



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

PRODUÇÃO DE TIJOLOS RESÍDUO-CIMENTO USANDO CASCALHO DE PERFURAÇÃO E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

SHEYLA KAROLINA JUSTINO MARQUES

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Tese n.º 153 /PPGCEM

Janeiro de 2015

Natal – RN

SHEYLA KAROLINA JUSTINO MARQUES

**PRODUÇÃO DE TIJOLOS RESÍDUO-CIMENTO USANDO
CASCALHO DE PERFURAÇÃO E CINZA DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Janeiro de 2015

Natal – RN

Setor de Informação e Referência

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Marques, Sheyla Karolina Justino.

Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar / Sheyla Karolina Justino Marques. – Natal, RN, 2015.

139 f.

Orientador: Wilson Acchar.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)
– Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de

Aos meus pais Guilherme e Berenite, pelo exemplo de vida e amor
incondicional.

A minha irmã Camila, por tudo que ela representa em minha vida.
Ao meu noivo Jhonnatta Amaral, por toda paciência e amor ao longo da
jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Wilson Acchar, pelos valerosos ensinamentos, pelo estímulo, crédito e apoio durante todo desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, pelas condições oferecidas durante o desenvolvimento da tese.

Aos amigos do LAFIMC, Antônio, Ana Paula, Cláudio, Larissa, Pedro e Paulo, por tornar os nossos encontros no laboratório mais leves e pela grande família formada.

Ao professor Vamberto, pela incansável disponibilidade em trocar e discutir ideias. Seus ensinamentos foram fundamentais.

Ao professor Eduardo Galvão pelo grande conhecimento repassado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas.

A minha família, em especial aos meus pais e irmã, por estarem sempre presentes me apoiando, incentivando em todas as minhas realizações e pelo amor incondicional.

Ao Jhonnatta, pelo seu amor, carinho, dedicação e compreensão ao me apoiar para a continuação deste trabalho.

Às amigas que vou levar no coração para a vida toda: Priscylla, Dárcia e Ana Paula, pelo ombro amigo que tanto precisei nos momentos difíceis e nas alegrias compartilhadas.

Aos amigos do IFAL, Maurício Ricardy, Ana Quitéria e Carlos Guedes pelo incentivo, apoio e por acreditarem que seria possível mais essa conquista.

A todos os amigos e parentes que torceram comigo para a conclusão desta tese.

Em especial a Deus, essência das nossas vidas, que mais uma vez esteve ao meu lado em todos os momentos.

“Na natureza, nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”.

Lavoisier

RESUMO

Nos últimos anos a indústria da construção civil tem uma importante representação mundial no consumo de recursos naturais, na geração de resíduos que levam a um maior impacto ambiental. Desta forma, torna-se de fundamental importância o planejamento do consumo dos bens naturais não-renováveis, além do gerenciamento dos resíduos, da reutilização e incorporação dos mesmos no processo de fabricação de novos materiais. O presente trabalho consiste no estudo das características e propriedades tecnológicas de tijolos resíduo-cimento maciços e vazados, formulados a partir de misturas binárias e ternárias de cimento Portland, cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo, com e sem adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar que poderão ser utilizados pela indústria, com o objetivo de melhorar seu desempenho, diminuindo seu custo e aumentando sua vida útil. Foi utilizado cimento CPIIZ-32, resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo, proveniente da perfuração de poços Onshore, no município de Mossoró/RN, fornecido pela Petrobras e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Para a determinação da mistura ótima, estudou-se a inclusão de teores de cinza (2%; 4%; 6%; e 8%) onde foram confeccionados 18 corpos-de-prova para cada formulação. A avaliação dos tijolos confeccionados foi realizada a partir de ensaios de compressão simples, perda de massa por imersão e absorção de água. Os resultados experimentais comprovaram a eficiência e o elevado potencial de utilização do cascalho de perfuração e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, tornando o tijolo resíduo-cimento com uma maior resistência mecânica e menor absorção de água. O melhor resultado, em termos de resistência mecânica e absorção d'água, dentre todas as misturas foi a formulação 86% cascalho, 12% cimento e 2% de cinza.

Palavras-chave: cascalho de perfuração de poços de petróleo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, resistência, tijolos.

ABSTRACT

In recent years the construction industry is a major world representation in the consumption of natural resources and generation of wastes which lead to a greater environmental impact. Thus, it is of fundamental importance to planning the consumption of non-renewable natural resources, in addition to waste management, reuse and incorporate them in the process of manufacturing new materials. The present work is the study of the characteristics and technological properties of solid waste-cement bricks and cast formulated from binary and ternary mixtures cement Portland, gravel from the oil well drilling, with and without addition of cane sugar ashes residue that can be used by industry, with the goal of improving performance, reducing cost and increasing its useful life. Was used CPIIZ-32 cement, drill cuttings residue of oil wells from drilling onshore wells in the municipality of Mossoró / RN, supplied by Petrobras and ashes of sugarcane bagasse. To determine the optimum mix was used to study the inclusion of gray levels (2%, 4%, 6% and 8%) where bodies were prepared 18-specimens for each formulation. The evaluation was made of bricks made from simple compression tests, weight loss by immersion and water absorption. The experimental results have proved the efficiency and the high potential for use of drill cuttings and ash cane bagasse, making the brick-cement residue with a higher strength and lower water absorption. The best result in terms of mechanical strength and water absorption, both for the binary and ternary blend formulation was 86% gravel, 12% cement and 2% ash.

Keywords: oil well drill cuttings, gray cane bagasse, strength, bricks.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metais pesados detectados no cascalho	36
Tabela 2 - Composição química do cimento Portland	72
Tabela 3 - Composição das formulações binárias e ternárias.....	84
Tabela 4 – Análise química por fluorescência do cascalho	104
Tabela 5 – Análise química por fluorescência da CBC	105
Tabela 6 – Absorção de água tijolos maciços	106
Tabela 7 – Absorção de água tijolos vazados	106
Tabela 8 – Perda de massa por imersão tijolos maciços	107
Tabela 9 – Perda de massa por imersão tijolos vazados	108
Tabela 10 – Resistência à compressão tijolos maciços	109
Tabela 11 – Resistência à compressão tijolos vazados	110
Tabela 12 – Absorção de água após esmalte tijolos maciços.....	111
Tabela 13 – Absorção de água após esmalte tijolos vazados.....	111
Tabela 14 – Custo dos tijolos	119
Tabela 15 – Custo dos tijolos com BDI	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais fabricados com solo-cimento	31
Figura 2 – Sistema de Circulação na perfuração de poços de petróleo	57
Figura 3 – Processo de fabricação do cimento Materiais fabricados com solo-cimento.....	65
Figura 4 – Esquema do Procedimento Experimental	76
Figura 5 – Coleta do cascalho de proveniente da perfuração de poços de petróleo	77
Figura 6 – Acondicionamento do cascalho de proveniente da perfuração de poços de petróleo.....	78
Figura 7 – Cascalho de perfuração após peneiramento.....	85
Figura 8 – Prensa utilizada para moldagem dos tijolos maciços	86
Figura 9 – Prensa utilizada para moldagem dos tijolos vazados.....	87
Figura 10 – Tijolos maciços em processo de cura	87
Figura 11 - Tijolos vazados em processo de cura.....	88
Figura 12 - Tijolos vazados após aplicação do esmalte	89
Figura 13 – Gráfico de distribuição granulométrica do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.....	94
Figura 14 - Gráfico de distribuição granulométrica da CBC	95
Figura 15 – Difratoograma de raios X do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.....	96
Figura 16 – Difratoograma de raios X da CBC.....	97
Figura 17 – Micrografia obtida por MEV, do cascalho, com aumento de 500X.....	98
Figura 18 – Micrografia obtida por MEV, do cascalho, com aumento de 1000X.....	99
Figura 19 – Micrografia obtida por MEV, da CBC, com aumento de 500X	100
Figura 20 – Micrografia obtida por MEV, da CBC, com aumento de 1000X	100
Figura 21 – Análise Térmica Diferencial do cascalho.....	101
Figura 22 – Análise Térmica Diferencial da CBC	102
Figura 23 – Análise Térmica Diferencial da composição cascalho/CBC	103
Figura 24 – Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 3000X.....	112

Figura 25 – Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 8000X.....	113
Figura 26 – Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 11000X.....	114

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ATD	Análise Térmica Diferencial
AG	Análise Granulométrica
AT	Análise Térmica
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBC	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia
CTGAS-ER	Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PMI	Perda de Massa por Imersão
RCP	Resíduo de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo
RM	Resistência Mecânica
TG	Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 Solo-cimento	23
3.1.1 Resistência do solo-cimento.....	26
3.2 Resíduos	30
3.2.1 Resíduos na Construção Civil	30
3.2.2 Resíduos gerados no processo de perfuração de poços de Petróleo.....	31
3.2.3 Cascalho de perfuração de poços de Petróleo.....	33
3.2.4 Incorporação dos resíduos para produção de novos materiais	37
3.3 Cana-de-Açúcar	41
3.3.1 Utilidade do Bagaço de Cana-de-açúcar.....	43
3.3.2 Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar.....	45
3.3.3 Composição Química da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar	47
3.4 Petróleo	50
3.1.1 Histórico	50
3.1.2 Processo de Exploração.....	54
3.5 Cimento Portland.....	59
3.5.1 Histórico	59
3.5.2 Fabricação.....	61
3.5.3 Tipos de Cimento Portland	65
3.5.3.1 Cimento Portland Comum CP I e CP I-S (NBR 5732)	65
3.5.3.2 Cimento Portland CP II (NBR 11578)	65
3.5.3.3 Cimento Portland de Alto Forno CP III (com escória – NBR 5735)	67
3.5.3.4 Cimento Portland CP IV (com pozolana – NBR 5736)	67

3.5.3.5 Cimento Portland CP V ARI (Alta Resistência Inicial – NBR 5733)	68
3.5.3.6 Cimento Portland CP (RS) (Resistente a sulfatos - NBR 5737).....	68
3.5.3.7 Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) - (NBR 13116).....	69
3.5.3.8 Cimento Portland Branco (CPB) – (NBR 12989).....	69
3.5.4 Composição Química do Cimento	70
4 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	74
4.1 Matérias-Primas	76
4.1.1 Caracterização das Matérias-Primas.....	77
4.1.1.1 Análise Granulométrica	78
4.1.1.2 Análise por Difração de raios X (DRX)	78
4.1.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	79
4.1.1.4 Análises Térmicas (TG).....	80
4.1.1.5 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	81
4.2 Determinação de Quantidades de Cimento e Água	81
4.2.1 Quantidade de Cimento.....	81
4.2.2 Quantidade de água a ser adicionada nas formulações.....	82
4.3 Formulações de Massa	84
4.4 Preparação dos Corpos-de-prova	85
4.5 Ensaio Tecnológico.....	88
4.5.1 Absorção de Água	88
4.5.2 Perda de Massa por Imersão	89
4.5.3 Resistência à compressão	90
4.6 Análises da Superfície de Fratura	91
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1 Análises Granulométricas.....	93
5.1.1 Análise Granulométrica do cascalho	93
5.1.2 Análise Granulométrica da CBC.....	94
5.2 Difração de Raios X.....	95
5.2.1 Difração de Raios X do cascalho.....	95
5.2.2 Difração de Raios X da CBC	96
5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)	97
5.3.1 Micrografia do cascalho.....	97
5.3.2 Micrografia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	98

5.4 Análises Térmicas	100
5.4.1 Análise Térmica cascalho.....	100
5.4.2 Análise Térmica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar	101
5.4.3 Análise Térmica da composição cascalho e CBC	102
5.5 Análise química por Fluorescência de raios X.....	103
5.5.1 Análise química por fluorescência do cascalho	103
5.5.2 Análise química por fluorescência da CBC	103
5.6 Ensaios Tecnológicos.....	104
5.6.1 Absorção de Água tijolos maciços.....	104
5.6.2 Absorção de Água tijolos vazados.....	105
5.6.3 Perda de Massa por Imersão tijolos maciços	106
5.6.4 Perda de Massa por Imersão tijolos vazados	107
5.6.5 Resistência a compressão tijolos maciços	107
5.6.6 Resistência a compressão tijolos vazados	109
5.6.7 Absorção de Água após esmalte tijolos maciços.....	109
5.6.8 Absorção de Água após esmalte tijolos vazados	110
5.7 Análise da Superfície de Fratura.....	111
5.8 Modelo de correlação entre propriedades mecânicas e reações químicas.....	114
5.9 Custo dos tijolos maciços e vazados.....	118
6 CONCLUSÃO	122
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	125
8 REFERÊNCIAS	127

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Dentre as indústrias que degradam o meio ambiente, a indústria da construção civil é responsável pelo consumo entre 20 e 50% do total de recursos naturais extraídos, beneficiados e transformados pela sociedade (Santos,2007).

Na construção de casas populares, uso de tijolos de solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, é bastante difundido pela vantagem da sua rápida fabricação, no próprio canteiro de obras, a mão-de-obra para operar os equipamentos não precisar ser especializada, podendo ser confeccionados pela própria comunidade, além da boa qualidade e regularidade no aspecto final das peças, propiciando um menor consumo de argamassa de assentamento e de revestimentos. Dessa forma, as obras terminam em prazos mais curtos, promovendo uma relação custo-benefício bem satisfatória.

O solo-cimento é o composto resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

Em termos de tijolos solo-cimento, a maior quantidade de matéria-prima é direcionada ao solo. Os solos são misturas complexas de materiais inorgânicos e resíduos orgânicos parcialmente decompostos, cuja composição difere grandemente de área para área, não só em quantidade, mas também qualitativamente. Por esta razão o solo é utilizado largamente como matéria-

prima na Indústria da Construção Civil, incluindo a fabricação de tijolos solo-cimento. Nessa vertente a substituição do solo pelo cascalho de perfuração trará ganhos no sentido da reutilização de um resíduo que seria descartado no meio ambiente e a economia do recurso natural existente, no caso do solo.

Uma das condições para aumentar a sustentabilidade e a economia é a incorporação de resíduos, uma vez que a geração desses é inevitável. As vantagens potenciais da reciclagem para a sociedade são, entre outras, a preservação de recursos naturais, economia de energia, redução do volume de aterros, redução da poluição, geração de empregos, redução do custo do controle ambiental pelas indústrias, aumento da durabilidade e, até mesmo, a economia de divisas (JOHN, 2000).

O setor sucro-alcooleiro vem expandindo nos últimos tempos, alavancado principalmente pelo advento da energia renovável. No Brasil, a produção de cana-de-açúcar vem avançando em áreas destinadas à pecuária extensiva e a outras culturas importantes como a soja, o milho e a laranja. Isto se deve tanto pela geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço (cogeração) quanto pelo uso de etanol como combustível de veículos automotores.

Apesar do processo de co-geração liberar dióxido de carbono - CO₂ para a atmosfera, a quantidade de emissões é significativamente menor se comparada com outras fontes de energia, como o petróleo (FREITAS, 2005).

Entretanto, a produção de açúcar, álcool e energia a partir da cana-de-açúcar pode causar outros problemas ambientais como a geração de resíduos: a palha, a cinza da palha - no caso de colheita manual, o bagaço e a cinza do bagaço.

Diante deste panorama mundial de crescimento do setor sucro-alcooleiro aliado ao desenvolvimento sustentável é de suma importância a realização de estudos que visem o aproveitamento destes resíduos, transformando-os em produtos de valor comercial.

A incorporação de resíduos em tijolos de solo-cimento já vem sendo utilizada em pesquisas científicas, e tem trazido resultados positivos, tanto em termos de características tecnológicas, quanto em termos de preservação ambiental.

Dessa forma, baseado neste panorama, o reaproveitamento de resíduos na indústria da construção civil, significa tanto uma redução financeira de custos como a perspectiva de crescimento industrial sustentável, implicando em melhores condições da qualidade de vida para uma faixa econômica da sociedade.

Este trabalho utiliza o cascalho, um dos resíduos provenientes da perfuração de poços de petróleo e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, na incorporação de tijolos resíduo-cimento. Os resultados experimentais comprovaram a eficiência e o elevado potencial da utilização do resíduo proveniente da perfuração de poços de petróleo e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, tornando o tijolo de resíduo-cimento com uma maior resistência mecânica e menor absorção de água se comparados com o tijolo solo-cimento convencional.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar as características e propriedades dos tijolos maciços e vazados oriundos das composições binárias de resíduo-cimento, como também a incorporação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, formando assim as composições ternárias, com a finalidade de se obter um produto de elevado desempenho, maior durabilidade e menor custo.

2.2 Objetivos Específicos

Nesse sentido, fez parte do escopo do trabalho:

- Caracterizar as matérias-primas através dos seguintes ensaios:
 - Análise Granulométrica (AG);
 - Análise por Difração de Raios X (DRX);
 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
 - Análises Térmicas (TG);
 - Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX).

- Estudar e avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das composições de (solo-cimento) maciços e vazados, com incorporação de diferentes percentuais de resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar;

- Avaliar a influência da substituição parcial do cimento pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades do tijolo resíduo-cimento;

- Avaliar os corpos-de-prova produzidos a ensaios de perda de massa por imersão, absorção de água, resistência à compressão em relação as normas para este tipo de material.

CAPÍTULO 3
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Solo-cimento

O solo-cimento advém do O adobe ou taipa de pilão que era normalmente usado em paredes externas e as divisões internas e paredes do piso superior construídas com taipa de mão, devido ao fato de ser ele, uma matéria mais leve (LOPES, 2002).

Quando ao solo se adiciona cimento Portland comum o material de construção resultante é denominado solo-cimento e segundo Neves (2000) solo-cimento é uma mistura de solo, cimento e água que, quando compactada, adquire a resistência mecânica e a durabilidade necessárias para fins de construção. O solo-cimento é um material de construção bastante antigo e encontra as suas raízes em modificações de um outro material ainda mais antigo, o solo-cinza.

Ao se adicionar cimento ao solo obtém-se um material que não sofre grandes variações volumétricas pela absorção e perda de umidade, não se deteriora completamente quando submerso em água, além de apresentar elevada resistência a compressão e durabilidade por apresentar uma menor permeabilidade (GRANDE, 2003).

Obtém-se solo-cimento pela mistura de solo, pulverizado e umedecido na umidade ótima de compactação, com 7 a 14% de cimento Portland em relação ao volume de solo compactado (VARGAS, 1977).

Acredita-se que o engenheiro inglês H. E. Brook-Bradley (1891), no final do século XIX tenha sido o pioneiro na utilização desta mistura, inicialmente no

tratamento de leitos de estradas e pistas para veículos de tração animal, no Sul da Inglaterra (PESSOA, 2004).

No Brasil o solo-cimento era utilizado na execução de bases rodoviárias, sendo as pesquisas voltadas para este fim. Em 1948, entretanto, a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, propondo um outro uso para este material, publicou seu boletim nº 54 – Casas de paredes de Solo-cimento – no qual, motivada pelo êxito obtido em algumas experiências, propõe a utilização desse material na construção de paredes monolíticas (NEVES, 1978).

Todavia, o primeiro registro oficial do seu uso em edificações no Brasil é na construção, concluída no ano de 1948, da sede da Fazenda Inglesa, no município de Petrópolis – RJ (CONCIANI, 2005).

O solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, obtido pela mistura de solo, cimento e um pouco de água, em proporções adequadas. Após compactação e cura, ela endurece e com o tempo ganha consistência e durabilidade suficiente para diversas aplicações no meio rural e urbano.

O solo-cimento é uma evolução de materiais de construção do passado, como o barro e a taipa. Só que as colas naturais, de características muito variáveis, foram substituídas por um produto industrializado e de qualidade controlada: o cimento.

O uso do solo-cimento no Brasil vem, desde 1948, ajudando na satisfação de tais necessidades, encontrando-se hoje já bastante difundido. Demonstram que a aplicação da técnica solo-estabilizante acarreta as seguintes vantagens:

- O solo-cimento vem se consagrando como tecnologia alternativa por oferecer o principal componente da mistura – o solo – em abundância na natureza, e geralmente disponível no local da obra ou próximo a ela;
- O processo construtivo do solo-cimento é muito simples, podendo ser assimilado por mão de obra não qualificada;
- Apresenta boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenaria de tijolos e ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalações e proliferações de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade;
- É um material de boa resistência e perfeita impermeabilidade, resistindo ao desgaste do tempo e à umidade, facilitando a sua conservação;
- A aplicação do chapisco, emboço e reboco são dispensáveis, devido ao acabamento liso das paredes monolíticas, em virtude da perfeição das faces (paredes) prensadas e a impermeabilidade do material, necessitando aplicar uma simples pintura com tinta à base de cimento, aumentando mais a sua impermeabilidade, assim como o aspecto visual, conforto e higiene;
- Baixa agressividade ao meio ambiente, pois dispensa o processo de queima;
- Economia de transporte quando produzidos no próprio local da obra;
- Baixo custo em relação às alvenarias convencionais.

O solo-cimento está por aí há décadas, mas seu uso ainda é bem restrito. Com isto, florestas inteiras são devastadas para produzir tijolos cerâmicos que, além de tudo, são mais caros.

Apesar dos pontos positivos destacados, no Brasil o interesse pelo método solo-estabilizante é mais expressivo em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são de solo-cimento compactado), barragens e contenções; relegando suas aplicações nas construções civis, a um plano secundário, devido ao desconhecimento técnico dos profissionais envolvidos nos vários segmentos da sociedade. Diante dessa realidade, são necessárias pesquisas que visem desenvolver e divulgar essa técnica.

3.1.1 Resistência do solo-cimento

Na década de 80, interessada em difundir a tecnologia dos tijolos de solo-cimento a empresa SUPERTOR, fabricante de máquinas e tecnologia em solo-cimento, divulgou um material em forma de manual sobre o funcionamento e utilização de tal tecnologia.

