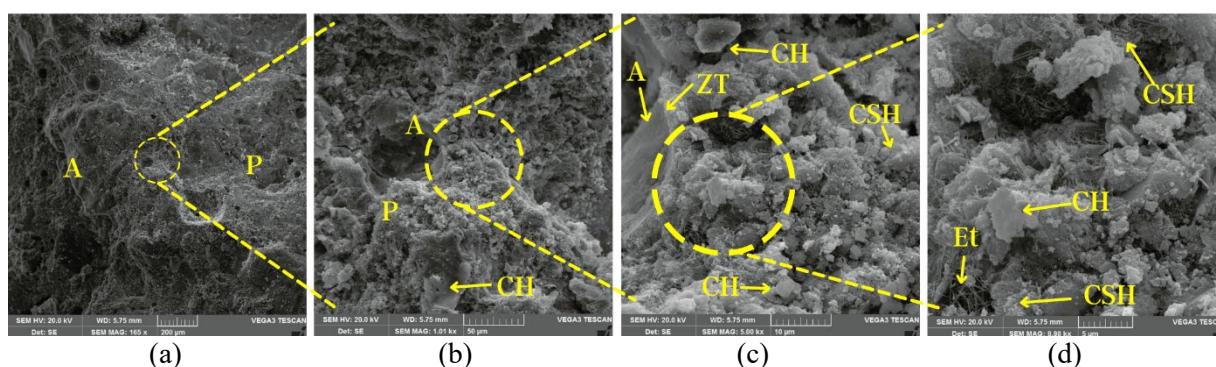
Fonte: Autor (2022).

A Figura 33 ilustra os diversos componentes da argamassa contendo 20% de substituição do agregado miúdo por cascalho de perfuração, sendo representada a pasta cimento e os devidos elementos químicos correspondentes às reações de hidratação do cimento. Aos 28 dias, a morfologia indica que a argamassa contém produtos de hidratação do cimento. A Figura 33a, com 165x, é apresentada a combinação entre a pasta e o agregado. Na Figura 33b, com 1kx, é possível notar a presença de cristais de portlandita e no detalhe da Figura 33c e também da etringita, além de um produto com organização estrutural semelhante a nanocristais, que

demonstram a melhor representação para o CSH em misturas cimentícias (KUNTHER; FERREIRO; SKIBSTED, 2017).

Contudo, a literatura menciona que não existe relações entre o comportamento da estrutura do CSH: composição química, nano e microestrutura, com as propriedades físicas e mecânicas que possa conferir aos sistemas cimentícios. Um dos principais motivos para essa constatação está relacionada com a complexidade de sua estrutura (DUART, 2021; SHARMA, SINGH e KAPOOR, 2020).

**Figura 33.** MEV da argamassa com substituição de 20% de DC em relação à NS.



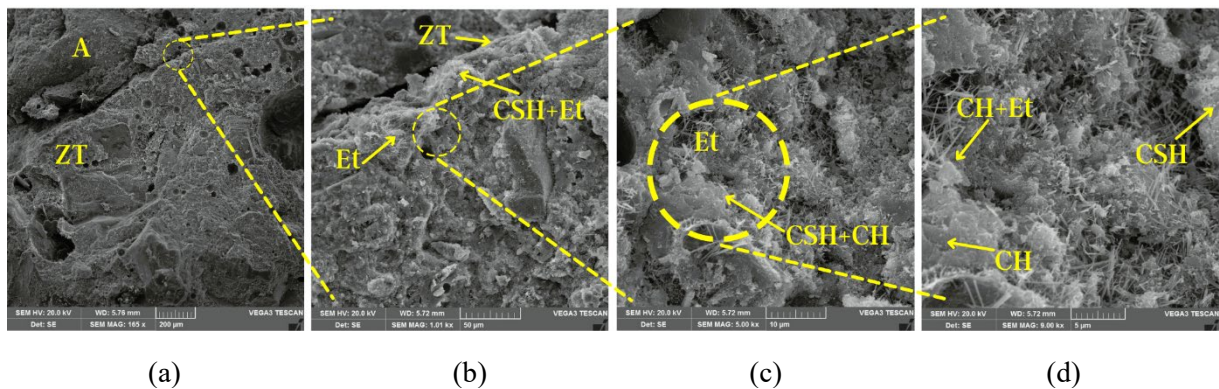
Fonte: Autor (2022).

A Figura 34 (a-d), por sua vez, apresenta a microscopia para a argamassa com 25% de substituição com aproximações de 165x, 1kx, 5kx e 9kx, respectivamente. Nota-se na Figura 34a a interface entre agregado e a zona de transição da pasta de cimento. Na Figura 34b consegue-se identificar visualmente alguns produtos de hidratação presentes na amostra. Nas Figura 34c nota-se a presença combinada da portlandita e do silicato de cálcio hidratado, que podem influenciar no aumento da resistência à compressão. Cabe-se mencionar que a grande quantidade de calcita, detectado no FRX e presente no DC pode ter sido essencial para o aumento da disponibilidade desse componente (CH) quanto maior o aumento em porcentagens de substituição, haja vista a redução de 25% do agregado miúdo devido a substituição de DC.

É ainda importante mencionar que a presença de compostos como os óxidos de magnésio, presentes no cimento e no cascalho, em ambientes agressivos de sulfatos combinados com a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) oriunda do DC, podem ajudar na formação de taumasita com o provimento do CSH. Por isso, mesmo que o cimento utilizado seja resistente à sulfatos, com baixo teor de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ); tal processo ainda pode ocorrer diferentemente da formação de etringita, que se forma enquanto existir alumina na solução de poros da argamassa (MEDEIROS, 2019).

A Figura 34 mostra que a argamassa com 25%, a microestrutura densa geral foi observada e a zona de transição interfacial (ITZ) entre a matriz de cimento e a areia era compacta. No entanto, a microestrutura sugere tornar-se menos densa para a variação com 30% e 35% de substituição (vide Figura 35 e Figura 36) onde uma grande quantidade de poros foram encontrados. Isso foi atribuído à provável necessidade do aumento da relação água-cimento efetiva das argamassas em que ocorre a incorporação de DC. Após a evaporação do excesso de água, um maior número de poros foi formado dentro desses corpos de prova, tal fato também foi comprovado por Huang et al. (2022).

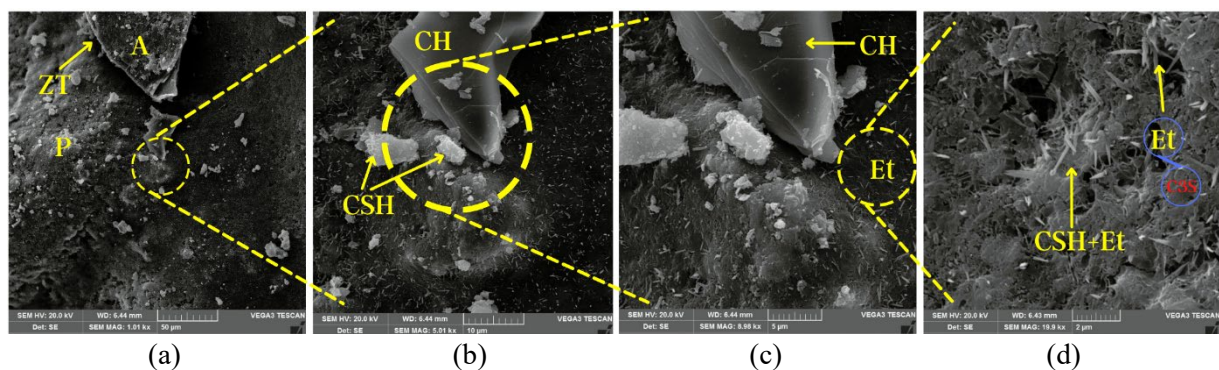
**Figura 34.** MEV da argamassa com substituição de 25% de DC em relação à NS.



Fonte: Autor (2022).

A argamassa com 30% de substituição, apresentado na Figura 35 nota-se a presença de produtos secundários de hidratação. A Figura 35a apresenta poros demonstrando que partir dessa dosagem em argamassas verifica-se a estrutura uma microestrutura mais aberta. Enquanto a Figura 35b e c mostram placas de portlandita e CSH. A Figura 35d mostra cristais minúsculos em forma de agulha (etringita) e géis de CSH, formando um aglomerado de nanocristais em multiescala, sem modelo consensual, conforme observado também por Diamond (2004) e Pelisser, Gleize e Mikowski (2009), uma estrutura completamente diferente em comparação com a da amostra de argamassas com 25% de DC.

**Figura 35.** MEV da argamassa com substituição de 30% de DC em relação à NS.



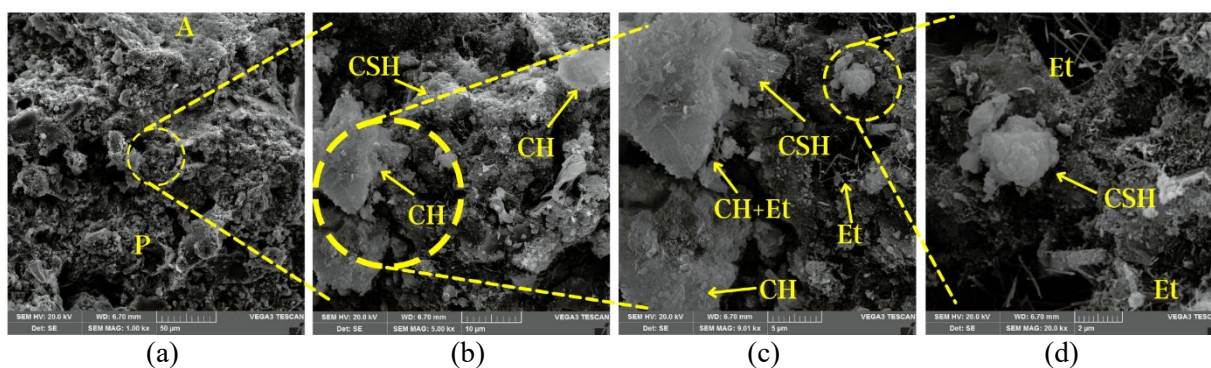
Fonte: Autor (2022).

