

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

JOSÉ DIÓGO BARBOSA DE ALMEIDA

**APROVEITAMENTO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Marechal Deodoro – AL

2021

JOSÉ DIÔGO BARBOSA DE ALMEIDA

**APROVEITAMENTO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sheyla Karolina Justino Marques

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Raposo

Marechal Deodoro – AL

2021



**Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Marechal Deodoro
Biblioteca Lúcio Soley Lomônaco**

A447a

Almeida, José Diôgo Barbosa de.

Aproveitamento de cascalho de perfuração de poços de petróleo na produção de concreto permeável / José Diôgo Barbosa de Almeida – 2021.

76 f. : il., col.

1 CD-ROM : 4.02 megabytes (PDF) ; 4 ¾ pol. ; caixa acrílica (12,5 cm x 14 cm).

Inclui bibliografia e figuras.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Marechal Deodoro*, Marechal Deodoro, 2021.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Sheyla Karolina Justino Marques.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Raposo.

1. Petróleo. 2. Permeabilidade. 3. Concreto permeável. 4. Cascalho. I. Título. II. Marques, Sheyla Karolina Justino.

CDD: 620.1

**Maria Jôse Nascimento Leite Machado
Bibliotecária – CRB-4/2125**

JOSÉ DIÓGO BARBOSA DE ALMEIDA

**APROVEITAMENTO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Aprovado em: 24 de maio de 2021.

Orientadora:

Prof. Dr^a. Sheyla Karolina Justino Marques, IFAL / *campus* Palmeira dos Índios

Coorientadora:

Prof. Dr^a. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Raposo, IFAL / *campus* Maceió

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eugênio Bastos da Costa, IFAL / *campus* Coruripe

Prof. Dr^a. Priscylla Cinthya Alves Gondim, IFRN / *campus* Mossoró

Dr^a. Larissa Bezerra da Silva, UFRN / *campus* Natal

Marechal Deodoro – AL

2021

Aos meus pais, por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui;

À Clara, minha Esposa, com quem eu posso contar;

Ao Matheus, nosso filho, que mesmo antes de nascer tem me feito descobrir o que é ser Pai.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que, com sua graça, deu-me mais do que eu sempre mereci.

À professora Sheyla, que só pelo fato de conhecê-la já seria uma honra, agradeço por contribuir não só neste trabalho, mas por todas as conquistas e aprendizado ao longo dessa jornada. Fico feliz ao caminhar ao lado de uma pessoa tão organizada, talentosa e esforçada, que consegue superar até as melhores expectativas.

À professora Áurea, pelo comprometimento, talento, pelos ensinamentos, pelas oportunidades de desenvolvimento propiciadas e, principalmente, pelo exemplo de pessoa e profissional.

Ao Instituto Federal de Alagoas e a todos os professores e funcionários desta instituição que contribuíram para minha formação desde a graduação.

Aos amigos do PPGTEC pelo companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos e familiares que sempre vibraram com minhas conquistas.

Aos meus avós por todas as orações e palavras de carinho.

À Clara, minha Esposa e companheira de vida, que sempre lutou ao meu lado por tudo. Nos momentos bons, vibrou comigo e nos momentos difíceis soube usar das melhores palavras para me incentivar a ir mais longe.

Ao Matheus, nosso Filho, que me deu a honra de ser pai e sonhar com sua chegada.

Às minhas irmãs, Danila e Debora, por caminharem comigo para a realização desse sonho.

Aos meus pais, por se entregarem ao máximo por mim, ao longo de toda a minha vida.

Muito obrigado a todos.

“Pois os nossos sofrimentos leves e momentâneos estão produzindo para nós uma glória eterna que pesa mais do que todos eles. Assim, fixamos os olhos, não naquilo que se vê, mas no que não se vê, pois o que se vê é transitório, mas o que não se vê é eterno”.

2 Coríntios 4:17,18

ALMEIDA, José Diogo Barbosa de. Aproveitamento de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo na Produção de Concreto Permeável. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - *Campus Marechal Deodoro*, Instituto Federal de Alagoas Marechal Deodoro, 2021.

RESUMO

O trabalho em questão consiste no estudo das características e propriedades tecnológicas do concreto permeável, formulado a partir da mistura de cimento Portland, cascalho de perfuração de poços de petróleo e agregados. A justificativa dessa substituição se dá pela ideia que a utilização do cascalho de perfuração em materiais de construção não é apenas uma nova ou rentável saída para aproveitamento, mas também possibilidade de redução do impacto dos resíduos gerados durante o processo. Esse trabalho tem o objetivo de analisar as características e propriedades do concreto permeável com a formulação base e com a incorporação do cascalho de perfuração de poços de petróleo em substituição do agregado miúdo. Para analisar a eficiência da substituição, realizou-se a caracterização do cascalho proveniente de perfuração de poços de petróleo *onshore* (em terra) e foram produzidos corpos de prova, de diferentes formulações para avaliação através de ensaios de compressão simples e tração, além de ensaio de permeabilidade. Os resultados encontrados mostram que o cascalho apresenta mais de 67% de seu volume com granulometria entre 0,06 mm e 2,0 mm, caracterizando-se predominantemente como areia grossa. Além disso, com base nas imagens produzidas por MEV, foi observado que o cascalho estudado apresenta estrutura lamelar, possuindo aspecto maciço, compactado e endurecido. Os ensaios de FRX e DRX mostraram a presença de dolomita e quartzo como as fases mais representativas nas amostras. Na análise térmica foi possível observar perda de cerca de 14% de massa após elevação da temperatura, com dois patamares de perda. Por fim, o concreto permeável configura-se como produto de possível utilização tanto para tráfego de pedestres (todas as formulações), como para tráfego leve (T25), apresentando resistência e permeabilidade satisfatórias, que superam o mínimo estabelecido pelas NBRs.

Palavras-chave: Petróleo; permeabilidade; concreto permeável; cascalho.

ALMEIDA, José Diogo Barbosa de. Use of Oil Well Drilling Gravel in Permeable Concrete Production. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - *Campus Marechal Deodoro*, Instituto Federal de Alagoas Marechal Deodoro, 2021.

ABSTRACT

The paper in question consists of studying the technological characteristics and properties of permeable concrete, formulated from a mixture of Portland cement, oil well gravel and aggregates. The justification for this substitution is given by the idea that the use of drilling gravel in construction materials is not only a new or profitable outlet for reuse, but also the possibility of reducing the impact of the waste generated during the process. This work aims to analyze the characteristics and properties of the permeable concrete with the base and with an incorporation of the oil well drilling gravel instead of the aggregate. To analyze the efficiency of the substitution, the characterization of the gravel from oil well drilling on the coast was replaced and specimens of different formulations were found for evaluation through simple compression and traction tests, in addition to permeability tests. The results found show that the gravel presents more than 67% of its volume with granulometry between 0.06 mm and 2.0 mm, being characterized predominantly as coarse sand. In addition, based on the images produced by SEM, it was observed that the studied gravel has a lamellar structure, having a solid, compacted and hardened aspect. The XRF and XRD tests are present in the presence of calcite as a more representative phase in administrators. In the thermal analyze, it was possible to observe a loss of about 14% of mass after the temperature rise, with two levels of loss. Finally, permeable concrete is configured as a product to be used both for pedestrian traffic (all formulations) and for noise level (T25), satisfactory resistance and permeability, which exceed the minimum established by the NBRs.

Keywords: Petroleum Industry; Urban drainage; permeable concrete; gravel.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

% - Porcentagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

a/c – Fator água/cimento

AG –Análise granulométrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo

BEN – Balanço Energético Nacional

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CP – Corpo de prova

E&P – Exploração e produção

EUA – Estados Unidos da América

FEA - Escória de forno elétrico

FRX – Fluorescência de Raios X

K – Coeficiente de Permeabilidade

Kg- Quilograma

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa - Megapascal

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de vinila

SSHA - *Scottish Special Housing Association*

TR – Traço de Referência

T25 – Traço com inserção de 25% de cascalho em relação ao total de agregado miúdo presente na amostra.

T50 - Traço com inserção de 50% de cascalho em relação ao total de agregado miúdo presente na amostra.

T75 - Traço com inserção de 75% de cascalho em relação ao total de agregado miúdo presente na amostra.

T100 - Traço com inserção de 100% de cascalho em relação ao total de agregado miúdo presente na amostra.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental.	29
Figura 2: Cascalho de perfuração de poços de petróleo.	30
Figura 3: Procedimento da mistura dos componentes	34
Figura 4: Corpo de prova para ensaio de resistência	35
Figura 5: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	36
Figura 6: Ensaio de resistência à compressão axial.....	37
Figura 7: Permeâmetro de carga variável	38
Figura 8: Análise granulométrica do cascalho	40
Figura 9: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 20x e 100x.	41
Figura 10: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 500x e 1000x.	42
Figura 11: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 2000x e 8000x	42
Figura 12: Difratometria de Raios X	43
Figura 13: Análise Térmica do cascalho de perfuração.	44
Figura 14: Resultado de resistência à tração	45
Figura 15: Resultado de resistência à compressão.	46
Figura 16: Resultado de permeabilidade	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável	24
Tabela 2: Traços estudados em concreto permeável	25
Tabela 3: Dosagem (em massa).....	34
Tabela 4: Caracterização por FRX do cascalho.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2. JUSTIFICATIVA	15
1.3. OBJETIVO GERAL.....	15
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. PETRÓLEO NO BRASIL.....	18
2.2 EXPLORAÇÃO E CADEIA PRODUTIVA DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	19
2.3. CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	21
2.4 CONCRETO PERMEÁVEL.....	22
2.4.1 Histórico	23
2.4.2 Fabricação	23
2.4.3 Propriedades	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1. MATÉRIA-PRIMA	30
3.1.1. Análise Granulométrica	30
3.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	31
3.1.3. Fluorescência de Raios X (FRX)	32
3.1.4. Difração de Raios X (DRX).....	32
3.1.5. Análises Térmicas	33
3.2. TRAÇO E DOSAGENS.....	33
3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	34
3.4. ENSAIOS TECNOLÓGICOS NOS CORPOS DE PROVA	36
3.4.1. Resistência à Tração.....	36

3.4.2. Resistência à Compressão	37
3.4.3. Permeabilidade	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	40
4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	41
4.3. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX).....	43
4.4. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	43
4.5. ANÁLISES TÉRMICAS.....	44
4.6. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	45
4.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	45
4.8. PERMEABILIDADE	46
5. CONCLUSÕES.....	48
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE – ARTIGO CIENTÍFICO	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A revolução industrial trouxe mudanças significativas para a sociedade atual e contribuiu diretamente para o surgimento da revolução tecnológica vivida até hoje (ROCHA; LIMA; WALDMAN, 2020). É certo que a globalização produziu progresso e rompeu barreiras, o que melhorou a formação e a tecnologia no mundo, mas também promoveu uma série de reestruturações, aumento do consumo e a consequente geração de resíduos (LEITE; ARAÚJO, 2006; SOUZA, 2016).

Dessa modernização destaca-se o crescimento, cada vez maior, dos centros urbanos, que traz consigo sérios e vários problemas de infraestrutura, dentre os quais, podem se destacar, os impactos causados pela geração de resíduos e aumento das vazões de águas de chuva, ocasionadas pela impermeabilização das cidades (VIDAL, 2014). O crescente número de áreas impermeáveis gera aumento das vazões críticas e dos volumes escoados, reduzindo o tempo de retardo e potencializando as vazões de pico, cujas consequências levam às inundações das cidades e enchentes dos rios (BATEZINI, 2013; LAMB, 2014).

Uma das alternativas para mitigar esses impactos consiste no concreto permeável, que ganhou importância nos últimos anos como material de revestimento para aplicação em pavimentos. Diferentemente dos pavimentos tradicionais, os pavimentos permeáveis permitem a infiltração da água pluvial na sua superfície, além de controlar o escoamento superficial e a degradação da qualidade da água. Deste modo, o concreto permeável se caracteriza como importante mecanismo para minimizar os problemas das grandes cidades e evitar inundações (ANTUNES, 2017).

É caracterizado por possuir elevada porosidade e boa drenabilidade e é composto por ligante hidráulico, material britado de graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo. Na sua composição pode-se utilizar a combinação de diferentes tipos de adições e aditivos que possuem a finalidade de atribuir ao concreto melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade (BATEZINI, 2013).

Essencialmente, pode-se dizer que o concreto permeável difere do concreto convencional pelo elevado índice de vazios. Nos concretos convencionais o objetivo é o alcance da maior densidade possível, já que os concretos permeáveis devem conter poros para permitir a infiltração de água (LAMB, 2014).

Os concretos permeáveis destinam-se, basicamente, para o uso como pavimento permeável. Esses pavimentos permeáveis de concreto podem ser construídos como revestimentos em peças de concreto, revestimento em placas de concreto e revestimento de pavimento de concreto permeável (ABNT, 2015).

Segundo Lamb (2014, p. 56), o uso do concreto permeável em pavimentos “permite que a água das chuvas passe através dele e seja armazenada nas camadas inferiores, base e sub-base, até ser conduzida ao lençol freático por meio do subleito ou, então, ser levada ao sistema de drenagem da cidade”. Deste modo, ele se caracteriza como área apropriada para receber as precipitações, evitando alagamentos e realimentando o aquífero.

O grande poder de percolação reduz a necessidade de criar grandes ambientes para captação de águas pluviais, uma vez que o pavimento propriamente dito age na captação dessas águas. Isso resulta na diminuição de custos de mão de obra, construção e manutenção, pois evita a necessidade de poços de detenção, encanamentos, drenos e outros sistemas de drenagem de águas pluviais (HOLTZ, 2011).

Outro mecanismo de redução dos impactos constitui-se na incorporação dos resíduos, sobretudo porque a importância da reciclagem consiste em minimizar os impactos negativos causados por ações do homem ao meio ambiente. Através de sua utilização, é possível reaproveitar produtos que seriam descartados, contribuindo assim, para a redução da poluição e para a preservação dos recursos naturais, além da economia de energia e redução do volume de aterros (JOHN, 2000; LOMASSO *et al.*, 2015).

Um desses resíduos, tratados nesse estudo como subprodutos, ou seja, matérias-primas não processadas que apresentam capacidade de reutilização enquanto insumos secundários, advém da perfuração de poços de petróleo e gás e precisam ser adequadamente gerenciados e armazenados, na maioria das vezes, dentro da própria empresa. O setor vem registrando crescimento em larga escala e contínuo, o que significa maior geração de subprodutos e maiores impactos ambientais, principalmente quando dispostos inadequadamente (ACCHAR; MARQUES, 2016; MARQUES, 2015).

Baseado nesse panorama surge o seguinte questionamento, como problema de investigação da presente pesquisa: **Quais as contribuições e os desafios da aplicação de cascalhos de perfuração para a produção de concreto permeável?**

1.2. JUSTIFICATIVA

Com o crescimento das metrópoles e do consumo de vários produtos, intensificou-se a produção de subprodutos, tornando-se um dos maiores problemas atuais da sociedade. Esse problema é agravado pela ausência de áreas para o destino final dos subprodutos. Toda essa geração causa problemas ao meio ambiente e às pessoas, piorando as condições de saúde do planeta (SEIBERT, 2014).

As práticas ambientais corretas, com foco na legislação ambiental, exigem que as gestões dos subprodutos tenham como metas não somente a redução na geração, mas também o seu reaproveitamento, ao invés do descarte (RIBEIRO, 2010). Esse reaproveitamento de subprodutos significa tanto redução financeira de custos como a perspectiva de crescimento industrial sustentável, implicando em melhores condições da qualidade de vida para a sociedade.

Diante disso, este trabalho justifica-se pela proposta de que a utilização do cascalho de perfuração em materiais de construção não é apenas uma nova ou rentável saída para aproveitamento, mas também ótima redução do impacto dos subprodutos gerados durante o processo. Fialho (2012) define a importância dessa substituição:

- A perfuração de poços de petróleo e gás gera anualmente milhões de toneladas de subprodutos que precisam ser adequadamente gerenciados;
- O setor gerador vem registrando crescimento franco e contínuo o que significa maior geração de subprodutos e maiores impactos ambientais;
- As empresas geradoras manifestam interesse em colaborar com o estudo.

Desse modo, é essencial que se utilize de subprodutos que trazem problemas ao meio ambiente para que novos produtos e soluções sejam gerados.

1.3. OBJETIVO GERAL

Analisar as características e propriedades do concreto permeável com a incorporação do cascalho de perfuração de poços de petróleo em substituição do agregado miúdo.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o subproduto através de Análise granulométrica, Microscopia Eletrônica de Varredura, Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e Análise Termogravimétrica;
- Produzir corpos de prova da formulação de referência e das formulações de substituição do agregado pelo cascalho;
- Realizar, nos corpos de prova, ensaios tecnológicos de permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração;
- Comparar, baseando-se na literatura existente, os resultados obtidos.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido e organizado com a seguinte estrutura:

O capítulo 1 aborda o panorama geral em relação ao conteúdo de estudo, percorrendo aspectos norteadores da pesquisa como introdução, justificativa, objetivo geral, objetivos específicos e a descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 está contida revisão bibliográfica sobre o cascalho de perfuração de poços de petróleo e a cadeia petrolífera, tratando desde o início da exploração até os subprodutos gerados através dos processos de exploração e perfuração. Além disso, a seção 2 trata das particularidades do concreto permeável, citando o histórico, os métodos de fabricação, as propriedades e os trabalhos que utilizaram subprodutos para produção de concretos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para atingir os objetivos propostos, descrevendo desde a obtenção do subproduto de estudo até os métodos de caracterização da matéria-prima, moldagem de corpos de prova e ensaios realizados.

No capítulo 4 estão contidos os resultados experimentais da pesquisa, onde são apresentados gráficos, curvas, figuras e tabelas, referentes aos ensaios laboratoriais e a influência do teor de subproduto nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis, bem como a comparação dos valores obtidos com trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores.

No capítulo 5 são mostradas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento do estudo e no capítulo 6 as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, estão relacionadas as referências utilizadas durante a elaboração dessa dissertação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PETRÓLEO NO BRASIL

A história do petróleo no Brasil iniciou, em 1892, com o fazendeiro Eugênio Ferreira de Camargo, que perfurou o primeiro poço em busca de petróleo em fazenda na cidade de Bofete, interior do estado de São Paulo. Essa foi a primeira tentativa de se encontrar petróleo em território brasileiro; no entanto, o poço de 488 metros de profundidade teve como resultado apenas água sulfurosa (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015).