Neste manual, são apresentados alguns fatores que influenciam nas propriedades de resistência de tijolos fabricados com solo-cimento tais como:

- a) Características do solo utilizado;
- b) Teor de cimento da mistura;
- c) Grau de finura do cimento utilizado;
- d) Grau de homogeneização da mistura;
- e) Densificação da mistura na prensagem (ou fator de empacotamento da mistura);
- f) Tempo e condição de cura da mistura após a prensagem;
- g) Aditivos empregados.

a) Características do solo utilizado

A proporção da fração argilosa (ou fração fina) e da fração arenosa influenciam nas características e propriedades de resistência do tijolo.

b) Teor de cimento da mistura

Propriedades mecânicas do tijolo de solo-cimento são proporcionais ao teor de cimento da mistura. Frequentemente são adicionados teores de cimento próximos a 8 % em relação ao peso do solo-seco.

c) Grau de finura do cimento utilizado

Teor de cimento poderá ser consideravelmente reduzido pela utilização de cimento mais fino que o convencional. Exemplo disso é que 10% em peso de cimento convencional (superfície específica = 2900 cm²/g) apresentam os mesmos resultados que 7 % de cimento de maior finura (superfície específica = 5800 cm²/g).

d) Grau de homogeneização da mistura

1) Relação logarítmica entre a uniformidade da mistura e a resistência mecânica. Quando cimento e o solo é misturado de forma ineficiente, pequenos aumentos na uniformidade ocasionam pequenos aumentos de resistência. Em amostras bem misturadas, um pequeno aumento na uniformidade levará a grandes aumentos na resistência.

2) A resistência do solo-cimento varia diretamente com logaritmo da energia acumulada requerida para a mistura.

3) Pequenos aumentos na uniformidade da mistura requerem grandes aumentos na energia mecânica requerida para a mistura.

e) Densificação da mistura na prensagem (ou fator de empacotamento da mistura)

A compactação (ou prensagem) da mistura é um dos fatores mais importantes na execução de tijolos de solo-cimento.

f) tempo e condição de cura da mistura após a prensagem

Os procedimentos de cura influenciam no resultado final do tijolo tanto quanto à sua resistência mecânica, quanto às suas características estéticas.

g) aditivos empregados

Constatou-se que a resistência mecânica dos corpos-de-prova (CPs) aumentou (2 a 10 vezes) pela adição de sais de sódio os quais formam compostos insolúveis com o cálcio.

Aditivos mais benéficos: Soda cáustica, Carbonato de sódio, Sulfito de sódio, Sulfato de sódio, Metassilicato de sódio e Aluminato de sódio. Lítio e Potássio apresentam menor eficiência. Concentração ideal (ótima): varia de 0,5 a 2,5% em volume, ou peso dependendo do solo ou aditivo. Soda cáustica mostra melhores resultados quando aplicada em solos argilosos; já em solos arenosos, melhores resultados podem ser conseguidos utilizando Metassilicato de sódio. Aluminato de sódio e Sulfato de sódio mostraram melhores resultados quando aplicados a siltes (SUPERTOR, 1989).

As informações dadas pela Supertor descrevem amplamente a influência de alguns fatores na resistência da mistura solo-cimento. Porém, vale ressaltar que o tipo de solo utilizado bem como a umidade adotada criam uma faixa de variação desta resistência. O teor de cimento utilizado para estabilizar o solo melhora e aumenta a resistência e a durabilidade do material. A combinação adequada destes fatores otimiza a resistência.

Como já se sabe, solos que apresentam uma maior proporção de areia em sua composição, na maioria das vezes, levarão a maior resistência do solo-cimento. Deve-se ainda considerar concomitantemente a influência de outros fatores como: os limites de consistência, a distribuição granulométrica e os tipos de argilo-minerais.

Uma boa homogeneização da mistura é fundamental. O cimento deve ser adicionado ao solo seco e misturado até que se consiga coloração uniforme (CEBRACE, 1981).

Somente após esta homogeneização acrescenta-se a água em sua devida quantidade. A resistência é crescente de forma proporcional ao teor de cimento utilizado; porém, deve-se limitar a um teor ideal que confira ao tijolo ou bloco curado a resistência requerida, sem elevação desnecessária do custo do produto final (ABCP, 1985).

Ensaio efetuados em corpos-de-prova de solo-cimento evidenciaram ganhos de resistência em função do tempo de cura. Esse comportamento está associado à interação dos argilo-minerais e o cimento que, segundo vários autores, são reações pouco conhecidas. Parece haver um certo consenso de que o endurecimento e o ganho de resistência da mistura ao longo do tempo esteja associado em grande parte às reações entre os argilo-minerais e a cal liberada na hidratação do cimento (SEGANTINI e CARVALHO, 1994).

Segundo Ceratti e Casanova (1988), para se estudar o ganho de resistência do solo estabilizado com cimento deve-se estudar cuidadosamente:

- Gênese, composição e propriedades do solo;
- Física e química dos solos;
- Conhecimento do cimento como ligante;
- Mecânica estrutural.

A Figura 1 a seguir, apresenta alguns tijolos de solo-cimento, fabricados com diferentes composições de solo.

Figura 1 – Tijolos fabricados com solo-cimento.



3.2 Resíduos

3.2.1 Resíduos na Construção Civil

No Brasil, os resíduos de construção e demolição (RCD) atingem elevadas proporções da massa dos resíduos sólidos urbanos: variam de 41% a 70% (PINTO, 2003).

Dentre os principais constituintes do RCD citam-se material betuminoso, vidros, cerâmicas, concreto, argamassa, pedra britada, madeira, blocos e tijolos, tintas, gesso, plásticos, metais e outros constituintes em menor quantidade (ANGULO, 2002; GRIGOLI, 2000).

O valor de geração de resíduo depende da intensidade da atividade de construção de cada país, da tecnologia empregada, taxas de desperdícios e manutenção. Esse volume pode crescer significativamente em função de desastres naturais ou guerras. Por exemplo, em 1995, em Beirute, no Líbano, a

quantidade de resíduos espalhada pela cidade somava cerca de 20 milhões de toneladas. Na Bósnia também houve um grande volume de resíduos deixados pelo pós-guerra. Na Flórida, 100 mil residências foram destruídas, em 1992, pelo furacão Andrew (LAURITZEN, 1998).

3.2.2 Resíduos gerados no processo de perfuração de poços de Petróleo

A produção de petróleo no Brasil cresceu de 750 m³/dia na época da criação da Petrobras, em 1953, para mais de 182.000 m³/dia no final dos anos 90, graças aos contínuos avanços tecnológicos de perfuração e produção (THOMAS, 2001).

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes (LIMA, 2001).

As principais finalidades do fluido de perfuração é carrear os fragmentos das rochas perfuradas até a superfície; manter esses fragmentos em suspensão nas paradas de circulação de fluido no poço; resfriar e lubrificar a broca; sustentar hidraulicamente as paredes do poço; e conter os fluidos (óleo, gás ou água) no reservatório.

Para cumprir suas finalidades, o fluido necessita possuir a capacidade de não reagir com as formações com as quais entra em contato. Dois tipos de formações podem ser encontrados:

- Formações com rochas ativas: são aquelas em que as rochas, devido às suas características argilosas, podem interagir com o fluido, absorvendo

água do mesmo e causando a hidratação das argilas ou folhelhos, o que causa o inchamento da rocha;

- Formações com rochas inertes: são aquelas em que as rochas não sofrem interação com a água do fluido, como por exemplo os arenitos.

A classificação de um fluido de perfuração dá-se em função do constituinte principal da fase contínua ou dispersante, sendo a seguinte:

a) Fluidos à base de água: a água é a fase contínua, podendo ser doce ou salgada. A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais.

b) Fluidos à base de óleo: a fase contínua é o óleo, que pode conter até 45 % de água (emulsão inversa, na qual as gotas de água ficam encapsuladas pelo óleo, tendo uma maior dificuldade de interagir com as rochas ativas). As principais características dos fluidos à base de óleo, e que lhes confere vantagens sobre os fluidos à base de água, são: grau de inibição elevado em relação às rochas ativas; baixa taxa de corrosão; propriedades controláveis acima de 175 °C; grau de lubricidade elevado; amplo intervalo de variação de densidade (de 0,89 a 2,4 Kg/l); pequena solubilidade de sais inorgânicos.

Entretanto, os fluidos à base de óleo têm algumas desvantagens, sendo as mais significativas: maior grau de poluição e maior custo inicial. Recentemente muitos progressos têm sido alcançados em relação à pesquisa de novos sistemas à base de óleo, como óleos minerais e sintéticos, menos poluentes que o óleo diesel e com grau de biodegradabilidade muito maior.

3.2.3 Cascalho de perfuração de poços de Petróleo

Os cascalhos de perfuração são misturas de pequenos fragmentos de rochas impregnados com o fluido usado para lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração (LEONARD; STEGEMANN, 2010).

Os resíduos de perfuração de poços de petróleo, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem um passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sem tratamento prévio.

A quantidade de resíduos de perfuração de poços de petróleo gera impactos negativos significativos (PAGE, 2003).

Teoricamente o volume de cascalho gerado durante a perfuração de um poço é o volume geométrico do cilindro perfurado, chamado volume nominal do poço. Mas no cálculo do volume de cascalho produzido é dado um coeficiente de segurança em torno de 20% devido a eventuais desabamentos das formações para dentro do poço, normais durante a perfuração. O volume médio gerado em perfurações terrestres é de 13m³ para cada 100m de avanço da perfuração, dependendo do diâmetro do poço (PETROBRAS, 2010).

Os cascalhos de perfuração tendem a ter uma forma angular e podem ter sua distribuição granulométrica variando de cascalhos a argilas. A composição física dos cascalhos refletem os materiais geológicos que compõem o subsolo que foi perfurado, bem como outros componentes específicos sólidos e materiais químicos que originalmente compunham o fluido de perfuração (CHARLES; SAYLE, 2010).

A concentração dos contaminantes do cascalho dependem do fluido utilizado, da formação geológica perfurada, da fase do poço e da água utilizada

na preparação dos fluidos. Os principais contaminantes podem ser divididos em hidrocarbonetos, sais solúveis em água e em alguns casos metais pesados (REIS, 1996). Os hidrocarbonetos podem contaminar os cascalhos durante a sua descoberta na forma de óleo cru ou se contidos nos fluidos. Eles são parcialmente removidos através do sistema de controle de sólidos, porém essa remoção não é total.

O óleo cru contém milhares de diferentes tipos de moléculas de hidrocarbonetos. A toxicidade e o potencial de impactos ambientais variam consideravelmente para diferentes moléculas. Um número de bioensaios tem sido realizado para determinar a toxicidade de hidrocarbonetos em animais marinhos. A toxicidade de hidrocarbonetos que tem sido encontrada é bastante variável e generalizações não podem ser feitas facilmente. Os fatores que afetam a toxicidade incluem: o peso molecular, a família do hidrocarboneto, o organismo exposto e seu estágio no ciclo de vida. Para misturas de hidrocarbonetos, como o óleo cru, a toxicidade também depende da história de exposição. Para hidrocarbonetos de mesma família, a toxicidade tende a aumentar com a redução do peso molecular. Pequenas partículas tendem a ser mais tóxicas que as maiores. Os hidrocarbonetos mais tóxicos são os que possuem maior solubilidade em água. A alta solubilidade faz a molécula ser mais acessível para absorção de plantas e animais (REIS, 1996).

Os sais solúveis, como cloreto de potássio e sódio, fazem parte da composição básica dos fluidos de perfuração de poços de petróleo e gás. E a disposição desses sais no solo, dissolvidos nos cascalhos de perfuração, podem trazer consequências graves ao meio ambiente.

Por não haver uma remoção total do fluido impregnado nos cascalhos, estes podem conter contaminantes. Esses contaminantes presentes nos cascalhos dependem da composição química utilizada no fluido de perfuração e da composição da formação rochosa.

Alguns estudos com cascalhos descreveram suas composições químicas, expressas nos óxidos mais estáveis, e os metais pesados detectados no cascalho *in natura* e estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Metais pesados detectados nos cascalhos.

Determinações (%)	ABBE <i>et al.</i> (2009)	PIRES (2009)	MEDEIROS (2010)	LEONARD e STEGEMANN (2010)
SiO ₂	47,60	43,96	36,5	60,4
Al ₂ O ₃	13,54	21,48	11,5	10,4
Fe ₂ O ₃	6,34	5,40	4,5	4,9
BaO	11,39	2,38	N.A.	N.A.
CaO	2,78	18,12	35,3	2,5
MnO	0,17	N.A.	0,09	0,06
MgO	2,31	N.A.	N.A.	2,0
K ₂ O	2,33	4,51	2,7	1,7
Na ₂ O	1,17	N.A.	N.A.	2,4
TiO ₂	0,65	N.A.	0,81	0,6
P ₂ O ₅	0,10	N.A.	N.A.	0,1

Nota: N.A.- Não apresentado

Fonte: FIALHO, 2012.

A toxicidade é a medida mais comum do potencial de impacto ambiental de um material. É definida pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) como a propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo. A toxicidade ocorre quando um material causa um efeito deletério sobre um organismo, população ou comunidade. O efeito deletério de uma substância é a medida de como ela prejudica a vida e a saúde dos seres vivos após a exposição à substância. Dois tipos de medidas são comumente usados:

a dose e a concentração. A dose é a concentração de uma substância que foi absorvida no tecido das espécies em estudo, enquanto a concentração é uma medida da concentração de uma substância no ambiente que as espécies vivem e também incluem um intervalo de tempo de exposição. Bioensaios de toxicidade são realizados em animais e os resultados são extrapolados para criar os guias que contém os valores máximos permitidos para cada elemento ou substância (REIS, 1996).

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) contém as tabelas com os limites máximos nos extratos obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização, que são estimadas para o nível de exposição que provavelmente não acarretará efeitos deletérios durante o tempo de vida. Entretanto, esses limites estão baseados nos padrões de potabilidade da água. Susich e Schwenne (2004) discutiram sobre esses limites, pois desconsideraram a solubilidade desses metais. Existem metais como a galena (sulfeto de chumbo) que contém aproximadamente 87% de chumbo, entretanto a galena é essencialmente insolúvel, resultando em pequenos riscos aos expostos por ela. Eles propõem ainda um aumento para os limites máximos permitidos em cerca de 10 vezes dos limites atuais, o que ainda seria bem menor que os limites considerados de toxicidade dos metais.

O principal risco para o meio ambiente associado a metais pesados está em suas formas solúveis em água ou trocáveis (PIRES, 2009). Os seres humanos necessitam apenas de pequenas quantidades de alguns desses metais e excessos podem apresentar efeitos adversos à saúde humana.

Outra crítica também de Susich e Schwenne (2004) é quanto a não consideração da caracterização física dos cascalhos para determinação da

disponibilidade dos metais, pois frações menores que 50 mesh (297 μ m) são consideradas com maior risco pois partículas pequenas possuem maior área superficial por unidade de massa e correspondem a um alto potencial de lixiviar metais.

3.2.4 Incorporação dos resíduos para produção de novos materiais

As massas utilizadas na indústria cerâmica são de natureza heterogênea, geralmente constituída de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto espectro de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes.

Desta forma, o beneficiamento de resíduos provenientes de diferentes processos industriais, como novas fontes para matérias-primas cerâmicas, tem sido objeto de pesquisas em diversas instituições, que buscam soluções que conciliem vários aspectos, como custo de disposição, tratamentos, tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e, finalmente, o impacto econômico e ambiental da reciclagem (MENEZES, 2002).

Foi estudada uma alternativa para reciclagem da borra oleosa através da sua incorporação à massa argilosa para fabricação de blocos cerâmicos de vedação utilizados na construção civil, em percentuais que variaram de 0 a 25% em peso. Os experimentos foram realizados na Cerâmica Alfredo Barata, Município de Itabaianinha, Estado de Sergipe, onde as borras foram adicionadas à massa para confecção dos blocos cerâmicos nos percentuais de 0% (testemunha), 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em relação ao peso total da massa de argila. O composto argila/borra foi introduzido na caixa alimentadora do misturador, umedecido com água para facilitar a homogeneização e depois

laminado, garantindo maior precisão na mistura. Após secarem naturalmente, os blocos cerâmicos foram colocados no forno tipo Hoffmann. Passaram 30 horas em fase de aquecimento a 100 °C e queimaram por três dias à temperatura em torno de 900 °C. A qualidade dos blocos produzidos foi avaliada através de ensaios de resistência mecânica, absorção de água, fluorescência, teor de sais solúveis, lixiviação e solubilização de metais pesados. As análises realizadas nos blocos cerâmicos produzidos com incorporação de borra oleosa em teores variando de 0 a 25% em peso mostram que a resistência mecânica é inversamente proporcional ao aumento do teor de borra incorporada; o aumento da absorção de água é diretamente proporcional ao aumento do teor de borra incorporada. Os blocos produzidos foram classificados como Classe II ou não inertes no teste de solubilização. Os resultados apresentados permitem visualizar que o teor mais adequado para incorporação de borra oleosa para fabricação dos blocos cerâmicos situa-se na faixa de 10% a 20% em peso, onde as suas características essenciais encontram-se maximizadas, tais como a resistência mecânica e a absorção de água (ALVES E HOLANDA, 2005).

Foi realizada a caracterização térmica do resíduo oleoso originário da perfuração de poço de petróleo (poço: 1-POTI-4-RN, localizado em Governador DixSept Rosado - RN - Brasil). Foi caracterizado pela análise termogravimétrica (TG), análise térmica diferencial (DTA) e difração de raios X (DRX). As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia, com razão de aquecimento 12,5 °C/min. A temperatura máxima para ambos os casos foi de 1000 °C e o padrão utilizado na DTA foi óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. Foram utilizadas

nesse estudo, três amostras provenientes das seguintes formações geológicas: Formação Jandaíra, Formação Açú e Embasamento Cristalino. As análises dos resultados mostraram que o resíduo oriundo da Formação Jandaíra é composto essencialmente por calcita, com pequenas quantidades de caulinita e quartzo. O resíduo oriundo da Formação Açú é composto essencialmente por quartzo, com pequenas quantidades de calcita e caulinita. E o resíduo oriundo do Embasamento Cristalino é composto por quartzo e calcita, com pequenas quantidades de caulinita, magnesita e mica.

Os resultados obtidos podem ser usados como um subsídio importante no estudo da utilização do cascalho da perfuração em pavimentos, visto que os materiais identificados nas amostras não causam efeito negativo nas propriedades do cimento asfáltico de petróleo (CAP), (LUCENA, 2007).

Foi estudada a viabilidade da aplicação do cascalho de perfuração dos Campos de Carmópolis (Sergipe – SE), Pilar (Alagoas – AL) e Anambé (Alagoas – AL) em matrizes argilosas para fabricação de peças cerâmicas. Inicialmente o programa consistiu em uma fase de investigação de campo que buscou identificar materiais argilosos que pudessem ser incorporados ao cascalho de perfuração. A segunda etapa do programa experimental consistiu em uma série de ensaios visando a sua aplicação como material de construção de peças cerâmicas. Os materiais argilosos coletados nas áreas de produção do Campo de Carmópolis, Anambé e Pilar bem como os cascalhos de perfuração dos respectivos campos foram submetidos a ensaios para a determinação de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

Observou-se ainda a presença de bário e do cloreto para os cascalhos de perfuração. Nas massas cerâmicas foram adicionadas de 5% e 10% em

peso de cascalho de perfuração. Após a queima foram determinadas propriedades como: retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão. Em relação à queima, não foi observada variação expressiva da massa específica na maioria dos materiais. Em relação à absorção de água, não foi observado um padrão de variação desse parâmetro em decorrência do aumento do teor de incorporação do cascalho de perfuração na mistura. Verificou-se, em geral, nas peças cerâmicas submetidas ao ensaio de flexão, uma redução no valor da resistência, com o aumento do teor de incorporação do cascalho de perfuração. Os resultados das principais propriedades tecnológicas de cerâmicas vermelhas obtidas no presente programa experimental demonstraram a viabilidade de incorporação dos cascalhos de perfuração a materiais argilosos para a execução de tijolos. Os resultados indicaram que as peças produzidas lixiviam alguns poucos constituintes inorgânicos e orgânicos. Em relação à classificação das peças cerâmicas oriundas do programa experimental segundo a norma brasileira de classificação de resíduos (NBR 10.004), os resultados mostraram que as peças se enquadraram na categoria de resíduos não perigosos Classe II (PIRES, 2008).

Foi estudada uma solução para destinação da borra de petróleo, resíduo proveniente da separação do óleo cru bruto, de impurezas sólidas e líquidas nas plataformas marítimas de produção. Esse resíduo pode ser classificado como classe I – perigoso, não podendo ser lançado no meio ambiente ou comercializado. A solução utilizada é um tratamento de mistura da borra com um agente encapsulante, bentonita organofílica em forma de pó, formando assim uma barreira física permanente no resíduo. Nesse trabalho foi estudado

seu aproveitamento em massas cerâmicas argilosas para a obtenção de cerâmica estrutural. As massas cerâmicas estudadas foram preparadas com as seguintes adições de borra encapsulada entre 0 a 20% em peso. Os corpos de prova foram prensados a 24 MPa numa matriz retangular, secos na estufa a 110 °C por 24h e sinterizados entre 850 °C a 1100 °C. Para esses foram determinados: retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e módulo de ruptura à flexão em carregamento de três pontos. Observou-se através dos resultados que a retração linear diminuiu com o aumento da adição da borra. O aumento da temperatura faz com que a retração também aumente especialmente acima de 1000 °C, onde há um maior grau de vitrificação do material. A absorção de água não apresentou variações significativas até 1000 °C. Os corpos de prova atingiram valores específicos de absorção de água para tijolos maciços e blocos cerâmicos (<25%) a partir de 850 °C. Para telhas (<20%) os valores específicos só foram alcançados em temperaturas a partir de 1050 °C. Concluiu-se que com a adição da borra houve um aumento no teor de quartzo e uma diminuição da fração de argila e plasticidade das massas, e que as propriedades físico-mecânicas foram afetadas pelo aumento da temperatura e a adição da borra (SANTOS et AL, 2002).