Ainda se propõe que as nanopartículas de sílica presentes no cascalho promovem uma atuação física, coerente com os conceitos de empacotamento, ocupando os espaços intersticiais entre os grãos de cimento, com papel de filler. Essa uma maior densificação da matriz pode fornecer uma maior resistência e durabilidade das argamassas (SENF; HOTZA; REPETTE, 2010; STRAPASSON et al., 2021).

A redução da resistência à compressão das argamassas contendo cascalho de perfuração em relação à de referência pode ser sugerida devido à provável dificuldade de hidratação e, conseqüentemente, a possível dificuldade de formação do silicato tricálcico (C3S), principal componente do cimento e o que responde pela sua resistência mecânica inicial (1 a 28 dias. Autores sugerem que ocorre a formação do gel de CSH, à medida que há maior formação de CH em função da hidratação do silicato tricálcico (C3S), que é composto responsável pela resistência inicial, similar ao identificado por Duque et al. (2018).

A Figura 36a mostra a morfologia característica de gel de sílica através de uma organização estrutural de aglomerado de nanocristais em multiescala (BRAHMI et al., 2014; WEI et al., 2021). A presença de placas cristalinas hexagonais de CH é registrada aos redores do CSH e na região periférica dos agregados Figura 36b. É notório maior quantidade de poros existentes na mistura, através da visualização das Figura 36c e d.

**Figura 36.** MEV da argamassa com substituição de 35% de DC em relação à NS.



Fonte: Autor (2022).

Conclusivamente, pode-se verificar que a microestrutura das amostras de argamassa com substituição de DC em relação ao NS foi otimizada significativamente, principalmente nas argamassas com 25% de substituição, que pode levar a uma maior durabilidade e desempenho mecânico para esta mistura, principalmente no que cerne à absorção. A menor quantidade de poros, derivada do empacotamento promovido na mistura, auxilia na retenção dos compostos químicos do cascalho que podem ser lixiviados caso esta tipologia seja submetida a ambientes



agressivos. Desta forma, a metodologia desenvolvida no *Software EMMA* apresentou resultados que corroboram com a potencialidade do produto.

#### 4.4. Compensação ambiental, viabilidade e sustentabilidade das argamassas

Para a avaliação da compensação ambiental, viabilidade e sustentabilidade das argamassas, resultados sobre redução de custos com a inserção do material, redução da pegada de carbono e um diagrama de *loop* causal foram desenvolvidos. Os resultados da análise de custo obtidos são apresentados na Tabela 30.

**Tabela 30.** Avaliação de custo na produção das argamassas.

Traço	%DC	Quantidade <sup>1</sup>		Análise de Custo (R\$)		
		DC	NS	Custo Original	Custo Final	Redução
T(%DC)/80	20	0,38	0,85	92,65	74,12	18,53
T(%DC)/75	25	0,48	0,79	92,65	69,49	23,16
T(%DC)/70	30	0,57	0,74	92,65	64,86	27,80
T(%DC)/65	35	0,67	0,69	92,65	60,22	32,43

<sup>1</sup> em m<sup>3</sup> de material/m<sup>3</sup> de argamassa produzida.

Fonte: Autor (2022), com dados de CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (2022).

A redução no custo com matéria prima utilizada na argamassa, para o caso do agregado miúdo, decai de forma diretamente proporcional a inserção da quantidade de substituição de cascalho em relação à areia. Isso significa dizer que a substituição de 25% de cascalho, melhor porcentagem de substituição indicativa nos testes de propriedades no estado fresco e endurecido, corresponderá a redução absoluta equivalente no preço que seria gasto em matéria prima para a produção da argamassa de referência, por exemplo, que não possui cascalho incorporado. Isso significa redução de R\$ 23,16 a cada m<sup>3</sup> de argamassa produzida.

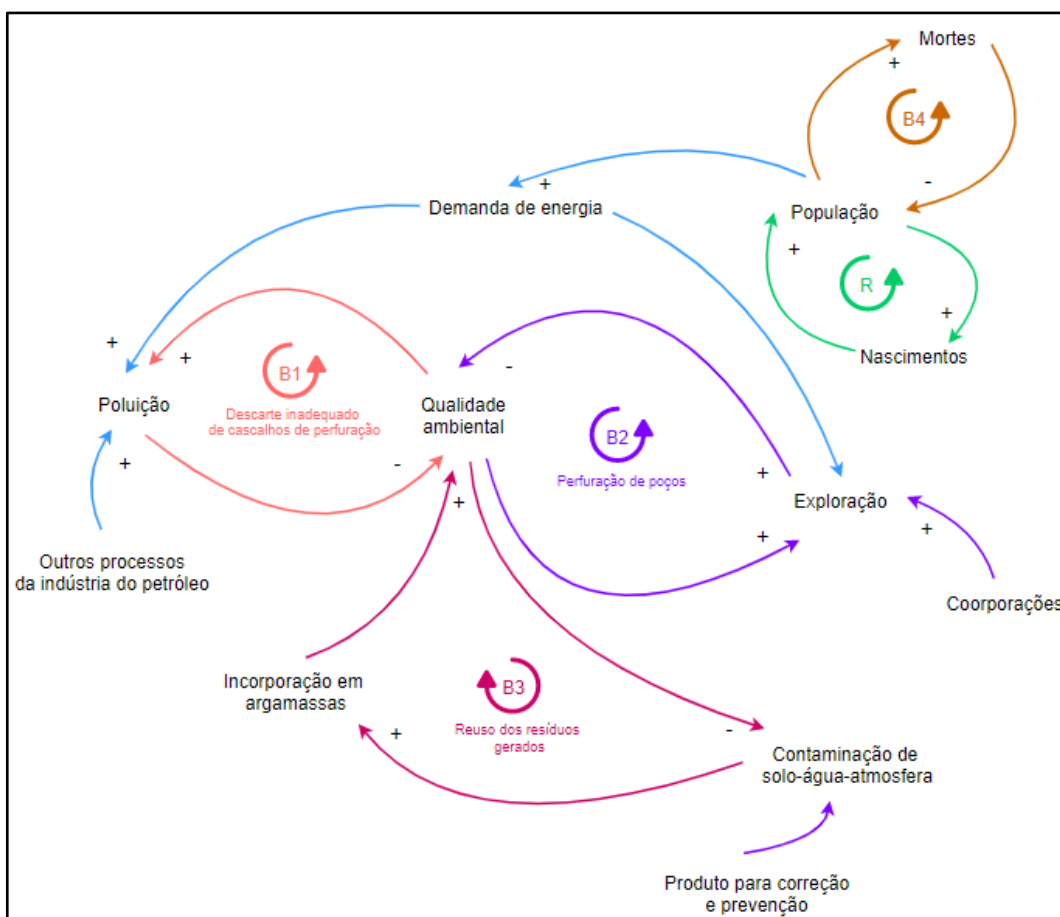
O uso de um resíduo de algum setor da economia (que pode gerar, decorrente de sua deposição no ambiente passivos ambientais) em outro setor, transformando esse problema econômico em solução, é chamado de economia circular (RIBEIRO e KRUGLIANSKAS, 2014). Neste caso, um resíduo do cascalho passa a ter valor agregado quando substitui outro material que é usual na construção civil e que geralmente é retirado do ambiente de forma predatória. A areia utilizada em argamassas não pode conter compostos deletérios, e geralmente é retirada de leitos de rios, podendo provocar erosão, assoreamento e desestruturação do solo do local.

Dentre as metodologias de análise da economia circular, existe o diagrama de *loop* causal, que compõe um ciclo de relação de causa-efeito (por meio de ciclos de alimentação). A

elaboração e construção do diagrama de *loop* causal foi realizada com a finalidade de compreender a estrutura geral do sistema, desde a necessidade de geração de energia até o reuso do resíduo desta pesquisa. Assim, foi realizado o mapeamento das interações das variáveis, mostrando a influência de umas sobre as outras.

Os diagramas causais foram definidos por sistemas formados por fluxos de realimentação e são compostos por *loops* de reforço e de equilíbrio, por relações de causa e efeito entre as variáveis e por defasagens entre estes, que podem ser representados pelas setas. O *loop* ocorre acontece quando existe entre as variáveis um impacto causal recíproco, ou seja, uma exerce influência direta sobre a outra. (DE SORDI; NELSON; BIANCHI, 2014). O diagrama de *loops* deste estudo está representado na Figura 37.

**Figura 37.** Diagrama de *Loop* Causal para análise da economia circular na reutilização de cascalho de perfuração.



Fonte: Autor (2022).

*Loops* de reforço ampliam os efeitos de uma variável sobre a outra, e estão representados pela letra “R”. Os de equilíbrio estabilizam o sistema, anulando o efeito de uma variável sobre a outra, representados pela letra “B”. O *loop* de reforço R existente nessa análise, corrobora que

a quantidade de nascimentos influencia na dinâmica do aumento populacional. Entretanto, o de equilíbrio B4 demonstra que a relação existente entre a quantidade de mortes reduz o quantitativo populacional. A demanda populacional por fontes de energia é indicada no fluxo de casualidade pela seta indicativa.