Com a explosão da Primeira Guerra Mundial, intensificou-se a procura por petróleo no Brasil e no mundo. Em 1917, foi criada a Empresa Paulista de Petróleo, parceria entre iniciativa privada e Governo (MORAIS, 2013). A partir de 1920, iniciou-se debate sobre os papéis do Estado, do setor empresarial nacional e do capital estrangeiro nas atividades petrolíferas do país. De um lado estavam os nacionalistas, defendendo a participação direta do Estado e do setor privado nacional; de outro, grupos contrários à participação estatal e favoráveis à presença de empresas estrangeiras (EBLING, 2016).

Em 1938, diante da importância que o setor de petróleo ganhava na estrutura econômica e na opinião pública do país, foi regulamentado através do Decreto-lei nº 395 a importação, exportação, transporte, distribuição e comércio de petróleo bruto e seus derivados, no território nacional; e, criou-se o Conselho Nacional do Petróleo (SANTOS; AVELLAR, 2016).

Diante da preocupação com as leis que regiam o petróleo, as pesquisas para encontrá-lo prosseguiram e os primeiros indícios de existência ocorreram em janeiro de 1939, em Lobato, no estado da Bahia. Em 1941, estabeleceu-se, pelo Decreto-lei nº 3.236, que as jazidas de petróleo e gás natural existentes eram de propriedade da União, exigindo que acionistas e sócios das empresas de extração de petróleo fossem de nacionalidade brasileira (LUSTOSA, 2002; MORAIS, 2013).

Em 1953, levado pelos interesses dos defensores do controle estatal, o congresso aprovou a Lei 2.004/53, que autorizava a criação da empresa estatal e monopolista Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). As principais missões dadas à empresa foram a diminuição das importações de combustíveis para complementar as necessidades de abastecimento interno e a indução do desenvolvimento industrial através de rede de fornecedores de serviços para o setor de petróleo (MORAIS, 2013).

Em 1997, houve o fim do monopólio do petróleo com a promulgação da Lei 9478/97, também chamada de Lei do Petróleo. Essa lei criou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), redefiniu o papel da Petrobras, que passou a ser empresa de capital aberto, flexibilizando o monopólio estatal do petróleo.

No ano de 2005, em Santos, foram encontrados os primeiros indícios de petróleo na camada pré-sal e, em 2008, extraiu-se óleo desta camada pela primeira vez, impulsionando a produção de petróleo no Brasil (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015). O Balanço Energético Nacional, ao divulgar os resultados da produção petrolífera em 2019, verificou aumento da produção, que chegou a quase 3 milhões de barris por dia em agosto de 2019, superando em 20% os números do mês de agosto de 2018, demonstrando o grande potencial de exploração.

2.2 EXPLORAÇÃO E CADEIA PRODUTIVA DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A Exploração e Produção (E&P) integram a base da indústria petrolífera como os primeiros passos para a obtenção do Petróleo. Grandes investimentos são despendidos no desenvolvimento tecnológico, na ampliação dos conhecimentos geológicos e na formação da cadeia de bens e serviços que dê suporte à atividade exploratória (FAGUNDES, 2018).

Essa E&P configura-se, basicamente, por dois ambientes de perfuração: as explorações em águas profundas, também denominadas *offshores*; e, as explorações em terra, denominadas *onshore*. As perfurações *offshore*, de maneira geral, sintetizam todo o processo em três conjuntos tecnológicos distintos que, por sua vez, são os objetos de pesquisa das companhias: as plataformas, o sistema de perfuração e o mecanismo de transmissão do petróleo da profundidade para a plataforma (ORTIZ NETO; COSTA, 2007).

A E&P teve início no final do século XIX, em perfurações de até 30 metros (águas ultrararas), de maneira rudimentar e pouco científica. Isso porque as dificuldades tecnológicas eram superadas de maneira empírica. Na verdade, era transferido para a exploração *offshore* o mesmo padrão tecnológico utilizado no segmento *onshore*. Com a ampliação das descobertas e o consequente aumento das dificuldades de exploração em campos mais profundos (águas rasas – entre 30 e 400 metros) e mais distantes da costa, foi necessário o desenvolvimento de procedimentos e tecnologias próprias, não sendo mais utilizada a rudimentar e empírica adaptação de equipamentos *onshore*. Dessa forma, foram construídas as primeiras plataformas fixas, necessitando de equipamentos mais modernos. Iniciava-se, assim, a busca de trajetória

tecnológica, que viabilizasse a exploração *offshore* em mar aberto (ORTIZ NETO; SHIMA, 2008).

Para que se chegue à produção de diferentes poços, a perfuração é realizada por sonda, constituída por vários sistemas com funções específicas. As perfurações acontecem, principalmente, por meio de dois métodos de perfuração: à percussão e rotativo. No método à percussão, são desferidos golpes por broca pontiaguda, gerando o esmagamento da rocha. Já no método rotativo, adota-se tecnologia diferente; neste, a broca é girada e comprimida sobre o solo e as rochas, que se fragmentam. A energia necessária para perfurar as diversas formações rochosas é proveniente do movimento de rotação e cargas aplicadas sobre a broca que, quando transferidas às rochas, promovem ruptura e desagregação em forma de pequenas lascas ou cascalhos, que são removidos do fundo do poço e carregados até a superfície pelo fluxo do fluido de perfuração (BANDEIRA, 2019).

Como as escavações são de grandes profundidades, podendo chegar a 6 km, a perfuração acontece por fases. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e se insere coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca. O número de fases e o comprimento das colunas de revestimento são determinados em função das pressões e fraturas previstas (FAGUNDES, 2018).

Segundo Fagundes (2018, p. 31), essa divisão de fases e diferentes colunas de revestimento têm a função de “[...] prevenir o desmoronamento das paredes do poço, evitar contaminação da água potável dos lençóis freáticos, permitir o retorno do fluído [sic] de perfuração à superfície, impedir a migração de fluido das formações para o interior do poço, etc [...]”.

Para auxiliar na perfuração, faz-se necessário se utilizar dos fluidos de perfuração, em cujas formulações químicas são adicionados diferentes produtos químicos e materiais sólidos, a fim de se alcançar composição com propriedades específicas, necessárias para as operações de perfuração de poços petrolíferos. A classificação do fluido de perfuração é feita em função da composição e do tipo de fase líquida. Nesse critério, classificam-se os fluidos em: de base aquosa e de base não aquosa, também denominados como fluidos a base de óleo. Há ainda a utilização de gás, que pode ser ar ou gás natural, além de lamas aeradas (normalmente com nitrogênio); no entanto, a utilização é restrita a cenários específicos (PEREIRA, 2010; ALMEIDA, 2016).

Os fluidos mais utilizados na indústria são os de base aquosa, pois apresentam fácil manipulação, baixo custo de manutenção e podem ser formulados para superar diversos problemas de perfuração, causando menor impacto ambiental em relação aos fluidos não aquosos. Os fluidos aquosos tratam-se de formulações compostas por 50% a 90% de água, com adição de argilas, polímeros, agentes adensantes, sais inorgânicos e outros aditivos dissolvidos ou em suspensão (RIBEIRO, 2015).

2.3. CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

A indústria de petróleo e gás gera vários produtos e com eles inúmeros subprodutos. Um dos principais subprodutos da atividade de perfuração de poços de petróleo e gás são os cascalhos de perfuração. A perfuração de poços de petróleo ocorre em duas fases: a de exploração e a de desenvolvimento. Para que se localizem as reservas de hidrocarbonetos, existe perfuração prévia chamada de atividades de exploração. Nessa fase, identifica-se o potencial produtivo das reservas de hidrocarbonetos e o potencial econômico. Quando essas reservas já foram descobertas, surge a fase de desenvolvimento, que busca o usufruto do material encontrado. Nas duas fases há geração de cascalho (PIRES, 2009).

A perfuração divide-se em diferentes estágios e diminui o diâmetro do poço à medida que aumenta a altura dessa escavação, proporcionando menor geração de subprodutos por metro perfurado (ALMEIDA NETO, 2017). O volume de cascalho produzido durante escavação varia, visto que a quantidade produzida é proporcional à profundidade, ao diâmetro e às características geológicas das formações perfuradas. Nesse processo, o volume gerado tende a ser o volume geométrico do cilindro perfurado somado ao fluido de perfuração (PIRES, 2009).

O Brasil tem apresentado grande geração desse subproduto. Nicolli e Soares (2010) consideram que, em média, 1 poço gera entre 500 e 800 m³ de material resultante da trituração das rochas pela broca. Fialho (2012), a partir de dados de perfurações terrestres, obtidos para o ano de 2010 no Estado do Espírito Santo, apresenta a geração média de 13 m³ de cascalho a cada 100 metros perfurados.

Segundo Almeida Neto (2017), só no nordeste, estima-se que exista, atualmente, quantidade de subprodutos da ordem de 100 mil m³ oriundos do processo de perfuração de poços para produção de petróleo. Quantidade significativa, principalmente, por saber que os cascalhos, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deteriora a paisagem urbana e

constituem passivo ambiental, caso sejam destinados aos aterros sem tratamento prévio (FIALHO, 2012).

Vários são os trabalhos que tratam do reaproveitamento do cascalho. Pires (2009) utilizou do cascalho para produção de cerâmica vermelha; Fialho (2012) aplicou cascalho para a produção de concreto convencional; Shon *et al.* (2016) aplicou esse subproduto em construções de estradas; Almeida Neto (2017) usou do cascalho para elaborar argamassa de cimentação primária com vistas à inserção em novos poços; e muitos outros trabalhos que tiveram resultados satisfatórios, positivando a substituição.

2.4 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é o tipo de concreto que apresenta maior volume de vazios. É caracterizado por possuir elevada porosidade e boa drenabilidade, sendo composto por ligante hidráulico, material britado de graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo. Na composição pode-se utilizar combinação de diferentes tipos de adições e aditivos, que possuem a finalidade de atribuir ao concreto melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade (BATEZINI, 2013).

Essencialmente, pode-se dizer que o concreto permeável difere do concreto convencional pelo elevado índice de vazios. Nos concretos convencionais o objetivo é o alcance da maior densidade possível, já nos concretos permeáveis devem conter poros para permitir a infiltração de água (LAMB, 2014).

Os concretos permeáveis destinam-se, basicamente, para o uso como pavimento permeável, que pode ser construído com as seguintes tipologias: revestimentos em peças de concreto com juntas alargadas, revestimento em peças de concreto com áreas vazadas, revestimento de peças de concreto permeável, revestimento em placas de concreto permeável e revestimento de pavimento de concreto permeável (ABNT, 2015).

Segundo Lamb (2014, p. 56), o uso do concreto permeável em pavimentos “[...] permite que a água das chuvas passe através dele e seja armazenada nas camadas inferiores, base e sub-base, até ser conduzida ao lençol freático por meio do subleito ou, então, ser levada ao sistema de drenagem da cidade”. Deste modo, caracteriza-se como material apropriado para área que receberá as precipitações, evitando os alagamentos e realimentando o aquífero.

2.4.1 Histórico

Os primeiros usos do concreto permeável nas construções tem origem na Europa, no século XIX. Esse tipo de concreto era usado em casas, edifícios ou até mesmo em painéis pré-fabricados, sendo que o uso estava, possivelmente, associado às reduções de peso e de custos e não ao incremento da permeabilidade a fluidos (LAMB, 2014).

Esse tipo de concreto, praticamente não é mencionado na literatura até 1923, quando um grupo de 50 casas de dois andares foi construído com agregado de clínquer em Edimburgo, na Escócia. Entre a década de 30 e 40, após a *Scottish Special Housing Association (SSHA)* adotar o uso do concreto permeável para a construção de residências, foram construídas mais de 900 casas no Reino Unido, devido às boas propriedades térmicas e ao baixo custo (ACI, 2010).

Após a Segunda Guerra Mundial, movido pela escassez de cimento e pela grande quantidade de resíduos de construções, intensificou-se o uso de concreto com grande quantidade de vazios e pouca pasta. Nos EUA, o concreto permeável só se desenvolveu após 1970, movido pelo excessivo escoamento de água nas áreas recém-construídas e pelo aumento das áreas impermeáveis, resultando em elevado escoamento superficial (LAMB, 2014).

Apesar de sua utilização ao longo da história, o concreto permeável sempre apresentou grandes limitações, até que os estudos sobre a sua aplicação em pavimento permeável ou em peças de sistemas de drenagem intensificaram-se, sobretudo nos Estados Unidos da América (EUA) a partir de 1990. Assim, ele reapareceu como tecnologia para ajudar na drenagem, retendo a água na fonte e impedindo-a de fluir para córregos e reduzindo enchentes (LI, 2009; LAMB 2014).

2.4.2 Fabricação

Os Concretos Permeáveis fazem parte do grupo de pavimentos permeáveis e são regidos pela ABNT NBR 16416 (2015). Dentre esses tipos de concretos, destacam-se as Placas de concreto permeável e os Concretos permeáveis moldados *in loco*. Em função das suas características diferenciadas, os procedimentos padrão para produção de corpos de prova e realização de ensaios em laboratório, utilizados para o concreto convencional não se aplicariam, sem prova prévia, para o concreto permeável. No Brasil, ainda não existe normatização ao estudo em laboratório deste tipo de material (BATEZINI, 2013).

Nos concretos permeáveis, o dimensionamento hidráulico deve considerar os dados de precipitação da região, o coeficiente de permeabilidade do solo e o risco de contaminação do lençol freático. Em relação ao sistema de infiltração de água precipitada do pavimento permeável, são definidas três modalidades: Infiltração total, onde toda a água é direcionada ao subleito; Infiltração parcial, que apresenta tubulação de drenagem para complementar a infiltração e; Sem infiltração, quando a água é direcionada por completo para tubulação de drenagem (PAULA JUNIOR, 2019).

A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece também condições para o campo. Nesse caso, quando o ensaio em campo demonstra que o concreto permeável construído apresenta coeficiente de permeabilidade inferior ao valor de 10^{-3} m/s (1 mm/s), é necessário executar procedimentos de limpeza, com o intuito de se alcançar pelo menos 80% do coeficiente de permeabilidade para pavimentos recém-construídos.

Esses procedimentos consistem na retirada de detritos da superfície a partir da limpeza com jato de água sob pressão, do uso de equipamentos de sucção, e se aplicável, da substituição do material de rejuntamento. São mencionados, ainda, os requisitos de resistência mecânica e espessura mínima para os revestimentos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência Mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	≥ 30,0 ^a	ABNT NBR 9781
	Tráfego Leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 20,0 ^a	
	Tráfego Leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 2,0 ^b	ABNT NBR 15805
	Tráfego Leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	≥ 1,0 ^c	ABNT NBR 12142
	Tráfego Leve	100	≥ 2,0 ^c	

^a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781.

^b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805.

^c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142

Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de ABNT NBR 16416, 2015.

Uma das limitações das normas brasileiras para o Concreto Permeável é que não há detalhes de fabricação desses concretos. A NBR que trata desse tipo de concreto não apresenta traço de referência, opções de moldagem, período e procedimentos de cura e muito menos relação entre água e cimento a serem adicionados à mistura. Sendo assim, é necessário basear-se em outros trabalhos.

Antunes (2017) compilou traços estudados em concreto permeável que pode ser mostrado na Tabela 2:

Tabela 2: Traços estudados em concreto permeável

Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de agregado (kg/m ³)	Dimensão do agregado (mm)	Consumo de água (kg/m ³)	Fator A/C	Teor de agregados em relação ao cimento	Teor de finos em relação ao agregado	Autores
244-311	1827-2029	9,5	93	0,3	6,5:1	0	Kim <i>et al</i> (2016)
Não informado	Não informado	6,0 - 3,0 10,0 - 6,0	Não informado	0,27-0,35	5:1	0,05:1 0,1:1	Bonicelli <i>et al</i> (2016)
374	1660	6,3 6,3-4,8 9,5-4,8	Não informado	0,3	4,4:1	0	Batezini (2013)
335-458	1737-2128	10,0 14,0		0,27	5:1 2,5:1	0,11:1	Khattab <i>et al</i> (2013)
Não informado	Não informado	16,0-12,5 12,5-10,0 10,0-6,3	Não informado	0,30-0,45	4:1	0	Jain e Chouhan (2011)
Não informado	2650-2740	13,2-4,8 9,5-6,3 9,5-4,8	Não informado	0,3-0,38	4-4,55:1	0	Lian <i>et al</i> (2011)
260-509	1550	5,0-13,0		0,2-0,36	3,7:1 2,15-1	0	Chindapas-irt <i>et al</i> (2008)
270-415	1190-1480	19,0-1,2	Não informado	0,27-0,34	4-4,5:1	0	Tennis <i>et al</i> (2004)
Não informado	Não informado	30,0-15,0 20,0-15,0 10,0-20,0	Não informado	0,2-0,35	Não informado	0,15:1 0,20:1	Yang e Jiang (2002)

Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de ANTUNES, 2017.

Com base nessas informações normalmente, existem quatro grandezas referentes aos agregados no traço do concreto permeável:

- Tamanho dos grãos – varia entre 1,2 mm e 30 mm;
- Consumo de agregado graúdo – varia entre 1190 a 2740 kg/m³;
- Teor de finos em relação ao agregado graúdo – varia de 0 a 1:1;
- Teor de agregado em relação ao cimento – varia entre 2,15:1 a 6,5:1.

Acontece que, quando se eleva o tamanho dos grãos, aumenta-se a porosidade e diminui-se a resistência. Lian e Zhuge (2010), após analisarem diferentes traços, com granulometria dos agregados, variando entre 4,75 mm e 13,2 mm, conseguiram definir que os melhores resultados estavam nos concretos com agregados com granulometria menor que 9,5 mm, principalmente com o uso de aditivos. Isso mostra que é necessário diminuir a granulometria dos agregados sem perder as condições de permeabilidade exigidas.