3.3 Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é um produto agrícola originado do sudeste da Ásia; sendo cultivada no Brasil desde a colonização portuguesa. A cana foi trazida para o Brasil em 1532 por Martin Afonso de Sousa, tendo a zona da mata

nordestina como a principal região de produção; desde então passou a ter significativa importância para o país (BRASIL, 2007a).

A importância da cana se deve ao fato de ter sua utilização diversificada e ser bastante empregada como matéria-prima para a fabricação de álcool, açúcar, aguardente. Todavia, o principal destino da cana-de-açúcar no Brasil é a fabricação de açúcar e álcool. No entanto, atualmente já existe tecnologia, brasileira e internacional, por meio das quais se aproveitam diversos subprodutos, tais como, o bagaço, o palhiço, méis, torta de filtro e vinhaça (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Vale lembrar que, nas usinas de açúcar, o álcool é fabricado com o mel resultante de produção de açúcar, assim a maioria das usinas possui destilaria anexa para a fabricação de álcool (PINTO, 1999).

O emprego da cana-de-açúcar para gerar álcool ou açúcar tem variado ao longo do tempo. Na década de 1970, cerca de 90% da cana era transformada em açúcar, posição que se inverteu nos anos 1980, depois da criação do PROÁLCOOL, quando cerca de 80% da cana era destinada à produção de álcool (BRASIL, 2007b). Deste modo, multiplicou-se o número de destilarias autônomas que produzem álcool diretamente do caldo de cana, sem se preocupar com o açúcar (PINTO, 1999).

A participação da cana no setor energético leva em consideração não somente o álcool consumido pelos veículos automotores, mas também a utilização do bagaço nas usinas.

O bagaço é o resíduo sólido gerado durante a extração do caldo da moagem da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool. Sua composição química varia conforme a espécie de cana-de-açúcar cultivada, os

tipos de herbicidas e de fertilizantes e os fatores naturais como clima, solo e água (CORDEIRO, 2006).

Os principais resíduos sólidos do setor sucro-alcooleiro são a palha da cana, o bagaço da cana, a cinza do bagaço de cana, sendo classificados quanto à natureza como classe II, e as embalagens de defensivos agrícolas, sendo classificadas como classe I em função dos componentes químicos presentes (FIESP/CIESP, 2001).

O bagaço pode ser transformado em bagaço hidrolisado para alimentação animal ou pode ser queimado na caldeira, juntamente com o palhiço ou palha da cana, no processo de co-geração de energia elétrica (FIESP/CIESP, 2001, PINTO, 1999, RIPOLI; RIPOLI, 2004).

3.3.1 Utilização do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Durante a produção de açúcar e álcool é gerado como subproduto o bagaço de cana resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar pelo processo de moagem. A quantidade desse bagaço extraído chega a aproximadamente 30% da cana moída e tem sido aproveitada como fonte energética, pois cerca de 95% desta biomassa é queimada em caldeiras para geração de vapor na produção de açúcar e álcool (PAULA, ET AL. 2009).

Dos principais subprodutos das usinas de açúcar e álcool podemos citar: o vinhoto (o caldo restante após a destilação é fracionado na fabricação de Etanol), a torta de filtro (consiste em um material sólido que fica retido nos filtros, após a fermentação do açúcar durante a filtragem do líquido que ainda contém sacarose) e o bagaço. Esse último é um resíduo sólido composto de

lignina e celulose “in natura”, constituído por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente é formada de celulose, hemicelulose e lignina, com 41%, 25% e 20%, respectivamente, com base na massa seca de bagaço (ZARDO, 2004).

Nos últimos tempos, tem sido objeto de atenção de indústrias do setor pesquisas para a otimização dos processos com o intuito de viabilizar a utilização desses subprodutos e o desenvolvimento de outras tecnologias que aumentem o seu valor.

Cordeiro (2006) afirma que para cada tonelada de cana-de-açúcar, são produzidas cerca de 260 kg de bagaço com 50% de umidade. Dentre os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos por causa de seu poder calorífico, o que faz dele a principal fonte energética do processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool (CORDEIRO et al, 2008; SOUZA ET AL. 2007).

Embora seja considerado também um dos maiores rejeitos da agroindústria nacional, sua aplicação industrial transcende desde a fabricação de composto para ração animal, fertilizante e biogás à matéria-prima para compensados e para indústria química em geral.

No início do século XXI, o seu uso direcionou-se para produção de energia (térmica e mecânica), conhecido como co-geração (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

Por definição, a co-geração é a geração simultânea de energia térmica e mecânica a partir de um mesmo combustível (gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço da cana, palha, ponteiros etc.) (COELHO, 2000)

3.3.2 Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Dentre os resíduos se destacam as cinzas minerais oriundas de diferentes atividades agroindustriais, que apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ser então utilizadas como pozolanas. A propriedade da pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA et al., 2004).

Constituída, basicamente, de sílica, SiO_2 , a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) tem pote

ncial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos (CORDEIRO et al., 2008, apud PAULA et al., 2008).

O bagaço é queimado em caldeiras, através de um sistema denominado co-geração, este processo consiste na produção de vapor que será fornecido às turbinas de acionamento mecânico, como bombas, moendas, desfibriladores e, também, para os geradores de energia elétrica; e a demanda no processamento do caldo é suprida pelo vapor que sai das turbinas, denominado vapor de escape (FIOMARI, 2004).

A energia elétrica produzida pode atender parte ou a totalidade das necessidades da própria usina possibilitando sua auto-suficiência e ainda gerar excedentes exportáveis às concessionárias de energia.

A co-geração adquiriu importância nos anos 80, embora os sistemas da época fossem considerados ineficientes já que as turbinas utilizadas geravam

energia elétrica somente para consumo próprio, e os parâmetros de trabalho do vapor gerado pelas caldeiras eram de 2156KPa de pressão e 290°C de temperatura (FIOMARI, 2004).

Com a possibilidade de exportação de energia elétrica, além competitividade do mercado, as usinas passaram a se preocupar com a eficiência das suas máquinas térmica, fazendo-se necessário uma modernização do seu parque industrial. E, para atender as necessidades técnicas de tais máquinas, o níveis de pressão e de temperatura do vapor gerado pelas caldeiras tiveram que ser alterados para 4214 KPa e 420°C, respectivamente (FIOMARI, 2004).

Cordeiro (2006) relata que quanto maior a temperatura no interior do salão da caldeira e/ou do tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberada, gerando cinzas com diferentes colorações.

A calcinação do bagaço nas caldeiras resulta em uma cinza pesada e uma cinza volante, que embora não sejam liberadas diretamente no ar podem poluir o ambiente quando descartadas de forma imprópria após a limpeza das caldeiras da usina (BORLINI et al., 2006). Para a estimativa de geração de resíduos, FIESP/CIESP (2001) adotaram-se as seguintes proporções: para cada tonelada de cana produzida, são gerados 260 kg de resíduo seco de bagaço; e cada tonelada de bagaço que alimenta as caldeiras das usinas, considerando seu percentual de uso em 95%, gera 23,8 kg de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Esta, juntamente com as tortas de filtros e com a palha é encaminhada para a adubação nas própriaslavouras, apesar de ser um material pobre em nutrientes minerais.

3.3.3 Composição Química

Para Cordeiro (2006), a cinza possui como composto químico principal a sílica (SiO_2), em quantidades acima de 60% em massa normalmente. O referido autor ainda salienta que com condições de queima controladas é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo, característica principal que possibilita o uso desse resíduo como pozolana e, conseqüentemente, diminuir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a adição da cinza pode agregar valor econômico ao resíduo e proporcionar vantagens técnicas e ambientais tanto a sua adição como a substituição parcial de cimento Portland (CORDEIRO, 2006).

Vale ressaltar que o alto teor de silício presentes no CBC é absorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e, posteriormente a transpiração (saída de água da planta), fica retido na parede externa das células da epiderme sob a forma de sílica gel (BORJA, 2011).

O acúmulo de sílica entre a cutícula e a parede das células da epiderme trabalha como um obstáculo físico à penetração de fungos patogênicos e diminui a perda de água por transpiração (BARBOZA FILHO, 2002).

Segundo Borja (2011), outra possível fonte de sílica é a areia oriunda da lavoura da plantação da cana-de-açúcar que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem do processamento.

Normalmente, essas cinzas são usadas como fertilizantes (adubação) nas próprias lavouras de cana, em paralelo com as tortas de filtro e a palha (CORDEIRO 2006). No entanto, devido à carência dos nutrientes minerais para seu uso como adubo, muitas vezes essas cinzas são descartadas na natureza

sem uma destinação adequada, muito embora seja um material de difícil degradação (FIESP/CIESP, 2001).

Com o aumento da indústria de cana-de-açúcar no Brasil, constatou-se também, um incremento na ocorrência de problemas referentes à destinação dos resíduos produzidos pelo setor. Diante disso, vários pesquisadores têm buscado desenvolvimento de alternativas para uma destinação sustentável do material e também uma maneira de agregar valor ao subproduto da indústria de cana-de-açúcar.

A indústria da Construção Civil se apresenta como um dos mais fortes candidatos para a destinação desses resíduos, mediante a incorporação destes em matrizes cimentícias. Além de ser o setor que mais consome matérias primas natural é também responsável pelo consumo de 4,5% da energia total do mundo. No entanto, a maior parte dessa energia, cerca de 84%, é usada na fabricação de materiais.

Para que a cinza seja utilizada como adição mineral ela deve ser derivada da indústria ou vegetal, com elevado teor de silicatos, produzida no estado amorfo e com finura adequada (JOHN et al., 2003).

Já na utilização de cinzas como adição pozolânica torna-se imprescindível o emprego de alguns procedimentos específicos de moagem e queima. É importante ressaltar que tais procedimentos podem acarretar a inviabilidade econômica devido à baixa reatividade predominante na maioria dos casos.

Para que o conteúdo de sílica se transforme em fase amorfa, a cinza deve ser queimada a temperaturas abaixo de 700°C, durante uma hora MACEDO, P. C. *et al.*, 2009. Contudo, Martinera Hernández *et al.* 2000

afirmam que a temperatura de combustão dos resíduos agrícolas deve oscilar entre 400°C e 800°C de modo a evitar a formação de fases cristalinas da sílica (produto proveniente das altas temperaturas de combustão), sendo que abaixo de 600°C encontra-se elevado o percentual de sílica amorfa. Segundo Payá *et al.* 2002, as cinzas de bagaço com temperaturas de queima acima de 800°C apresentaram elevada cristalinidade, com picos de quartzo e mulita. Cordeiro, G. C. *et al.* 2009 identificaram que a temperatura de 600°C é a mais apropriada para produzir uma cinza de bagaço de cana predominantemente pozolânica.

Embora não tenha um consenso sobre a temperatura e o tempo ideal de queima do bagaço para se obter um material amorfo, os estudos mostram a importância do controle de queima das cinzas para otimizar a sua reatividade (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000; NEHDI *et al.*, 2003).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um alto teor de silício, normalmente acima de 60% (em massa) e, conseqüentemente, apresenta atividade pozolânica (MARTINERA HERNÁNDEZ, 2000; CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2004; CORDEIRO, G.C., 2006). O silício é absorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossílico (H_4SiO_4) e, após a saída da água das plantas pelo processo de transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel (CORDEIRO, G. C., 2006).

As características mineralógicas é o que difere essas cinzas, ou seja, é a forma em que a sílica é encontrada: amorfa ou cristalina.

3.4 Petróleo

Do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), o petróleo no estado líquido é uma substância oleosa inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro (THOMAS, 2001).

O petróleo encontra-se na natureza ocupando os vazios de uma rocha porosa chamada rocha reservatório. Considerando a origem orgânica, o petróleo é um combustível fóssil, originado provavelmente de restos de vida aquática animal acumulados no fundo de oceanos primitivos e cobertos por sedimentos. O tempo e a pressão do sedimento sobre o material depositado no fundo do mar transformaram-no em massas homogêneas viscosas de coloração negra, denominadas jazidas de petróleo (PETROBRAS, 2010).

3.4.1 Histórico

Os registros da história da utilização do petróleo remontam a tempos bíblicos. Os povos da Mesopotâmia, do Egito, da Pérsia e da Judéia já utilizavam o betume para pavimentação de estradas, calafetação de grandes construções, aquecimento e iluminação de casas, lubrificação entre outros.

A moderna indústria petrolífera data de meados do século XIX, até o final do século XIX, os Estados Unidos dominaram praticamente sozinhos o comércio mundial de petróleo, devido em grande parte à atuação do empresário John D. Rockefeller. A supremacia americana só era ameaçada, nas últimas décadas do século XIX, pela produção de óleo nas jazidas do Cáucaso, exploradas pelo grupo Nobel, com capital russo e sueco. Em 1901

uma área de poucos quilômetros quadrados na península de Apsheron, junto ao mar Cáspio, produziu 11,7 milhões de toneladas, no mesmo ano em que os Estados Unidos registravam uma produção de 9,5 milhões de toneladas. O resto do mundo produziu, ao todo, 1,7 milhões de toneladas.

As companhias européias realizaram intensas pesquisas em todo o Oriente Médio, e a comprovação de que a região dispunha de cerca de 70% das reservas mundiais provocou reviravolta em todos os planos de exploração.

O petróleo tem forte presença na sociedade de consumo do mundo atual, conforme mostra a grande quantidade de produtos industrializados que contém insumos ou são produzidos diretamente a partir dessa matéria-prima e seus derivados.

A primeira guerra mundial pôs em evidência a importância estratégica do petróleo. A transformação do petróleo em material de guerra e o uso generalizado de seus derivados – era a época em que a indústria automobilística começava a ganhar corpo – fizeram com que o controle do suprimento se tornasse questão de interesse nacional. O governo americano passou a incentivar empresas do país a operarem no exterior.

Comercialmente, existem dois tipos de petróleo: o leve (com maior proporção de gasolina) e o pesado (com maior proporção de querosene e óleos combustíveis). O petróleo leve tem maior cotação no mercado mundial, por causa do elevado consumo de gasolina. (PETROBRAS, 2010)

Segundo o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2010) Os maiores produtores de petróleo são: Rússia, Arábia Saudita, Estados Unidos, Irã, China, Canadá, México, Emirados Árabes Unidos, Iraque, Kuwait, Venezuela, Noruega. O Brasil está em 14º lugar.

O mundo se tornou dependente do petróleo e o Brasil, depois da crise de 1973, passou a investir na prospecção de jazidas petrolíferas a fim de diminuir nossa dependência externa em relação a esta fonte importantíssima de matéria – prima.

Os egípcios o usaram na pavimentação de estradas, para embalsamar os mortos e na construção de pirâmides, enquanto gregos e romanos dele lançaram mão para fins bélicos. No Novo Mundo, o petróleo era conhecido pelos índios pré-colombianos, que o utilizavam para decorar e impermeabilizar seus potes de cerâmica. Os incas, os maias e outras civilizações antigas também estavam familiarizados com o petróleo, dele se aproveitando para diversos fins. O petróleo era retirado de exsudações naturais encontradas em todos os continentes. (ANP,2010)

O início e a sustentação do processo de busca com crescente afirmação do produto na sociedade moderna datam de 1859, quando foi iniciada a exploração comercial nos Estados Unidos, logo após a célebre descoberta do Cel. Drake, em Tittusville, Pensilvânia, com um poço de apenas 21 metros de profundidade perfurado com um sistema de percussão movido a vapor, que produziu 2m³/dia de óleo. Descobriu-se que a destilação do petróleo resultava em produtos que substituíam, com grande margem de lucro, o querosene obtido a partir do carvão e o óleo de baleia, que eram largamente utilizados para iluminação. Estes fatos marcaram o início da era do petróleo. Posteriormente, com a invenção dos motores a gasolina e a diesel, estes derivados até então desprezados adicionaram lucros expressivos à atividade.

Até o fim do século passado os poços se multiplicaram e a perfuração com o método de percussão viveu o seu período áureo. Neste período,

entretanto, começou a ser desenvolvido o processo rotativo de perfuração. Em 1900, no Texas, o americano Anthony Lucas, utilizando o processo rotativo, encontrou óleo a uma profundidade de 354 metros. Este evento foi considerado um marco importante na perfuração rotativa e na história do petróleo.

Nos anos seguintes a perfuração rotativa, atualmente desenvolveu-se e progressivamente substituiu a perfuração pelo método de percussão. A melhoria dos projetos e da qualidade do aço, os novos projetos de brocas e as novas técnicas de perfuração possibilitaram a perfuração de poços com mais de 10.000 metros de profundidade.

Até 1945 o petróleo produzido provinha dos Estados Unidos, maior produtor do mundo, seguido da Venezuela, México, Rússia, Irã e Iraque. Com o fim da Segunda Guerra Mundial, um novo quadro geopolítico e econômico se delineou e a indústria do petróleo não ficou à margem do processo. Ainda nos anos 50, os Estados Unidos continuavam detendo metade da produção mundial, mas já começava a afirmação de um novo pólo produtor potencialmente mais pujante no hemisfério oriental. Essa década marcou, também, uma intensa atividade exploratória, e começaram a se intensificar as incursões no mar, com o surgimento de novas técnicas exploratórias. (THOMAS, 2001)

Assim, ao longo do tempo, o petróleo foi se impondo como fonte de energia. Hoje, com o advento da petroquímica, além da grande utilização dos seus derivados, centenas de novos compostos são produzidos, muitos deles diariamente utilizados, como plásticos, borrachas sintéticas, tintas, corantes, adesivos, solventes, detergentes, explosivos, produtos farmacêuticos, cosméticos, etc. Com isso, o petróleo, além de produzir combustível, passou a

ser imprescindível às facilidades e comodidades da vida moderna (THOMAS, 2001).

A história do petróleo no Brasil começou em 1858, quando o Marquês de Olinda assinou o Decreto nº 2.266 concedendo a José Barros Pimentel o direito de extrair mineral betuminoso para fabricação de querosene, em terrenos situados às margens do Rio Maraú, na então província da Bahia. O primeiro poço brasileiro com o objetivo de encontrar petróleo, porém, foi perfurado somente em 1897, por Eugênio Ferreira Camargo, no município de Bofete, no estado de São Paulo. Este poço atingiu a profundidade final de 488 metros e, segundo relatos da época, produziu 0,5 m³ de óleo.

Desde sua criação a Petrobras já descobriu petróleo nos Estados do Amazonas, Pará, Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, São Paulo e Santa Catarina. Cada década na Empresa tem sido marcada por fatos de grande relevância na exploração de petróleo no país.

3.4.2 Processo de Exploração

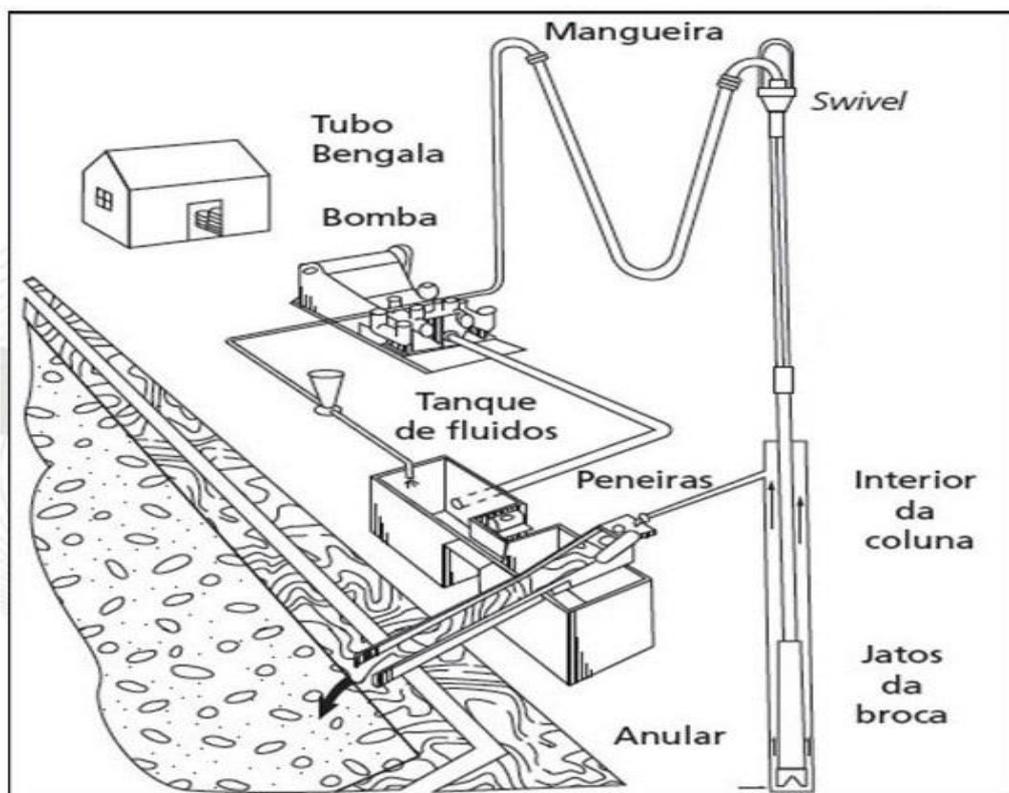
Na perfuração dos poços de petróleo durante o processo é gerado o cascalho, sendo os métodos mais utilizados na perfuração: os métodos a percussão e rotativo. No método por percussão, as rochas são golpeadas por uma broca pontiaguda de aço com movimentos alternados ocasionando fraturamento ou esmagamento. Periodicamente é preciso remover os detritos cortados pela broca, o que é conseguido através da descida no poço de um tubo equipado com uma alça na sua extremidade superior e uma válvula na inferior (caçamba). A válvula de fundo é alternadamente aberta e fechada por

uma haste saliente que bate contra o fundo do poço quando a caçamba está sendo movimentada. Isto provoca a entrada dos detritos na caçamba, em que os mesmos são retirados do poço (THOMAS, 2001). Este processo, por suas características, é muito limitado, atingindo profundidades máximas entre 200 e 250 metros.