A demanda por energia aumenta a exploração de recursos naturais e a poluição ambiental. O aumento da poluição e a exploração de recursos é movido por fatores externos, à exemplo de outros processos da indústria do petróleo e pelo incentivo das corporações, por exemplo. A exploração de jazidas de petróleo ocorre pela perfuração de poços, representada pelo *loop* de equilíbrio B2. No entanto, quanto maior a exploração, maior os impactos e menor a qualidade ambiental. No entanto, um ambiente conservado e com recursos é alvo de exploração.

O *loop* de equilíbrio B1 trata da esfera ambiental, representando o descarte inadequado de produtos provenientes da exploração de petróleo, mais especificamente o cascalho de perfuração, que causa poluição e conseqüentemente, redução da qualidade ambiental. Muito se procura por soluções e produtos que mitiguem impactos no ambiente e neste sentido, o *loop* de equilíbrio B3, aplica o conceito de economia circular, o qual apresenta que o reuso desses resíduos gerados, que podem contaminar o sistema solo-água-atmosfera, quando reutilizados e incorporados em outros materiais, à exemplo da argamassa, corrobora com a melhoria da qualidade ambiental.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais realizados neste estudo, as seguintes conclusões relativas aos impactos do cascalho de perfuração no ambiente e o efeito da incorporação deste em argamassas podem ser tiradas:

- i. Foi verificado, por meio da Matriz de Leopold, que o cascalho de perfuração (DC) proveniente de poços *onshore* da Bacia Potiguar disposto sem tratamento pode provocar impactos ao ambiente;
- ii. A disposição direta do cascalho no ambiente age impactando diretamente os sistemas: solo (alto impacto), água (altíssimo impacto) e atmosfera (baixo impacto);
- iii. Foi estudada a incorporação deste resíduo em argamassas através de substituições parciais pelo agregado miúdo, no intuito de produzir insumos com viés sustentável.
- iv. Foi verificada que independentemente da porcentagem de inserção, a adição de DC resulta em uma mistura com melhor distribuição granulométrica;
- v. O empacotamento das partículas foi conduzido pelo Método de *Andreassen* modificado e pela utilização do software *EMMA Mix Analyzer* torando as misturas mais uniformes;
- vi. Comparado à NS, o DC apresenta menor massa específica e massa unitária.
- vii. No tocante aos materiais individuais, a areia apresentou frações mais grosseiras, enquanto o cascalho detinha uma granulometria mais fina.
- viii. Do ensaio de MEV constatou-se a forma das partículas: areia (esférico e estrutura maciça), cimento (lamelar), cascalho (esférica, alguns com superfície lisa, outros com superfície rugosa);
- ix. No ensaio de DRX notou-se que o DC apresentou presença de carbonato de cálcio, a calcita, um tipo de sal praticamente insolúvel em água. Além disso, apresentou presença de dióxido de silício, presente também na areia e de hidróxido de cálcio;
- x. No ensaio de FRX, as amostras analisadas apresentaram elevados teores dos óxidos de silício;
- xi. Foram avaliados as propriedades e o desempenho das argamassas com incorporação do resíduo de perfuração de cascalho. No estado fresco, constatou-

se diminuições nas consistências com a introdução de maiores porcentagens de DC;

- xii. No estado endurecido, a substituição NS por DC demonstrou resultar na diminuição da resistência à compressão da argamassa;
- xiii. O teor de 25% produz a melhor tipologia de argamassa sustentável entre as avaliadas. O comportamento é validado quando às propriedades e ao empacotamento;
- xiv. Os MEVs das argamassas aos 28 dias sugerem a presença dos componentes de hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH) e etringita (Et), que conferem as propriedades de resistência às argamassas confeccionadas;
- xv. Verificou-se redução no custo com matéria prima utilizada na argamassa;
- xvi. Foi proposto um cenário de solução técnica e economia circular, com a inserção do DC na argamassa sustentável, verificado por meio do diagrama de *loop* causal, onde a substituição corrobora com a melhoria da qualidade ambiental, evidenciando que se trata de um produto que condiz com a realidade local e com a sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

- ABD ELHAKAM, A. et al. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 421-427, 2012.
- ABNT. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- ABNT. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro - RJ. 2004.
- ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro - RJ. 2016.
- ABNT. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro - RJ. 2005.
- ABNT. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro - RJ. 2005.
- ABNT. **NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**. Rio de Janeiro - RJ. 2019.
- ABNT. **NBR 14832: Cimento Portland e clínquer - Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo**. Rio de Janeiro - RJ. 2002.
- ABNT. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro - RJ. 2005.
- ABNT. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- ABNT. **NBR 15900-10: Água para amassamento do concreto - Parte 10: Análise química - Determinação de nitrato solúvel em água**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- ABNT. **NBR 15900-7: Água para amassamento do concreto - Parte 7: Análise química - Determinação de sulfato solúvel em água**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- ABNT. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios**. Rio de Janeiro - RJ. 2016.
- ABNT. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017.
- ABNT. **NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro - RJ. 2018.
- ABNT. **NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro - RJ. 2018.

- ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ. 2018.
- ABNT. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro - RJ. 2021.
- ABNT. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro - RJ. 2021.
- ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro - RJ, 1995.
- ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro - RJ. 2005.
- ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro - RJ. 2019.
- ABNT. **NBR 7221: Agregado - Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas - Método de ensaio**. Rio de Janeiro - RJ. 2012.
- ABNT. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro - RJ. 2011.
- ABNT. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro - RJ. 2005.
- ABNT. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro - RJ. 2012.
- ABNT. **NBR 9917: Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- ABNT. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro - RJ. 2003.
- ABNT. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro - RJ. 2001.
- ABOUTABIKH, M.; SOLIMAN, A. M.; EL NAGGAR, M. H. Properties of cementitious material incorporating treated oil sands drill cuttings waste. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 751–757, 2016.
- ADAMS, M. P. et al. Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 802-810, 2016.
- ADGATE, J. L.; GOLDSTEIN, B. D.; MCKENZIE, L. M. Potential public health hazards, exposures and health effects from unconventional natural gas development. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 15, p. 8307-8320, 2014.
- AHAMMAD, F.; MAHMUD, S. A Review of Mud Loss While Drilling Through Naturally Fractured Reservoirs. *In: International Conference on Petroleum Engineering*. 2017. p. 44. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/332187476\\_A\\_Review\\_of\\_Mud\\_Loss\\_While\\_Drilling\\_through\\_Naturally\\_Fractured\\_Reservoirs](https://www.researchgate.net/publication/332187476_A_Review_of_Mud_Loss_While_Drilling_through_Naturally_Fractured_Reservoirs). Acesso em: 10 set. 2021.

ALMEIDA NETO, J. B. DE. **Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária**. 2017. 139p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

ALMEIDA, E. D. P. C.; SANTOS, H. G. D.; ZARONI, M. J. **Latossolos Vermelho-Amarelos**. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000g05ip3qr02wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000g05ip3qr02wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html). Acesso em: 26 mar. 2022.

ALMEIDA, R. S. et al. Desenvolvimento Sustentável no Brasil e o desafio da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e39211225446-e39211225446, 2022.

ALY, A. A.; GÓRECKI, T. Green Approaches to Sample Preparation Based on Extraction Techniques. **Molecules**, [S.L.], v. 25, n. 7, p. 1719, 2020. MDPI AG. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7180442/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ANDRADE, A. F. M. et al. EDTA-induced phytoextraction of lead and barium by brachiaria (*B. decumbens* cv. Basilisk) in soil contaminated by oil exploration drilling waste. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 21 ago. 2014. v. 36, n. 4, p. 495.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **Câmara dos Deputados - GTMINERA- Requerimento 5/2021**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/grupos-de-trabalho/56a-legislatura/gt-codigo-de-mineracao-decreto-lei-227-67/apresentacoes-em-eventos/ANEPAC.pdf>. Acesso em 15 mar. 2022.

ANGELIN, A. F. et al. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 534-545, 2017.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Arrecadação com royalties e participação especial foi recorde em 2021**. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/arrecadacao-com-royalties-e-participacao-especial-foi-recorde-em-2021](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/arrecadacao-com-royalties-e-participacao-especial-foi-recorde-em-2021). Acesso em: 25 nov. 2020.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 699 de 6 de setembro de 2017**. Brasília - DF, 2017.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 817 de 27 de abril de 2020**. Brasília - DF, 2020.

ANP. **Bacia Potiguar**: sumário geológico e setores em oferta. Sumário Geológico e Setores em Oferta. 2017. Elaborado por: Andressa Yumi Portella e Rosemari Fabianovicz. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/14a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas-oferta/sumario-potiguar.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

APOLÔNIO, T. G.; AMORIM, L. V.; LEAL, C. A. Correlação entre a composição química e mineralógica e as características plásticas de folhelhos do Nordeste do Brasil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n. 2, 2020.



ARAÚJO, E. M.; MAMEDE, G. L. INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO USANDO ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA EM UMA BACIA SEMIÁRIDA. **IRRIGA**, v. 23, n. 1, p. 72-86, 2018.

ARDJMAND, M.; DANESHFAR, M. A. Selecting a suitable model for collecting, transferring, and recycling drilling wastes produced in the operational areas of the Iranian offshore oil company (IOOC) using analytical hierarchy process (AHP). **Journal of Environmental Management**, v. 259, n. xxxx, p. 109791, 2020.

AROCENA, J. M.; RUTHERFORD, P. M. Properties of hydrocarbon- and salt-contaminated flare pit soils in northeastern British Columbia (Canada). **Chemosphere**, jul. 2005. v. 60, n. 4, p. 567–575. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653505001189>>. Acesso em: 10 set. 2020.