2.4.3 Propriedades

O pavimento permeável caracteriza-se por possuir elevada porosidade e boa drenabilidade, com taxas de fluxo de passagem de água através do concreto permeável variando de 120 l/m²/min (2 mm/s) a 320 l/m²/min (5,4 mm/s), que são valores muito superiores à capacidade de infiltração da maioria dos solos. Devido a essa capacidade de deixar a água infiltrar através de sua estrutura porosa, a utilização dessas estruturas, quando corretamente projetadas e implantadas, pode influenciar, significativamente, nas vazões de pico, que ocorrem durante eventos de chuva em determinado local (LAMB, 2014; BETEZINI, 2016).

Segundo Holtz (2011), esse grande poder de percolação reduz a necessidade de criar grandes ambientes para captação de águas pluviais, uma vez que o pavimento propriamente dito age na captação dessas águas. Isso resulta na diminuição de custos de mão de obra, construção e manutenção, pois evita a necessidade de poços de retenção, encanamentos, drenos e outros sistemas de drenagem de águas pluviais.

Esse valor elevado do índice de vazios afeta, diretamente, as características de resistência mecânica do material no estado endurecido. Em contraponto, esse material pode apresentar bom desempenho e durabilidade quando utilizado como revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves. Além disso, devido às boas propriedades acústicas,

pode ser utilizado como material para isolamento térmico de paredes e, também, como barreiras acústicas (LAMB, 2014).

Outro ponto de destaque é que a densidade do concreto permeável é influenciada pelas propriedades e proporções dos materiais utilizados e na metodologia de compactação usada na sua aplicação. Em geral, encontram-se densidades na ordem de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 e índices de vazios de 15% a 25%. Essa baixa densidade apresenta-se como vantagem econômica na sua produção. Ainda cabe salientar que o concreto permeável pode ser fabricado com baixa tecnologia e mão de obra não especializada, o que permite diminuir custos na fabricação (HOLTZ, 2011).

2.5. SUBPRODUTOS INCORPORADOS NO CONCRETO PERMEÁVEL

Vários são os estudos que tratam da incorporação dos subprodutos para geração do concreto permeável. Podem-se destacar, através de iniciativas no Brasil e em outros países, as seguintes pesquisas:

Vidal (2014) estudou a “caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano”, visando avaliar a viabilidade estrutural da utilização dos subprodutos, oriundos da construção civil. O subproduto foi utilizado substituindo parcial ou total o agregado convencional, para a produção de elementos de concreto permeável, buscando a diminuição do uso de recursos não renováveis do meio ambiente e aplicando o recurso da reciclagem dos resíduos de construção e demolição na construção. De acordo com os resultados obtidos, em comparação com o concreto convencional, foi possível considerar que as misturas de concreto permeável compostas somente de agregados graúdos, influenciaram negativamente nas propriedades mecânicas desses concretos, principalmente a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade.

Schackow *et al.* (2020), produziram placas de concreto permeáveis com subprodutos de calcinação de lodo da indústria de papel, buscando a redução do uso de cimento em calçadas públicas. Ao fim do estudo, os pesquisadores concluíram que a incorporação dos subprodutos deixou o concreto permeável mais sustentável e com alto grau de permeabilidade ($> 3600 \text{ mm/h}$).

Rahman *et al.* (2015) incorporaram materiais reciclados de construção e demolição em sistemas de pavimentos permeáveis para averiguar as condições hidráulicas e geotécnicas.

Foram inseridos ao concreto permeável três materiais comuns de construção e demolição reciclados; tijolo triturado, agregado de concreto reciclado e pavimento de asfalto recuperado. Após uma série de testes de laboratório serem realizados, foi observado que algumas formulações tinham propriedades geotécnicas e hidráulicas equivalentes ou superiores às dos materiais granulares convencionais.

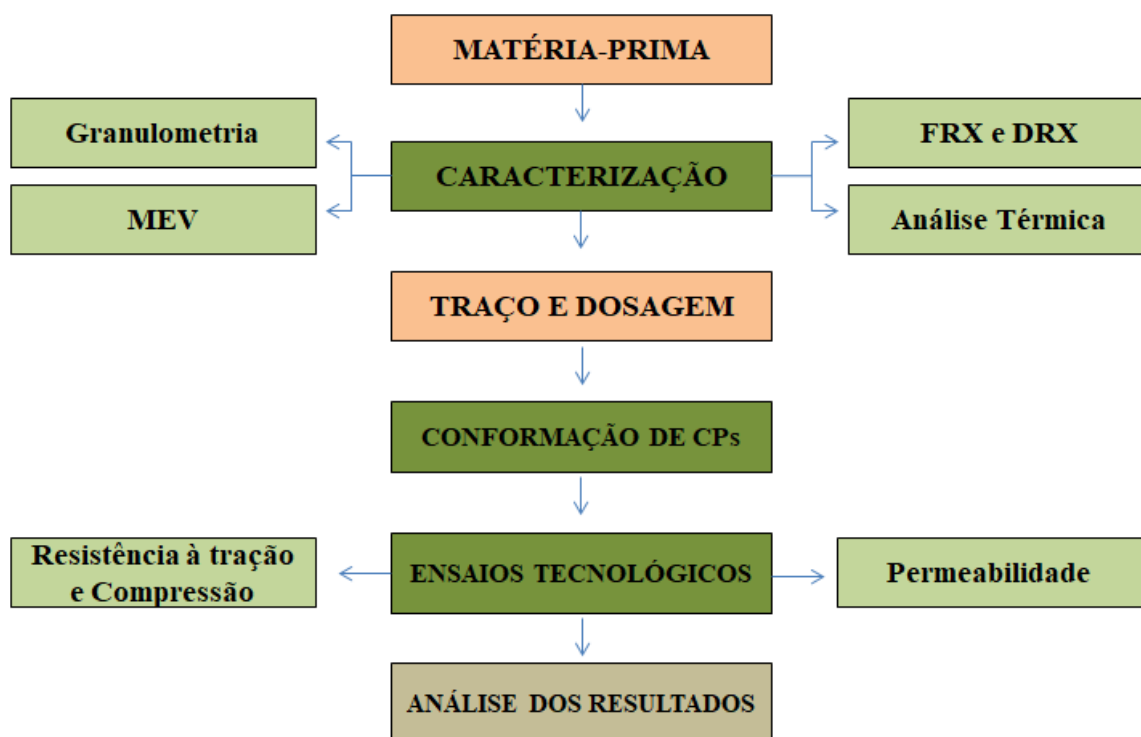
Sandoval *et al.* (2019) substituíram agregado graúdo por escória de forno elétrico (EFA) na produção do concreto permeável buscando atingir os parâmetros mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 16416 (2015). Esta substituição minimizaria a utilização de agregados naturais, além de aproveitar o subproduto que não tem destinação específica. Para alcançar o objetivo foram escolhidos três EFA's com diferentes distribuições granulométricas: 6-10 mm, 10-20 mm e, finalmente, mistura das duas anteriores na proporção 30-70%, respectivamente. Por fim, a partir dos resultados obtidos, observou-se que é viável a substituição total dos agregados convencionais por EFA na fabricação de Concreto Permeável cumprindo com os parâmetros mínimos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método de pesquisa adotado consistiu no desenvolvimento experimental, ou seja, a pesquisa teve natureza tecnológica com abordagem quantitativa; e, foi executada, predominantemente, *in vitro* (Laboratório).

Para a obtenção do produto final, fonte primordial desse estudo, foi necessário conhecer o cascalho, caracterizando-o e analisando a possível utilização para a obtenção do concreto permeável. Na Figura 1, apresenta-se o fluxograma do procedimento experimental, onde é determinado o caminho percorrido até a execução do produto final, incluindo os ensaios tecnológicos.

Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental



Na imagem a cor Laranja = insumos e produtos; Verde escuro = etapas da pesquisa; Verde Claro = ensaios tecnológicos; Cinza = análises e discussões.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Dessa forma, o procedimento experimental foi dividido em 3 etapas. A primeira tratou do conhecimento das matérias-primas, a partir da caracterização física, química e morfológica, através dos ensaios que serão citados no item 3.1. A segunda etapa buscou a elaboração do traço e conformação dos corpos de prova para identificar o percentual de

subproduto que foi inserido na composição (item 3.2 e 3.3). Na terceira etapa (item 3.4), realizou-se os ensaios tecnológicos executados, a fim de avaliar a viabilidade do concreto.

3.1. MATÉRIA-PRIMA

Foram coletadas amostras de cascalho, provenientes da perfuração de poços *Onshore* da Bacia Sergipe-Alagoas (Figura 2). O material foi coletado no município de Carmópolis-SE, ainda úmido e acondicionado em sacos plásticos. Posteriormente, passou por secagem ao sol por 8 horas para diminuição da umidade e foi submetido a caracterização pelas seguintes técnicas: Análise Granulométrica (AG); Análise Mineralógica por Difração de Raios X (DRX); Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise Termogravimétrica (ATG).

Figura 2: Cascalho de perfuração de poços de petróleo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.1.1. Análise Granulométrica

O ensaio de Granulometria teve como objetivo conhecer o tamanho dos grãos do solo, conforme a ABNT NBR 7181: Análise Granulométrica (ABNT, 2016), que apresenta o passo a passo necessário para se obter a curva granulométrica. O método utilizado no ensaio foi por peneiramento.

O primeiro passo realizado foi a separação das amostras de cascalho. Como o material foi coletado ainda úmido, foi necessário secagem ao ar por 8 horas para diminuição da umidade. Após a secagem, determinou-se a massa da amostra seca, que foi levada para

peneiramento em peneira com espessura de 2,0 mm, para separação de material graúdo e miúdo.

A parte retida na peneira de 2,0 mm foi lavada a fim de eliminar o material fino aderente, sendo levada para secar em estufa à temperatura de 110 °C, até constância de massa. Esse material foi utilizado no peneiramento grosso que necessitou de agitador mecânico para peneiramento da amostra. O material retido foi lançado sobre as peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm.

Para o peneiramento do material passante na peneira de 2,0 mm, foi necessário a lavagem do material na peneira de 0,075 mm, vertendo-se água potável à baixa pressão. O material retido na peneira de 0,075 mm foi seco em estufa, à temperatura de 110 °C, até constância de massa; e, utilizando-se de agitador mecânico, executou-se peneiramento em malhas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. As massas retidas acumuladas em cada peneira foram anotadas.

O resultado final é apresentado graficamente, dispondo-se em abcissas os diâmetros das partículas, em escala logarítmica; e, em ordenadas, as porcentagens das partículas menores do que os diâmetros considerados, em escala aritmética.

O ensaio de granulometria foi realizado no Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas (IFAL), Campus Palmeira dos Índios.

3.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste em ferramenta utilizada para a análise microestrutural de diversos materiais, e possibilita a análise de falhas, tamanho de partículas, estrutura e forma (COSTA, 2016). O ensaio foi necessário para identificar as particularidades do cascalho da Bacia Sergipe-Alagoas, possibilitando identificar a formação rochosa da camada de exploração.

As amostras estudadas foram peneiradas e selecionadas com diâmetro menor que 0,42 mm e submetidas no microscópio eletrônico de varredura de modelo MEV SSX 550 *superscan* – Shimadzu, no Laboratório de Química do IFAL, Campus Maceió, com magnificação de 20x, 100x, 500x, 1000x, 2000x e 8000x.

Apesar de Fialho (2012), analisar o cascalho até magnificação máxima de 1000x, esse trabalho buscou aprofundar os aspectos microscópicos do subproduto para obter mais respostas quanto à estrutura molecular da região e amostra estudada.

3.1.3. Fluorescência de Raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX) é a técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes na amostra (análise qualitativa), assim como estabelecer a proporção de cada elemento. Por ser técnica instrumental muito reprodutível, rápida e precisa, a fluorescência de Raios X é o método mais usual para determinação da composição química dos materiais (OLIVEIRA, 2011).

A execução do ensaio mostrou-se importante por dois motivos: primeiro, para analisar os componentes da amostra, que permitissem avaliar os resultados obtidos nos testes de resistência e permeabilidade; e, para verificar a presença de componentes nocivos ao meio ambiente e aos usuários.

Nesse trabalho utilizou-se do espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDX-700, Shimadzu) em atmosfera a vácuo, aplicando método semi-quantitativo para determinação dos elementos, realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.1.4. Difração de Raios X (DRX)

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a técnica de difração de Raios X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia dos materiais, não só devido à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas desses minerais. Dentre as principais vantagens da técnica, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados e a possibilidade de análise quantitativa das fases cristalinas (SILVA *et al.*, 2015).

As amostras estudadas por DRX foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,075 mm, secas e analisadas em difratômetro de Raios X (XRD-6000, Shimadzu), localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da UFRN, utilizando-se as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 10° a 80°).

3.1.5. Análises Térmicas

A análise termogravimétrica é bastante difundida para complementar a caracterização de matérias-primas, buscando analisar quantitativamente o ganho e/ou perda de massa através das relações entre temperaturas e propriedades físicas. Assim, é possível estimar a vida útil dos materiais, bem como a estabilidade térmica (QUINTINO *et al.*, 2017). As principais técnicas termoanalíticas utilizadas em materiais são: Análise Termogravimétrica (ATG) e Análise Térmica Diferencial (ADT). Essas análises têm o objetivo de avaliar fenômenos de transformação, tais como desidratações, decomposições, mudanças de fase e reações químicas acompanhadas de efeitos endotérmicos e exotérmicos (LIMA, 2010).

As amostras de cascalho foram preparadas com granulometria inferior a 0,075 mm; posteriormente, a análise do cascalho de perfuração foi realizada no Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos (LaPFiMC) da UFRN, usando o *Shimadzu* DTG-60, onde a amostra foi submetida à temperatura máxima de 1000 °C, fluxo de gás de 50 mL/min, taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de gás Argônio.

3.2. TRAÇO E DOSAGENS

Após realização da pesquisa bibliográfica, foi constatada a existência de diversos procedimentos e métodos para o cálculo das dosagens de concreto, através de abordagens matemáticas e de métodos empíricos (VIDAL, 2014). Antunes (2017) analisou diferentes traços e chegou à conclusão que o teor de agregado em relação ao cimento, em massa, normalmente varia entre 2,15:1 a 6,5:1. Além disso, aconselha-se que a proporção entre agregado graúdo e miúdo seja de 1:1. Com base nessas informações, este trabalho seguiu a relação agregado/cimento, em massa, igual a 1:3, sendo os agregados miúdos substituídos pelo cascalho em diferentes formulações e a proporção entre agregados de 1:1, em massa.

O agregado miúdo inserido nas amostras passou por peneiramento, de modo a eliminar areias e cascalhos com granulometria inferior a 1,2 mm e superiores a 4,8 mm. No caso dos agregados graúdos, foi inserido brita 0, com granulometria variando entre 4,8 mm e 9,5 mm.

Utilizando os percentuais da Tabela 3, a seguir, foram executadas 5 dosagens, de modo que a primeira formulação possuía cimento, brita e areia, sem incorporação do cascalho de perfuração de poços de petróleo e a última formulação não possuía areia, sendo todo o agregado miúdo composto pelo subproduto.

Tabela 3: Dosagem (em massa)

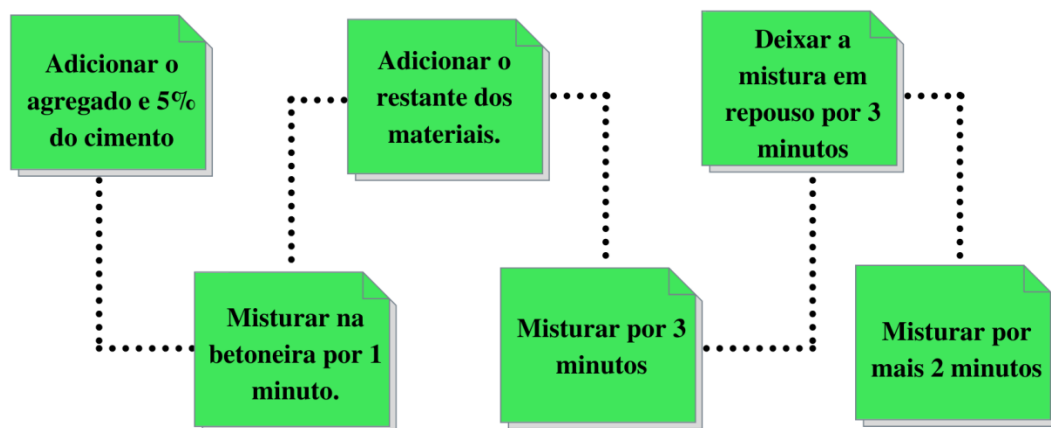
Referência	% Cimento	% Agregado Miúdo (1,2 – 4,8 mm)	% Cascalho (1,2 – 4,8 mm)	% Agregado Graúdo (4,8 – 9,5 mm)	Relação a/c
TR	25,00	37,50	-	37,50	0,3
T-25	25,00	28,10	9,40	37,50	0,3
T-50	25,00	18,75	18,75	37,50	0,3
T-75	25,00	9,40	28,10	37,50	0,3
T-100	25,00	-	37,50	37,50	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a preparação dos traços estudados do concreto permeável foi utilizada betoneira no Laboratório de Materiais do IFAL, Campus Palmeira dos Índios. A mistura dos materiais seguiu Schaefer *et al.* (2006) e Batezini (2012), que concluíram que a ordem de mistura dos componentes altera as características do produto final e estabeleceram procedimento pelo qual foi obtido material com melhores propriedades mecânicas e hidráulicas. Procedimento similar foi utilizado na presente pesquisa e está apresentado na Figura 3.

Figura 3: Procedimento de mistura dos componentes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com o concreto obtido foram confeccionados 8 corpos de prova (CP) cilíndricos por formulação, cada CP possuindo diâmetro de 10 cm por 20 cm de altura, conforme Figura 4. Estes foram destinados aos ensaios de resistência à compressão e tração indireta. O

procedimento de compactação consistiu em 50 golpes de bastão metálico por amostra, divididos em 2 camadas, seguindo metodologia utilizada por Batezini (2012).

Figura 4: Corpo de prova para ensaio de resistência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para o ensaio de permeabilidade foram produzidos 4 corpos de prova cilíndricos por formulação, com os CPs possuindo 10 cm de diâmetro por 8 cm de altura. Devido à altura, para que se empregasse a mesma energia de compactação, foi adotado somente 15 golpes, utilizando apenas 1 camada.