O método rotativo emprega uma tecnologia diferente, no qual a broca é girada e comprimida sobre as formações, que se fragmentam. Esses fragmentos são carregados por um fluido (fluido de perfuração) que é injetado pelo interior de tubos de aço até o fundo do poço, retornando à superfície pelo espaço anular entre o poço e as paredes externas da tubulação. Este é o método utilizado até os dias atuais para a perfuração de poços de petróleo (THOMAS, 2001).

O fluido é separado dos cascalhos em peneiras vibratórias, retornando aos tanques e, caso for preciso, pode ser tratado, sendo reinjetado no poço, operando-se assim em circuito fechado, como pode ser ilustrado na Figura 2. A análise contínua dos cascalhos permite detectar os primeiros indícios de hidrocarbonetos nas formações.

Figura 2 – Sistema de Circulação na perfuração de poços de petróleo.



Fonte: ANP

Como mencionado anteriormente, os fragmentos das rochas cortados pela broca (cascalhos) são carregados pelo fluido de perfuração até as peneiras vibratórias na superfície, onde são separados do fluido e descartados em um dique.

Considerando-se que na atividade de “arrumação e limpeza da sonda e locação”, os aspectos que apresentam maior impacto são: óleo, cascalho e fluido de perfuração no chão da locação e o tratamento de esgotos, cujos impactos acarretam a poluição do solo e risco à saúde e ao meio ambiente, e em termos do cascalho, têm-se que:

- Durante a sua remoção, no processo de perfuração dos poços de petróleo, pode haver o derramamento fora da caixa o qual será depositado;
- Durante o carregamento da caçamba, pode ocorrer o transbordamento e vazamento das caixas coletoras.

Por não haver uma remoção total do fluido impregnado nos cascalhos, estes podem conter contaminantes, tais como:

a) Metais pesados: O principal risco para o meio ambiente associado a metais pesados está em suas formas solúveis em água ou trocáveis. Essas formas, entretanto, estão presentes em quantidades mínimas nos rejeitos sólidos da perfuração, conforme demonstrado em análises de solubilidade em amostras seguindo a norma brasileira NBR 10004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que esses resíduos possam ter manuseio e destinação adequados.

b) Alta salinidade: uma vez que os fluidos, em sua maioria têm sais em sua composição, cujo objetivo é o de minimizar o inchamento das formações argilosas perfuradas, promovendo a estabilidade do poço. Os sais solúveis, como o cloreto de sódio e o cloreto de potássio, fazem parte da composição química básica dos fluidos de perfuração de poços de petróleo e a disposição desses sais no solo, dissolvidos nos resíduos da perfuração, pode trazer conseqüências graves ao meio ambiente. A concentração excessiva de sal solúvel no solo aumenta o potencial osmótico, que é a causa principal do dano e morte das plantas. O potencial osmótico é a força com que os constituintes dissolvidos tentam reter as moléculas de água, ou seja, o sal no solo compete

com as plantas pelas moléculas de água. O excesso de sal no solo faz com que as plantas tenham, prematuramente, stress por secura, mesmo que quantidades substanciais de água estejam disponíveis (GARCIA E VAQUEIRO, 2001).

Além disso, a lixiviação desse sal (por exemplo, pela chuva) pode vir a transportá-lo até lençóis de água doce subterrâneos, alterando a qualidade dessas águas.

- c) Óleos e graxas;
- d) Elementos que causam demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO);
- e) Elementos que causam demanda Química de Oxigênio (DQO);
- f) Elementos que causam alcalinidade.

Durante a perfuração do poço, os resíduos são armazenados em diques. Esses diques de perfuração possuem uma dimensão compatível com a profundidade final a ser alcançada no poço, sendo normalmente entre 1,0 e 1,5 m³/m de poço perfurado. Além dos cascalhos, os diques recebem também os efluentes líquidos oriundos das operações (restos de lama, água contaminada na área operacional da sonda e restos de cimento das cimentações). Os diques de perfuração devem ser impermeabilizados para garantir que não ocorra a percolação de contaminantes que venham a ser neles depositados durante a perfuração. Com o término dos trabalhos de perfuração, esses rejeitos devem receber uma disposição adequada, a fim de minimizar a agressão ao meio ambiente

3.5 Cimento Portland

O cimento Portland é um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que quando sob a água, endurece e não mais se decompõe quando exposto à água novamente. O cimento Portland é composto de clínquer e adições, sendo o primeiro o seu principal componente, que está presente em todos os cimentos. As adições variam de um tipo de cimento para outro (ABCP, 2002).

3.5.1 Histórico

A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água (ABCP,2000).

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que obteve um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, através da mistura de componentes argilosos e calcários.

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha

uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

No Brasil, a primeira tentativa de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreu aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Posteriormente, várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas. Assim, chegou a funcionar durante três meses em 1892 uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba. A usina de Rodovalho operou de 1897 a 1904, voltando a funcionar em 1907 e extinguindo-se definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1936, após modernização.

Todas essas etapas não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as

décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias atuais (ABCP,2008).

3.5.2 Fabricação

A matéria-prima é extraída das jazidas pelos processos usuais de exploração de depósitos minerais. O calcário pode apresentar-se com dureza elevada, exigindo o emprego de explosivos seguido de britagem, ou suficientemente mole, exigindo apenas emprego de desintegradores, para ficar reduzido ao tamanho de partículas de diâmetro máximo da ordem de 1cm.

As argilas contendo silicatos, alumina e óxido de ferro, normalmente, apresentam-se em condições de serem misturadas diretamente com o calcário. As argilas e o calcário, em proporções predeterminadas, são enviadas ao *moinho de cru* (moinho de bolas, de barras ou de rolos) onde se processa o início da mistura íntima das matérias-primas e, ao mesmo tempo, a sua pulverização, de modo a reduzir o diâmetro das partículas a 0,050 mm, em média.

A moagem, conforme se trate de *via úmida* ou *seca*, e feita com ou sem presença de água. A determinação da porcentagem de cada matéria-prima na mistura crua depende essencialmente da composição química das matérias-primas e da composição que se deseja obter para o cimento Portland, quando terminado o processo de fabricação.

Durante o processo de fabricação, a matéria-prima e a mistura crua são analisadas, quimicamente, numerosas vezes, a intervalos de 1 hora e, as vezes, de meia em meia hora, e em face dos resultados dos ensaios, o

laboratório indica as porcentagens de cada matéria-prima que deve compor a mistura crua.

São numerosos os métodos de controle da composição química da mistura crua, sendo as fórmulas seguintes as mais empregadas:

- Módulo hidráulico
- Módulo de sílica
- Módulo de alumina-ferro

A matéria-prima devidamente dosada e reduzida a pó muito fino, após a moagem, deve ter a sua homogeneidade assegurada da melhor forma possível.

No processo por via úmida, a matéria-prima é moída com água e sai dos moinhos sob a forma de uma pasta contendo geralmente de 30 a 40 litros de água, sendo bombeada para grandes tanques cilíndricos, onde se processa durante varias horas a operação de homogeneização. Os tanques de homogeneização são providos de um equipamento que gira em torno de um eixo central e é constituído de uma serie de pás que giram, por sua vez, em torno de vários eixos ligados ao eixo principal. A pasta, nessa fase de operação, é ensaiada varias vezes, a fim de controlar a homogeneidade da mistura e a dosagem dos constituintes do cimento, permitindo a sua correção, se necessário.

No processo por via seca a matéria-prima sai do moinho já misturada, pulverizada e seca.

Normalmente os moinhos de cru do sistema por via seca trabalham com temperaturas elevadas (300-400°C) no seu interior, o que permite secá-la. Para tal fim, são usados, em certos tipos de moinho, os gases de combustão do

forno, antes de serem enviados ao filtro retentor de poeiras, e, em seguida a chaminé. O cru é transportado mecânica ou pneumaticamente para o silo homogeneizador, onde se assegura a homogeneização necessária da mistura e se corrige, eventualmente, a sua composição.

A matéria-prima, uma vez pulverizada e intimamente misturada na dosagem conveniente, sofre o seguinte tratamento térmico.

No processo por via úmida, todo o processamento termo-químico necessário à produção do clínquer se dá no forno rotativo.

No processo por via seca, até temperatura da ordem de 900°C a 1000 °C, o processamento da mistura crua se dá em intercambiadores de calor do tipo ciclone ou de contra-corrente. O processamento restante realiza-se no forno, de comprimento reduzido, que recebe a mistura já na referida temperatura.

No forno, como resultado do tratamento sofrido, a matéria-prima transforma-se em clínquer. Na saída, o material apresenta-se na forma de bolas de diâmetro máximo variável entre 1cm a 3cm. As bolas que constituem o clínquer saem do forno a uma temperatura da ordem de 1200°C a 1300°C, pois há um início de abaixamento de temperatura, na fase final, ainda no interior do forno.

O clínquer sai do forno e passa ao equipamento de resfriamento, que pode ser de vários tipos. Sua finalidade é reduzir a temperatura, mais ou menos rapidamente, pela passagem de uma corrente de ar frio no clínquer. Dependendo da instalação, na saída do esfriador o clínquer apresenta-se com temperatura entre 50 °C e 70 °C, em média.

O clínquer, após o esfriamento, é transportado e estocado em depósitos.

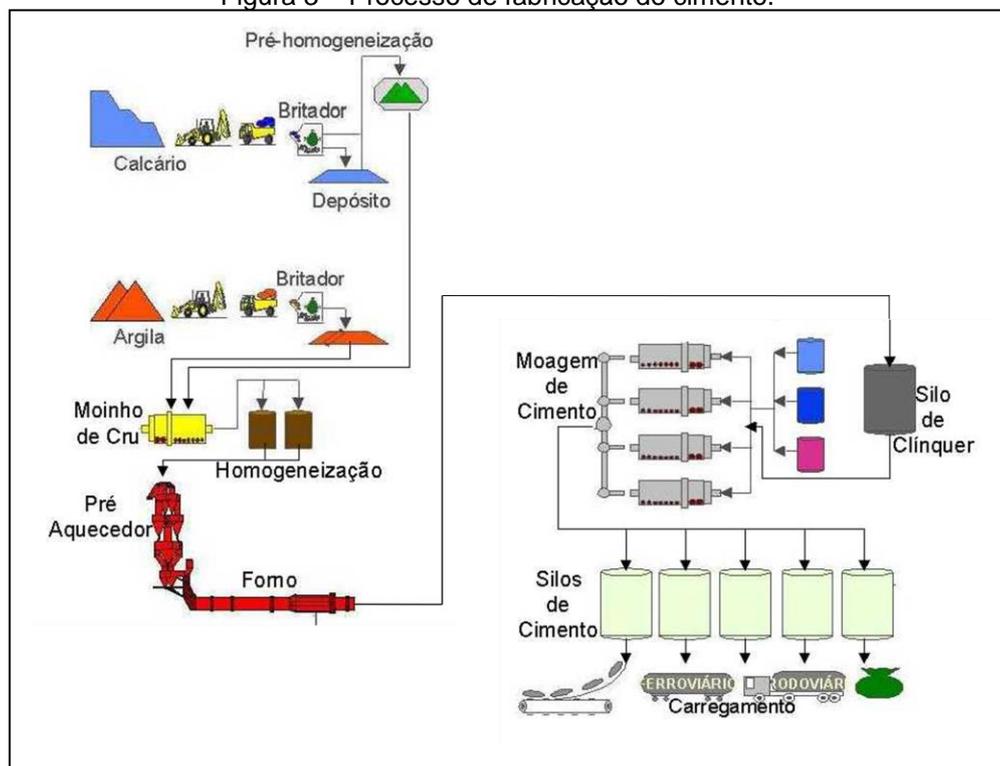
O clínquer Portland assim obtido é conduzido à moagem final, recebendo, antes, uma certa quantidade de gesso, limitada pela norma, gesso esse destinado ao controle do tempo de início de pega.

O cimento Portland resultante da moagem do clínquer, com os aditivos permitidos, é transportado mecânica e pneumaticamente para os silos de cimento a granel, onde é estocado.

Após os ensaios finais de qualidade do cimento estocado, ele é enviado aos silos para a operação de ensacamento, operação feita em máquinas especiais que automaticamente enchem os sacos e os soltam assim que atingem o peso especificado de 50 Kg. Muitas são as fábricas providas de equipamentos que permitem também a entrega do cimento a granel.

O processo de fabricação do cimento pode ser observado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Processo de fabricação do cimento.



3.5.3 Tipos de Cimento Portland

Existem no Brasil, diversos tipos de cimento, dentre eles pode-se citar: cimento Portland comum, cimento Portland composto (cerca de 75% do mercado), cimento Portland de alto-forno, cimento Portland pozolânico, cimento Portland de alta resistência inicial, cimento Portland resistente aos sulfatos, cimento Portland branco, cimento Portland de baixo calor de hidratação e cimento Portland para poços petrolíferos (ABCP,2002).

3.5.3.1 Cimento Portland Comum CP I e CP I-S (NBR 5732)

Tipo de cimento Portland sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega) é muito adequado para o uso em construções de concreto em geral quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas. Geralmente é usado em serviços de construção em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento. Também é oferecido ao mercado o Cimento Portland Comum com Adições CP I-S, com 5% de material pozolânico em massa, normalmente é recomendado para construções, com as mesmas características.

3.5.3.2 Cimento Portland CP II (NBR 11578)

O Cimento Portland Composto é modificado, gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Recomendado para obras correntes de

engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Abaixo segue recomendações de cada tipo de CP II:

a. Cimento Portland CP II-Z (com adição de material pozolânico)

- Geralmente é empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais, além de ser muito utilizado para produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável.

b. Cimento Portland Composto CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno) - Composição intermediária entre o cimento

Portland comum e o cimento Portland com adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento confere bons resultados o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do Cimento Portland Comum. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos.

c. Cimento Portland Composto CP II-F (com adição de material carbonático - fíler) – Normalmente utilizado para diversas aplicações

entre elas, no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros.

3.5.3.3 Cimento Portland de Alto Forno CP III – (com escória - NBR 5735)

Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação geral em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, de concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro e outras. Entretanto é particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

3.5.3.4 Cimento Portland CP IV – 32 (com pozolana - NBR 5736)

É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação.

Geralmente é aplicado em obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

3.5.3.5 Cimento Portland CP V ARI - (Alta Resistência Inicial - NBR 5733)

Com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente, o CP V ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, tais como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Pode ser usado no preparo de concreto e argamassa em obras desde as pequenas construções até as edificações de maior porte, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

3.5.3.6 Cimento Portland CP (RS) - (Resistente a sulfatos - NBR 5737)

O CP-RS oferece resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. Pode ser usado em concreto dosado em central, concreto de alto desempenho, obras de recuperação estrutural e industriais, concretos projetado, armado e protendido, elementos pré-moldados de concreto, pisos industriais, pavimentos, argamassa armada, argamassas e concretos submetidos ao ataque de meios agressivos, como estações de tratamento de água e esgotos, obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas.

De acordo com a norma NBR 5737, cinco tipos básicos de cimento - CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI - podem ser resistentes aos sulfatos, desde que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes condições:

- Teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico;
- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

3.5.3.7 Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) - (NBR 13116)

O Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) é designado por siglas e classes de seu tipo, acrescidas de BC. Por exemplo: CP III-32 (BC) é o Cimento Portland de Alto-Forno com baixo calor de hidratação, determinado pela sua composição. Este tipo de cimento tem a propriedade de retardar o despreendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento.

3.5.3.8 Cimento Portland Branco (CPB) – (NBR 12989)

O Cimento Portland Branco se diferencia por coloração, e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, com classes de

resistência 25, 32 e 40, similares às dos demais tipos de cimento. Já o não estrutural não tem indicações de classe e é aplicado, por exemplo, em rejuntamento de azulejos e em aplicações não estruturais. Pode ser utilizado nas mesmas aplicações do cimento cinza. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante a fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78%. É adequado aos projetos arquitetônicos mais ousados, esse cimento branco oferece a possibilidade de escolha de cores, uma vez que pode ser associado a pigmentos coloridos.

3.5.4 Composição Química do Cimento

Posto que o cimento Portland é formado essencialmente de vários compostos a base de cálcio, os resultados de análises químicas de rotina são expressos em relação aos óxidos dos elementos presentes. Dos quatro óxidos principais (Tabela 2), nomeados na química do cimento pelas letras C, S, A e F, respectivamente, derivam os compostos mais complexos constituintes do clínquer e que especificam as propriedades do cimento, conhecidos como: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (METHA; MONTEIRO, 1994; FREITAS, 2008).

Tabela 2: Composição Química do Cimento Portland

Os principais componentes químicos do cimento Portland	
Cal (CaO)	60% a 67%
Sílica (SiO ₂)	17% a 25%
Alumina (Al ₂ O ₃)	3% a 8%
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,5% a 6%

Fonte: FREITAS,2008.

Os compostos mais complexos do clínquer são descritos da seguinte maneira:

Silicato tricálcico (C₃S) – sendo o principal componente do cimento, ele é o que responde pela sua resistência mecânica inicial (1 a 28 dias). Sua hidratação começa em poucas horas e desprende quantidade de calor inferior ao aluminato tricálcico;

Silicato dicálcico (C₂S) – reage lentamente com a água e libera baixo calor de hidratação. Apresenta baixa resistência mecânica inicial, mas contribui de forma significativa com o aumento da resistência ao longo do tempo;

Aluminato tricálcico (C₃A) – reage rapidamente com a água e cristaliza-se em poucos minutos. É o constituinte do cimento que apresenta maior calor de hidratação. Controla a pega inicial e o tempo de endurecimento da pasta, mas é o responsável pela baixa resistência aos sulfatos;

Ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) – é o componente responsável pela coloração acinzentada do cimento, devido à presença de ferro. Este libera baixo calor de hidratação e reage menos rapidamente que o C₃A. Controla a resistência a corrosão química do cimento (LIMA, 2001).

A pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. De acordo com a NBR 12653/1992, a exemplo da definição dada pela American Society for Testing and Materials (ASTM), em sua norma C 125-03, pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, individualmente, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, no entanto, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Com isso, os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio com a finalidade de formar componentes com propriedades cimentantes.

A reação que ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, tem como principal produto o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), podendo haver também a formação de aluminatos de cálcio hidratados (NETTO, 2006; CABRAL, 2011).

De acordo com MEHTA (1987), exceto para zeólitas, que desenvolvem suas propriedades cimentícias com a cal por mecanismo de troca e base, a reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (caráter básico) e os óxidos (caráter ácido) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhoria nas características técnicas do concreto. A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento Portland, como o C₃S. As reações envolvidas podem ser descritas como:



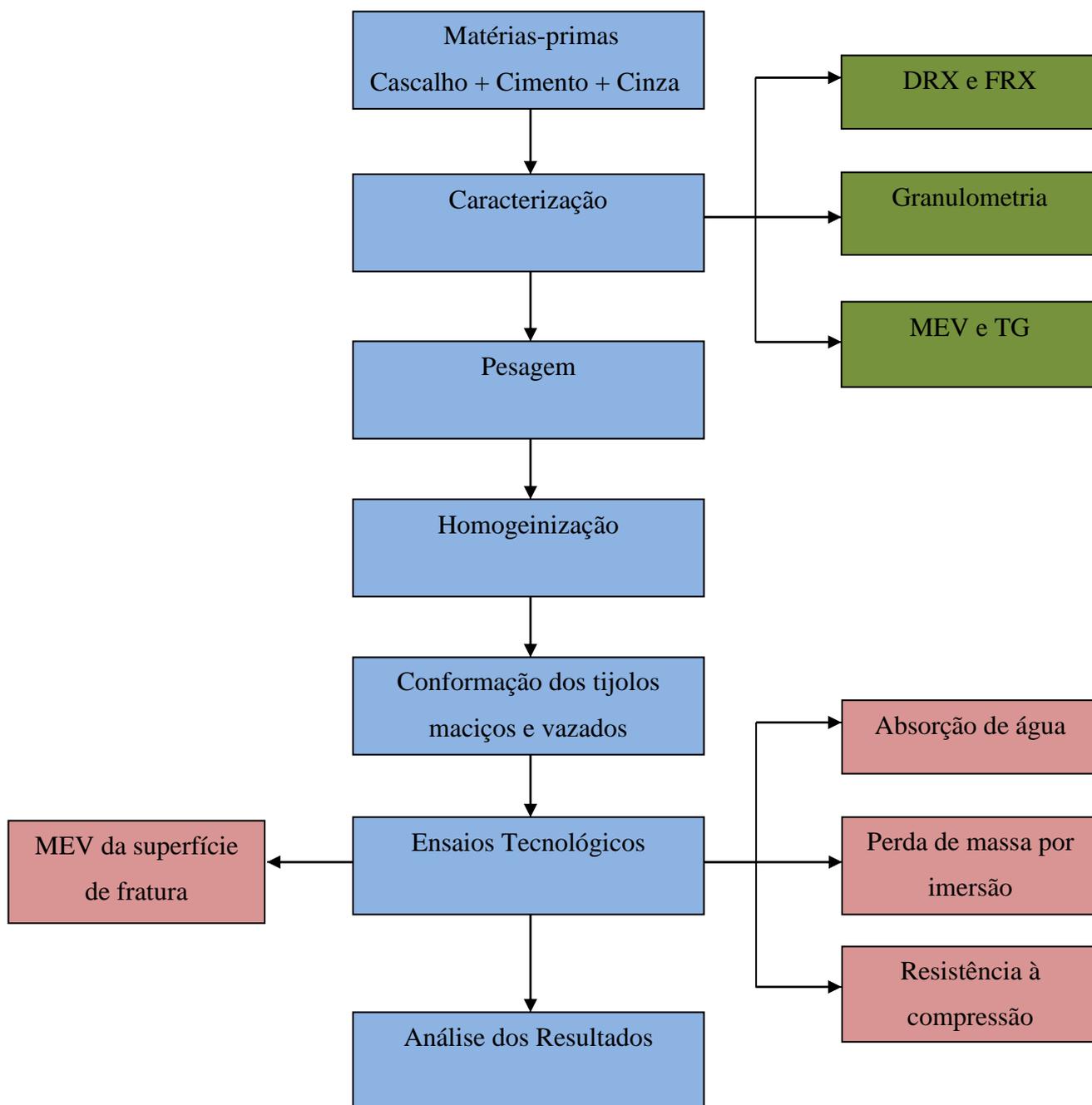
Onde: C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O

CAPÍTULO 4
METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta os materiais selecionados para a realização deste estudo e todo o procedimento experimental utilizado para realizar os objetivos propostos. O procedimento experimental (Figura 4) foi dividido em três partes. Inicialmente são apresentados os materiais e a metodologia adotada para a caracterização das matérias-primas que foram utilizadas para a pesquisa. A primeira parte foi denominada de caracterização das matérias-primas, no qual são descritas as técnicas de caracterização utilizadas para melhor compreensão das características e propriedades destes materiais. Em seguida são descritos os materiais e os métodos utilizados para as formulações das massas escolhidas a partir da primeira parte do trabalho. Por fim, é mostrado o procedimento adotado na elaboração dos tijolos resíduo-cimento e suas caracterizações com relação a propriedades tecnológicas.