AROCENA, J. M.; RUTHERFORD, P. M. Properties of hydrocarbon- and salt-contaminated flare pit soils in northeastern British Columbia (Canada). **Chemosphere**, v. 60, n. 4, p. 567–575, jul. 2005.

ARPORNPOONG, N. et al. Formulation of Bio-Based Washing Agent and Its Application for Removal of Petroleum Hydrocarbons From Drill Cuttings Before Bioremediation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, n. August, p. 1–16, 2020. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00961/full>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

ARULMOLY, B.; KONTHESSINGHA, C.; NANAYAKKARA, A. Influence of Blended Fine Aggregates on the Performance of Lime-Cement Mortar - A Statistical Approach. In: **2021 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)**. IEEE, 2021. p. 275-280.

ASME SHALE SHAKER COMMITTEE (Org.). **Drilling Fluid Processing Handbook**. [s.l.]: Elsevier Inc, 2004.

ASTM. **C144 - Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar**. 2018.

AWEH, D.; IGBOKWE, J. I.; EJIKEME, J. Analytic Hierarchy Process–Based Environmental Criteria Weight Assessment and Prioritization for Suitable Petroleum Refining Plant siting in Edo State, Nigeria. **Asian Review of Environmental and Earth Sciences**, v. 8, n. 1, p. 10–17, 2021.

BAKKE, T.; KLUNGSOYR, J.; SANNTI, S. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. **Mar. Environ. Res.**, v. 92, p. 154-169, 2013.

BALL, A. S.; STEWART, R. J.; SCHLIEPHAKE, K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. **Waste Management and Research**, v. 30, n. 5, p. 457–473, 2012. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X11419892>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

BAMBERGER, M.; OSWALD, R. E. Impacts of gas drilling on human and animal health. **New solutions: a journal of environmental and occupational health policy**, v. 22, n. 1, p. 51-77, 2012.

BARATTO, N. L. B. et al. CALAGEM E GESSAGEM DOS SOLOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA. **Salão do Conhecimento**, v. 7, n. 7, 2021.

- BARBOSA, W.; PORTELLA, K. F. Síntese e caracterização das fases minerais C3S, C2S, C3A e C4AF para utilização em cimento tipo Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 54-62, 2019.
- BASSI, A. M. et al. Improving the understanding of circular economy potential at territorial level using systems thinking. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 128–140, 2021.
- BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501–516, 2014.
- BEUTLER, C. S.; LUZ, C. A. D.; BONINI, J. S. Behavior of supersulfated cement (SSC) obtained from blast furnace slag generated by charcoal and coke and submitted to thermal curing. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020.
- BEZERRA, F. H. R.; SRIVASTAVA, N. K.; SOUSA, M. O. L. **Geologia e recursos minerais da folha Mossoró, SB. 24-XDI: Estado do Rio Grande do Norte**. CPRM, 2014.
- BILSTAD, T.; STENBERG, E. S.; JESEN, B.; LARSEN, T.; TOFT, M. Offshore drilled cuttings management. **AGH Drilling, Oil, Gas**, v. 30, n. 1, 2013.
- BONFIM, W. B. et al. Resíduos de usinas de concreto como material alternativo para produção de produtos cimentícios: mapeamento sistemático. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 8, n. 1, p. 109-127, 2021.
- BRAHMI, D. et al. Preparation of amorphous silica gel from Algerian siliceous by-product of kaolin and its physico chemical properties. **Ceramics International**, v. 40, n. 7, p. 10499-10503, 2014.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Brasília, DF.
- BRITO, A. L. F. D.; SOARES, S. R.. Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 39-48, mar. 2009.
- BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116–2136, nov. 2005.
- CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. 7. ed. Oxford: Elsevier, 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**, v. 11, n. 9, p. 461-470, 2017.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. v. 1. Rio de Janeiro/RJ, 2015.
- CAREY, J. M. Spent Drilling Mud and Drill Cutting Remediation by Ex Situ Surfactant Enhanced Soil Washing. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 11, n. 3, p. 432–432, 2002. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/toc/bssc20/11/3>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

CARLS, E. G.; FENN, D. B.; CHAFFEY, S. A. Soil contamination by oil and gas drilling and production operations in Padre Island National Seashore, Texas, U.S.A. **Journal of Environmental Management**, v. 45, n. 3, p. 273–286, 1995.

CASALI, J. M. et al. Characterisation and influence of the content of waste foundry sand on rendering mortars. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 261-279, 2018.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C.. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 10-21, 2011.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C.. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño. **Revista ingeniería de construcción**, v. 31, n. 2, p. 91–104, ago. 2016.

CEF - CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Relatório de Insumos e Composições – FEV/22 - COM DESONERAÇÃO para o estado do Rio Grande do Norte**. 2022. Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-rn/SINAPI\\_ref\\_Insumos\\_Composicoes\\_RN\\_022022\\_Desonerado.zip](https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-rn/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_RN_022022_Desonerado.zip). Acesso em 15 mar. 2022.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 1, p. 205–220, 2011.

CHEN, J. J. et al. Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar. **Powder Technology**, v. 364, p. 404-415, 2020.

CHEN, Z. et al. Supercritical water oxidation of oil-based drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**, v. 332, p. 205–213, 2017.

CHENG, C. et al. Risk measurement of international oil and gas projects based on the Value at Risk method. **Petroleum Science**, v. 16, n. 1, p. 199–216, 2019.

COBB, M.; IRVINE, M.; FICHERA, M. Midia Gas Development: Drill Cuttings Disposal - Best Practicable Environmental Option. **Black Sea Oil & Gas**, v. 1, 2, p. 4-37, 2019.

COELHO, R. S. **Biorremediação de solos contaminados com arsênio por meio de lavagem de solo usando biossurfactantes**. 2018. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

COLBORN, T.; DUMANOSKI, D.; MYERS, J. P. **Nosso futuro roubado: estamos ameaçando nossa fertilidade, inteligência e sobrevivência**; Dutton: New York, 156 pp, 1996.

CORINALDESI, V; MAZZOLI, Alida; MORICONI, G. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. **Materials & Design**, v. 32, n. 3, p. 1646-1650, 2011.

- COSME, C. R. et al. Avaliação da qualidade das águas de poços em comunidades e assentamentos rurais Mossoró-RN. **Acta Iguazu**, v. 7, n. 2, p. 97-108, 2018.
- CROGNALE, S.; COCARTA, D. M.; STRECHE, A.; D'ANNIBALE, A. Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils. **New Biotechnology**. v. 58, p. 38-44, 2020.
- CUNHA, B. P. et al. (Org.). **Os saberes ambientais, sustentabilidade e olhar jurídico: visitando a obra de Enrique Kegg**. Caxias do Sul: Educs, 2015. 394 p. Disponível em: <[https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/saberes\\_ambientais\\_ebook.pdf](https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/saberes_ambientais_ebook.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- CUNHA, S. et al. Classificação de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase com base nas suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.
- DA SILVA, J. L. et al. Influence of the partial substitution of fine aggregate by granite powder in mortar on the process of natural carbonation. **Waste Management and Research**, v. 38, n. 3, p. 254–262, 2020.
- DA SILVA, L. I. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos. **Revista do Departamento de Geografia**. Universidade de São Paulo, v. 40, p. 40-48, 2020.
- DAMINELI, Bruno L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. 5. ed. [s.l.] Gulf Professional Publishing, 1988.
- DE ALMEIDA, P. C.; ARAÚJO, O. DE Q. F.; DE MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 143–156, 2017.
- DE SORDI, J. O.; NELSON, R. E.; BIANCHI, E. Mapa Causal e o Ensino de Arquétipos Sistêmicos-DOI: <http://dx.doi.org/10.15603/1982-8756/roc.v10n19p331-356>. **Revista Organizações em Contexto-online**, v. 10, n. 19, p. 331-356, 2014
- DELGADO, A. V. Mineral resource depletion assessment. **Eco-Efficient Construction And Building Materials**, p. 13-37, 2014.
- DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete- a visual primer. **Cement and Concrete Composites**. V. 26, p. 919-933, 2004.
- DRESCHER, M. S. et al. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1836-1844, 2012.
- DUAN, P. et al. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 1-6, 2013.
- DUART, M. A.. Características microestruturais de concretos adicionados de CSH e nanotubos de carbono. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

DUARTE, M. A. H. et al. Tricalcium silicate-based cements: properties and modifications. **Brazilian oral research**, v. 32, 2018.

DUQUE, J. A. et al. The effect of mixing method on tricalcium silicate-based cement. **International endodontic journal**, v. 51, n. 1, p. 69-78, 2018.

DURGUT, İ. et al. Dynamic modeling of environmental risk associated with drilling discharges to marine sediments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 99, n. 1–2, p. 240–249, out. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X15004397>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

ECCARD, L. S. et al. Análise de parâmetros dos fluidos de perfuração de poços de petróleo. **Revista Transformar**, v. 12, n. 2, p. 124–146, 2018. Disponível em: <<http://www.fsj.edu.br/transformar/index.php/transformar/article/view/175>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

EMBRAPA (Brasil). **Mapa Exploratório - Reconhecimento de solos do município de Mossoró/RN**. 2006. Disponível em: <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/rn/mossoro.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ENVIRONMENTAL STUDIES RESEARCH FUNDS (CANADA). **Cuttings treatment technology evaluation**. Dartmouth, NS: Jacques Whitford Stantec Ltd., 2009.

ESA, M. R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 219–229, 2017.