O número de CPs escolhidos para a amostra ocorreu pela seguinte equação:

$$\text{N}^{\circ} \text{ Tratamentos (t)} \times \text{N}^{\circ} \text{ Repetições (r)} = 20 \text{ parcelas}$$

Como houve delimitação de 5 tratamentos (formulações), foi necessária a produção de 4 corpos de prova por formulação para diminuir os erros estatísticos.

3.4. ENSAIOS TECNOLÓGICOS NOS CORPOS DE PROVA

3.4.1. Resistência à Tração

Para obter a resistência à tração do concreto permeável utilizou-se a norma ABNT NBR 7222 (2011), que estabelece os critérios para determinação da resistência à tração por compressão diametral de CP cilíndrico. O procedimento para execução do ensaio é simples, necessitando da utilização de tiras de madeira a ser colocada de maneira que o eixo de aplicação da carga coincida com o plano axial do corpo de prova. A Figura 5 apresenta a execução do ensaio e o detalhe do corpo de prova rompido diametralmente.

Figura 5: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

a) Execução do ensaio



b) Corpo de prova rompido



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A resistência à tração foi calculada através da equação:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{2 \pi L}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

L é comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

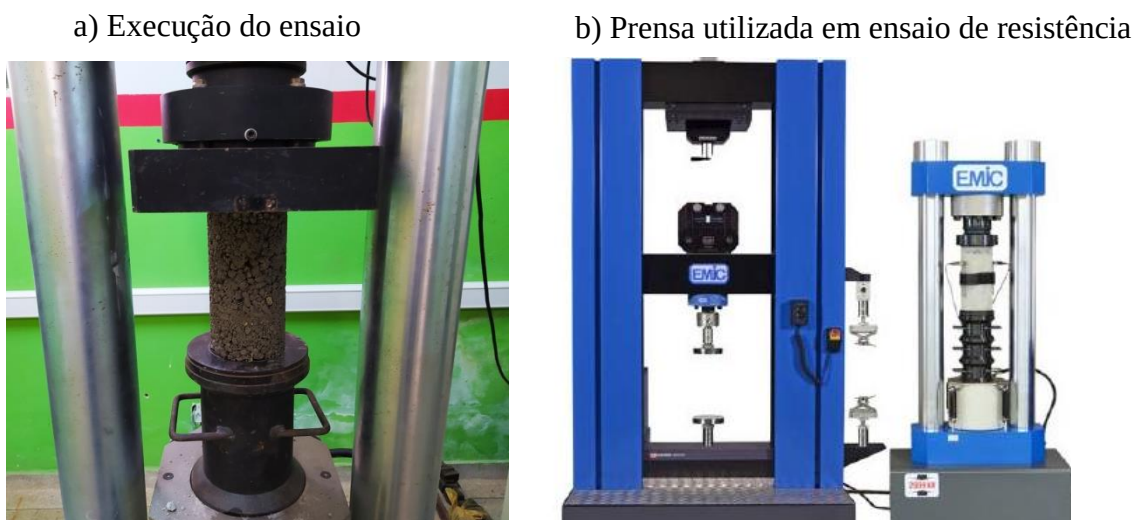
Apesar da ABNT NBR 16416 (2015) indicar o ensaio de tração por normatização específica, foi utilizado o método indireto de determinação por apresentar resultados compatíveis ao ensaio exigido pela norma, como é apresentado por Bittencourt (2017) e Oliveira (2017).

3.4.2. Resistência à Compressão

Apesar da resistência à compressão do concreto permeável não ser fator limitante para a caracterização do material para fins de uso em pavimentação, o ensaio de resistência à compressão axial foi realizado para conhecer essa propriedade secundária.

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com as orientações estabelecidas pela norma ABNT NBR 5739 (2018), utilizando corpos de prova sem capeamento, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6: Ensaio de resistência a compressão axial



Fonte: a) Elaborado pelo autor, 2021; b) EMIC, 2018.

A resistência foi calculada segundo a equação :

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, em Megapascal (MPa);

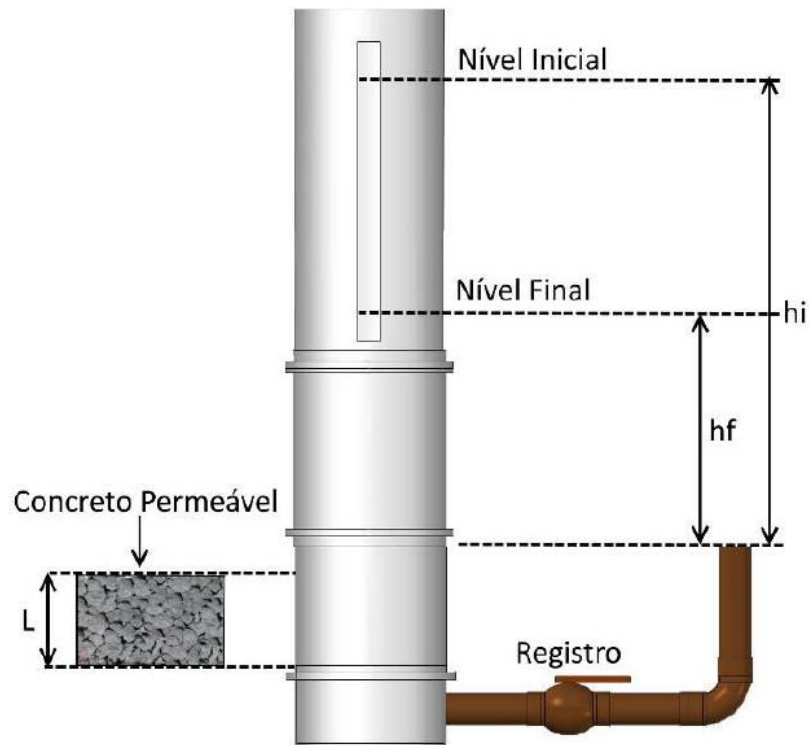
F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

3.4.3. Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade foi determinado por meio de permeâmetro de carga variável, montado com tubulações e conexões de PVC, de forma similar ao desenvolvido por Neithalath et al. (2010), Ibrahim *et al.* (2014) e Mikami *et al.* (2018), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Permeâmetro de carga variável



Fonte: Mikami et al. (2018).

A amostra de concreto permeável foi colocada no equipamento realizando a saturação do material antes do ensaio. O permeâmetro foi preenchido com água até o nível inicial (h_i), distante 27cm do nível do extravasor. Abrindo-se o registro de globo, foi medido o tempo necessário (t) para o nível d'água atingir o nível final (h_f), 12 cm acima do extravasor. O valor do coeficiente de permeabilidade foi calculado por meio da Lei de Darcy, conforme a equação:

$$k = \frac{A_1 L}{A_2 t} \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right)$$

Onde:

k é o coeficiente de permeabilidade;

A_1 é a área da seção transversal da amostra;

A_2 é a área da seção transversal da coluna de carga;

L é a altura da amostra;

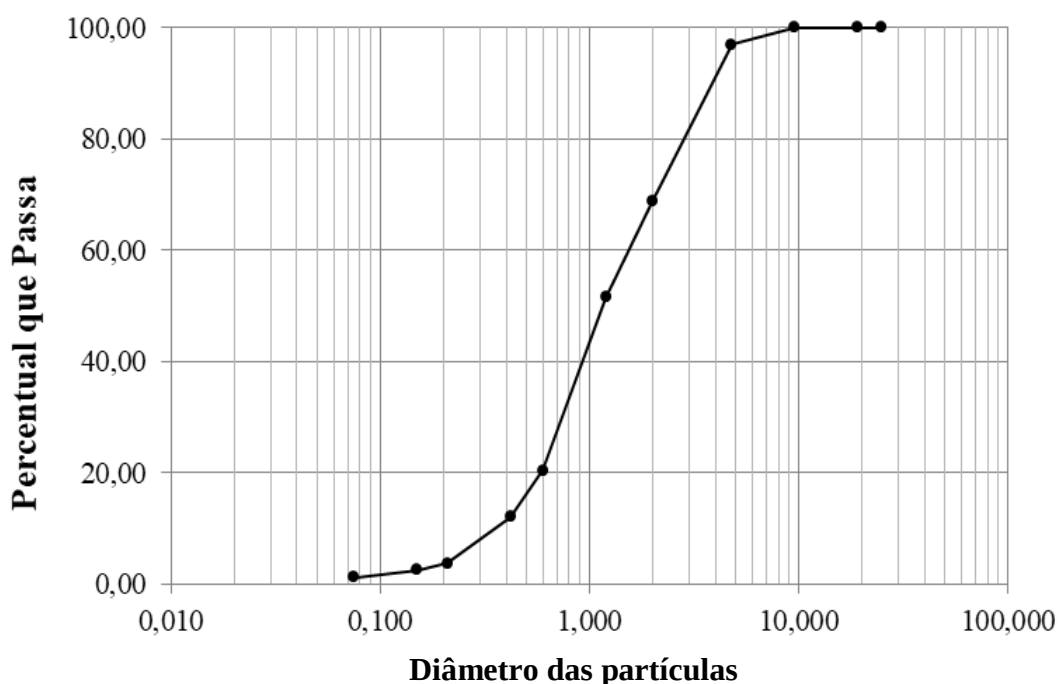
t é o tempo para a água se deslocar do nível inicial h_i até o nível final h_f , ambos em relação ao nível do extravasor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Figura 8 apresenta a curva granulométrica do cascalho de perfuração de poços de petróleo da Bacia Sergipe-Alagoas. Comparando os resultados obtidos com a ABNT NBR 7211 – Agregados para concreto (2005), pode-se constatar que o material apresenta características de areia média, com módulo de finura igual a 2,87.

Figura 8: Análise granulométrica do cascalho



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Quando se analisou os resultados com a ABNT NBR 6502 – Rochas e Solos (1995), que classifica os solos de acordo com a granulometria, observou-se que o material apresentou mais de 67% do volume entre 0,06 mm e 2,0 mm, ou seja, a maior parte do material é caracterizado como areia, sendo cerca de 48% do volume total areia grossa, 17% areia média e, pouco mais de 2,0%, areia fina. Identificou-se que, pouco mais de 31% da amostra, caracterizou-se como material granular, com granulometria maior que 2,0 mm, sendo constatada a pequena quantidade de finos presente no material. Como o concreto permeável exige maior granulometria dos agregados, essa constatação mostrou-se favorável para o desenvolvimento do produto, além de garantir maior utilização do subproduto (BATEZINI, 2013).

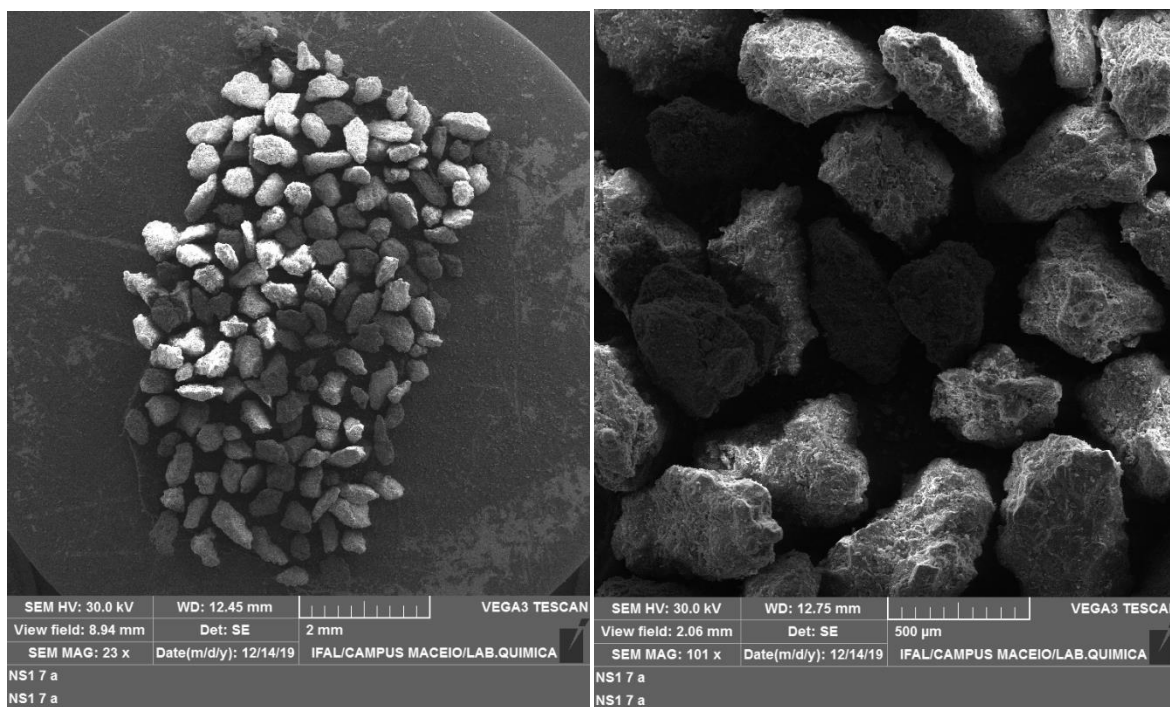
4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Na Figura 9 (imagens 9a e 9b) identificou-se a não uniformidade das partículas de cascalho, bem como a aglomeração que forma espaços vazios e que não proporciona compactação entre eles. Além disso, não foi observada variação de granulometria, diferenciando dos resultados identificados por Marques (2015) e Acchar e Marques (2016), que verificaram heterogeneidade entre partículas. Esse resultado corrobora com o ensaio de granulometria, onde mostra maior percentual de partículas entre os diâmetros de 0,6 mm e 4,8 mm.

Figura 9: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 20x e 100x

a) Magnificação de 20x

b) Magnificação de 100x



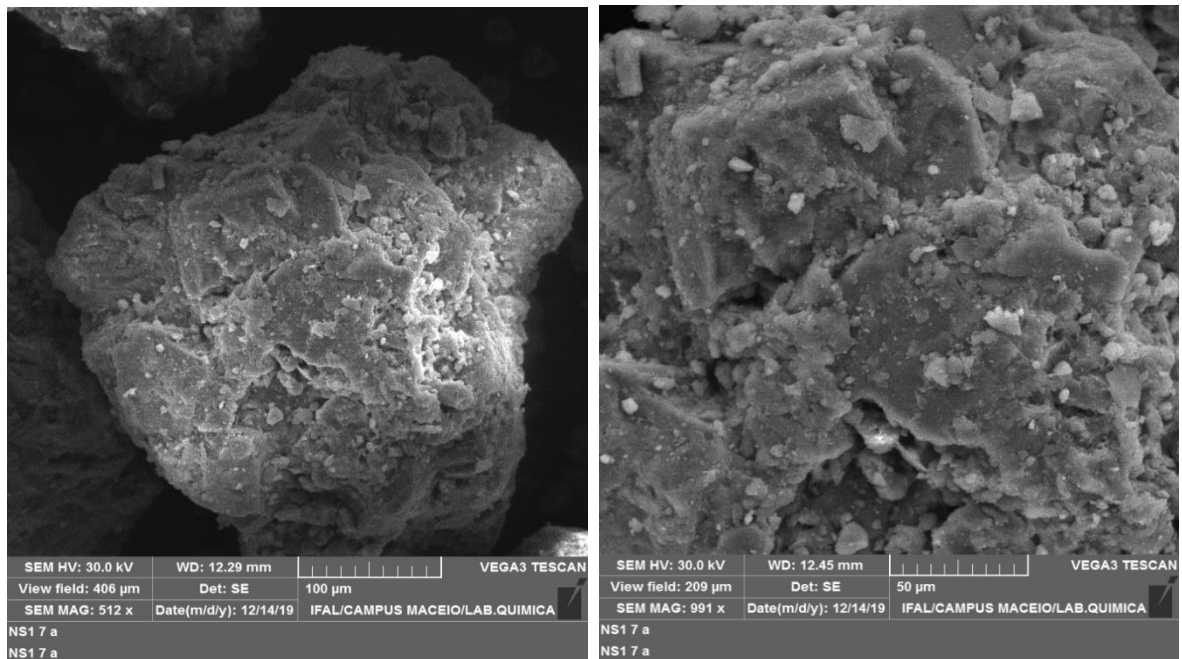
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Quando se observou a Figura 10 (imagens 10a e 10b), percebeu-se a grande compactação dos grãos e ausência de vazios, confirmando as afirmações de Mota (2018) de que os cascalhos apresentam aspecto estrutural característico das argilas, com estrutura lamelar. Segundo Rossi (2017), essa formação rochosa é tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais e possuem aspecto maciço, compactado e endurecido.

Figura 10: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 500x e 1000x

a) Magnificação de 500x

b) Magnificação de 1000x



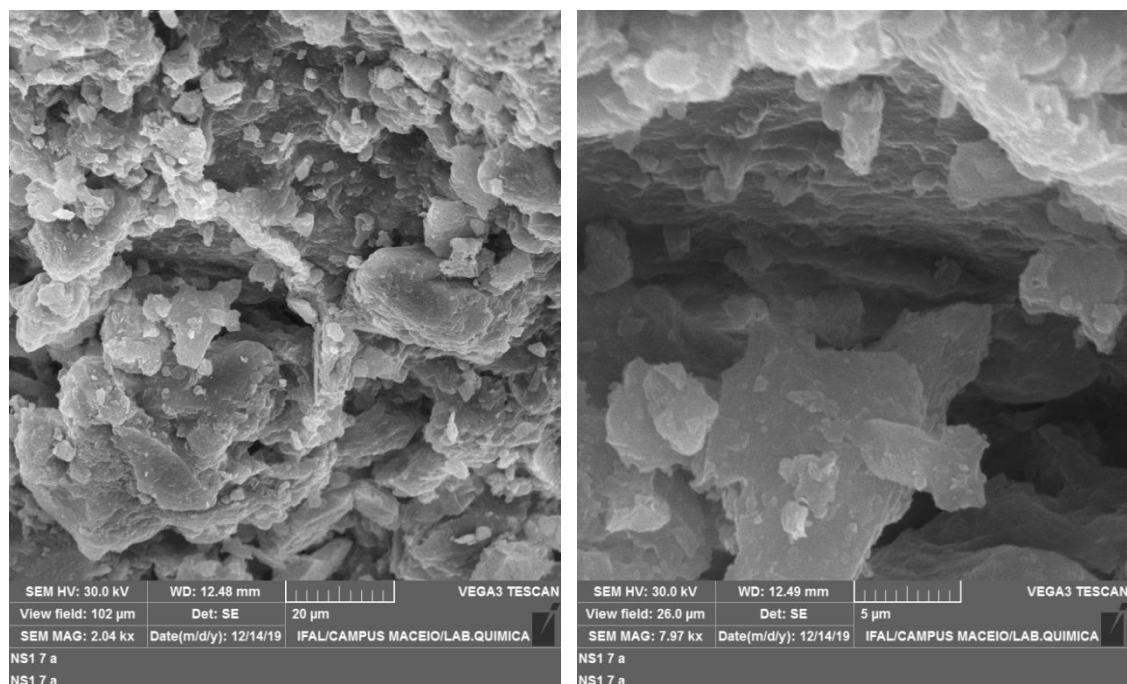
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Já na Figura 11 (imagens 11a e 11b) constatou-se essa formação lamelar, que faz com que os grãos sejam constituídos por lâminas finas e paralelas.