Figura 4: Esquema do procedimento experimental.



Fonte: Próprio autor

4.1 Matérias-Primas

Foram coletadas amostras de cascalho de perfuração, proveniente da perfuração de poços *Onshore*, no município de Mossoró/RN, fornecida pela Petrobras. Pode-se observar a coleta do material conforme é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Coleta do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.



Fonte: Próprio autor

Após a coleta, o resíduo foi acondicionado em sacos fechados, fornecidos pela própria empresa (ver Figura 6 a seguir).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi coletada numa usina na região de Eunápolis/BA.

Figura 6 – Acondicionamento do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.



Fonte: Próprio autor

4.1.1 Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas utilizadas foram caracterizadas 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), Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (ATD).

4.1.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica das amostras de cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, classificadas por peneiramento de 35#, foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Materiais do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Utilizou-se um granulômetro a laser, baseado na difração de luz e propriedades do espalhamento, modelo 1180L, do fabricante *Cilas*, com faixa de 0,04 a 2500 μm , tendo sido usado o programa The Particle Expert, que calcula a estatística da distribuição de uma população de partículas por meio de transformações matemáticas complexas (transformada de Fourier inversa), com água como meio de dispersão.

4.1.1.2 Difração de raios X – (DRX)

A difração de raios X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia das matérias-primas devido não só à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas desses minerais (BARBA, 1997).

As amostras a serem estudadas por DRX foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,075 mm, secas e analisadas em um difratômetro de raios X (XRD-6000, Shimadzu) localizado no Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás, utilizando-se as seguintes condições: radiação de $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 10° a 80° .

Os resultados gerados, representados pelas fases mineralógicas das amostras, foram analisados por comparação entre os picos gerados com as cartas padrões do banco de dados ICSD.

4.1.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)

O conhecimento da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes da argamassa, assim como da relação entre elas, serve para auxiliar no controle das suas propriedades (METHA; MONTEIRO, 2008).

As amostras estudadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura de modelo MEV SSX 550 superscan – Shimadzu, no Laboratório de Química do Instituto Federal de Alagoas, com o intuito de verificar o comportamento dos resíduos e se a incorporação do cascalho e da CBC provocou mudanças representativas na massa.

Devido à baixa condutividade que o composto possui foi necessário o aterramento dos fragmentos com fita metálica entre a superfície da amostra e o porta amostra seguido pelo processo de metalização.

As imagens foram obtidas utilizando o detector de elétrons secundários (SE) e a microanálise de algumas amostras em regiões específicas foram obtidas utilizando-se o espectrômetro por energia dispersiva de raios-X (EDS).

4.1.1.4 Análises Térmicas

A análise térmica é muito utilizada na complementação dos ensaios de caracterização de matérias-primas. As principais técnicas termoanalíticas utilizadas em materiais são: Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (ADT).

A ATD detecta mudanças de energia que ocorrem no material durante o seu aquecimento ou arrefecimento, resultantes de quatro causas principais: transições de fase, decomposições no estado sólido, reações com um gás ativo como o oxigênio e transições de 2^o ordem (mudança de entropia sem mudança de entalpia).

Na ATG, a curva termogravimétrica revela as modificações de massa que ocorrem durante o aquecimento de um material e que podem ter duas causas: decomposição ou oxidação. A ATG fornece informações mais restritas que a ATD, no entanto, para análises quantitativas de certas substâncias as informações obtidas podem ser mais precisas.

As curvas termogravimétricas foram obtidas utilizando um analisador termogravimétrico (TG-50, Shimadzu), localizado no Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás, em atmosfera a ar e taxa de aquecimento de 10 °C/min. As amostras foram preparadas na granulometria inferior a 200 mesh (ABNT n°200, 0,074 mm).

4.1.1.5 Fluorescência de raios X

A determinação da composição química dos materiais é de grande importância para sua caracterização. Essa análise raramente serve para caracterizar o material se não vier acompanhado de alguns dados físicos ou sem conhecer as espécies mineralógicas que contém as matérias-primas.

Por ser uma técnica instrumental muito reproduzível, rápida e precisa, a fluorescência de raios X (FRX) é o método mais usual para determinação da composição química dos materiais (BARBA, 1997).

Neste trabalho, as amostras em estudo antes de serem analisadas foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074 mm, correspondendo à peneira nº 200 da ABNT, e secas em estufa (110 °C) por 24 h.

Utilizou-se um espectrômetro por fluorescência de raios X (EDX-700, Shimadzu) em uma atmosfera a vácuo, empregando o método semi-quantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras. O resultado em forma de óxidos limita-se na identificação dos elementos químicos da Tabela Periódica.

4.2 Determinação de quantidades de cimento e água

4.2.1 Quantidade de cimento

Sobre o teor de cimento, a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP recomenda o uso de 7% como o menor teor de cimento a ser adotado e Vargas (1977, p.97) recomenda de “7% a 14% de cimento Portland em relação ao volume de solo compactado”.

Após conduzir ensaios em mais de sessenta solos da região metropolitana de Salvador, em que foram avaliadas a resistência e durabilidade, em função do uso de teores variados de cimento, o CEPED concluiu que, para obter-se resistência à compressão do corpo de prova igual ou maior que 2,0MPa, o teor de cimento deve ser da ordem de 14% (NEVES, 1978).

O cimento utilizado para fabricação dos tijolos maciços e vazados foi CP II-Z que contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente em presença de água. O cimento CP II-Z, também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. A escolha do CP II-Z teve relação com a adição do material pozolânico presente, tendo em vista que o cimento foi substituído parcialmente pela CBC.

4.2.2 Quantidade de água a ser adicionada nas formulações

De acordo com Marques (2010) a quantidade de água a ser adicionada foi definida a partir do ensaio de compactação Proctor Normal realizado na mistura solo-cimento, onde o teor de umidade ótimo foi o parâmetro que definiu tal dosagem. Calmon et al (1998) e Ferraz (2001) relatam que o uso do Ensaio de Compactação de Proctor Normal (NBR 7182) possibilita a determinação da quantidade de água a ser adicionada na mistura (umidade ótima de compactação), visando à obtenção da massa específica máxima. O efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples das

misturas de solo-cimento, a resistência a compressão simples atinge o valor máximo e decresce de modo similar à curva de compactação, ou seja, a máxima resistência ocorre na umidade ótima (LOPES, 2002). Esse parâmetro apresenta estreita relação com a granulometria e plasticidade do solo (FERRAZ; FALEIRO; FREIRE; 2005) e, assim como o teor de cimento a ser adicionado na mistura (FERRAZ, 2001), cresce com a quantidade de argila.

4.3 Formulações de massa

Após a caracterização das matérias-primas, as quais foram analisadas através dos ensaios realizados as massas a serem conformadas foram formuladas de acordo com a Tabela 3, onde, conforme tópico anterior, foi utilizada a proporção de 14% de cimento nas composições binárias, e a partir desse valor foi realizada a substituição parcial do cimento pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar nas quantidades relacionadas na tabela.

Tabela 3 – Composição das Formulações binárias e ternárias.

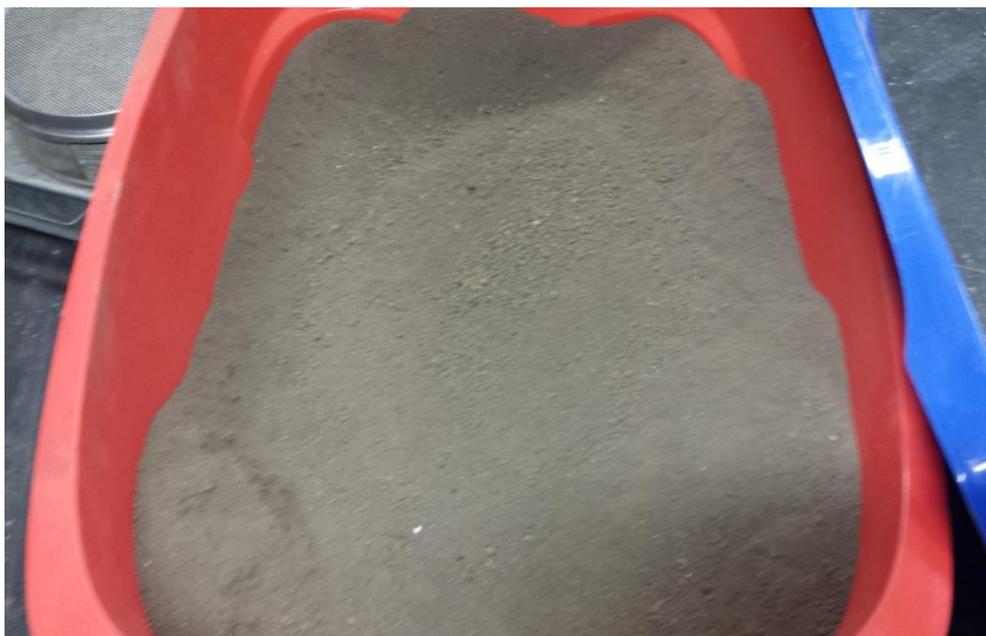
FORMULAÇÕES
Solo-cimento 14%
Resíduo + 14% Cimento
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza

Fonte: Próprio auto

4.4 Preparação dos corpos-de-prova

Após a formulação da massa foram conformados 18 corpos-de-prova para cada formulação, o cascalho coletado foi peneirado numa malha de 4,8mm (Figura 7).

Figura 7 – Cascalho de Perfuração após peneiramento.



Fonte: Próprio autor

Os constituintes dos corpos-de-prova, solo, cascalho, cimento e CBC foram separados após a pesagem, a fim de serem misturados para composição das massas e posterior conformação. A mistura dos componentes da argamassa foi realizada manualmente, colocando-se num recipiente o cimento para, antes de qualquer coisa, desfazer manualmente pequenos torrões existentes nesse material.

Posteriormente foi colocado o solo (nas formulações que possuía esse constituinte), ou adicionado o resíduo, sendo realizada uma rigorosa homogeneização seca manual até o produto final adquirir coloração uniforme,

após essa etapa foi gradualmente inserida água potável e realizada nova homogeneização.

A mistura foi transferida do recipiente onde foi realizada a homogeneização para a prensa 1 (Figura 8), para os tijolos maciços e prensa 2 (Figura 9) para os tijolos vazados. O molde das prensas, é que dá forma ao tijolo, seja maciço ou vazado. Logo após a prensagem a máquina ejeta o elemento moldado que é retirado da prensa e colocado nas mesas para início do processo de cura sobre uma superfície plana.

Após 6h da moldagem, e durante os 7 primeiros dias, os elementos foram mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens a cada 2h com borrifador, a fim de garantir a cura necessária (Figuras 10 e 11).

Figura 8 – Prensa utilizada para moldagem dos tijolos maciços.



Fonte: Próprio autor

Após o processo de cura os tijolos foram separados para cada ensaio tecnológico (perda de massa por imersão, absorção de água e resistência à compressão).

Figura 9 – Prensa utilizada para moldagem dos tijolos vazados.



Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Tijolos maciços em Processo de Cura.



Fonte: Próprio autor

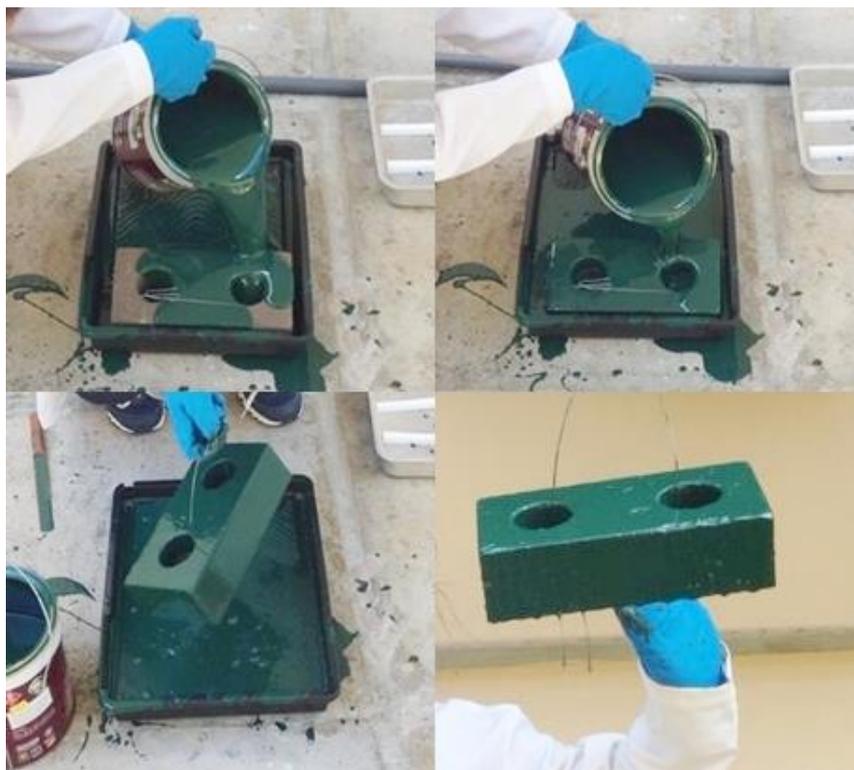
Figura 11 – Tijolos vazados em Processo de Cura.



Fonte: Próprio autor

Com os resultados do ensaio de absorção de água, com objetivo de melhorar os resultados de absorção e possibilitar o uso do material sem a necessidade de aplicação de chapisco, emboço e reboco, foi aplicado esmalte (Figura 12) e novamente realizado ensaio de absorção nos corpos-de-prova esmaltados.

Figura 12 – Tijolo vazado após aplicação do esmalte



Fonte: Próprio autor

4.5 Ensaios Tecnológicos

4.5.1 Absorção de água

O ensaio foi realizado de acordo com as normas NBR-8492 e NBR 10836 onde os tijolos são secos em estufa até a constância de massa, retirados e pesados. Em seguida, são imersos por 24 horas em água, de onde são retirados para nova pesagem e cálculo dos respectivos valores de absorção. Com os dados obtidos nos ciclos de pesagem, secagem e imersão em água, calculou-se o percentual de absorção para os tijolos maciços e vazados.

A absorção média foi determinada pela média aritmética de três repetições, através da equação 3 a seguir.

$$AA=(M_2-M_1)\times 100/M_1 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

M_1 = Massa do corpo-de-prova seco em estufa (g);

M_2 = Massa do corpo-de-prova saturado (g);

A A = Absorção de água (%);

4.5.2 Perda de massa por imersão

Este método de ensaio adotado tem por base o método M-197/88, do DER, método o qual fixa o processo para a determinação da perda de massa por imersão em água, de solos compactados, em laboratório. Perda de massa por imersão (PMI) é a porcentagem da massa seca da porção que se desprende do corpo-de-prova, quando o mesmo é preparado e imerso em água, sob condições padronizadas, em relação à massa seca 10mm de comprimento do referido corpo-de-prova.

O ensaio é realizado com os corpos-de-prova moldados e curados, após o período de cura, onde se introduz água no recipiente de imersão, de maneira contínua e suave, até que a lâmina de água atinja pelo menos 1cm acima da face externa do tijolo.

Foi observado nos minutos iniciais, o comportamento do corpo-de-prova, anotando eventuais peculiaridades (desagregação, desprendimento de bolhas, inchamento e trincamento). Após pelo menos 20 horas, esvaziar o recipiente de imersão; remover o molde e anotar a forma da amostra que permaneceu dentro do recipiente. Se contiver algum solo dentro do local de imersão anotar sua forma e em seguida determinar a sua massa seca em estufa 100/105°C.

A perda de massa por imersão para uma determinada condição, será obtida pela seguinte equação:

$$PMI = M_d \times 100/M_o \quad (\text{equação 4})$$

PMI = Perda de massa por imersão.

Expresso em porcentagem, com aproximação de uma unidade, em que:

M_d = é a massa de solo seco, da parte desprendida do corpo-de-prova, em gramas.

M_o = é a massa do solo seco correspondente a 10 mm do corpo-de-prova logo após a sua compactação, em gramas.

4.5.3 Resistência à compressão

Após o período de cura em ambiente protegido para evitar a perda rápida de umidade, os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina Shimadzu AG-I com capacidade de carga de 250KN e com avanço de 0,5mm/min.

No teste de compressão, o corpo de prova foi testado pela aplicação de uma carga axial compressiva, e construído o diagrama tensão–deformação, semelhantemente ao procedimento do ensaio de tração. As mesmas máquinas do ensaio de tração são utilizadas para o ensaio de compressão, apenas alterando as condições de fixação do corpo de prova na máquina. A norma estabelece que os tijolos solo-cimento devem apresentar 2MPa de resistência mínima para serem considerados dentro do padrão.

4.6 Análise da Superfície de Fratura

Após a realização do ensaio de resistência à compressão nos tijolos maciços e vazados foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com objetivo de identificar quais locais foram os mais afetados no processo de fratura e quais possíveis causas, além de identificar a formação do silicato de cálcio hidratado na matriz, possibilitando assim justificar o aumento da resistência dos tijolos fabricados.

CAPÍTULO 5
RESULTADOS E DISCUSSÃO

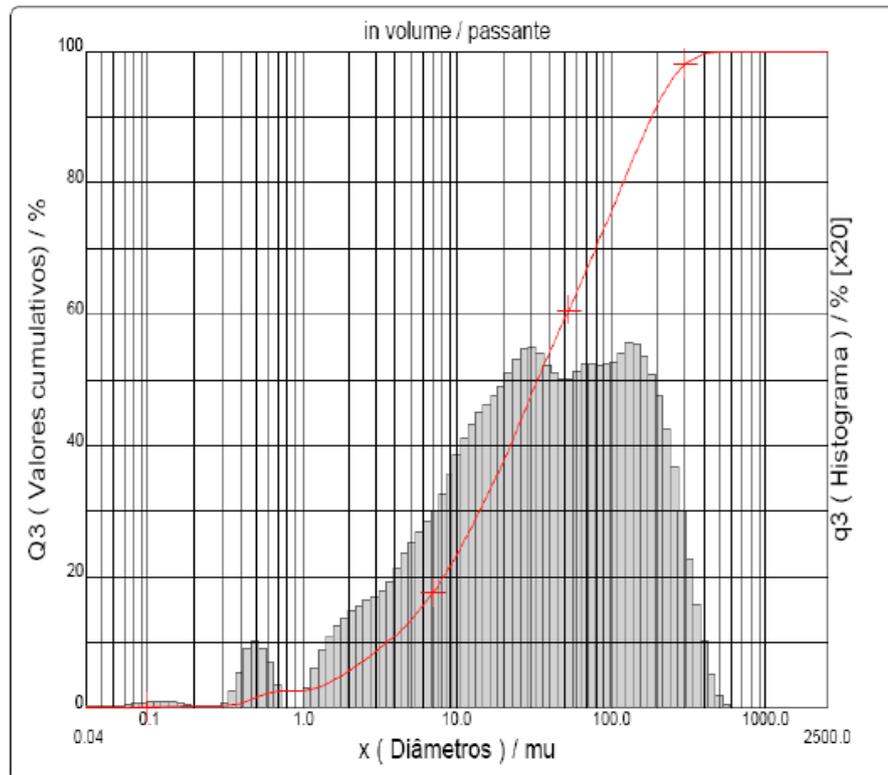
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Granulométrica

5.1.1 Cascalho de perfuração

Na Figura 13 é apresentada a curva granulométrica do cascalho de perfuração de poços de petróleo, e pode-se observar que o material possui 10% do seu volume em granulometria inferior a $3,55 \mu\text{m}$, em que 50% das partículas possuem valores menores que $33,34 \mu\text{m}$, e 90% das partículas possuem valores menores que $181,08 \mu\text{m}$, classificado como bimodal por apresentar uma distribuição de partículas variada com dois picos em destaque. O diâmetro médio da partícula é de $66,83 \mu\text{m}$.