ESMAEILZADEH, F.; GOODARZANIA, I.; DANESHI, R. Solubility calculation of oil-contaminated drill cuttings in supercritical carbon dioxide using statistical associating fluid theory (PC-SAFT). **Chemical Engineering and Technology**, v. 31, n. 1, p. 66–70, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200700021>>. Acesso em: 04 fev. 2021.

EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION. **Annual Review 2020-2021**. Disponível em: [https://uepg.eu/mediatheque/media/Final\\_-\\_UEPG-AR2020\\_2021-V05\\_spreads72dpiLowQReduced.pdf](https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf). Acesso em: 01 fev. 2022.

EUROSTAT. **Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity**. Disponível em: <[http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wasgen&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en)>. Acesso em: 4 ago. 2021.

FAGUNDES, T. B. **Caracterização de cascalhos de perfuração de poços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais**. 2018. 221p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

FALK, D. G. et al. Estudo de caso: Emprego da Matriz de Leopold para a avaliação de impactos associados à produção de tabaco em uma propriedade no vale do rio Pardo. **Tecnológica**, v. 23, n. 2, p. 108-115, 2019.

FANG, Y. et al. Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 125467, 2021.

FERNANDEZ, L. C. et al. Characterization and surfactant-enhanced washing treatability of drilling fluids stored for more than 20 years. **Journal of Surfactants and Detergents**, v. 11, n. 4, p. 307–314, 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/225546475\\_Characterization\\_and\\_Surfactant-Enhanced\\_Washing\\_Treatability\\_of\\_Drilling\\_Fluids\\_Stored\\_for\\_More\\_than\\_20\\_Years](https://www.researchgate.net/publication/225546475_Characterization_and_Surfactant-Enhanced_Washing_Treatability_of_Drilling_Fluids_Stored_for_More_than_20_Years)>. Acesso em: 03 fev. 2021.

FERREIRA, R. L. D. S. **Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento**. 2017. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FERREIRA, R. L. D. S. et al. Effects of the use of beach sand on mixed mortar properties: analysis of granulometric variation. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

FIALHO, P. F. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto**. 2012. 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, 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. In: BARROSO AGUIAR, AIRES CAMÕES, RAUL FANGUEIRO, R. E.; KHERADMAND, S. C. E. M. (Eds.). **Materiais de Construção Sustentáveis**. Universidade Federal da Paraíba, 2014. p. 742.

FIGUEIRÊDO, J. M. R. D. et al. Influence of processing variables on clay-based ceramic formulations. **Materials Research**, v. 22, 2019.

FOROUTAN, M. et al. Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 400–409, 10 mar. 2018.

FREITAS et al. pH, sódio, potássio, cálcio, magnésio e alumínio em solos contaminados com fluido de perfuração de poços de petróleo após ensaios de lixiviação. **Ciência Rural**, 5 maio. 2015. v. 45, n. 8, p. 1418–1423. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782015000801418&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782015000801418&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 10 set. 2020.

FREITAS, F. C. DE. **Caracterização química de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e seus efeitos em plantas e nas bases trocáveis do solo**. 2013. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2013.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (Ceará). **Podzólicos Vermelho-Amarelo Eutrófico**. 2014. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=1010>. Acesso em: 26 nov. 2021.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. Boston, MA: Springer US, 1994.

G1. **Produção de petróleo feita por operadores independentes em campos maduros sobe 300% no RN**. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2021/11/26/producao-de-petroleo-feita-por-operadores-independentes-em-campos-maduros-sobe-300percent-no-rn.ghtml>. Acesso em: 26 nov. 2021.

- GÁLVEZ-MARTOS, J.-L. et al. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166–178, set. 2018.
- GARDNER, R. O. N. Overview and characteristics of some occupational exposures and health risks on offshore oil and gas installations. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 47, n. 3, p. 201-210, 2003.
- GEBLER, L.; LONGHI, A. Aplicação da matriz de Leopold para avaliação expedita de impacto ambiental na produção de morangos: um estudo de caso em Ipê (RS). **Ambiência**, v. 14, n. 3, p. 709-727, 2018.
- GERANMAYEH, A. et al. Extraction of hydrocarbons from the contaminated soil of Pazanan II production unit by supercritical carbon dioxide. **The Journal Of Supercritical Fluids**, v. 72, p. 298-304, dez. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844612003191>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- GHADERI, S. et al. Application of sustainable saffron purple petals as an eco-friendly green additive for drilling fluids: A rheological, filtration, morphological, and corrosion inhibition study. **Journal of Molecular Liquids**, v. 315, p. 113707, 2020.
- GHASEMI, S. et al. Treatment of petroleum drill cuttings using stabilization/solidification method by cement and modified clay mixes. **Iranian Journal of Health, Safety and Environment**, v. 4, n. 3, p. 781-787, 2017.
- GNONI, M. G. et al. Supporting Circular Economy through Use-Based Business Models: The Washing Machines Case. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 49–54, 2017.
- GOODARZANIA, I.; Treatment Of Oil-Contaminated Drill Cuttings Of South Pars Gas Field In Iran Using Supercritical Carbon Dioxide. **Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering**, v. 30, n. 5, p. 607–611, 2006. Disponível em: <<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=59446>>. Acesso em: 05 fev. 2021.
- GOUW, J. A.; PARRISH, D.D.; FROST, G. J.; TRAINER, M. Reduced emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub> from US power plants owing to switch from coal to natural gas with combined cycle technology. **Earth's Future**, v. 2, n. 2, p. 75-82, 2014.
- GROWCOCK, F.; HARVEY, T. Drilling fluids. In: **Drilling fluids. In: Drilling Fluids Processing Handbook**. 1. ed. Oxford, UK: ASME Shale Shaker Committee, 2005. p. 15–68.
- GUDIMOV, A. V. Discharge of drill cuttings in the Arctic seas and responses of bottom fauna: bivalve *Mytilus edulis* L. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2021. p. 022041. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/937/2/022041/pdf>>. Acesso em 28 jan. 2021.
- GUEDES, J. DO N. **Estratégias de manejo do cascalho oriundo da perfuração de poços de petróleo**. 121p. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2014.

GÜNEYISI, E. et al. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 9–16, 2015.

GUTLEB, A. C.; HELSBERG, A.; MITCHELL, C. Heavy metal concentrations in fish from a pristine rainforest valley in Peru: A baseline study before the start of oil-drilling activities. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 2002. v. 69, n. 4, p. 523–529.

H. ALMABROK, M.; G. MCLAUGHLAN, R.; VESSALAS, K. EFFECT OF SYNTHETIC DRILL CUTTINGS ON MORTAR PROPERTIES. **Malaysian Journal of Civil Engineering**, v. 30, n. 3, p. 405–414, 19 nov. 2018.

HAFID, H. et al. Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 80, p. 44-51, 2016.

HALBINIAK, Jacek et al. A Proposition of an In situ Production of a Blended Cement. **Materials**, v. 13, n. 10, p. 2289, 2020.

HEIDARZADEH, N.; GITIPOUR, S.; ABDOLI, M. A. Characterization of oily sludge from a Tehran oil refinery. **Waste Management and Research**, v. 28, n. 10, p. 921–927, out. 2010. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/26807170\\_Characterization\\_of\\_Oily\\_Sludge\\_from\\_a\\_Tehran\\_Oil\\_Refinery](https://www.researchgate.net/publication/26807170_Characterization_of_Oily_Sludge_from_a_Tehran_Oil_Refinery)>. Acesso em 28 jan. 2021.

HERMANN, A. et al. Using a particle packing model considering cement as part of the "dry arrangement". **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

HU, G. et al. Human health risk-based life cycle assessment of drinking water treatment for heavy metal (loids) removal. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 121980, set. 2020.

HU, G. et al. Life cycle assessment of low-temperature thermal desorption-based technologies for drill cuttings treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, n. September 2020, p. 123865, 2021b.

HU, G. et al. Low-temperature thermal desorption and secure landfill for oil-based drill cuttings management: Pollution control, human health risk, and probabilistic cost assessment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 410, p. 124570, 2021a.

HUANG, Q. et al. Utilizing shale gas drilling cuttings as admixture in cement mortars: a case study in Fuling, Chongqing, China. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-8, 2022.

IBRAHIM, M. B. A.; YAO, K. A.; DIGBEHI, Z. B. Mineralogical characterization of Upper Cretaceous petroleum source rocks of Termit sedimentary basin (Niger). **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 11, p. 1173-1183, 2020.

IMARHIAGBE, E. E.; OBAYAGBONA, N. O.. Environmental Evaluation and Biodegradability of Drilling Waste: A Case Study of Drill Cuttings from Ologbo Oilfield Wells at Edo State, Nigeria. In: **Oil and Gas Wells**. IntechOpen, 2019. p. 17.

INTERNATIONAL LOGGING. **Basic Mud Logging Manual**, 2001. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/183549649/Basic-Mud-Logging-Manual-pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2021.



ISAEV, S. A., BABAEV, F. M., RAGIMZADE, A. I. et al. Ecological-geochemical evaluation of changes in the biosphere of the Absheron peninsula. **Baku**: “MBM” publishing house, 2007. 470p.

**ISO. International Standard ISO 14001: Environmental management systems - Requirements with guidance for use**, 2015. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/60857.html>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

JARBAS, T. et al. **Cambissolos**. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma\\_caatinga/arvore/CONT000g798rt3o02wx5ok0wtedt3n5subswf.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g798rt3o02wx5ok0wtedt3n5subswf.html). Acesso em: 01 fev. 2022.

JASIELEC, J. J. et al. Effective and Apparent Diffusion Coefficients of Chloride Ions and Chloride Binding Kinetics Parameters in Mortars: Non-Stationary Diffusion–Reaction Model and the Inverse Problem. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5522, 2020.