Figura 11: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 2000x e 8000x

a) Magnificação de 2000x

b) Magnificação de 8000x



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

Na Tabela 4, observou-se que, na composição química do cascalho de perfuração, há ocorrência de alto teor de cálcio. Além disso, pôde-se identificar valores significativos de Si, Fe, Mg, Ag, Al e K, o que também é apresentado em ensaios de fluorescência de cascalhos de perfuração provenientes de outras regiões do Brasil, como Fialho (2012), Marques (2015) e Fagundes (2018).

Tabela 4: Fluorescência de Raios X do cascalho

Fluorescência de Raios X (%)													
Ca	Si	Fe	Mg	Ag	Al	K	Sr	Ti	S	Zn	Mn	Br	Cu
65,89	8,75	6,81	6,58	3,69	3,63	2,45	0,62	0,48	0,33	0,27	0,24	0,17	0,09

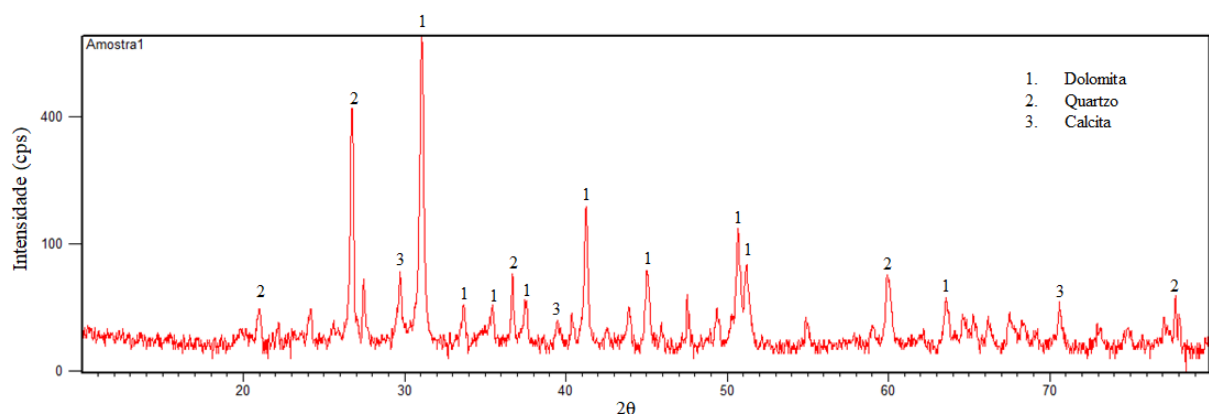
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O alto teor de Ca é proveniente das rochas carbonáceas dos reservatórios petrolíferos, tanto da decomposição de organismos vivos como da precipitação química (SILVA, 2014).

4.4. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Na Figura 12 apresenta-se o difratograma de Raios X do cascalho, onde foram identificados picos característicos das fases dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3). Observou-se que a dolomita é a fase cristalina predominante, corroborando com os resultados apresentados na análise química por fluorescência de Raios X, onde foi obtida a concentração de 65,89% de cálcio.

Figura 12: Difratometria de Raios X



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

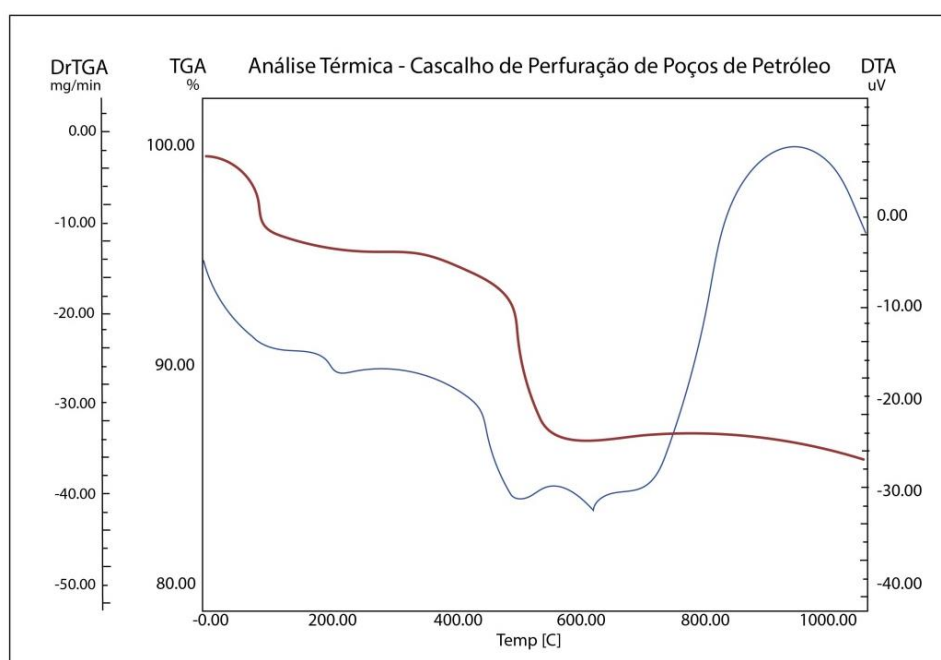
Segundo Petri Júnior (2014), mesmo que em algumas fases da perfuração dos poços se encontrem rochas ígneas e até metamórficas, a teoria mais aceita sobre a formação do

petróleo é que ele se origina a partir da decomposição de matéria orgânica junto com sedimentos, durante a formação das bacias sedimentares, isso explica o alto teor de dolomita na amostra.

4.5. ANÁLISES TÉRMICAS

A Figura 13 apresenta a curva termogravimétrica do cascalho de perfuração. Foi possível verificar que o cascalho perde em torno de 14% de massa à medida que a temperatura se eleva até 1000 °C. Observou-se duas etapas de perda, a primeira ocorre na faixa de temperatura entre 100 °C e 500 °C e pode ser atribuída à desidratação dos compostos orgânicos voláteis, provenientes do hidrocarboneto incorporados ao cascalho de perfuração e a presença de água (MARQUES, 2015). Esses resultados mostram-se favoráveis para o fim de aplicação dos cascalhos, visto que apresenta baixo percentual de perda, principalmente na faixa de temperatura entre 0 °C a 100 °C.

Figura 13: Análise Térmica do cascalho de perfuração



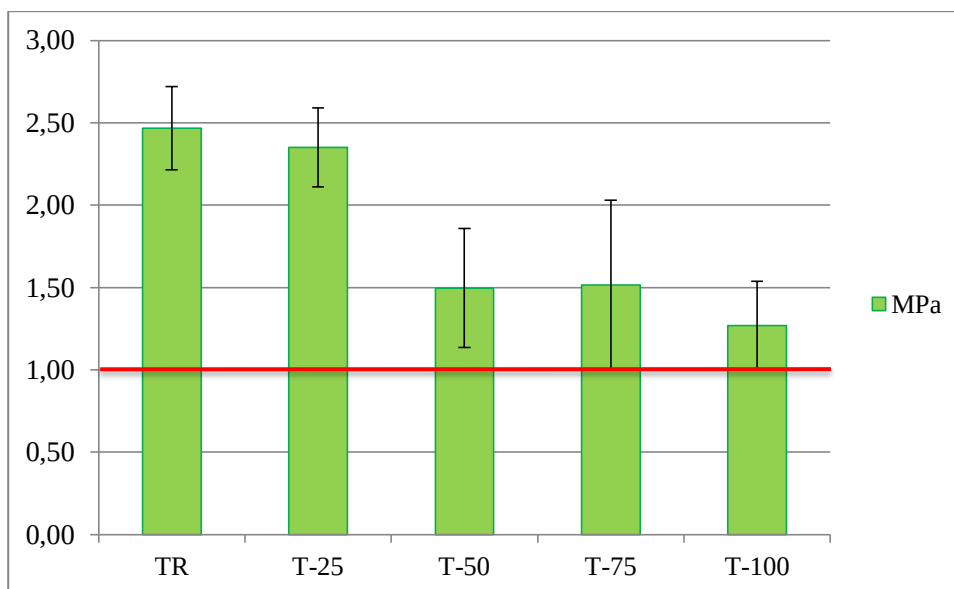
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A segunda etapa de perda de massa ocorre na faixa de temperatura entre 500 °C e 600 °C que pode estar relacionada a estabilização do composto (MARQUES, 2015). Observou-se que em torno de 600 °C ocorre a inversão térmica onde o quartzo passa da fase α para fase β . A partir de 600 °C notou-se estabilização das perdas.

4.6. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O resultado de resistência à tração é mostrado na Figura 14. Os resultados encontrados variaram de 1,27 MPa, para o concreto com utilização máxima de subproduto, até 2,45 MPa no traço de referência.

Figura 14: Resultado de resistência à tração



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

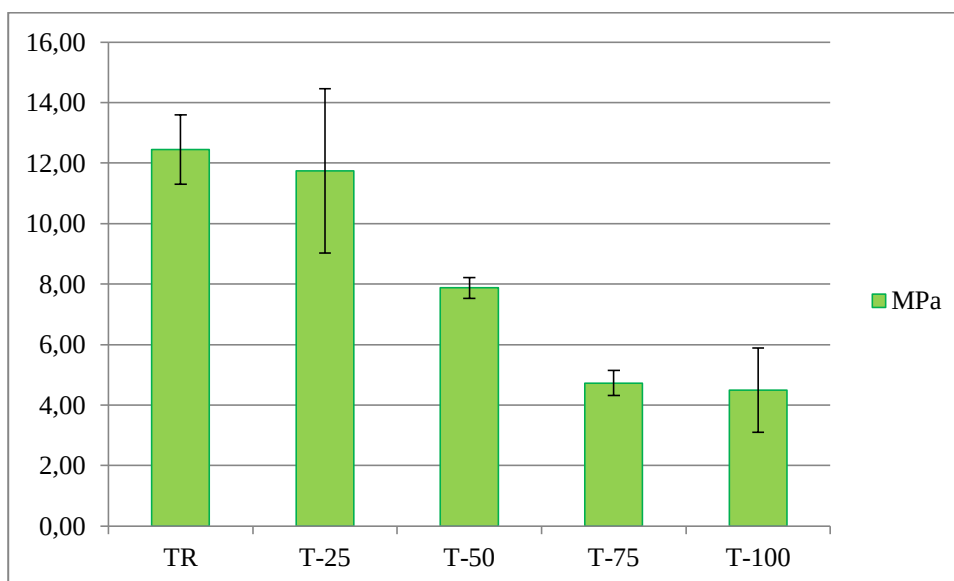
De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), os pavimentos permeáveis moldados no local devem apresentar valores mínimos para resistência à tração na flexão de 1,0 MPa, para tráfego de pedestres, e de 2,0 MPa, para tráfego leve. Devido as limitações laboratoriais, foi utilizado ensaio de tração indireta. Com isso, pode-se verificar que todos os concretos permeáveis do estudo satisfizeram as condições para utilização de tráfego de pedestre, porém, somente concreto de referência TR e o traço T25 satisfizeram a condição para ser utilizado como pavimento de tráfego leve.

Esses resultados assemelham-se aos resultados obtidos por pesquisadores ao utilizarem subprodutos na produção de concreto permeável, podendo destacar Vidal (2014); Bittencourt (2017) e Oliveira (2017).

4.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O resultado do ensaio de resistência à compressão é mostrado na Figura 15. Percebeu-se que, à medida que se incorpora o subproduto há diminuição da resistência, corroborando com o ensaio de resistência à tração.

Figura 15: Resultado de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

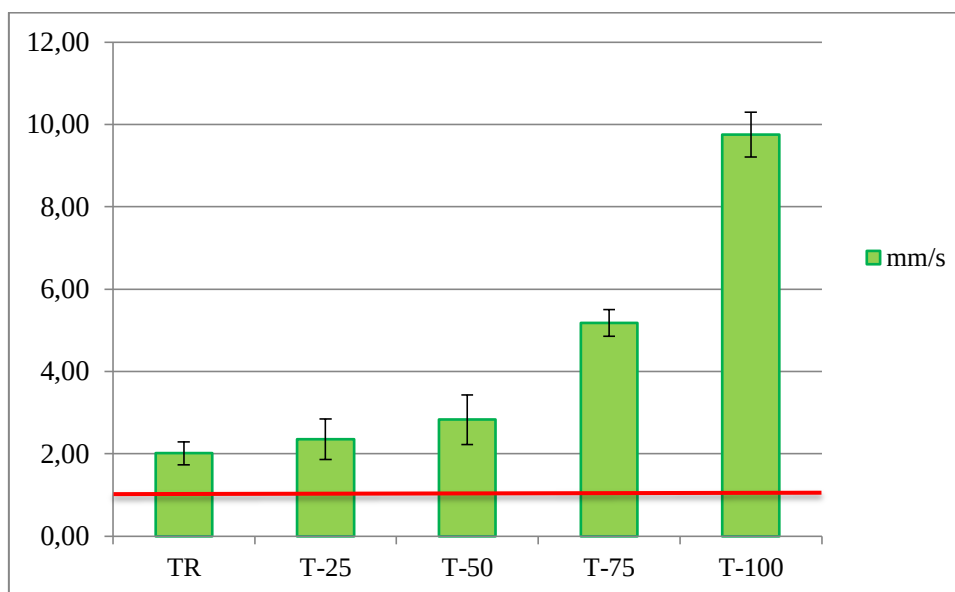
Segundo Kevern *et al.* (2009), por apresentar granulometria elevada para sua composição, com distribuição granulométrica uniforme, o concreto permeável apresenta elevado índice de vazios, o que ajuda na obtenção de altas permeabilidades, mas o leva a apresentar baixas resistências à compressão, o que faz com que os concretos permeáveis variem entre 6,7 MPa e 17,5 MPa em diferentes pesquisas. Essa afirmação foi confirmada Delatte *et al.* (2009), que, ao correlacionar a resistência ao de índice de vazio, verificou que ambos são inversamente proporcionais, ou seja, o aumento dos vazios diminui as resistências do concreto.

A baixa resistência apresentada na Figura 15 seguiu o mesmo padrão encontrado por Batezini (2012); Tavares e Kazmierczak (2016); Bittencourt (2017); e Mikami *et al.* (2018), ao utilizarem subprodutos na confecção dos CPs. Nesses autores, os resultados variaram de 2,0 MPa a 23,43 MPa.

4.8. PERMEABILIDADE

Na Figura 16, a seguir, é apresentado o resultado do ensaio de permeabilidade. Observa-se que todas as composições satisfazem o especificado pela norma brasileira ABNT NBR 16416 (2015), que estabelece 10^{-3} m/s (1 mm/s) como mínimo para altas permeabilidades, e pela norma ACI 522R (2013), que estabelece como valor mínimo para o concreto permeável coeficiente de infiltração superior a $1,40 \times 10^{-3}$ m/s (1,4 mm/s).

Figura 16: Resultado de permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Ao analisar o gráfico, foi possível observar que mesmo obtendo resultados satisfatórios, há diferença expressiva nesses coeficientes de permeabilidade de uma mistura para outra, o que indica melhora na permeabilidade quando se aumenta o teor de cascalho, com variação de 2,01 mm/s e 9,75 mm/s.

Os valores obtidos nessa pesquisa assemelharam-se a maioria dos autores que testaram esse parâmetro em concretos permeáveis. Analisando a literatura, os resultados obtidos por Schaefer *et al.* (2006) variam entre 0,4 mm/s e 14,5 mm/s, valores próximos aos estudos de Montes e Haselbach (2006), que, por sua vez, encontraram coeficientes entre 0,1 mm/s e 11,9 cm/s. Mais recentemente, autores como Batezini (2012) obtiveram permeabilidade entre 1,3 mm/s e 1,4 mm/s; Tavares e Kazmierczak (2016), permeabilidade entre 5 mm/s e 18 mm/s; e Risson (2017) resultados aproximados entre 7 mm/s e 15 mm/s.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados pode-se concluir que:

- O cascalho de perfuração de poços de petróleo apresentou módulo de finura igual a 2,87, que o caracteriza como areia média;
- Observou-se, pelas imagens geradas no MEV, que o cascalho apresenta aspecto estrutural característico das argilas, com estrutura lamelar, tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais, com aspecto maciço, compactado e endurecido;
- Na composição química do cascalho, há ocorrência de alto teor de Ca, ultrapassando o percentual de 65% da amostra analisada;
- Na difração de raios X do cascalho, foram identificados picos característicos das fases dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3). Observou-se que a dolomita é a fase cristalina predominante, corroborando com os resultados apresentados na análise química por fluorescência, onde foi apresentada concentração de 65,89% de cálcio;
- O ensaio de tração mostrou que todos os concretos permeáveis do estudo satisfizeram as condições para utilização de tráfego de pedestre, porém, somente o concreto de referência TR e o traço T25 satisfizeram a condição para ser utilizado como pavimento de tráfego leve; e,
- Todos os concretos testados apresentaram permeabilidade superior ao exigido pela ABNT e pela ACI, sendo que o traço com maior percentual de cascalho superou o valor mínimo em, aproximadamente, 10 vezes.