Figura 13 – Gráfico de distribuição granulométrica do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.

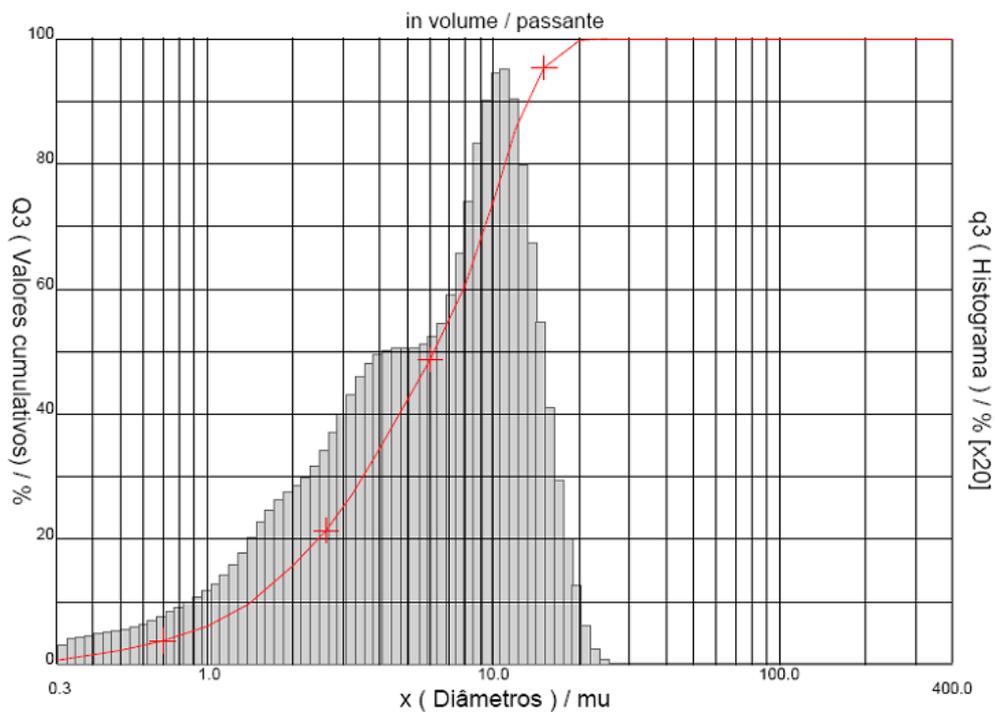


Fonte: Próprio autor

5.1.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Na Figura 14 é apresentado o gráfico de distribuição granulométrica da cinza da CBC, realizada através do ensaio de granulometria a laser. Observou-se que a cinza apresentou uma distribuição granulométrica com diâmetros de partículas variando na faixa granulométrica de 0,3 a 25,0 μm , sendo que destes, 50% do volume passante correspondeu a partículas com diâmetro inferior a 7,0 μm , classificando assim a CBC como um material monomodal por possuir uma maior concentração de finos na sua distribuição. O diâmetro médio das partículas apresentou valor de 6,91 μm .

Figura 14 – Gráfico de distribuição granulométrica da CBC.



Fonte: Próprio autor

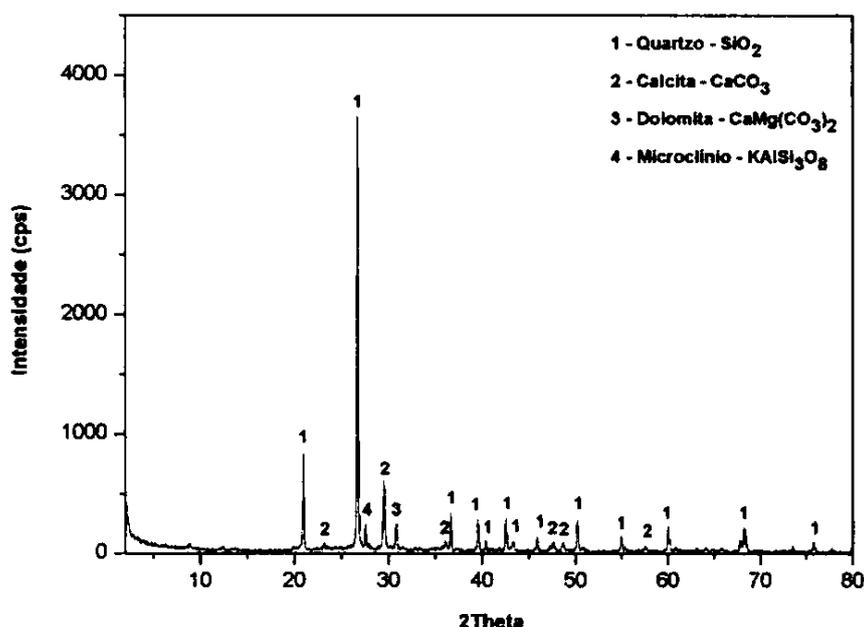
5.2 Difração de raios X

5.2.1 Cascalho de perfuração

Na Figura 15 é mostrado o difratograma de raios X do cascalho de perfuração, onde foram identificados picos característicos das fases quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e microclínio (KAlSi_3O_8). Observou-se que o quartzo é a fase cristalina predominante corroborando com os resultados apresentados na análise química por fluorescência, onde foi apresentado uma concentração de 46,72% de sílica.

O Quartzo é a forma termodinamicamente estável da sílica cristalina nas condições ambientais. A grande maioria da sílica cristalina natural existe como α -quartzo. As outras formas podem aparecer na condição ambiente num estado metaestável.

Figura 15 – Difratograma de raios X do cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo.



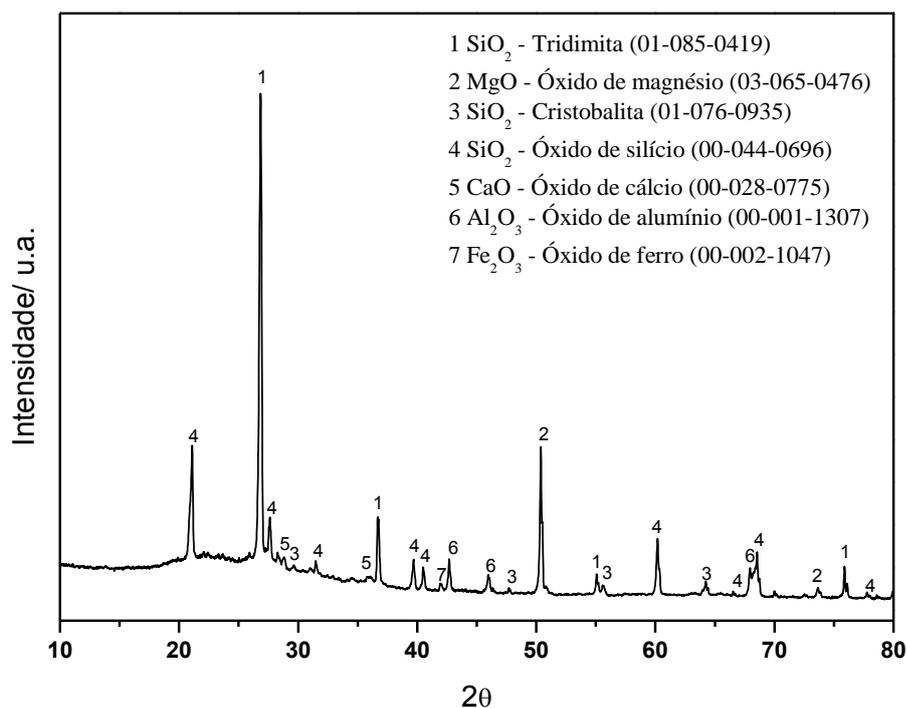
Fonte: Próprio autor

5.2.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A Figura 16 representa o difratograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com o difratograma foram identificadas as fases tridimita (SiO_2), cristobalita (SiO_2), óxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

As fases de tridimita e cristobalita são formas cristalinas da sílica, comumente existentes a elevadas temperaturas (fases metaestáveis).

Figura 16 – Difratograma de Raios X da CBC.



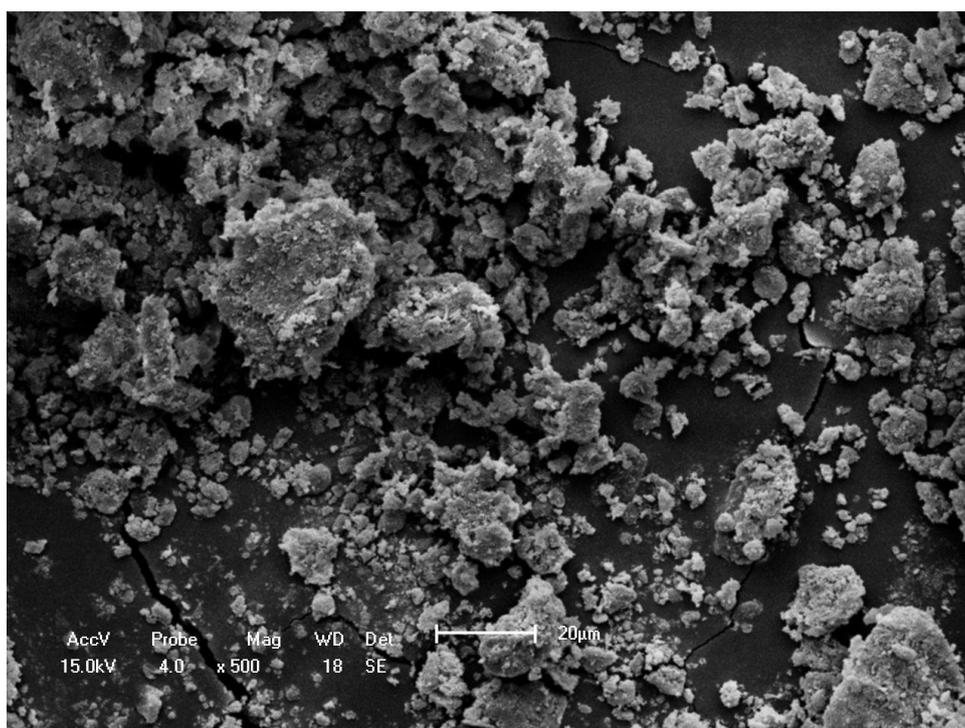
Fonte: Próprio autor

5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)

5.3.1 Cascalho de perfuração

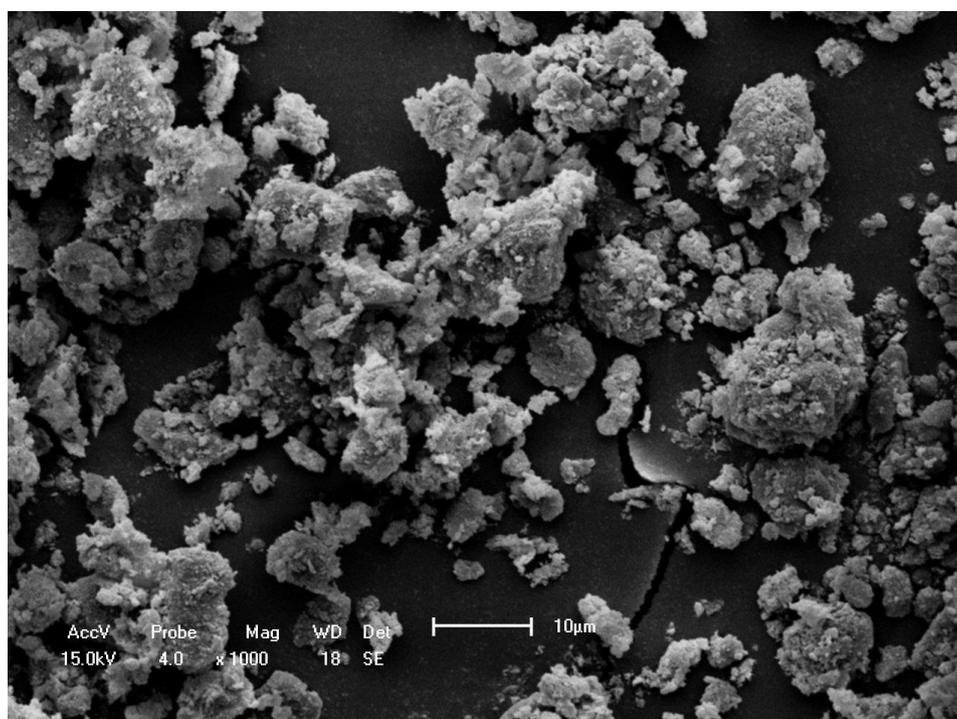
Na Figura 17 e 18 são apresentadas as micrografias do cascalho de perfuração, podemos observar que o material é heterogêneo, possuindo vários tamanhos de partículas, corroborando com a análise granulométrica do material. A variedade de partículas colabora para um melhor empacotamento no processo de moldagem dos tijolos aliado com a CBC, formando assim um material com menor índice de vazios.

Figura 17 - Micrografia obtida por MEV, do cascalho, com aumento de 500X.



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Micrografia obtida por MEV, do cascalho, com aumento de 1000X

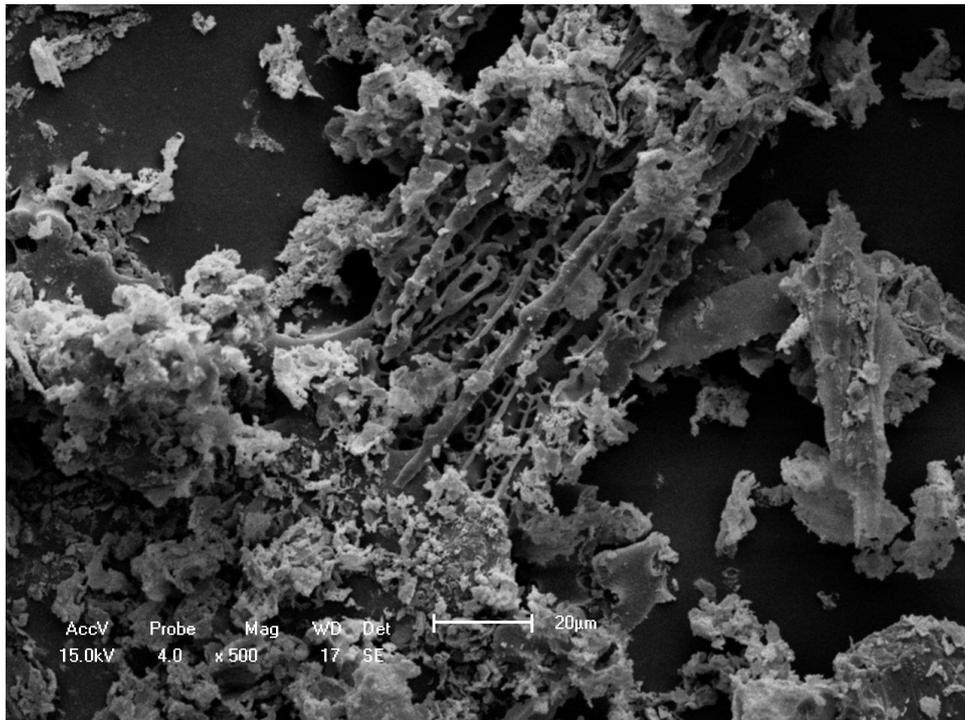


Fonte: Próprio autor

5.3.2 Micrografia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar

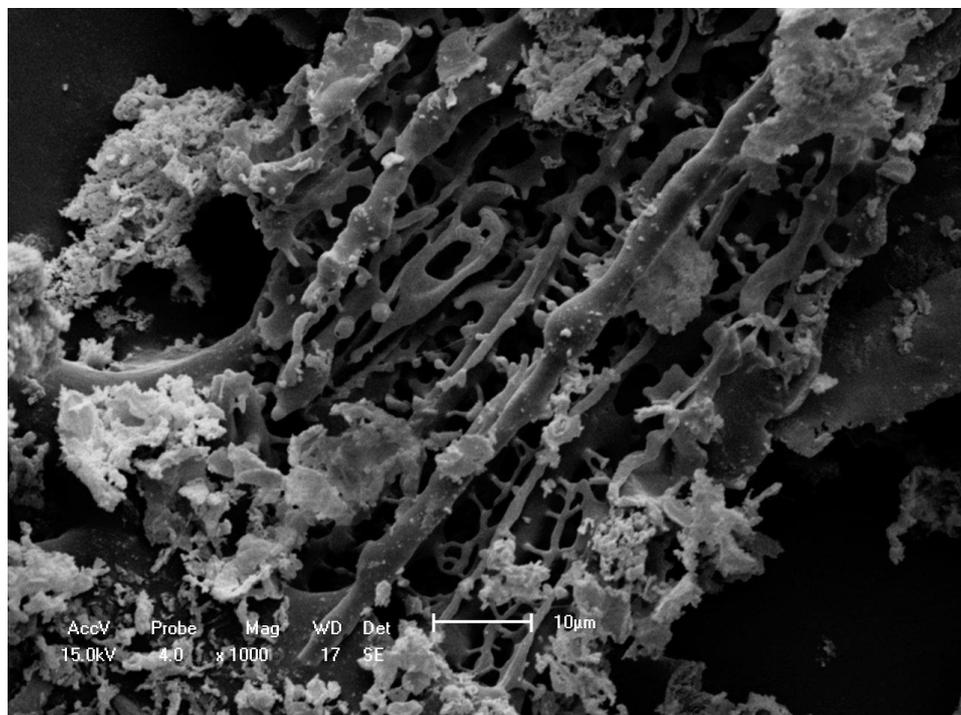
Nas figuras 19 e 20 pode-se verificar que as partículas de CBC são formadas por partículas de tamanhos e formatos variados e possuindo aspecto fibroso com camadas sobrepostas e com pequenas partículas aderidas à superfície além do seu aspecto arredondado. Cordeiro (2006) notou que a morfologia das partículas da cinza produzida a 600°C é caracterizada por elementos fibrilares e microporosos, com tamanhos variados e que possuem fosfato e sílica como elementos principais. A CBC possui maior percentual de finos possibilitando assim uma melhor homogeneidade, quando aliada ao cascalho de perfuração e a alto teor de finos que irá colaborar para um maior empacotamento das partículas.

Figura 19 - Micrografia obtida por MEV, da CBC, com aumento de 500X.



Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Micrografia obtida por MEV, da CBC, com aumento de 1000X.



Fonte: Próprio autor

5.4 Análises Térmicas

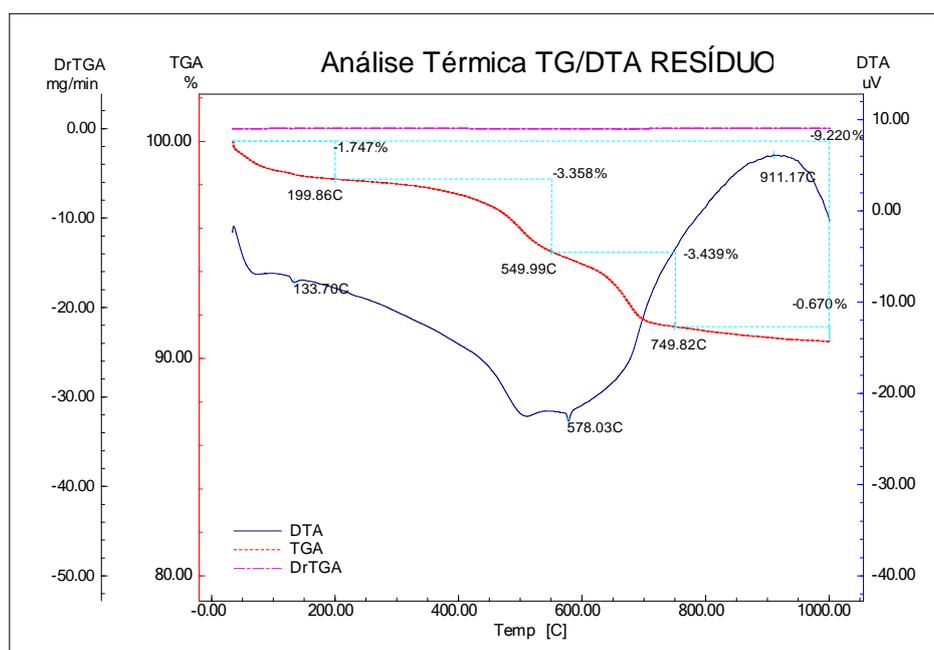
A análise termogravimétrica foi realizada com o cascalho de perfuração e a CBC, para observar o comportamento térmico em função da temperatura.

5.4.1 Análise Térmica do cascalho de perfuração

Na Figura 21 a seguir, é apresentada a curva termogravimétrica do cascalho de perfuração. Observa-se duas etapas de perda de massa onde, a primeira perda ocorre na faixa de temperatura de 100 – 500 °C e pode ser atribuído à desidratação dos compostos orgânicos voláteis, provenientes do hidrocarboneto incorporados ao cascalho de perfuração.

A segunda etapa ocorre na faixa de temperatura entre 700 – 800 °C que pode estar relacionado a estabilização do composto. Observou-se que na faixa de temperatura de 500 °C a 700 °C ocorre a inversão térmica onde o quartzo passa da fase α para fase β , em torno de 570°C.

Figura 21 – Análise Térmica do cascalho de perfuração.