JIAO, D. et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and concrete composites**, v. 83, p. 146-159, 2017.

JOEL, O. F.; AMAJUOYI, C. A. Determination of Selected Physicochemical Parameters and Heavy Metals in a Drilling Cutting Dump Site at Ezeogwu–Owaza, Nigeria. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 13, n. 2, p. 27-31, 2009.

JÚNIOR, I. P. et al. Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings. **Journal of Environmental Management**, v. 196, p. 659–665, jul. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717302840?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

KARIMI, M. Drill-Cuttings Analysis for Real-Time Problem Diagnosis and Drilling Performance Optimization. In: SPE ASIA PACIFIC OIL AND GAS CONFERENCE AND EXHIBITION, 1., 2013, Jakarta. **Anais [...]**. Jakarta: All Days, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/165919-MS>. Acesso em: 18 fev. 2021.

KENJEGALIEV, A. K.; ORAZBAEV, B. B.; JÝMAGALIEV, S. J. Issledovanie vlianiia neftepoiskovyh operatsii na ekologicheskoe sostoiianie Kazahstanskogo sek-tora Kaspiuskogo moria i razrabotka matematicheskoi modeli dreifa neftnaaticheskoi modeli dreifa neftnaaticheskoi. **Otchet po grantovoi nauchnomu proektu**, 2014.

KHALILOVA, H. K. Study of purification of oil contaminated soils. **Chemical industry**. v. 90, n. 1, p. 45-49, 2013.

KHALILOVA, H. K. The impact of oil contamination on soil ecosystems. **Biological and Chemical Research**, v. 2015, p. 133-139, 2015.

KOGBARA, R. B. et al. Recycling stabilised/solidified drill cuttings for forage production in acidic soils. **Chemosphere**, v. 184, p. 652-663, 2017.

KRZYZANOWSKI, J. Environmental pathways of potential impacts to human health from oil and gas development in northeast British Columbia, Canada. **Environmental Reviews**, v. 20, n. 2, p. 122–134, 2012.

KRZYZANOWSKI, J. Environmental pathways of potential impacts to human health from oil and gas development in northeast British Columbia, Canada. **Environmental Reviews**, v. 20, n. 2, p. 122–134, 2012.

- KUJAWSKA, J.; PAWŁOWSKA, M. Effect of drill cuttings addition on physicochemical and chemical properties of soil and red clover (*Trifolium pretense* L.) growth. **PLoS ONE**, v. 15, n. 11 November, p. 1–16, 2020.
- KUNTHER, W.; FERREIRO, S.; SKIBSTED, J.. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 5, n. 33, p. 17401-17412, 2017.
- KURDVE, M. et al. Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 304–315, 2015.
- LARSSON, A. I. et al. Tolerance to long-term exposure of suspended benthic sediments and drill cuttings in the cold-water coral *Lophelia pertusa*. **Marine Pollution Bulletin**, v. 70, n. 1–2, p. 176–188, 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23510599/>>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- LEONARD, S. A.; STEGEMANN, J. A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: leaching studies. **Journal of hazardous materials**, v. 174, n. 1-3, p. 484-491, 2010.
- LEONARD, S. A.; STEGEMANN, J. A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**. v. 174, n. 3, p. 463-472, 2010.
- LEOPOLD, L. B., F. E. Clarke, B. B. Hanshaw, and J. E. Balsley. 1971. **A procedure for evaluating environmental impact**. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington, D.C.
- LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; OUCHAGOUR, Youssef. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439-449, 2012
- LINS, F. A. F.; LUZ, A. B. **Fluidos de perfuração**. Rio de Janeiro: CETEM, 2003. 26p.
- LIU, D. et al. Environmental performance, mechanical and microstructure analysis of non-fired bricks containing water-based drilling cuttings of shale gas. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 215-225, 2018.
- LIU, H. et al. Remediation of oil-based drill cuttings using low-temperature thermal desorption: Performance and kinetics modeling. **Chemosphere**, v. 235, p. 1081–1088, nov. 2019. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31561298/>>. Acesso em: 07 fev. 2021.
- LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2019. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- LUMMUS, J. L.; AZAR, J. J. **Drilling Fluids Optimization: A Practical Field Approach**. Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1986.
- MA, B. et al. Experimental study on harmless disposal of waste oil based mud using supercritical carbon dioxide extraction. **Fuel**, v. 252, p. 722–729, set. 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/333201874\\_Experimental\\_study\\_on\\_harmless\\_disposal\\_of\\_waste\\_oil\\_based\\_mud\\_using\\_supercritical\\_carbon\\_dioxide\\_extraction](https://www.researchgate.net/publication/333201874_Experimental_study_on_harmless_disposal_of_waste_oil_based_mud_using_supercritical_carbon_dioxide_extraction)>. Acesso em: 01 fev. 2021.

MACIEL, M. H. et al. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 245-259, 2018.

MAGALHÃES et al. Reducing conditions on barium absorption in rice plants cultured in BaSO<sub>4</sub>-enriched soil doi: 10.4025/actasciagron.v36i1.17539. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 7 jan. 2014. v. 36, n. 1, p. 119. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/17539>>. Acesso em: 10 set. 2020.

MAGALHÃES, M. O. L. **Dinâmica do bário em solos contaminados por resíduos oriundos da perfuração de poços de petróleo**. 2011. 161p. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MAGALHÃES, M. O. L.; SOBRINHO, N. M. B. DO A.; MAZUR, N. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 219-227, 30 jun. 2011. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cflo/a/ZZTc3t4bPLzzSq9kxz6Pk9F/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

MANGULKAR, M.; JAMKAR, S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal Of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 5, p. 143-148, 2013.

MEDEIROS et al. ESTUDO DA VIABILIDADE DE USO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DA BACIA POTIGUAR NA PRODUÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA DE QUEIMA. **In: 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica**. 2013.

MEDEIROS, A. G. **Propriedades de concreto sustentável produzido com pó do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita**. 2019. 91f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró - RN, 2019.

MEDEIROS, D. H. M. D.; CAVALCANTE, A. A.; PINHEIRO, L. D. S. Aspectos pluviométricos e heterogeneidade do relevo na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Apodi/Mossoró. **GEOTemas**, v. 8. 2018.

MEHMOOD, F.; KHAN, A.; MUNEEB, R.; LATIF, M. R.; MUHAMMAD, H. Environmental concerns caused by drilling and production operations in petroleum industry (a case study). **Sci. Int. (Lahore)**, v. 28, n. 5, p. 4497-4499, 2016.

MENA, M.; WALTHER, A. M. Rock magnetic properties of drill cutting from a hydrocarbon exploratory well and their relationship to hydrocarbon presence and petrophysical properties. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 371, n. 1, p. 217-228, 2012. Disponível em: <<http://sp.lyellcollection.org/lookup/doi/10.1144/SP371.14>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

MENDES, G. A.; EFFTING, C.; SCHACKOW, A. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granito: propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 403-418, 2020.

- MENDES, J. C. **Viabilidade técnica do uso de linear alquil benzeno sulfonato de sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- MENDONÇA, G. C.; FERREIRA, C. C.; PAVAN, F. A. Análise da perda ao fogo de corpos de prova cerâmicos formulados com cinza leve proveniente da gaseificação do carvão mineral pulverizado. In: **V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. 2017.
- MENESES, C. G.; PAULA, G. D. A. Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. **RUnPetro-ISSN 2316-6681**, v. 3, n. 1, p. 29-38, 2014.
- MENG, T.; YU, Y.; WANG, Z.. Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash. **Composites Part B: Engineering**, v. 117, p. 124-129, 2017.
- MIES, Annika; GOLD, Stefan. Mapping the social dimension of the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128960, 2021.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021**. Brasília - DF, Brasil, 2021.
- MNEINA, A. et al. Engineering properties of Controlled Low-Strength Materials containing Treated Oil Sand Waste. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 277–285, 2018.
- MOHAMMED, B.; CHEESEMAN, C. R. Use of oil drill cuttings as an alternative raw material in sandcrete blocks. **Waste and Biomass Valorization**, v. 2, n. 4, p. 373-380, 2011.
- MOREJÓN-ALONSO, L.; CARRODEGUAS, R. G.; SANTOS, L. A. D. Effects of silica addition on the chemical, mechanical and biological properties of a new  $\alpha$ -Tricalcium Phosphate/Tricalcium Silicate Cement. **Materials Research**, v. 14, n. 4, p. 475-482, 2011.
- MOTAMEDIMEHR, S.; GITIPOUR, S. Sub and supercritical decontamination of oil-based drill cuttings: a review. **Environmental Energy and Economic Research 2019**, v. 3, n. 3, p. 225–240, 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/334164653\\_Sub\\_and\\_Supercritical\\_Decontamination\\_of\\_Oil-Based\\_Drill\\_Cuttings\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/334164653_Sub_and_Supercritical_Decontamination_of_Oil-Based_Drill_Cuttings_A_Review)>. Acesso em: 01 fev. 2021.
- MURTAZAIIEV, S. Y. et al. Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration for carbonation. **Modern Applied Science**, v. 9, n. 4, p. 233, 2015.
- NENO, C.; BRITO, J. D.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials research**, v. 17, n. 1, p. 168-177, 2014.
- NETO; SILVA, 2022 - comentario na dissertação:  
[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio\\_mata\\_sul\\_pernambucana/arvore/CO NT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CO NT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html) pag.66
- NILSSSEN, I. et al. Assessing the potential impact of water-based drill cuttings on deep-water calcareous red algae using species specific impact categories and measured oceanographic and discharge data. **Marine Environmental Research**, v. 112, p. 68–77, dez. 2015. Elsevier BV. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141113615300477>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

NISTOV, A.; KLOVNING, R.; LEMSTAD, F.; RISBERG, J.; OGNEDAL, T. A.; HAVER, P. A. Noise reduction interventions in the Norwegian Petroleum Industry. *In: International conference on health, safety and environment in oil and gas exploration and production*, I, 2008, Perth. OnePetro, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/156848-MS>.