A caracterização do cascalho, proveniente da perfuração de poços de petróleo da Bacia Sergipe-Alagoas, proporcionou visão mais ampla do cascalho enquanto subproduto, sendo possível reaproveitá-lo para estudos em diferentes incorporações, em especial nos concretos permeáveis, já que necessitam em sua composição de materiais com boa resistência e grãos com maiores dimensões.

Como verificado, o concreto permeável configurou-se como produto de possível utilização tanto para tráfego de pedestres (todas as formulações), como para tráfego de leves (T25), apresentando resistência e permeabilidade satisfatórias.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Além dos resultados encontrados, foi possível observar pontos que podem ser avaliados em trabalhos futuros, que podem gerar resultados satisfatórios para elementos de drenagem urbana. Diante disso, seguem sugestões para novas pesquisas de elementos de drenagem:

- Avaliar as resistências em diferentes idades de cura (7, 14 e 21 dias);
- Devido a obtenção de coeficientes de permeabilidade bem superiores ao especificado pelas normas técnicas, sugere-se a avaliação da inserção de agregados com menor distribuição granulométrica, de modo a otimizar a relação entre resistência mecânica e condutividade hidráulica do concreto permeável;
- Realização de MEV com EDS;
- Determinação da qualidade da água infiltrada pelo concreto com incorporação de cascalho;
- Produção de concretos permeáveis compostos por cascalho de perfuração com aplicação de adições e aditivos que potencializem as principais características do material e aumente sua trabalhabilidade;
- Avaliação de tempo de pega e consequências da utilização de fluídos de perfuração para a hidratação do cimento;
- Avaliação da adição de novos subprodutos, aliados ao cascalho de perfuração, que visem a melhoria das propriedades físicas do concreto;
- Avaliação das vantagens econômicas da utilização de subproduto da cadeia petrolífera na produção de concreto poroso e;
- Produção de protótipo para avaliação das condições de campo e durabilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6502:1995: Rochas e Solos**. São Paulo, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Método de ensaio. São Paulo, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. 3 ed. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 16416:2015: Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

ACCHAR, W; MARQUES, S. K. J. **Ecological soil-cement bricks from waste materials**. Springer International Publishing, 2016.

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

ALMEIDA, P. C. **Análise Técnico-ambiental de Alternativas de Processamento de Cascalho de Perfuração Offshore**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Report on Pervious Concrete**. ACI Committee 522. Report number: ACI 522R-10, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - **Specification for Pervious Concrete Pavement**. Report number: ACI 522.1-13, 2013.

ANTUNES, P. T. S. C.. **Uso do Pavimento Permeável de Concreto para Atenuação de Cheias Urbanas**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BANDEIRA, R. A. F. **Uso de cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de cbuq (concreto betuminoso usinado a quente)** – Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, UFRN, Natal – RN, 2019.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2013.

BEN. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL.** Relatório 2019. Disponível em: <<https://url.gratis/4ygGL>>. Acesso em 27/03/2020.

BITTENCOURT, S. V. **Estudo da Utilização de Resíduos de Pavimentos Asfálticos na Confecção de Concretos Permeáveis.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

COSTA, F. R. T. **Microscopia Eletrônica de Varreduras: potencialidades e aplicações.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). São Luís, MA, 2016.

DELATTE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D.I. Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, nº 2113, p. 132–139, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3141/2113-16>

EBLING, M. **Estratégias de desenvolvimento e política industrial de petróleo e gás: uma comparação entre Brasil, México e Noruega** – Tese (doutorado) - UnB, Brasília, 2016.

FAGUNDES, T. B. **Caracterização de cascalhos de perfuração de poços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais** – Dissertação (Mestrado) – USP, São Paulo – SP, 2018.

FIALHO, P. F. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

HOLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524–529, 2014.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Temperature Behaviour of Pervious Concrete Systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2098, p. 94–101, Set. 2009.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LEITE, D. A. B; ARAÚJO, J. B. Aspectos da política pública municipal de resíduos sólidos em Fortaleza. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, III. **Anais...** Brasília, DF, 2006. III Encontro da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2006. 20p.

LI, J. Mix Design of Pervious Recycled Concrete. GeoHunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements. V. 195, n. 15, p. 103–108. 2009. **DOI:** [https://doi.org/10.1061/41047\(354\)15](https://doi.org/10.1061/41047(354)15)

LIAN, C. ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. **Elsevier Journal Constrution and Building Materials**. M. Urban drainage specific climates: urban drainage in humid tropics. Paris: UNESCO. IHPV. Technical Documents in Hydrology. No.40. v.I. cap.4, p 103 – 124, 2010. **DOI:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>

LOMASSO, A. L.; SANTOS, B. R.; ANJOS, F. A. S.; ANDRADE, J. C.; SILVA, L. A.; SANTOS, Q. R.; CARVALHO, A. C. M. Benefícios e Desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no centro mineiro de referência em resíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, jan. 2015.

LUSTOSA, M. C. J. **Meio ambiente, inovação e competitividade na Indústria Brasileira: a cadeia produtiva do petróleo**. Tese (Doutorado em Economia) - Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MARQUES, S. K. J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal – RN, 2015.

MIKAMI, R. J.; KRUGER, P.; PEREIRA, E.; KUMMER, A. C. B.; DÖLL, M. M. R. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. **Revista Matéria**, v. 23, n° 3, 2018.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, p. 960-969, 2006.

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea: Petrobras, 2013.

MOTA, A. C. S. **Propriedades dielétricas e cinética de secagem de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás utilizando micro-ondas**. Dissertação (mestrado). UFU, Uberlândia, 2018.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M.S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, p. 802-813, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004>

NICOLLI, D.; SOARES, C. B. P. **Avaliação da Dispersão do Cascalho de Perfuração lançado em águas profundas**. Disponível em: <<http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/BE09/artigo1.htm>>. Acesso em: 27 de abril de 2020.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação (mestrado) – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, SP, 2017.

ORTIZ NETO, J. B.; COSTA, A. J. D. A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. **Revista Brasileira de Economia**, v. 6, n° 1, Rio de Janeiro, mar. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-71402007000100006>

ORTIZ NETO, J. B.; SHIMA, W. T. Trajetórias tecnológicas no segmento offshore: ambiente e oportunidades. **Revista Economia Contemporânea**, v. 12, n° 2, Rio de Janeiro, ago. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-98482008000200005>

PETRI JUNIOR, I. **Formação do petróleo é que ele se origina a partir da decomposição de matéria orgânica junto com sedimentos** – Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFU, Uberlândia-MG, 2014.

PIRES, P. J. M. **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFU, Minas Gerais, 2010.

QUINTINO, M. N.; DE CASTRO, J. A.; DA SILVA, L. M.; MOTA, I. O. Análise Termogravimétrica do Efeito da Granulometria do Resíduo Metalúrgico na Cinética de Perda de Massa. **Cadernos UniFOA**. Vol 35. Dezembro de 2017.

RAHMAN, M. A.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**, V. 90, Melbourne, Australia. p. 183-194, 2015.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2010.

RIBEIRO, L. S. **Uso de água produzida na formulação de fluídos de perfuração**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal-RN, 2015.

ROCHA, B. A. B.; LIMA, F. R. S.; WALDMAN, R. L.. Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista Pensamento Jurídico**, v. 14, n. 1, 2020.

ROSSI, A.S. **Cinética de aquecimento e secagem, propriedades dielétricas e simulação computacional aplicado ao tratamento de cascalho de perfuração por micro-ondas**. Tese (doutorado). UFU, Uberlândia-MG, 2017.

RISSE, K. D. B. S. **Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concreto permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

SANDOVAL, G. F. B.; GALO BARDES, I.; DIAS, C.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic

properties. **IBRACON**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 590-607, maio/junho, 2019. **DOI:** <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000300009>

SANTOS, R. J.; AVELLAR, A. P. M. Da criação do conselho nacional do petróleo à política de conteúdo local: a trajetória histórica das políticas para a indústria do petróleo e gás natural no Brasil. **História econômica & história de empresas**, v. 19, nº1, p. 221-248, 2016.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; BARROS, V. G.; GOMES, I. R.; DALANDRÉA, M. S. Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: Reduction of surface flow and possible applications. **Construction and Building Materials**, Joinville, Brasil, v. 250, 2020. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118896>

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report, Civil Engineering, Iowa State University, 2006.

SCHIAVI, M.T. HOFFMANN, W.A.M. Cenário petrolífero: sua evolução, principais produtores e tecnologias. **Revista digital de biblioteconomia e Ciência da Informação**, Campinas, SP, 2015. p.259-278

SEIBERT, A. L. **A importância da gestão de resíduos sólidos urbanos e a conscientização sobre a sustentabilidade para a população em geral**. Monografia (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Medianeira, PR, 2014.

SHON, C. S.; Estakhri, C. K.; Lee, D.; Zhang, D. Evaluating feasibility of modified drilling waste materials in flexible base course construction. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 79-86, jun. 2016. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.100>

SILVA, B. J. B.; SILVA, A. O. S.; NETO, P. P. M.; COSTA, T. P. M.; JÚNIOR, L. V. S.; RIBEIRO, L. M. O.; ALENCAR, S. L.; SILVA, A. E.; SANTOS, R. B. Análise quantitativa das zeólitas ferrierita, ZSM-5 e mordenita presentes em amostras sintetizadas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 357, jan./mar. 2015. **DOI:** <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613571842>

SILVA, C. H. **Influência da Incorporação de Sólidos nas Propriedades de Fluidos de Perfuração Sintéticos**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

SOUZA, O.; OLIVEIRA, L. J. Globalização e relações de consumo: servidão moderna e degradação ambiental. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 6, n. 2, p.156-178, 2016.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n° 1, São Paulo, 2016.

VIDAL, A. S. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. Dissertação (mestrado). UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2014.

APÊNDICE – ARTIGO CIENTÍFICO

CARACTERIZAÇÃO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL

RESUMO

A revolução industrial trouxe progresso e desenvolvimento, mas também promoveu aumento do consumo de bens naturais e a consequente geração de resíduos. O cascalho de perfuração faz parte desses resíduos que, quando disposto inadequadamente, pode gerar impactos ambientais através da poluição atmosférica, poluição hídrica, poluição do solo e poluição visual, bem como pode causar doenças para população, ocasionando dano a saúde das pessoas. Gerado das diferentes explorações de poços de petróleo e gás que, anualmente, produzem milhões de toneladas – e derivado da geração de petróleo, após a escavação de poços – o cascalho pode ser definido como fragmentos de rochas e fluido provenientes dessa perfuração. Este trabalho objetivou caracterizar o cascalho proveniente da bacia Sergipe-Alagoas de forma física, química e morfológica, visando aplicação em concretos permeáveis. Os ensaios realizados foram de Análise Granulométrica, Microscopia Eletrônica de Varredura, Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e Análises Térmicas. Como resultados, constatou-se que o material analisado apresentava pequena quantidade de finos, tendo aproximadamente 80% do cascalho com diâmetro superior a 0,6 mm. Identificou-se que o material apresenta aspecto estrutural característico das argilas, com estrutura lamelar, tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais, com aspecto maciço, compactado e endurecido, possuindo alto teor de cálcio e que, quando submetido a temperaturas de até 1000 °C, perde cerca de 14% da massa total.

Palavras-chave: Indústria do petróleo; perfuração de poços; cascalho.

CHARACTERIZATION OF DRILLING GRAVEL OF OIL WELLS IN THE SERGIPE-ALAGOAS BASIN FOR THE PRODUCTION OF PERMEABLE CONCRETE

ABSTRACT

The industrial revolution brought progress and development, but also promoted an increase in the consumption of natural goods and the consequent generation of waste. Drilling gravel is part of this waste that, when disposed of improperly, can generate environmental impacts through air pollution, water pollution, soil pollution and visual pollution, as well as it can cause diseases to the population, causing damage to people's health. Generated from different explorations of oil and gas wells that annually produce millions of tons - and derived from the generation of oil after the excavation of wells - gravel can be defined as fragments of rocks and fluid from this drilling. This work aimed to characterize the gravel from the Sergipe-Alagoas basin in physical, chemical and morphological form, aiming at application in permeable concrete. The tests performed were Granulometric Analysis, Scanning Electron Microscopy, X-Ray Fluorescence and X-Ray Diffraction. As a result, it was found that the analyzed material had a small amount of fines, with approximately 80% of the gravel with a diameter greater than 0.6 mm. It was identified that the material has a structural aspect characteristic of clays, with lamellar structure, typically found in national well drilling, with a solid, compacted and hardened aspect, having a high CaO content and which, when subjected to temperatures up to 1000 °C, loses about 14% of the total mass.

Keywords: Oil industry; drilling of wells; grave.

1. INTRODUÇÃO

A revolução industrial trouxe mudanças significativas para a sociedade atual e contribuiu diretamente para o surgimento da revolução tecnológica vivida até hoje (ROCHA; LIMA; WALDMAN, 2020). É certo que a globalização trouxe progresso e rompeu barreiras, o que melhorou a formação e a tecnologia no mundo, mas também promoveu aumento do consumo de bens naturais e a consequente geração de resíduos, que geralmente são constituídos por elementos de difícil decomposição (LEITE; ARAÚJO, 2006; SOUZA, 2016).

Esses resíduos, tratados nesse estudo como subprodutos, ou seja, matérias-primas não processadas que apresentam capacidade de reutilização enquanto insumos secundários -, quando dispostos inadequadamente, podem gerar impactos ambientais através da poluição atmosférica, poluição hídrica, poluição do solo e poluição visual; e, além disso, podem causar doenças para população, ocasionando dano a saúde das pessoas. Para amenizar esses impactos, utiliza-se da incorporação de subprodutos que seriam descartados no desenvolvimento de novos materiais e produtos que seriam descartados, contribuindo para a redução da poluição e para a preservação dos recursos naturais, além da economia de energia e redução do volume de aterros (JOHN, 2000; LOMASSO *et al.*, 2015).

O cascalho de perfuração é gerado das diferentes explorações de poços de petróleo e gás e, anualmente, produzem milhões de toneladas desse subproduto que precisa ser adequadamente gerenciado e armazenado, na maioria das vezes, dentro da própria empresa (ACCHAR; MARQUES, 2016; MARQUES, 2015). Esse material pode ser definido como fragmentos de rochas e fluido provenientes da perfuração, podendo conter fragmentos de cimento curado na composição (ALMEIDA, 2016).

A produção de petróleo consiste em atividade exploratória que gera diversos riscos. Entre eles, está a geração de grande quantidade de cascalho, que são depositados na superfície dos solos, sem o devido tratamento. Por ser atividade que atinge diretamente a preservação dos recursos naturais, uma vez que quanto maior o crescimento da exploração maior será a necessidade de áreas para deposição do material gerado, faz-se necessário obter-se solução efetiva na destinação do cascalho gerado, de forma que se minimize os impactos causados por essa atividade (MENESES; PAULA, 2015; MARTINS *et al.*, 2015).

Incorporar subprodutos em novos materiais consiste em alternativa de mitigar esses impactos e o concreto permeável pode fazer parte dessa solução. Ele ganhou importância nos últimos anos como material de revestimento para aplicação em pavimentos. Diferentemente dos pavimentos tradicionais, os pavimentos permeáveis permitem a infiltração da água pluvial na superfície, além de controlar o escoamento superficial e a degradação da qualidade da água. Deste modo, o concreto permeável caracteriza-se como importante mecanismo para minimizar os problemas das grandes cidades, evitar inundações e, neste caso, incorporar cascalho de perfuração na composição (ANTUNES, 2017).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o cascalho proveniente da bacia Sergipe-Alagoas de forma física, química e morfológica, visando aplicação em concretos permeáveis, como alternativa para

recuperação e destinação. O artigo encontra-se organizado em 5 seções: Introdução, Referencial Teórico, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão e Conclusão. A primeira seção apresenta contextualização, o porquê da escolha desta pesquisa e o objetivo do trabalho. A segunda seção faz abordagem teórica do cascalho de perfuração, desde a exploração do petróleo até o descarte dos resíduos, além de apresentar, na subseção 2.3. informações sobre o concreto permeável. A terceira seção apresenta os Materiais e Métodos, acentuando a obtenção do subproduto, os ensaios e os equipamentos utilizados na caracterização. Na quarta seção são expostos os resultados e as discussões; e, na quinta seção, apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Exploração e cadeia produtiva da indústria petrolífera

A Exploração e Produção (E&P) integram a base da indústria petrolífera como os primeiros passos para a obtenção do Petróleo. Grandes investimentos são despendidos no desenvolvimento tecnológico, na ampliação dos conhecimentos geológicos e na formação da cadeia de bens e serviços que dê suporte à atividade exploratória (FAGUNDES, 2018).

Essa E&P se configuram, basicamente, por dois ambientes de perfuração: as explorações em águas profundas, também denominadas *offshores*; e, as explorações em terra, denominadas *onshore*. As perfurações *offshore*, de maneira geral, sintetizam todo o processo em três conjuntos tecnológicos distintos que, por sua vez, são os objetos de pesquisa das companhias: as plataformas, o sistema de perfuração e o mecanismo de transmissão do petróleo da profundidade para a plataforma (ORTIZ NETO; COSTA, 2007).

A E&P teve início no final do século XIX, em perfurações de até 30 metros (águas ultrararas), de maneira rudimentar e pouco científica. Isso porque as dificuldades tecnológicas eram superadas de maneira empírica. Na verdade, era transferido para a exploração *offshore* o mesmo padrão tecnológico utilizado no segmento *onshore*. Com a ampliação das descobertas e o consequente aumento das dificuldades de exploração em campos mais profundos (águas rasas – entre 30 e 400 metros) e mais distantes da costa, foi necessário o desenvolvimento de procedimentos e tecnologias próprias, não sendo mais utilizada a rudimentar e empírica adaptação de equipamentos *onshore*. Dessa forma, foram construídas as primeiras plataformas fixas, necessitando de equipamentos mais modernos. Iniciava-se, assim, a busca de trajetória tecnológica, que viabilizasse a exploração *offshore* em mar aberto (ORTIZ NETO; SHIMA, 2008).