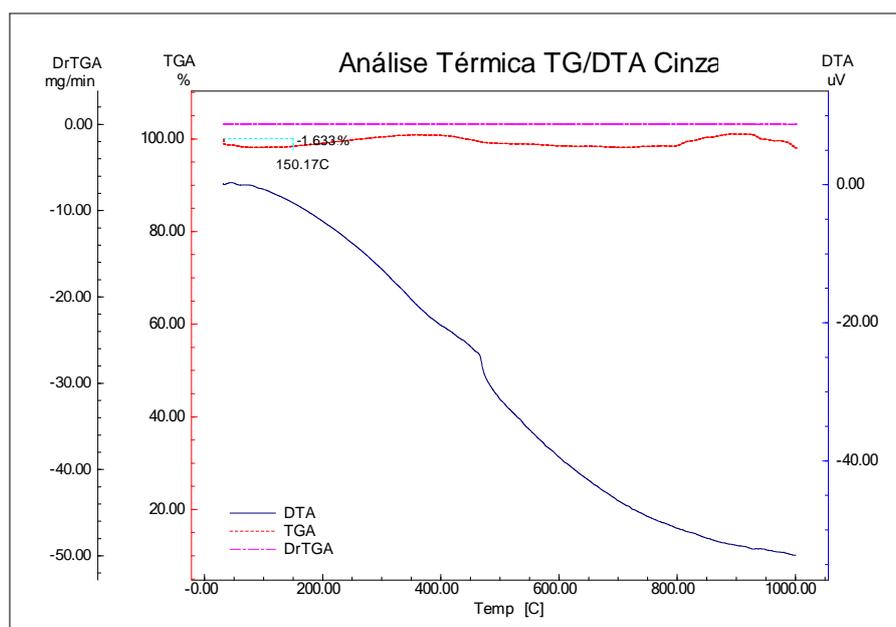
Fonte: Próprio autor

5.4.2 Análise Térmica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Na Figura 22 é apresentada a curva termogravimétrica da CBC, onde podemos observar uma mínima perda de massa em torno de 1,6% que pode ser justificada pela perda de umidade. Após esse pequeno evento podemos verificar que a cinza apresentou estabilidade térmica no qual pode ser atribuída ao processo de queima para alimentação das caldeiras para co-geração de energia. A ATD da cinza corroborou com os resultados encontrados na Difração de Raios X em relação à presença de fragmentos de quartzo na amostra.

Observou-se que na faixa de temperatura entre 400 °C a 500 °C ocorreu a inversão térmica onde o quartzo passa da fase α para fase β . O valor mínimo de perda de massa, se acham próximos aos encontrados por MARTIRENA HERNÁNDEZ et al. (1998); MASSAZA (1998) e FREITAS (2005).

Figura 22 – Análise Térmica da CBC.

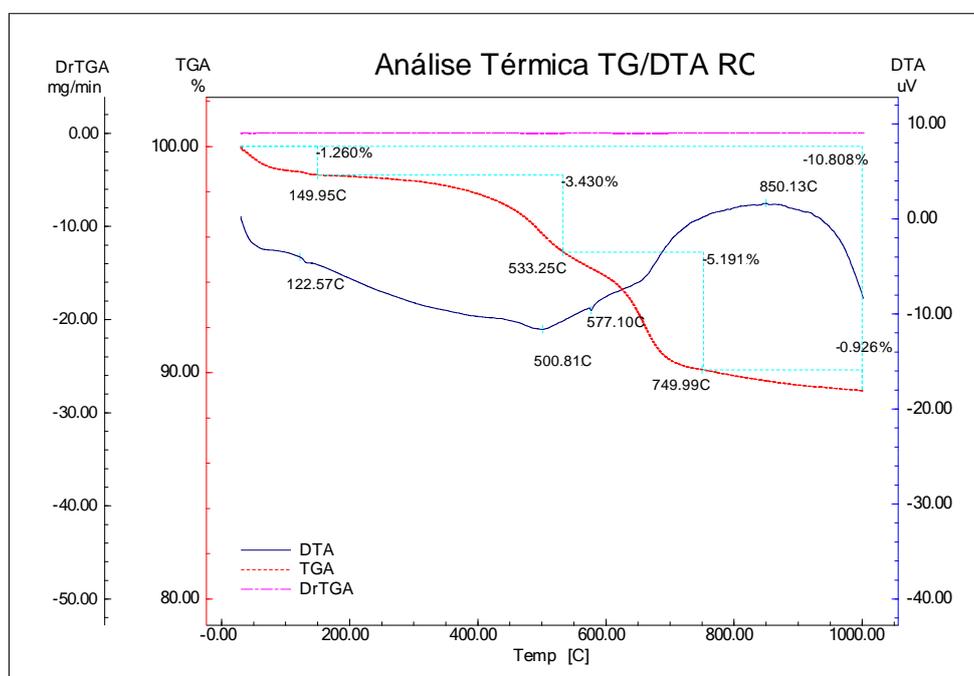


Fonte: Próprio autor

5.4.3 Análise Térmica da composição resíduo de perfuração e CBC

Na Figura 23, é apresentada a curva termogravimétrica da matriz cascalho de perfuração e da CBC (cascalho + 2% de CBC). Observou-se dois eventos onde, o primeiro ocorre com a perda de massa na faixa de temperatura de 200 – 750 °C no qual pode ser atribuído à desidratação dos compostos orgânicos e o segundo evento ocorreu acima de 750 °C apresentando estabilização do composto. Somando os eventos o resultado é condizente com os resultados das análises térmicas de cada material, onde o cascalho apresentou uma perda de massa em torno de 9% e a CBC 1%. A análise da matriz apresentou aproximadamente 10% de perda de massa.

Figura 23 – Análise Térmica da composição Cascalho e CBC.



Fonte: Próprio autor

5.5 Análise química por Fluorescência de Raios X

5.5.1 Análise química por fluorescência do cascalho

Na Tabela 4, observou-se que na composição química do cascalho de perfuração, além dos óxido de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , há ocorrência de alto teor de SiO_2 e CaO , proveniente das rochas carbonáceas dos reservatórios petrolíferos.

Com a presença de 46,72% de sílica é possível justificar a substituição total do solo pelo cascalho de perfuração na fabricação dos tijolos.

O óxido de cálcio, segundo elemento em maior proporção, explicou a perda ao fogo de 10,88%, devido principalmente à eliminação do dióxido de carbono (CO_2) proveniente do carbonato de origem; e também das águas intercaladas de coordenação e zeolítica, a água de hidroxilas dos argilominerais e também de hidróxidos existentes como hidróxido de alumínio e ferro ($Al(OH)_3$; $Fe(OH)_3$) (SANTOS,1992).

Tabela 4 – Análise química por fluorescência do cascalho.

Óxidos	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	BaO	SO_3	TiO_2	SrO	ZrO_2	CuO	ZnO	PF
%	46,72	20,64	10,12	5,33	2,48	1,34	0,99	0,76	0,56	0,06	0,05	0,04	0,03	10,88

Fonte: Próprio autor

5.5.2 Análise química por fluorescência da CBC

De acordo com a Tabela 5 nota-se que o SiO_2 é o composto predominante na CBC, com teores de mais ou menos 44% da massa das amostras, seguido de Al_2O_3 com teores na faixa de 9%. Os óxidos, Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , P_2O_5 , SO_3 , CaO representam cerca de 23% da cinza.

A predominância da sílica de acordo com Cordeiro (2006) se deve provavelmente ao silício adsorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4). O autor acrescenta ainda que também pode ser devido à presença de areia impregnada as raízes da cana-de-açúcar.

O percentual da sílica obtido foi abaixo dos valores encontrados na literatura (Borja, 2011 Cordeiro et al., 2010). Tal fato pode ser justificado pelo método da colheita da cana-de-açúcar. De acordo com a literatura boa parte da sílica encontrada na CBC pode ser decorrente da areia que se mistura com a cana na hora da colheita mecânica.

Tabela 5 – Análise química por fluorescência da CBC.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃	CaO	Outros
%	44,01	8,36	1,72	0,69	4,74	3,49	0,14	4,71	6,84	1,83

Fonte: Próprio autor

5.6 Ensaio Tecnológicos

5.6.1 Absorção de Água tijolos maciços

Verificou-se que todos os traços atenderam a NBR 8492 (2012), que prescreve absorção máxima de 20%. Nota-se decréscimos nos valores de absorção conforme se adiciona cinza (Tabela 6).

Tabela 6 – Absorção de água tijolos maciços

Dosagem - Tijolo Maciço	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	16,2	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	16,2	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	14,0	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	14,7	± 0,03
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	15,7	± 0,03

Fonte: Próprio autor

5.6.2 Absorção de Água tijolos vazados

Foi realizado ensaio de acordo com a NBR 10836 onde preconiza que os tijolos devem apresentar a média dos valores de absorção de água igual ou menor que 20% e valores individuais iguais ou menores que 2%, aos 28 dias de idade. Todas as formulações para os tijolos vazados atenderam a norma e a medida que a cinza era acrescentada nas formulações a absorção apresenta um decréscimo até o teor de 4% de cinza. A formulação com 6% apresentou um pequeno acréscimo na absorção, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Absorção de água tijolos vazados

Dosagem -Tijolo Vazado	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	17,6	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	16,5	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	15,7	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	15,3	± 0,03

Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	15,9	± 0,03
---------------------------------	------	--------

Fonte: Próprio autor

5.6.3 Perda de Massa por Imersão tijolos maciços

Foram seguidas as diretrizes do ME 26 – IPT/BNH – Determinação de perda de massa por molhagem e secagem de tijolos solo-cimento – Método de ensaio. Conforme mostrado na tabela 8 os tijolos apresentaram uma perda de massa dentro dos padrões especificados na norma, que atribui uma perda de massa para o tijolo de solo-cimento até 5%.

Foi observado que os tijolos moldados com o teor máximo de resíduo obteve uma menor perda de massa e a medida que o resíduo é diminuído na formulação da massa o tijolo apresentou uma maior perda de massa.

Tabela 8 - Perda de Massa por Imersão tijolos maciços

Dosagem - Tijolo Maciço	PMI (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	2,8	± 0,08
Resíduo + 14% Cimento	2,6	± 0,07
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	2,5	± 0,07
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	2,7	± 0,07
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	3,1	± 0,07

Fonte: Próprio autor

5.6.4 Perda de Massa por Imersão tijolos vazados

Foram seguidas as diretrizes do ME 26 – IPT/BNH – Determinação de perda de massa por molhagem e secagem de tijolos solo-cimento – Método de ensaio. Conforme mostrado na tabela 9 os tijolos apresentaram uma perda de massa dentro dos padrões especificados na norma, que atribui uma perda de massa para o tijolo de solo-cimento até 5%. Os tijolos vazados mesmo possuindo a mesma formulação que os tijolos maciços apresentaram um pequeno acréscimo na perda de massa.

Tabela 9 - Perda de Massa por Imersão tijolos vazados

Dosagem - Tijolo Vazado	PMI (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	2,9	± 0,08
Resíduo + 14% Cimento	2,6	± 0,07
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	2,9	± 0,07
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	3,1	± 0,07
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	3,5	± 0,07

Fonte: Próprio autor

5.6.5 Resistência a compressão tijolos maciços

A Tabela 10 apresenta a composição seguida da resistência média em função da quantidade de resíduo e cinza.

O aumento da resistência do tijolo resíduo-cimento pode ser justificada pela presença de um material cimentante no resíduo de perfuração.

Nas formulações onde o cimento foi parcialmente substituído pela cinza podemos notar um acréscimo na resistência, podemos atribuir esse ganho a presença do óxido de silício que junto com óxido de alumínio da presença de água irá conferir ao material o efeito pozolânico. Pode ser considerada também a granulometria do cascalho bem graduado e a cinza com um maior teor de finos, o que corrobora para um melhor empacotamento das partículas ocasionando a redução dos vazios.

Conforme pode ser observado, que a resistência média dos tijolos, com e sem adição de cinza, em ensaio realizado após 14 dias de cura dos corpos-de-prova, atendeu às prescrições da NBR 8492. Esta norma prescreve um valor médio maior ou igual a 2,0 MPa aos sete dias. Todas as composições atenderam aos requisitos mínimos das normas brasileiras.

Tabela 10 - Resistência à compressão tijolos maciços

Dosagem - Tijolo Maciço	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão
Solo-cimento	4,34	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	6,21	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	7,94	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	5,33	± 0,03
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	3,64	± 0,03

Fonte: Próprio autor

5.6.6 Resistência à compressão tijolos vazados

A Tabela 11 apresenta a dosagem seguida da resistência média em função da quantidade do cascalho e cinza.

Os tijolos vazados mesmo possuindo a mesma formulação que os tijolos maciços apresentaram uma menor resistência que pode ser relacionada com a superfície específica dos tijolos, os dois furos do material ocasionam em maior possibilidade de trincas e fissuras. Mesmo apresentando uma menor resistência, todas as formulações atenderam a norma que estabelece 2,0MPa de resistência à compressão.

Tabela 11 - Resistência à compressão tijolos vazados

Dosagem - Tijolo Vazado	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão
Solo-cimento	4,14	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	5,19	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	5,60	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	4,15	± 0,03
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	3,10	± 0,03

Fonte: Próprio autor

5.6.7 Absorção de Água após esmalte tijolos maciços

Após avaliação de absorção de água, mesmo todas as formulações terem atendido as normas foi aplicado um esmalte nos tijolos (maciços e vazados) com objetivo de diminuir ainda mais a absorção e melhorar o

acabamento dos tijolos, para que ele possa ser utilizado de forma aparente, dispensando o uso de chapisco, emboço e reboco.

Na tabela 12 é apresentada a absorção dos tijolos maciços após o esmalte, podemos observar uma diminuição de absorção em todas as formulações em relação ao não esmaltado.

Tabela 12 - Absorção de Água após esmalte tijolos maciços

Dosagem - Tijolo Maciço Esmaltado	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	14,2	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	14,2	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	13,0	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	13,7	± 0,03
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	14,7	± 0,03

Fonte: Próprio autor

5.6.8 Absorção de Água após esmalte tijolos vazados

Na tabela 13 podemos observar também a diminuição da absorção de água dos tijolos vazados após aplicação do esmalte, que pode ser justificada pela película fina que o esmalte forma no material, impedindo que a água percole com maior facilidade no material.

Tabela 13 - Absorção de Água após esmalte tijolos vazados

Dosagem -Tijolo Esmaltado	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão
Solo-cimento	16,6	± 0,03
Resíduo + 14% Cimento	16,5	± 0,03
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	14,7	± 0,03
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	14,3	± 0,03
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	15,9	± 0,03

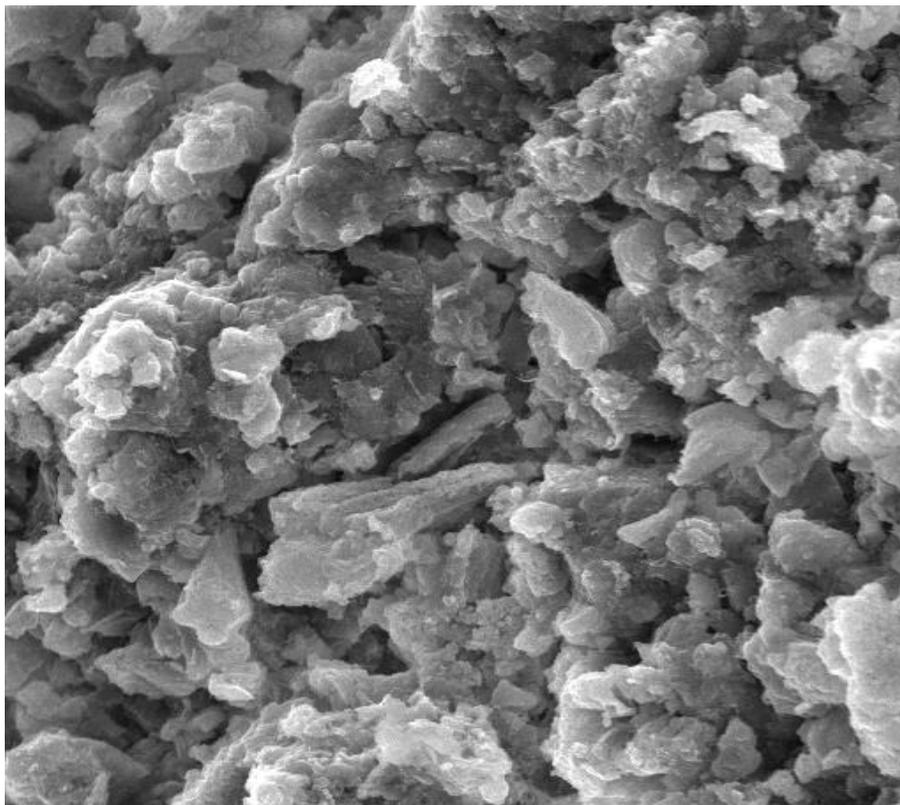
Fonte: Próprio autor

5.7 Análise da Superfície de Fratura

A Figura 24 a seguir, apresentam as micrografias das superfícies de fratura do corpo-de-prova referente ao melhor resultado obtido pela formulação com combinação ternária, resíduo-cimento, com os percentuais, em massa, de 12% de cimento e 2% de cinza.

As imagens reforçam os resultados obtidos anteriormente, ou seja, de desenvolvimento de uma boa homogeneidade física, principalmente pela boa distribuição granulométrica, o que pode ser comprovado pela uniformidade microestrutural evidenciada nas micrografias.

Figura 24 - Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 3000X.

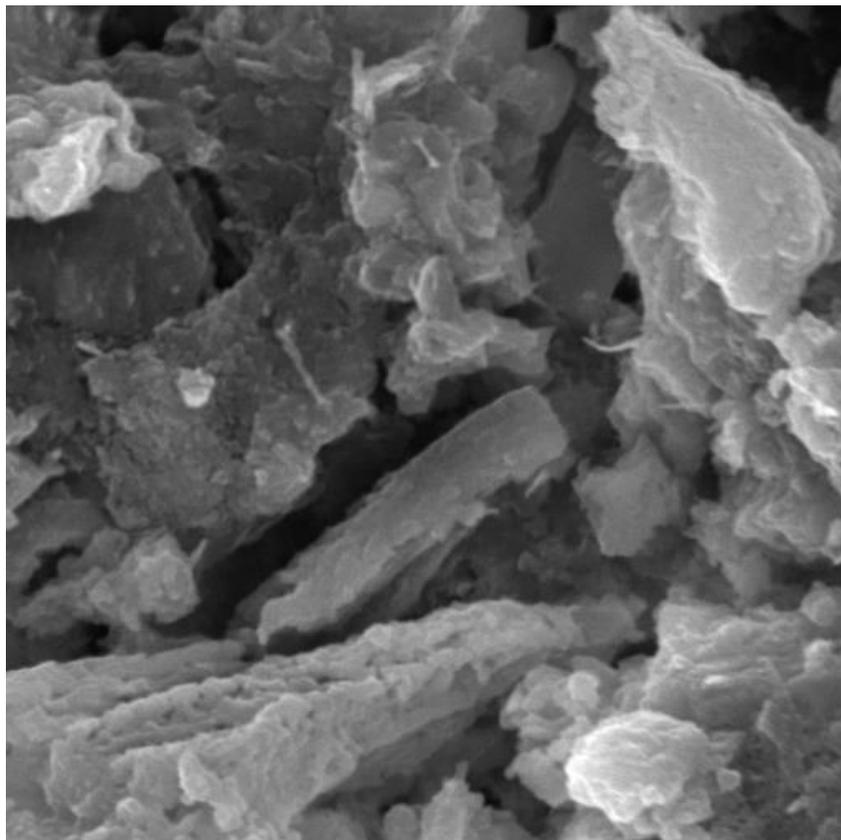


Fonte: Próprio autor

A microestrutura de um material, o tipo e distribuição das fases constituintes, tem uma ligação fundamental entre o processo de formação do material e suas propriedades (SCRIVENER *et al.*, 2004).

As micrografias mostram características gerais associadas com os produtos de hidratação do cimento. Cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, e de sulfoaluminato de cálcio hidratados mesmo nas primeiras idades foi constatada. As micrografias mostram a evolução dos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado, semelhante a folhas e os largos cristais prismáticos hexagonais que podem ser típicos da portlandita (hidróxido de cálcio) e do aluminato de cálcio hidratado (Figuras 25 e 26).

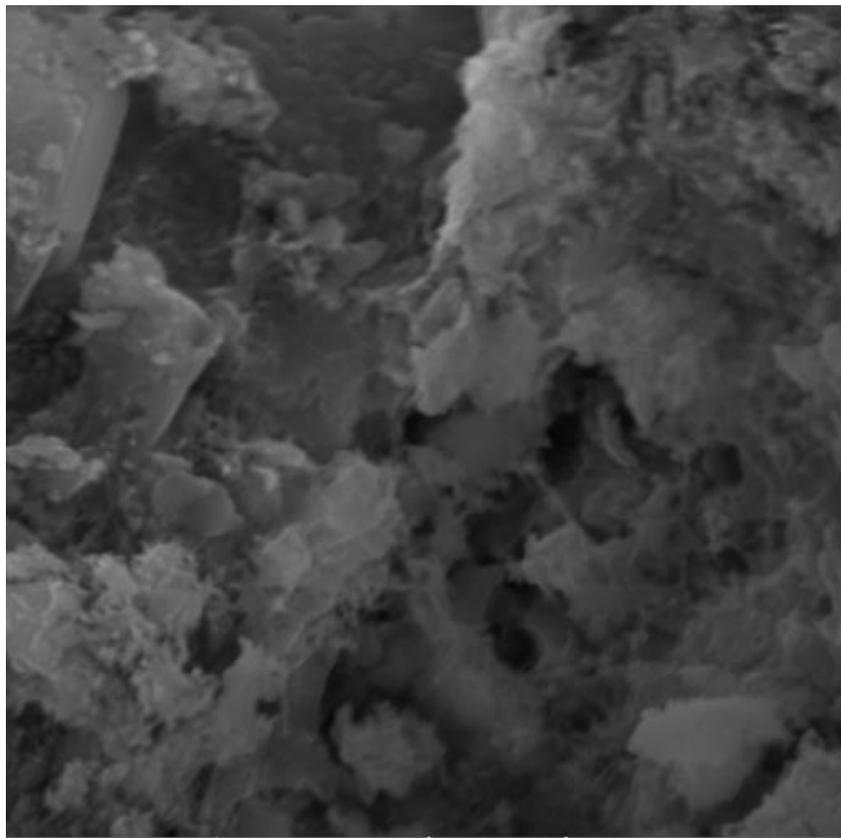
Figura 25 - Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 8000X.