OGP - International Association of Oil & Gas Producers (2003). **Report N° 342:** Environmental aspects of the use and disposal of non aqueous drilling fluids associated with offshore oil & gas operations. Disponível em: <[https://www.shell.com/business-customers/chemicals/our-products/higher-olefins-and-derivatives/neoflo/\\_jcr\\_content/par/tabbedcontent/tab\\_1374592840/textimage.stream/1447787759021/9050d59f3873723b16457940ce08dd0899e64c9a/342.pdf](https://www.shell.com/business-customers/chemicals/our-products/higher-olefins-and-derivatives/neoflo/_jcr_content/par/tabbedcontent/tab_1374592840/textimage.stream/1447787759021/9050d59f3873723b16457940ce08dd0899e64c9a/342.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2021.

OKOGBUE, C. O.; ANYIAM, O. A.; ADUN, A. A. Impact assessment of drilling waste generated in “Eden Field” offshore, Niger Delta, Nigeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 9, p. 1–9, 2016.

OKPARANMA, R. N. et al. Towards enhancing sustainable reuse of pre-treated drill cuttings for construction purposes by near-infrared analysis: A review. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**, v. 9, n. 3, p. 19-39, 2018.

OKPARANMA, R. N. et al. Towards enhancing sustainable reuse of pre-treated drill cuttings for construction purposes by near-infrared analysis: a review. **Journal Of Civil Engineering and Construction Technology**, v. 9, n. 3, p. 19-39, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/325626555\\_Towards\\_enhancing\\_sustainable\\_reuse\\_of\\_pre-treated\\_drill\\_cuttings\\_for\\_construction\\_purposes\\_by\\_near-infrared\\_analysis\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/325626555_Towards_enhancing_sustainable_reuse_of_pre-treated_drill_cuttings_for_construction_purposes_by_near-infrared_analysis_A_review)>. Acesso em: 20 jan. 2021.

OKPARANMA, R. N.; CHIKWUE, M. I.; AYOTAMUNO, M. J. Pozzolanic potential of pre-Treated oil-based drill cuttings for mortar production. **Journal of Agricultural and Environmental engineering Technology**, v. 2, n. 1, p. 1-16, 2020.

OLASANMI, I. O.; THRING, R. W. **Evaluating rhamnolipid-enhanced washing as a first step in remediation of drill cuttings and petroleum-contaminated soils.** *Journal Of Advanced Research*, [S.L.], v. 21, n. 2020, p. 79-90, jan. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32071776/>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, C. O. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, v. 23, 2018.

OLIVEIRA, I. R. DE et al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas - Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

ONUAGULUCHI, O.; PANESAR, D. K. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 125-131, 2014.

- ONWUKWE, S. I. Adaptation of Thermal Desorption in the Treatment of Oil Based Drill Cuttings. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**, v. 2, n. 12, p. 78–80, 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/333324439\\_Adaptation\\_of\\_Thermal\\_Desorption\\_in\\_the\\_Treatment\\_of\\_Oil\\_Based\\_Drill\\_Cuttings](https://www.researchgate.net/publication/333324439_Adaptation_of_Thermal_Desorption_in_the_Treatment_of_Oil_Based_Drill_Cuttings)>. Acesso em: 07 fev. 2021.
- ONWUKWE, S. I.; NWAKAUDU, M. S. Drilling wastes generation and management approach. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 3, n. 3, p. 252, 2012.
- OWENS, C. K. Exploration and production waste management guidelines from the E&P forum. **Society of Petroleum Engineers - SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference 1994, HSE 1994**, n. 2, p. 485–493, 1994.
- OZDEMIR, Ozgul Dere; PISKIN, Sabriye. Characterization and environment risk assessment of galvanic sludge. **J Chem Soc Pakistan**, v. 34, n. 4, p. 1032-1036, 2012.
- PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 829–836, fev. 2009.
- PAGE, P. W.; GREAVES, C.; LAWSON, R.; HAYES, S.; BOYLE, F. Options for the recycling of drill cuttings. *In: Proceedings SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference*, I, 2003, San Antonio, Texas, OnePetro.
- PALM, S. et al. Cements with a high limestone content - Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 308–318, 2016.
- PAPONG, S. et al. Environmental life cycle assessment and social impacts of bioethanol production in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 157, p. 254–266, 2017.
- PASTOR, J.; HERNÁNDEZ, A. J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: Determinants for restoring their impact. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. 42–49, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479711002453?via%3Dihub>>. Acesso em: 30 jan. 2021.
- PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. **Revista Ambiente Construído**, v. 42, p. 129-139, 2009.
- PEREIRA, D. G. C. et al. Potassium chloride: impacts on soil microbial activity and nitrogen mineralization. **Ciência Rural**, v. 49, 2019.
- PEREIRA, F. D. C.; LEAL, C. E. F.; FERREIRA, F. G. D. S. Efeitos de nanossílica no desempenho e na durabilidade de concretos submetidos ao ataque de CO<sub>2</sub>. **Concreto & Construções**, n. 103, p. 67-73, 2021.
- PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás**. 2010. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PEREIRA, M. S. et al. Microwave heating: A feasible alternative for drilled cuttings drying in offshore environments. **SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings**, v. 2, p. 1484–1491, 2013. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/267460909\\_Microwave\\_Heating\\_A\\_Feasible\\_Alternative\\_for\\_Drilled\\_Cuttings\\_Drying\\_in\\_Offshore\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/267460909_Microwave_Heating_A_Feasible_Alternative_for_Drilled_Cuttings_Drying_in_Offshore_Environments)>. Acesso em: 09 fev. 2021.

PETRI, I. et al. OTC-29964-MS Microwave Drying of Reservoir Drilled Cuttings. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE BRASIL, 2019, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 2019. p. 1-7. Disponível em: <<https://onepetro.org/OTCBRASIL/proceedings-abstract/19OTCB/1-19OTCB/D011S004R005/180814?redirectedFrom=PDF>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PIMPLIKAR, S. S.; SONAWANE, R. T. Use of Recycled Aggregate Concrete. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, p. 52-59, 2012.

PIPER, W.; HARVEY, T.; MEHTA, H. Waste Management. In: **Drilling Fluids Processing Handbook**. New York: Elsevier Inc., 2004. p. 367–412.

PIRES, P. J. M. **Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha**. 173p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2009.

POYAI, T. et al. Solvent-based washing as a treatment alternative for onshore petroleum drill cuttings in Thailand. **Science of the Total Environment**, 2020. v. 718, p. 137384. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137384>>. Acesso em: 10 set. 2020.

POYAI, T. et al. Solvent-based washing as a treatment alternative for onshore petroleum drill cuttings in Thailand. **Science of the Total Environment**, v. 718, p. 137384, 2020.

POZEBON, D. et al. Heavy metals contribution of non-aqueous fluids used in offshore oil drilling. **Fuel**, v. 84, n. 1, p. 53–61, jan. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236104002170?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

POZZETTI, V. C; CALDAS, J. N. O descarte de resíduos sólidos no âmago da sustentabilidade. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 10, n. 1, p. 183-205, 2019.

PROSKE, T. et al. Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 413–421, set. 2014.

PROSKE, T. et al. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 38–46, set. 2013.

PUISEUX, A.; GUILLOU, A.; MERZI, T. Overview of drill cuttings management options through modeling, monitoring and life cycle assessment. **Society of Petroleum Engineers - SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability 2020, HSE and Sustainability 2020**, 2020.

RANA, S. Facts and data on environmental risks-oil and gas drilling operations. *In: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, I, 2008, Perth. OnePetro, 2008.

RANGEL, N. D. S. Gerenciamento de resíduos da perfuração de poços de petróleo e gás offshore: fluidos e cascalhos de perfuração. 2015. 62p. Monografia. (Especialização em Engenharia de Campo SMS) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

RIBEIRO, F. D. M.; KRUGLIANSKAS, I. A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. *In: XVI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA)*. São Paulo, 2014.

RIDZUAN, A. R. M. et al. The influence of Recycled Aggregate on the Early Compressive Strength and Drying Shrinkage of Concrete. *In: Structural Engineering, Mechanics and Computation*. Elsevier, 2001. p. 1415–1422.

ROBINSON, J. et al. Microwave Treatment of Oil-Contaminated Drill Cuttings at Pilot Scale. *Spe Drilling & Completion*, v. 24, n. 03, p. 430-435, 19 ago. 2009. Society of Petroleum Engineers (SPE). Disponível em: <<https://onepetro.org/DC/article-abstract/24/03/430/191906/Microwave-Treatment-of-Oil-Contaminated-Drill?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

RODRIGUES, A. J. S. et al. Aplicação da Política dos 3R's em conjunto com a tríade da sustentabilidade, para incentivar a redução de resíduos sólidos em Serra Branca–PB. *Anais. XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2017. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STP\\_248\\_433\\_30974.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_248_433_30974.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2021.

RODRIGUES, N. M. **Avaliação do efeito da lavagem com surfactante na Biodegradação de um solo contaminado com óleo diesel**. 2011. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RODRÍGUEZ-LÓPEZ, L. C. et al. Recovery of impregnated hydrocarbon in drill cuttings using supercritical carbon dioxide. *Journal of Environmental Management*, v. 285, p. 112134, 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33588162/>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

ROSENTHAL, A. **Safe Design of a Continuous Supercritical Extraction System for the Extraction of Drilling Fluid from Drill Cuttings**. 2012. Tese (Master of Applied Science) - School of Engineering, University of Guelph, Ontário, 2012.