Para que se chegue à produção de diferentes poços, a perfuração é realizada por sonda, constituída por vários sistemas com funções específicas. As perfurações acontecem, principalmente, por meio de dois métodos de perfuração: à percussão e rotativo. No método à percussão, são deferidos golpes por broca pontiaguda, gerando o esmagamento da rocha. Já no método rotativo, adota-se tecnologia diferente; neste, a broca é girada e comprimida sobre o solo e as rochas, que se fragmentam. A energia necessária

para perfurar as diversas formações rochosas é proveniente do movimento de rotação e cargas aplicadas sobre a broca que, quando transferidas às rochas, promovem ruptura e desagregação em forma de pequenas lascas ou cascalhos, que são removidos do fundo do poço e carregados até a superfície pelo fluxo do fluido de perfuração (BANDEIRA, 2019).

Como as escavações são de grandes profundidades, podendo chegar a 6 km, a perfuração acontece por fases. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e se insere coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca. O número de fases e o comprimento das colunas de revestimento são determinados em função das pressões e fratura previstas (FAGUNDES, 2018).

Segundo Fagundes (2018, p. 31), essa divisão de fases e diferentes colunas de revestimento têm a função de “[...] prevenir o desmoronamento das paredes do poço, evitar contaminação da água potável dos lençóis freáticos, permitir o retorno do fluido [sic] de perfuração à superfície, impedir a migração de fluido das formações para o interior do poço, etc [...]”.

Para auxiliar na perfuração, faz-se necessário se utilizar dos fluidos de perfuração, em cujas formulações químicas são adicionados diferentes produtos químicos e materiais sólidos, a fim de se alcançar composição com propriedades específicas, necessárias para as operações de perfuração de poços petrolíferos. A classificação do fluido de perfuração é feita em função da composição e do tipo de fase líquida. Nesse critério, classificam-se os fluidos em: de base aquosa e de base não aquosa, também denominados como fluidos a base de óleo. Há ainda a utilização de gás, que pode ser ar ou gás natural, além de lamas aeradas (normalmente com nitrogênio); no entanto, a utilização é restrita a cenários específicos (PEREIRA, 2010; ALMEIDA, 2016).

Os fluidos mais utilizados na indústria são os de base aquosa, pois apresentam fácil manipulação, baixo custo de manutenção e podem ser formulados para superar diversos problemas de perfuração, causando menor impacto ambiental em relação aos fluidos não aquosos. Os fluidos aquosos tratam-se de formulações compostas por 50% a 90% de água, com adição de argilas, polímeros, agentes adensantes, sais inorgânicos e outros aditivos dissolvidos ou em suspensão (RIBEIRO, 2015).

2.2. Cascalho de perfuração de poços de petróleo

A indústria de petróleo e gás gera vários produtos e com eles inúmeros subprodutos. Um dos principais subprodutos da atividade de perfuração de poços de petróleo e gás são os cascalhos de perfuração. A perfuração de poços de petróleo ocorre em duas fases: a de exploração e a de desenvolvimento. Para que se localizem as reservas de hidrocarbonetos, existe perfuração prévia chamada de atividades de exploração. Nessa fase, identifica-se o potencial produtivo das reservas de hidrocarbonetos e o potencial econômico. Quando essas reservas já foram descobertas, surge a fase de desenvolvimento, que busca o usufruto do material encontrado. Nas duas fases há geração de cascalho (PIRES, 2009).

A perfuração divide-se em diferentes estágios e diminui o diâmetro do poço à medida que aumenta a altura dessa escavação, proporcionando a menor geração de subprodutos por metro perfurado (ALMEIDA NETO, 2017). O volume de cascalho produzido durante a escavação varia, visto que a quantidade produzida é proporcional à profundidade, ao diâmetro e às características geológicas das formações perfuradas. Nesse processo, o volume gerado tende a ser o volume geométrico do cilindro perfurado somado ao fluido de perfuração (PIRES, 2009).

O Brasil tem apresentado grande geração desse subproduto. Nicolli e Soares (2010) consideram que, em média, 1 poço gera entre 500 e 800 m³ de material resultante da trituração das rochas pela broca. Fialho (2012), a partir de dados de perfurações terrestres, obtidos para o ano de 2010 no Estado do Espírito Santo, apresenta a geração média de 13 m³ de cascalho a cada 100 metros perfurados.

Segundo Almeida Neto (2017), só no nordeste estima-se que exista, atualmente, quantidade de subprodutos da ordem de 100 mil m³ oriundos do processo de perfuração de poços para produção de petróleo. Quantidade significativa, principalmente, por saber que os cascalhos, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deteriora a paisagem urbana e constituem passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sem tratamento prévio (FIALHO, 2012).

Vários são os trabalhos que tratam do reaproveitamento do cascalho. Pires (2009) utilizou do cascalho para produção de cerâmica vermelha; Fialho (2012) aplicou cascalho para a produção de concreto convencional; Shon *et al.* (2016) aplicou esse subproduto em contruções de estradas; Almeida Neto (2017) usou do cascalho para elaborar argamassa de cimentação primária com vistas à inserção em novos poços; e muitos outros trabalhos que tiveram resultados satisfatórios, positivando a substituição.

2.3. Concreto permeável

O concreto permeável é o tipo de concreto que apresenta maior volume de vazios. É caracterizado por possuir elevada porosidade e boa drenabilidade, sendo composto por ligante hidráulico, material britado de graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo. Na composição pode-se utilizar combinação de diferentes tipos de adições e aditivos, que possuem a finalidade de atribuir ao concreto melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade (BATEZINI, 2013).

Essencialmente, pode-se dizer que o concreto permeável difere do concreto convencional pelo elevado índice de vazios. Nos concretos convencionais o objetivo é o alcance da maior densidade possível, já que os concretos permeáveis devem conter poros para permitir a infiltração de água (LAMB, 2014).

Os concretos permeáveis destinam-se, basicamente, para o uso como pavimento permeável, que pode ser construído com as seguintes tipologias: revestimentos em peças de concreto com juntas alargadas, revestimento em peças de concreto com áreas vazadas, revestimento de peças de concreto permeável, revestimento em placas de concreto permeável e revestimento de pavimento de concreto permeável (ABNT, 2015).

Segundo Lamb (2014, p. 56), o uso do concreto permeável em pavimentos “[...] permite que a água das chuvas passe através dele e seja armazenada nas camadas inferiores, base e sub-base, até ser conduzida ao lençol freático por meio do subleito ou, então, ser levada ao sistema de drenagem da cidade”. Deste modo, caracteriza-se como material apropriado para área que receberá as precipitações, evitando os alagamentos e realimentando o aquífero.

Vários são os estudos que tratam da incorporação dos subprodutos para produção de concreto permeável; Vidal (2014), que incorporou agregados reciclados de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano; Sandoval *et al.* (2019) que substituíram agregado graúdo por escória de forno elétrico (EFA) na produção do concreto permeável; e Schackow *et al.* (2020), produziram placas de concreto permeáveis com subprodutos da indústria de papel.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto Federal de Alagoas (IFAL) e teve como objetivo caracterizar cascalho de perfuração de poços de petróleo provenientes da Bacia Sergipe-Alagoas (Figura 1). O material foi coletado no município de Carmópolis-SE, ainda úmido e acondicionado em sacos plásticos. Posteriormente passou por secagem ao sol por 8 horas para diminuição da umidade.

O método de pesquisa adotado consistiu no desenvolvimento experimental, ou seja, a pesquisa teve natureza tecnológica com abordagem quali-quantitativa e foi executada *in vitro* (Laboratório). O material coletado foi caracterizado pelas seguintes técnicas: Análise Granulométrica (AG); Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX); Análise Mineralógica por Difração de Raios X (DRX) e Análises Térmicas.



Figura 1: Cascalho de perfuração de poços de petróleo.

3.1. Análise Granulométrica

O ensaio de Granulometria teve como objetivo conhecer o tamanho dos grãos do solo, conforme a ABNT NBR 7181: Análise Granulométrica (ABNT, 2016), que apresenta o passo a passo necessário para se obter a curva granulométrica. O método utilizado no ensaio foi por peneiramento.

O primeiro passo realizado foi a separação das amostras de cascalho. Como o material foi coletado ainda úmido, foi necessária secagem ao ar por 8 horas para diminuição da umidade. Após a secagem, determinou-se a massa da amostra seca, que foi levada para peneiramento em peneira com espessura de 2,0 mm, para separação de material graúdo e miúdo.

A parte retida na peneira de 2,0 mm foi lavada a fim de eliminar o material fino aderente, sendo levada para secar em estufa à temperatura de 110 °C, até constância de massa. Esse material foi utilizado no peneiramento grosso que necessitou de agitador mecânico para peneiramento da amostra. O material retido foi lançado sobre as peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm.

Para o peneiramento do material passante na peneira de 2,0 mm, foi necessário a lavagem do material na peneira de 0,075 mm, vertendo-se água potável à baixa pressão. O material retido na peneira de 0,075 mm foi seco em estufa, à temperatura de 110 °C, até constância de massa; e, utilizando-se de agitador mecânico, executou-se peneiramento em malhas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. As massas retidas acumuladas em cada peneira foram anotadas.

O resultado final é apresentado graficamente, dispondo-se em abcissas os diâmetros das partículas, em escala logarítmica; e, em ordenadas, as porcentagens das partículas menores do que os diâmetros considerados, em escala aritmética.

O ensaio de granulometria foi realizado no laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, Campus Palmeira dos Índios.

3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste em ferramenta utilizada para a análise microestrutural de diversos materiais, e possibilita a análise de falhas, tamanho de partículas, estrutura e forma (COSTA, 2016). O ensaio foi necessário para identificar as particularidades do cascalho da Bacia Sergipe-Alagoas, possibilitando identificar a formação rochosa da camada de exploração.

As amostras estudadas foram peneiradas e selecionadas com diâmetro menor que 0,42 mm e submetidas no microscópio eletrônico de varredura de modelo MEV SSX 550 *superscan* – Shimadzu, no Laboratório de Química do Instituto Federal de Alagoas, Campus Maceió, com magnificação de 20x, 100x, 500x, 1000x, 2000x e 8000x.

Apesar de Fialho (2012), analisar o cascalho até magnificação máxima de 1000x, esse trabalho buscou aprofundar os aspectos microscópicos do subproduto para obter mais respostas quanto à estrutura molecular da região e amostra estudada.

3.1.3. Fluorescência de Raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX) é a técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes na amostra (análise qualitativa), assim como estabelecer a proporção de cada elemento. Por ser técnica instrumental muito reprodutível, rápida e precisa, a fluorescência de Raios X é o método mais usual para determinação da composição química dos materiais (OLIVEIRA, 2011).

A execução do ensaio mostrou-se importante por dois motivos: primeiro, para analisar os componentes da amostra, que permitissem avaliar os resultados obtidos nos testes de resistência e permeabilidade; e, para verificar a presença de componentes nocivos ao meio ambiente e aos usuários.

Nesse trabalho utilizou-se do espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDX-700, Shimadzu) em atmosfera a vácuo, aplicando método semi-quantitativo para determinação dos elementos, realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.1.4. Difração de Raios X (DRX)

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a técnica de difração de Raios X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia dos materiais, não só devido à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas desses minerais. Dentre as principais vantagens da técnica, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados e a possibilidade de análise quantitativa das fases cristalinas (SILVA *et al.*, 2015).

As amostras estudadas por DRX foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,075 mm, secas e analisadas em difratômetro de Raios X (XRD-6000, Shimadzu), localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando-se as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 10° a 80°).

3.1.5. Análises Térmicas

A análise termogravimétrica é bastante difundida para complementar a caracterização de matérias-primas, buscando analisar quantitativamente o ganho e/ou perda de massa através das relações entre temperaturas e propriedades físicas. Assim, é possível estimar a vida útil dos materiais, bem como a estabilidade térmica (QUINTINO *et al.*, 2017). As principais técnicas termoanalíticas utilizadas em materiais são: Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (ADT). Essas análises têm o objetivo de

avaliar fenômenos de transformação, tais como desidratações, decomposições, mudanças de fase e reações químicas acompanhadas de efeitos endotérmicos e exotérmicos (LIMA, 2010).

As amostras de cascalho foram preparadas com granulometria inferior a 0,075 mm; posteriormente, a análise do cascalho de perfuração foi realizada no Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos, usando o *Shimadzu* DTG-60, onde a amostra foi submetida à temperatura máxima de 1000 °C, fluxo de gás de 50 mL/min, taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de gás Argônio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Granulométrica

A Figura 2 apresenta a curva granulométrica do cascalho de perfuração de poços de petróleo da Bacia Sergipe-Alagoas. Comparando os resultados obtidos com a ABNT NBR 7211 – Agregados para concreto (2005), pode-se constatar que o material apresenta características de areia média, com módulo de finura igual a 2,87.

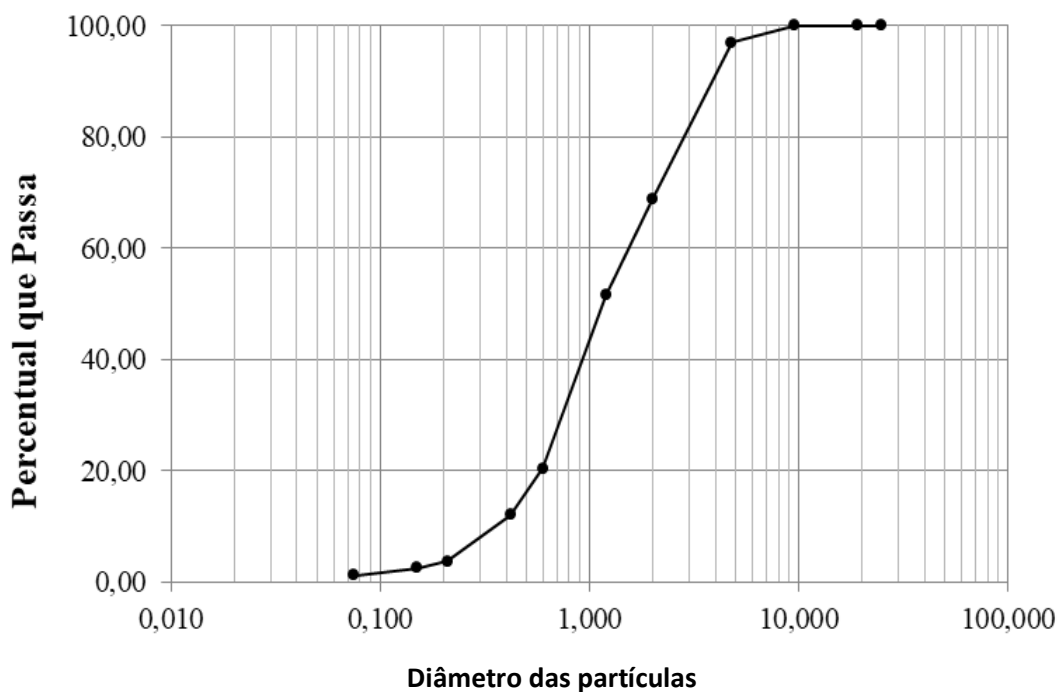


Figura 2: Análise granulométrica do cascalho.

Quando se analisou esses resultados com a ABNT NBR 6502 – Rochas e Solos (1995), que classifica os solos de acordo com a granulometria, observou-se que o material possui mais de 67% do volume entre 0,06 mm e 2,0 mm, ou seja, a maior parte do material é caracterizado como areia, sendo cerca de 48% do volume total areia grossa, 17% areia média e, pouco mais de 2,0%, areia fina. Identificou-se que, pouco mais de 31% da amostra, caracteriza-se como material granular, com granulometria maior que 2,0 mm, sendo constatada a pequena quantidade de finos presente no material. Como o concreto permeável exige

maior granulometria dos agregados, essa constatação mostra-se favorável para o desenvolvimento do produto, além de garantir maior utilização do subproduto (BATEZINI, 2013).

4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nas Figuras 3 e 4 identificou-se a não uniformidade das partículas de cascalho, bem como a aglomeração que forma espaços vazios e que não proporciona compactação entre eles. Além disso, não foi observada variação de granulometria, diferenciando dos resultados identificados por Marques (2015) e Acchar e Marques (2016), que verificaram heterogeneidade entre partículas. Esse resultado corrobora com o ensaio de granulometria, onde mostra maior percentual de partículas entre os diâmetros de 0,6 mm e 4,8 mm.

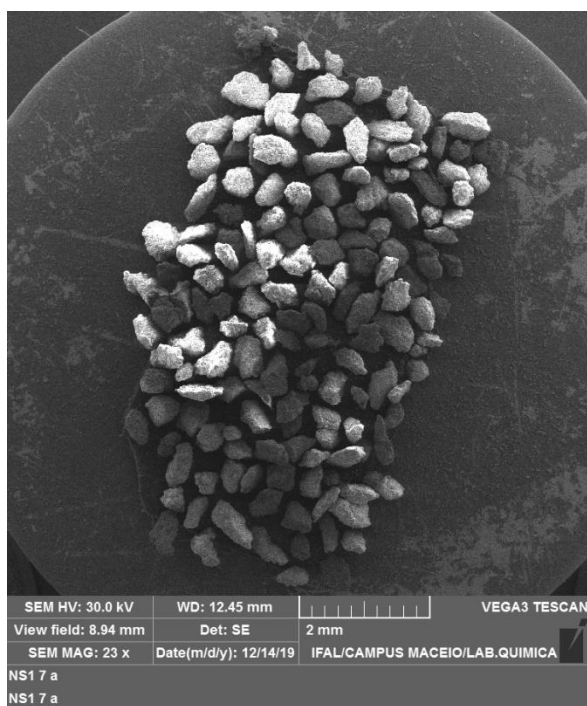


Figura 3: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 20x.

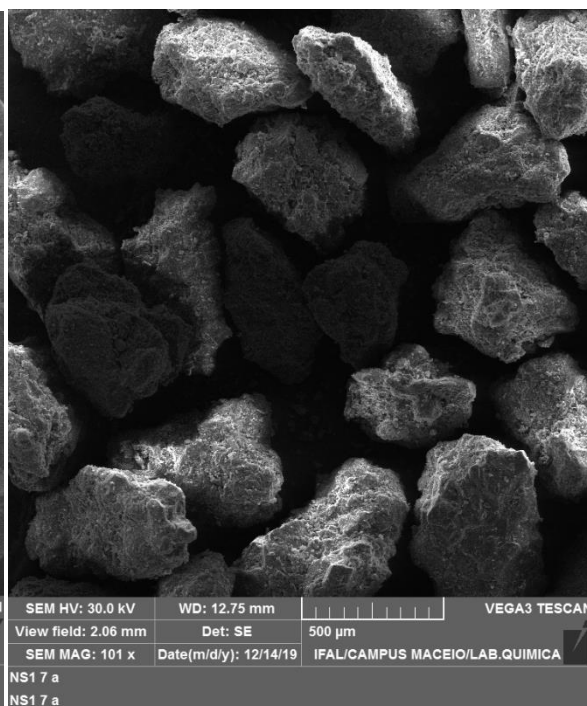


Figura 4: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 100x.