Fonte: Próprio autor

Pode também ser observado que os tijolos apresentados são caracterizados por uma estrutura compacta. A estrutura dos poros dos percentuais avaliados em relação à referência não apresenta mudanças morfológicas acentuadas. Isto pode sugerir que a presença da CBC não influenciou negativamente na formação dos produtos de hidratação.

Figura 26 - Micrografia obtida por MEV, da superfície de fratura, com aumento de 500X.



Fonte: Próprio autor

5.8 Modelo de correlação entre propriedades mecânicas e reações químicas

Os silicatos de cálcio são praticamente os únicos responsáveis pelas características mecânicas medidas na pasta de cimento. Estes silicatos - C_3S e C_2S - perfazem cerca de 65 a 85 % da massa do cimento (Tipo I) e, na hidratação, formam o gel de C-S-H, o mais importante componente da pasta de cimento hidratada (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Visando simplificar o estudo da hidratação do cimento, é usual substituir o complexo sistema (água/cimento) pelo sistema (água/silicatos). A substituição é aceitável tendo em vista que os silicatos são os constituintes

mais efetivos por estarem presentes em maior proporção. A morfologia dos hidrossilicatos apresenta partículas fibrosas com dimensões de alguns microns que recobrem os grãos dos silicatos anidros. Em geral, o material é pouco cristalino e forma um sólido poroso que apresenta características de um gel rígido (NEVILLE, 1997).

Considerando que a composição química dos silicatos de cálcio hidratados varia com a relação (água/cimento), temperatura e idade de hidratação, tornou-se comum referir-se a esses hidrossilicatos simplesmente como C-S-H, uma notação que não implica em uma composição fixa.

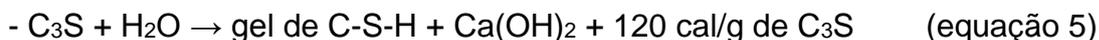
No caso da hidratação completa, a composição aproximada do material corresponde ao $C_3S_2H_3$, sendo esta composição então utilizada para cálculos estequiométricos.

Durante a hidratação, os microcristais de silicato de cálcio hidratado C-S-H, como pequenos filamentos de um feltro, surgem na superfície do cimento e cristalizam-se. No final da hidratação, já macrocristais, formam uma superfície específica total com cerca de $200 \text{ m}^2/\text{g}$ (POWERS, 1968).

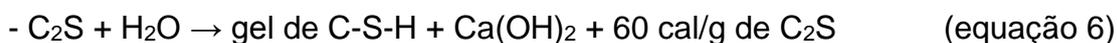
Dada a natureza da superfície de cristalização, os macrocristais aderem entre si e entrelaçam-se, aderindo também aos cristais do agregado, formando assim uma estrutura sólida.

Os componentes do cimento mais ricos em CaO reagem fortemente com a água produzindo o gel de C-S-H e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), liberando muito calor. O calor gerado na hidratação também é indiretamente responsável pela resistência mecânica da pasta, pois pode gerar microfissuras de retração térmica.

As reações principais responsáveis pela resistência mecânica segue abaixo (MEHTA & MONTEIRO,1994).



A equação 6 propicia alta resistência inicial e forte desprendimento de calor de hidratação (cerca de 80 % em 10 dias).



A equação 7 propicia lento e constante desenvolvimento de resistência e baixo calor de hidratação (cerca de 80 % em 100 dias).

Sabendo da formação do silicato de cálcio hidratado é um dos responsáveis pelo endurecimento da pasta foi possível relacionar o aumento significativo da resistência dos tijolos maciços e vazados. Mesmo com a substituição parcial do cimento pela CBC não houve diminuição da resistência, pois os componentes óxido de cálcio e sílica presentes no cascalho de perfuração e CBC possibilitaram a formação do silicato de cálcio hidratado, conforme visto nas figuras 28 e 29.

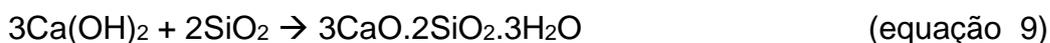
As reações envolvidas no processo de formação do silicato de cálcio hidratado pode ser representada como segue abaixo:



Além da formação do Ca (OH)₂ pelas reações de hidratação dos componentes do cimento (equações 5 e 6), pode haver a reação do CaO (equação 8) proveniente da cinza, conforme o DRX.



O CaO formado nestas reações poderá reagir com o SiO₂ presente tanto no resíduo de perfuração quanto na CBC, conforme reação pozolânica (equação 9). O maior efeito para a ocorrência desta reação com a adição da CBC, que possui fases metaestáveis da sílica, como a cristobalita e a tridimita, além de possivelmente ter um pouco de sílica amorfa, fases com uma maior reatividade.



O aumento da resistência pode está associado com uma maior formação de C-S-H, devido a reação pozolânica, com a adição da cinza.

Com a reação pozolânica ocorre uma redução do Ca(OH)₂ livre associado a um refino do tamanho dos poros, o que pode está contribuindo tanto para diminuir a absorção de água, quanto a resistência mecânica.

O não aumento da resistência mecânica com maiores teores de cinza pode está associado ao não incremento da formação do C-S-H pela reação pozolânica, pois 2% da CBC pode está fornecendo as quantidades estequiométricas necessárias para ocorrência da reação, estando a quantidade

de cinza adicional agindo apenas como enchimento (carga) na massa, sem contribuição efetiva para as propriedades mecânica

5.9 Custo dos tijolos maciços e vazados

A orçamentação consiste na verificação dos custos, é a parte de um plano financeiro estratégico que compreende a previsão de receitas e despesas futuras para a administração de determinado exercício (período de tempo).

Com objetivo de fazer o levantamento do custo dos tijolos maciços e vazados foi realizado um levantamento tomando como base o cimento utilizado, lembrando que os resíduos utilizados são descartados no meio ambiente e ainda não possuem valor comercial. Após cálculo da quantidade de cimento e o levantamento do custo do saco de 50kg foi elaborada a tabela com o custo. Conforme tabela 14 podemos observar que o tijolo varia de 0,03 a 0,07 centavos dependendo do percentual de cimento incorporado, ainda sem os valores de mão-de-obra e encargos sociais.

Tabela 14 – Tabela Custo dos tijolos maciços e vazados

Orçamento Tijolos	Valores (R\$)
Solo-cimento	0,07
Resíduo + 14% Cimento	0,07
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	0,05
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	0,04
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	0,03

Fonte: Próprio autor

Após o levantamento do custo foi realizado o cálculo do preço que é incorporado além dos valores gastos com materiais, a mão-de-obra, encargos sociais e BDI (Bonificação de Despesas Indiretas), conforme tabela 15 e cálculo com os insumos que incidem para o levantamento do preço.

Levantamento dos quantitativos para produção dos tijolos maciço de solo-cimento

Mão-de-obra – R\$ 3,68/hora (dado obtido no SINDUSCON/RN para a profissão de pedreiro);

Estimativa de produção da prensa manual – 100 unidades/hora;

Encargos sociais – 123,93%;

BDI – 5% do custo unitário;

Mão-de-obra: (R\$ 3,68/h)/100 unidade/hora = R\$ 0,0368

Custo unitário da mão de obra + encargos sociais:

R\$ 0,0368 x 2,2393 = R\$ 0,082

Custo unitário dos materiais + mão-de-obra

Custo unitário do tijolo + BDI

Tabela 15 – Tabela Custo dos tijolos maciços e vazados com BDI

Orçamento Tijolos	Valores (R\$)
Solo-cimento	0,16
Resíduo + 14% Cimento	0,16
Resíduo + 12% Cimento + 2% Cinza	0,14
Resíduo + 10% Cimento + 4% Cinza	0,13
Resíduo + 8% Cimento + 6% Cinza	0,12

Se levarmos em consideração que o milheiro de tijolo convencional custa em média 390,00 reais, o tijolo que mostrou-se com melhores resultados mecânicos foi a formulação com 2% de cinza, esse tijolo sairia o milheiro por 140,00 reais constata-se a viabilidade econômica do tijolos solo-cimento com

cascalho de perfuração e CBC para utilização em alvenaria sem fins estruturais.

Além de o valor ficar abaixo do tijolo convencional podemos ainda dispensar o chapisco, emboço e reboco, o que irá minimizar ainda mais os custos da obra, contribuindo também para um menor impacto ambiental.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÃO

6 CONCLUSÃO

Após análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados, conclui-se que:

— As análises granulométricas demonstraram que o cascalho de perfuração é um material bem graduado, possuindo vários tamanhos de partículas, já a CBC possui um alto teor de finos. Os resultados apresentados entre a CBC e o cascalho colaboram para um bom empacotamento das partículas na etapa de prensagem.

— Com relação as análises químicas os dois materiais apresentaram um alto teor de silício e alumínio que podem ser confirmadas na Difração de Raios X.

— Nos Difrátogramas de Raios X do cascalho de perfuração e da CBC ficou confirmada a presença de silício na fase quartzo.

— Nas micrografias do cascalho e da CBC foi possível confirmar os resultados das análises granulométricas, onde os materiais aparecem de forma bem graduada.

— A análise termogravimétrica do cascalho de perfuração mostrou que o material perde 9% de massa entre 100 a 700°C, já a cinza apresentou-se de forma estável perdendo apenas 1% de massa.

— O ensaio de resistência à compressão para os tijolos maciços e vazados a melhor formulação foi 86% resíduo, 12% cimento e 2% de cinza, onde o tijolo maciço

apresentou 7,94 MPa e o vazado 5,60MPa, as duas formulações atenderam acima do que é estabelecido na norma 8492 que é 2,0MPa.

— A incorporação do cascalho proveniente de poços de petróleo e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, na fabricação de tijolos de resíduo-cimento mostraram-se viáveis tecnicamente e pode configurar-se numa alternativa para o aproveitamento dos resíduos.

— Trata-se, portanto, de uma prática ecologicamente correta, pois pode contribuir no sentido de transformar materiais que seriam descartados na natureza em importante fonte de matéria-prima.

— Os tijolos produzidos com a incorporação do resíduo em estudo, tiveram suas propriedades mecânicas melhoradas e todos atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos nas normas brasileiras;

CAPÍTULO 7
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizando a mesma metodologia deste trabalho, inserir outras variáveis como: novas formulações das massas e diminuição do teor de cimento.
- Estudar a incorporação do resíduo de cascalho de perfuração em outros materiais, como: blocos intertravados e pisos.

REFERÊNCIAS

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Método de ensaio. São Paulo, 1984. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, RJ, 1996. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento**. Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8492: Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10835: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Forma e dimensões**. Padronização. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 2p..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11798: Materiais para sub-base ou base de solo-cimento.** Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1990. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5732: Cimento Portland Comum.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11578: Cimento Portland Composto.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5735: Cimento Portland de Alto Forno.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5736: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733: Cimento Portland de Alto Forno.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5737: Cimento Portland de Alta Resistência a Sulfatos.** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13116: Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação .** Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim Técnico 109. Aplicação de Solo-Cimento em Pequenas Áreas Urbanas. TEIXEIRA, Fernando José. São Paulo, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização de cimento portland**. 7 ed. – São Paulo,2002.

ALVES, M. R. F. V.; HOLANDA, J. N. F.. Reciclagem de Borra Oleosa através de Incorporação em Blocos Cerâmicos de Vedação. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 10, n. 3,2005.

ANGULO, S. C. et al. **Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD**. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 5, 2002, São Paulo. Anais: São Paulo: IBRACON/IPEN. 2002.

BARBOZA FILHO, M. P. & PRABHU, A. S. **Aplicação de silicato de cálcio na cultura do arroz** – Circular Técnica 51, Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 4 p, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Balanço nacional da cana-de-açúcar e agroenergia*. Brasília: MAPA/SPAE, 2007a.

Borlini, M.C., Mendonça, J. L. C. C., Vieira, C.M.F., Monteiro, S. N.(2006). Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e macroestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *Matéria (Rio J.)*, vol.11, nº 4, 433-441p.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. Tese de Doutorado, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 3 de ago. 2010.

CABRAL, K. C. Efeito da adição de cargas minerais leves na resistência mecânica de grautes para cimentação de poços offshore. 2011. 136f. Tese. (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

CALMON, João Luiz et. Al. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos solo-cimento**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído e Qualidade no Processo Construtivo. Florianópolis, 1998.

CEBRACE - Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares. **Solocimento na construção de escolas – SC01**. 2ª ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE, 1981. 39p. il. (sistemas construtivos 2).

CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CEPED). (1978). Manual prático de construção com solo-cimento. Camaçari. BNH / CEPED.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira, CASANOVA, Francisco José. **Um método físico químico para dosagem de solo-cimento**. In Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em geotecnia, 1988, RJ. Anais ... RJ: COPPE; ABMS; ABGE, 2V.1, p.191-200, 1988.

CHARLES, M.; SAYLE, S. Offshore Drill Cuttings Treatment Technology Evaluation. **SPE Publication 126333**. SPE International Conference on Health, Safety and Environmental in Oil and Gas Exploration and Production held in Rio de Janeiro, Brazil., 12-14 Abril, 2010.

COELHO, Antonio C. Vieira; SANTOS, Pérsio de Souza; SANTOS, Helena de Souza. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 1, fev. 2000.

CONCIANI, Wilson; OLIVEIRA, José Luis Malheiros de. **Moradias Populares – Opções para a melhoria da qualidade**, 2005.

CORDEIRO, G. C.(2006). **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 445p.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and limemortars. *Cement and Concrete Composities*, Barking, v. 30, p. 410-418. 2008

CORDEIRO, G.C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Caracterização de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar para Emprego como Pozzolana em Materiais Cimentícios**. 2009. Revista Química Nova, Vol. 32, nº 1.

CORDEIRO, G. C. TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine sugarcane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries: Revista do Ibracon de Estruturas e Materiais. Vol.3, n. 1, p.50-67, 2010.

FERRAZ, R. L. et. al. **Estudo comparativo de alguns métodos de dosagens de misturas solo-cimento**. Universidade Estadual de Maringá, 2001.

FIESP/CIESP (2001). Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar). São Paulo: FIESP/CIESP, 85p.

FIOMARI, M. C. *Análise energética e exergética de uma usina sucro-alcooleira do oestepaulista com sistema de co-geração de energia em expansão*. 2004. 130f. Dissertação(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

Freitas, E. S. (2005). **Caracterização de cinza de bagaço da Cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense- UENF. 81p.

FREITAS, J. C. O. **Adição de poliuretana em pastas de cimento para poços de petróleo como agente de correção do filtrado.** 2008. 87f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008;

GARCIA, R. L. P.; VAQUEIRO, R. L. C. **Viabilidade da aplicação das tecnologias landtreatment, dilution burial e roadspreading para disposição/remediação de cascalho de perfuração na UN-BA.** Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, 2001. Comunicação técnica CT BIO 88/2001

Gestão de Resíduos em Sondas de Perfuração. Revista Brasileira para Divulgação das Atividades de Responsabilidade Social no Setor de Óleo, Gás e Energia. TN Projetos Sociais, 2009.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** São Carlos, 2003. Dissertação.

GRIGOLI, A. S. Management in the production and utilization of the waste material in the construction site. CIB Symposium on construction & environment: theory into practice. Global Seven Editora Ltda. São Paulo, 2000.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 113p. Tese (Livre Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos**. In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: UNICAMP, 2003. cap.6, p.145-190.

LAURITZEN, E. K. The global challenge of recycled concrete. In: Use of recycled concrete aggregate. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998.

LEONARD, S.A.; STEGEMANN, J.A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**. v. 174. p. 463-472. 2010.

LOPES, Wilza Gomes Reis. **A taipa de mão no Brasil**. I SIACOT – I Seminário Ibero- Americano de construção com terra, Anais. 16-18 setembro de 2002. Salvador, Ba,Brasil.

LIMA, Heitor R. P. **Fundamentos de Perfuração**. Apostila do curso de formação de engenheiros de petróleo da Petrobras, Centro de Desenvolvimento de Recursos Humanos Norte-Nordeste, Salvador : 2001.

MARQUES, S.K.J. **Estudo da incorporação de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações para tijolos solo-cimento**. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. p - 83.

MARTINERA HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT RODRÍGUEZ, S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L. MACHADO LÓPEZ, I.; GONZÁLEZ LÓPEZ, R. Propiedades puzolánicas de desechos de La industria azucarera (primeira parte). *Materiales de Construcción*, v.50, n.260, p. 71-78,2000.

MEDEIROS, Leonardo Coutinho. **Adição de Cascalho de Perfuração da Bacia Potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos**: influência da concentração e da temperatura de queima. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em ciências e engenharia de materiais). Programas de Pós-Graduação em ciências e engenharia de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. **O Estado da Arte do Uso de Resíduos como Matérias-Primas Cerâmicas Alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2002.

MEHTA, P.K. Natural Pozzolan. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994;

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. Science Direct, Pergamon. Cement and Concrete Research 33, p. 1203 - 1210, 2003.

NEVES, Célia M.M. **Novos materiais para a melhoria da habitação popular**. Camaçari: CEPED – Centro de Pesquisas de Desenvolvimento, 1978.

NEVES, Célia M.M. **Soil cement as an environmental friendly building material**. In: SIMPOSIUM ON CONSTRUCTION E ENVIRONMENT THEORY INTO PRACTICE. 2000, São Paulo.

NEVILLE, Adam Mathew. Propriedades do concreto. Trad. Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

_____. **NBR 10004** - Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

NETTO, R. M. "Materiais Pozolânicos". 2006. 149f. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006

OLIVEIRA, M. P.; NOBREGA, A. F.; CAMPO, M. S.; BARBOSA, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. Conferência Brasileira De Materiais E Tecnologias Não-Convencionais: Habitação E Infraestrutura De Interesse Social Brasil – NOCMAT 2004, Pirassununga. Anais... Pirassununga: USP, 2004.

PAULA, M. O. de; TINÔCO. I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N. S.; SOUZA, C. F. (2009). **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n3/v13n03a19.pdf>>.

PAGE. P. W.; GREAVES. Chris.; LAWSON. R.; HAYES. Sean.; BOYLE, F. Options for the Recycling of Drill Cuttings. **SPE Publication 80583**. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental conference held in San Antonio, Texas, U.S.A., 10-12 March 2003.

PESSOA, Francisco Hélio Caiatano. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. Distrito Federal, 2004. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil Universidade de Brasília)

PETROBRAS. **Exploração e Produção de petróleo e gás**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

PINTO, C. P. *Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável*. 1999. 147f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PIRES, P. J. M.; JUNIOR, J. T. A.; ALEXENDRE, J. Reciclagem de Resíduo E&P como Material de Construção. TN Petróleo, n. 63, p.110-115, 2008.

PIRES, Patrício José Moreira. **Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha**. 2009. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

POWERS, C. The properties of fresh concrete. New York, 1968.

REIS, J. **Environmental Control in Petroleum Engineering**. 1st Ed, Houston, Texas, Gulf Publishing. 1996.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2004. 302p.

SANTOS, R. S.; SOUZA, G. P.; HOLANDA, J. N. F.. Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural. *Cerâmica*, São Paulo, v. 48, n. 307, 2002

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992, 408p.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva; CARVALHO, David de. **Comportamento de estacas de pequeno diâmetro de solo-cimento**. X COBRAMSEF – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu, nov. 1994 volume 1.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva; CARVALHO, David de. **Aplicação de solo-cimento em elementos de fundação. Evolução da Pesquisa em Ilha Solteira-SP**. Anais do 4º seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo. 17-20 jul 2000-b. p. 339-348.

SOUZA, P. A. B. F. Reciclagem como estratégia competitiva para a Indústria da construção civil. Congresso Brasileiro de Meio Ambiente, 2000, Fortaleza.

SOUZA, Z.; AZEVEDO, P. F. Geração de Energia Elétrica Excedente no Setor Sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. Rev. Econ. Sociol. Rural, Brasília, v. 44, n. 2, 2006.

SOUZA, G. N. et al. Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-Açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Anais. São Paulo: IBRACON, 2007.

SCRIVENER, K.L. et al. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. Cement and Concrete Research. v. 34, n. 9. p.1541–1547. 2004.

SUPERTOR. **O tijolo de solo cimento**. Catálogo de divulgação tecnológica. SUPERTOR – Máquinas e tecnologia em solo-cimento – Tijolos sem queima. [1989], Brasil.

SUSICH, M. L; SCHWENNE. Onshore Drilling Waste Management: Beneficial Reuse of Cuttings. **SPE Publication 86732**. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 29-31 March 2004, Calgary, Alberta, Canada.

THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

VARGAS, Milton. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

VAQUEIRO, R. L. C., ARARUNA Jr. J. T. e PIRES, P. J. M. The Use of Drilling Cuttings as Building Materials in Baiano, Brazil. **SPE Publication 98550**. SPE

International Conference on Health, Safety, and environment in Oil and Gas Exploration and Production held in Abu Dhabi, U.A.E, 2-4 April 2006.

ZARDO, A. M. **Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento.** I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Anais. São Paulo: 2004.