ROSSEL, R. V.; WEBSTER, R. Predicting soil properties from the Australian soil visible–near infrared spectroscopic database. *European Journal of Soil Science*, v. 63, n. 6, p. 848-860, 2012.

ROSSETTI, K. D. V.; CENTURION, J. F. Compactação em Latossolos e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Agro@Mbiente On-Line*, v. 11, n. 3, p. 181-190, 11 jul. 2017.

ROSSI, A. S. et al. Kinetics of microwave heating and drying of drilling fluids and drill cuttings. *Drying Technology*, v. 35, n. 9, p. 1130-1140, 4 out. 2016. Informa UK Limited.



Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2016.1233425>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

SAIKIA, N. et al. Use of Pb blast furnace slag as a partial substitute for fine aggregate in cement mortar. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 14, n. 2, p. 102–112, 2012.

SAINTPERE, S.; MORILLON-JEANMAIRE, A. Supercritical CO<sub>2</sub> Extraction Applied to Oily Drilling Cuttings. **SPE Reservoir Engineering (Society of Petroleum Engineers)**, p. 477–484, 2000. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/00ATCE/All-00ATCE/SPE-63126-MS/132129>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

SAMEDOV, P. A.; BABABEKOVA, L. A.; ALIYEVA, B. B. Biological characteristics of technogenic contaminated soils. **Baku**: Elm publishing. 2011. 104 p.

SANDU, Ciprian et al. Electrokinetic oxidant soil flushing: a solution for in situ remediation of hydrocarbons polluted soils. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 799, p. 1-8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.05.036>.

SANTOS, A. R. et al. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. **Construction and Building materials**, v. 187, p. 907-922, 2018.

SANTOS, H. G. D. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, H. G. D.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. D. P. C.. **Chernossolos Rêndzicos**. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000gn230xhp02wx5ok0liq1mqbgzx2od.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn230xhp02wx5ok0liq1mqbgzx2od.html). Acesso em: 01 fev. 2022.

SCHLUMBERGER LIMITED (Estados Unidos da América). **Carbonato de cálcio**. Disponível em: [https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/c/calcium\\_carbonate](https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/c/calcium_carbonate). Acesso em: 01 fev. 2022.

SCRIVENER, K. et al. (Ed.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton, FL, USA. Crc Press, 2016.

SENFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, n. 1, p. 12-20, 2010.

SHANG, H. et al. Treatment of Oil-Contaminated Drill Cuttings by Microwave Heating in a High-Power Single-Mode Cavity. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 17, p. 6837-6844, 22 jul. 2005. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie0500772>. Acesso em: 15 fev. 2021.

SHARIF, M. D. et al. Drilling Waste Management and Control the Effects. **Journal Of Advanced Chemical Engineering**, v. 07, n. 01, p. 1-9, fev. 2017. Disponível em: <<https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/drilling-waste-management-and-control-the-effects-2090-4568-1000166.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

- SHARMA, A.; SINGH, P.; KAPOOR, K.. Utilization of recycled fine powder as an activator in fly ash based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126581, 2022.
- SHEN, W. et al. Coarse aggregate effectiveness in concrete: Quantitative models study on paste thickness, mortar thickness and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123171, 2021.
- SILVA, D. N. N. **Tratamento de cascalho de perfuração utilizando sistemas microemulsionados**. 2015. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- SILVA, I. A. et al. Efeito do armazenamento de argilas esmectíticas nas suas propriedades reológicas. **Cerâmica**, v. 63, p. 109-115, 2017.
- SILVA, L. J. DA. **Gerenciamento de borras oleosas provenientes de refinaria de petróleo**. 2013. 186p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400-415, 2016.
- SOLO-GABRIELE, H. M. et al. Towards integrated modeling of the long-term impacts of oil spills. **Marine Policy**, v. 131, p. 104554, 2021.
- SOMEI, M. R.; SHAVANDI, M.; DASTGHEIB, S. M. M.; AMOOZEGAR, M.A. Bioremediation of oil-based drill cuttings by a halophilic consortium isolated from oil-contaminated saline soil. **3 Biotech**, v. 8, n. 5, p. 1-13, 2018.
- SPEIGHT, J. G. Environmental Regulations. In: **Environmental Organic Chemistry for Engineers**. Elsevier, 2017. p. 355–386.
- SPÍNOLA, D. C. S. **Obtenção de uma vitrocerâmica a partir de resíduos da perfuração de poços de petróleo e do beneficiamento do caulim**. 2018. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- SUSANTO, A.; MULYONO, N. B. Risk assessment method for identification of environmental aspects and impacts at ore processing industry in Indonesia. **Journal of Ecological Engineering**, v. 19, n. 2, p. 72–80, 2018.
- SUSLICK, S. B.; SCHIOZER, D.; RODRIGUEZ, M. R. Uncertainty and Risk Analysis in Petroleum Exploration and Production. **TERRÆ**, v. 6, n. 1, p. 30–41, 2009.
- SWIGART, J.; HEO, J.; WOLF, D. Soil contamination assessments from drilling fluids and produced water using combined field and laboratory investigations: A case study of arkansas, USA. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 5, p. 1–16, 2021.
- TEIXEIRA, C. S.; CORDON, H. C. F. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO. **Anais do 5.º Seminário Mauá de Iniciação Científica**, 2013.

TEIXEIRA, E. D. C. **Estudo da zona de transição de concretos preparados com metacaulim através de análise nanomecânica**. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2020.

THOMAS, J. E (Org.). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

THONGSANITGARN, P. et al. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 410-417, 2014.

TORRES, M. M. et al. Análise geoquímica de rochas sedimentares argilosas a partir do conteúdo dos elementos maiores, perda ao fogo e difração de raios X. **Geosciences= Geociências**, v. 37, n. 1, p. 39-53, 2018.

TUKKER, A. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 4, p. 435–456, 2000.

UKOOA - United Kingdom Offshore Operators Association. **Drill Cuttings Initiative Final Report**. London-UK, 2002. Disponível em: <[http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round8/perfuracao\\_R8/Bibliografia/UKOOACASCALHO.PDF](http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round8/perfuracao_R8/Bibliografia/UKOOACASCALHO.PDF)>. Acesso em: 02 set. 2021.

VALADÃO, F. C. D. A. et al. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 40, p. 183-195, 2017.

VARJANI, S. et al. Petroleum waste biorefinery: A way towards circular economy. In: **Waste Biorefinery**. Elsevier, 2021. p. 375–389.

VENTURA, R. A. **Avaliação da degradação de pastas de cimento aditivadas com sílica, em ambientes de alta concentração de dióxido de carbono**. 2015. 54f. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. DENSIDADE DE PARTÍCULAS. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA, 2017. p. 8.

WANG, C. et al. Utilization of oil-based drilling cuttings pyrolysis residues of shale gas for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 359-368, 2018.

WANG, Chao-qiang et al. Utilization of oil-based drilling cuttings pyrolysis residues of shale gas for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 359-368, 2018.

WEI, Guilin et al. Role of amorphous silica gel in B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-SiO<sub>2</sub> to immobilize iodine waste. **Journal of Nuclear Materials**, v. 543, p. 152619, 2021.

WISEN, J.; CHESNAUX, R.; WENDLING, G.; WERRING, J.; BARBECOT, F.; BAUDRON, P. Assessing the potential of cross-contamination from oil and gas hydraulic

fracturing: A case study in northeastern British Columbia, Canada. **Journal of environmental management**, v. 246, p. 275-282, 2019.

WITJES, S.; LOZANO, R. Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 37–44, set. 2016.

XIAO, J.; LI, W.; POON, C. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China - A review. **Science China Technological Sciences**, v. 55, n. 6, p. 1463–1480, 20 jun. 2012.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. **Cement and concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005.

ZAMORA-LEDEZMA, E.; GARCÍA, J. V. Mineral Oil-Based Drilling Cuttings Phytotoxicity Assessment Using Species of Temperate and Tropical Climate. **Global Journal of Environmental Research**, v. 7, n. 1, p. 01–07, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/274897105\\_Mineral\\_Oil-Based\\_Drilling\\_Cuttings\\_Phytotoxicity\\_Assessment\\_Using\\_Species\\_of\\_Temperate\\_and\\_Tropical\\_Climate](https://www.researchgate.net/publication/274897105_Mineral_Oil-Based_Drilling_Cuttings_Phytotoxicity_Assessment_Using_Species_of_Temperate_and_Tropical_Climate)>. Acesso em: 31 jan. 2021.

ZENKOV, I. A. Production of construction materials based on drilled cuttings for the road industry. **Journal of Economics and Social Sciences**, v. 4, n. 10, p. 1–4, 2017. Disponível em: <<http://earchive.tpu.ru/handle/11683/55719>>. Acesso em: 01 fev. 2021.

ZHANG, Shu et al. Applications of water-stable metal-organic frameworks in the removal of water pollutants: A review. **Environmental Pollution**, v. 291, p. 118076, 2021.

ZHANG, Y. et al. Characteristics of Fracture Propagation Induced by Supercritical CO<sub>2</sub> in Inter-Salt-Shale Reservoir. **Geofluids**, v. 2019, p. 1-9, 10 abr. 2019. Hindawi Limited. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2019/7132843/>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ZHU, P. et al. Cement with high-volume limestone powder: effect of powder fineness on packing density, strength and hydration behaviour. **Advances in Cement Research**, p. 1-14, 2021.