Quando se observou a Figura 5 e a Figura 6, percebeu-se a grande compactação dos grãos e ausência de vazios, confirmando as afirmações de Mota (2018) de que os cascalhos apresentam aspecto estrutural característico das argilas, com estrutura lamelar. Segundo Rossi (2017), essa formação rochosa é tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais e possuem aspecto maciço, compactado e endurecido.

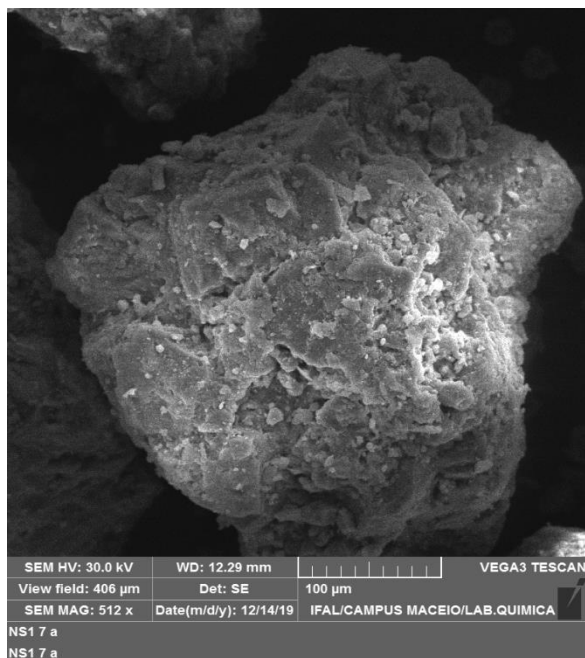


Figura 5: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 500x.

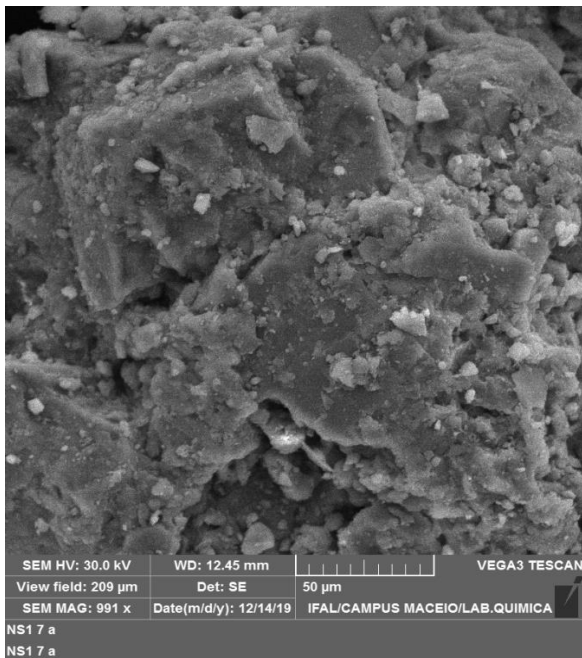


Figura 6: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 1000x.

Já na Figura 7 e Figura 8, constatou-se essa formação lamelar, que faz com que os grãos sejam constituídos por lâminas finas e paralelas.

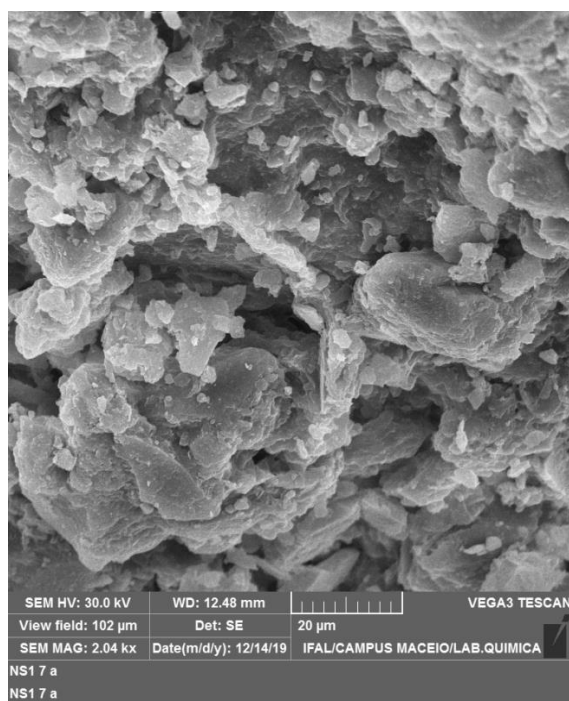


Figura 7: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 2000x

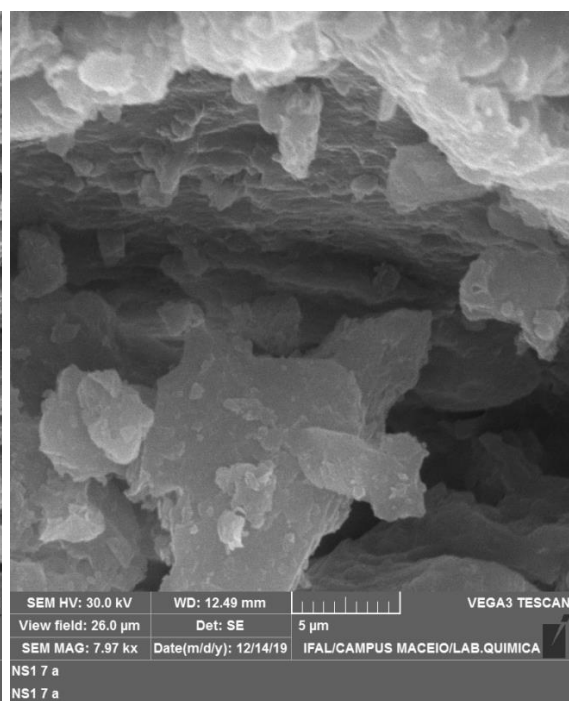


Figura 8: MEV das superfícies do cascalho com magnificação de 8000x

4.3. Fluorescência de Raios X (FRX)

Na Tabela 1 observou-se que, na composição química do cascalho de perfuração, há ocorrência de alto teor de cálcio. Além disso, pôde-se identificar valores significativos de Si, Fe, Mg, Ag, Al e K, o que também é apresentado em ensaios de fluorescência de cascalhos de perfuração provenientes de outras regiões do Brasil, como Fialho (2012), Marques (2015) e Fagundes (2018).

Tabela 1 – Caracterização por FRX em cascalho.

Fluorescência de Raios X (%)													
Ca	Si	Fe	Mg	Ag	Al	K	Sr	Ti	S	Zn	Mn	Br	Cu
65,89	8,75	6,81	6,58	3,69	3,63	2,45	0,62	0,48	0,33	0,27	0,24	0,17	0,09

O alto teor de Ca é proveniente das rochas carbonáceas dos reservatórios petrolíferos, tanto da decomposição de organismos vivos como da precipitação química (SILVA, 2014).

4.4. Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 9 apresenta-se o difratograma de Raios X do cascalho, onde foram identificados picos característicos das fases dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3). Observou-se que a dolomita é a fase cristalina predominante, corroborando com os resultados apresentados na análise química por fluorescência, onde foi obtida a concentração de 65,89% de cálcio.

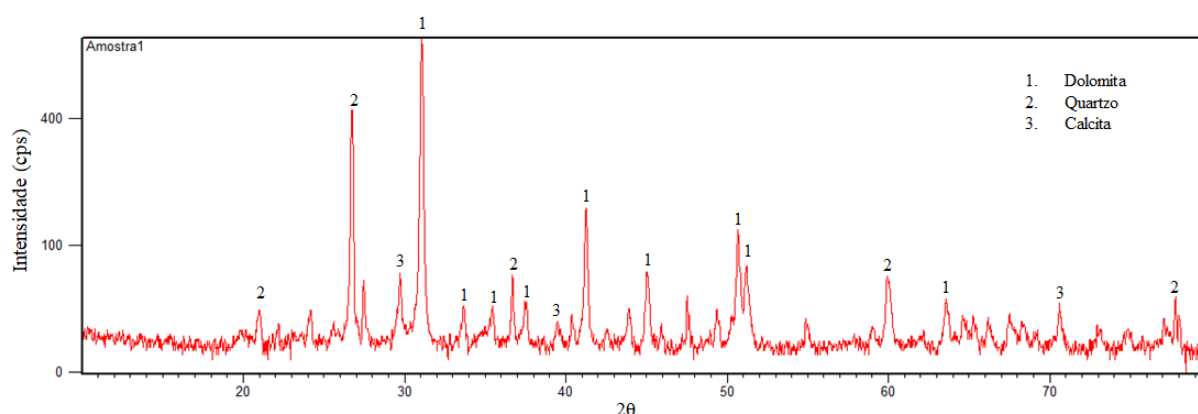


Figura 9: Caracterização por DRX.

Segundo Petri Júnior (2014), mesmo que em algumas fases da perfuração dos poços se encontrem rochas ígneas e até metamórficas, a teoria mais aceita sobre a formação do petróleo é que ele se origina a partir da decomposição de matéria orgânica junto com sedimentos, durante a formação das bacias sedimentares, isso explica o alto teor de dolomita na amostra.

4.5. Análises Térmicas

A Figura 10 apresenta a curva termogravimétrica do cascalho de perfuração. Foi possível verificar que o cascalho perde em torno de 14% de massa à medida que a temperatura se eleva até 1000 °C. Observou-se duas etapas de perda, a primeira ocorre na faixa de temperatura entre 100 °C e 500 °C e pode ser atribuída à desidratação dos compostos orgânicos voláteis, provenientes do hidrocarboneto

incorporados ao cascalho de perfuração e a presença de água (MARQUES, 2015). Esses resultados mostram-se favoráveis para o fim de aplicação dos cascalhos, visto que apresenta baixo percentual de perda, principalmente na faixa de temperatura entre 0 °C a 100 °C.

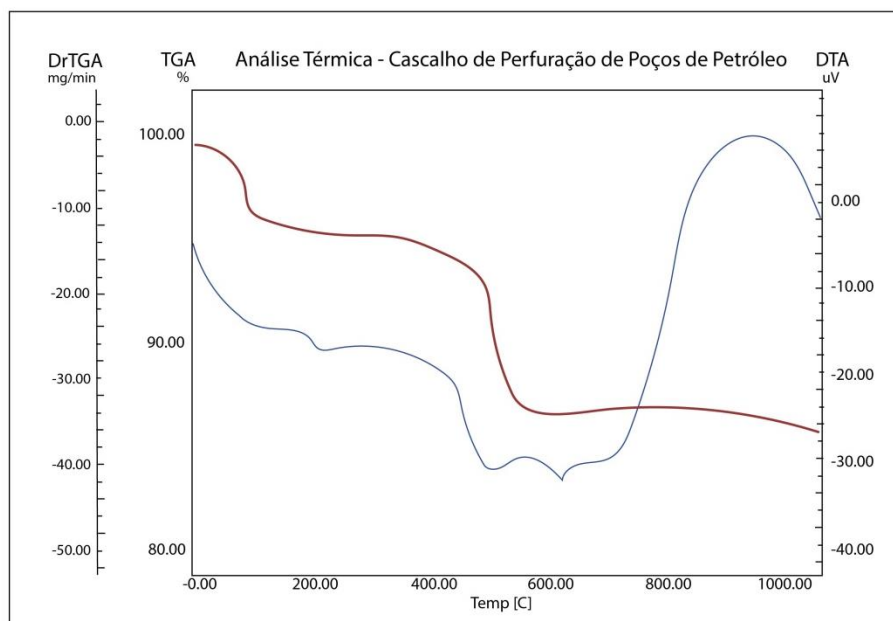


Figura 10: Análise Térmica do cascalho de perfuração.

A segunda etapa de perda de massa ocorre na faixa de temperatura entre 500 °C e 600 °C que pode estar relacionada a estabilização do composto (MARQUES, 2015). Observou-se que em torno de 600 °C ocorre a inversão térmica onde o quartzo passa da fase α para fase β . A partir de 600 °C notou-se estabilização das perdas.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados pode-se concluir que:

- O cascalho de perfuração de poços de petróleo apresentou módulo de finura igual a 2,87, que o caracteriza como areia média;
- Observou-se, pelas imagens geradas no MEV, que o cascalho apresenta aspecto estrutural característico das argilas, com estrutura lamelar, tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais, com aspecto maciço, compactado e endurecido;
- Na composição química do cascalho, há ocorrência de alto teor de Ca, ultrapassando o percentual de 65% da amostra analisada;
- Na difração de raios X do cascalho, foram identificados picos característicos das fases dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3). Observou-se que a dolomita é a fase cristalina predominante, corroborando com os resultados apresentados na análise química por fluorescência, onde foi apresentada concentração de 65,89% de cálcio;

A caracterização do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo da Bacia Sergipe-Alagoas proporcionou visão mais ampla do cascalho enquanto subproduto, sendo possível reaproveitá-lo para estudos em diferentes incorporações.

Com os dados obtidos foi possível inserir o cascalho na produção de concretos permeáveis. Como resultado da incorporação verificou-se que o concreto pode ser utilizado para tráfego de pedestres, apresentando resistência e permeabilidade satisfatórias.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6502:1995: Rochas e Solos**. São Paulo, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Método de ensaio. São Paulo, 2016.

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 16416:2015: Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

ACCHAR, W; MARQUES, S. K. J. **Ecological soil-cement bricks from waste materials**. Springer International Publishing, 2016.

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

ALMEIDA, P. C. **Análise Técnico-ambiental de Alternativas de Processamento de Cascalho de Perfuração Offshore**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BANDEIRA, R. A. F. **Uso de cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de cbuq (concreto betuminoso usinado a quente)** – Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, UFRN, Natal – RN, 2019.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2013.

COSTA, F. R. T. **Microscopia Eletrônica de Varreduras: potencialidades e aplicações**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). São Luís, MA, 2016.

FAGUNDES, T. B. **Caracterização de cascalhos de perfuração de poços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais** – Dissertação (Mestrado) – USP, São Paulo – SP, 2018.

FIALHO, P. F. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LEITE, D. A. B.; ARAÚJO, J. B. Aspectos da política pública municipal de resíduos sólidos em Fortaleza. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, III. **Anais...** Brasília, DF, 2006. III Encontro da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2006. 20p.

LOMASSO, A. L.; SANTOS, B. R.; ANJOS, F. A. S.; ANDRADE, J. C.; SILVA, L. A.; SANTOS, Q. R.; CARVALHO, A. C. M. Benefícios e Desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no centro mineiro de referência em resíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, jan. 2015.

MARQUES, S. K. J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal – RN, 2015.

MARTINS, S.S.S.; AZEVEDO, M. O.; SILVA, M. P.; SILVA, V. P. Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações. **Revista Holos**, v. 6, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2201>

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

MOTA, A. C. S. **Propriedades dielétricas e cinética de secagem de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás utilizando micro-ondas**. Dissertação (mestrado). UFU, Uberlândia, 2018.

NICOLLI, D.; SOARES, C. B. P. **Avaliação da Dispersão do Cascalho de Perfuração lançado em águas profundas**. Disponível em: <<http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/BE09/artigo1.htm>>. Acesso em: 27 de abril de 2020.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação (mestrado) – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.

ORTIZ NETO, J. B.; COSTA, A. J. D. A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. **Revista Brasileira de Economia**, v. 6, n° 1, Rio de Janeiro, mar. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-71402007000100006>

ORTIZ NETO, J. B.; SHIMA, W. T. Trajetórias tecnológicas no segmento offshore: ambiente e oportunidades. **Revista Economia Contemporânea**, v. 12, n° 2, Rio de Janeiro, ago. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-98482008000200005>

PETRI JUNIOR, I. **Formação do petróleo é que ele se origina a partir da decomposição de matéria orgânica junto com sedimentos** – Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFU, Uberlândia-MG, 2014.

PIRES, P. J. M. **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFU, Minas Gerais, 2010.

RIBEIRO, L. S. **Uso de água produzida na formulação de fluidos de perfuração**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal-RN, 2015.

ROCHA, B. A. B.; LIMA, F. R. S.; WALDMAN, R. L.. Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista Pensamento Jurídico**, v. 14, n. 1, 2020.

ROSSI, A.S. **Cinética de aquecimento e secagem, propriedades dielétricas e simulação computacional aplicado ao tratamento de cascalho de perfuração por micro-ondas**. Tese (doutorado). UFU, Uberlândia-MG, 2017.

SANDOVAL, G. F. B.; GALO BARDES, I.; DIAS, C.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. **IBRACON**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 590-607, maio/junho, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000300009>

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; BARROS, V. G.; GOMES, I. R.; DALANDRÉA, M. S. Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: Reduction of surface flow and possible applications. **Construction and Building Materials**, Joinville, Brasil, v. 250, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118896>

SHON, C. S.; Estakhri, C. K.; Lee, D.; Zhang, D. Evaluating feasibility of modified drilling waste materials in flexible base course construction. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 79-86, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.100>

SILVA, B. J. B.; SILVA, A. O. S.; NETO, P. P. M.; COSTA, T. P. M.; JÚNIOR, L. V. S.; RIBEIRO, L. M. O.; ALENCAR, S. L.; SILVA, A. E.; SANTOS, R. B. Análise quantitativa das zeólitas ferrierita, ZSM-5 e mordenita presentes em amostras sintetizadas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 357, jan./mar. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613571842>

SILVA, C. H. **Influência da Incorporação de Sólidos nas Propriedades de Fluidos de Perfuração Sintéticos**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

SOUZA, O.; OLIVEIRA, L. J. Globalização e relações de consumo: servidão moderna e degradação ambiental. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 6, n. 2, p.156-178, 2016.

VIDAL, A. S. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. Dissertação (mestrado). UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2014.