



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de Licenciatura

Aproveitamento do Bagaço de Cana-de-Açúcar para produção de Cimento Portland
de Cinzas Volantes

Autor(a)

Pedro, Rosa Luciano

Supervisor

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe, Eng^o.

Maputo, Abril de 2022

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de Licenciatura

Aproveitamento do Bagaço de Cana-de-Açúcar para produção de Cimento Portland
de Cinzas Volantes

Autor(a)

Pedro, Rosa Luciano

Supervisor

Doutor Eng^o. Jonas Valente Matsinhe

Maputo, Abril de 2022

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho com muito amor e carinho á aqueles cuja presença constante dá-me forças pra enfrentar qualquer obstáculo e caminhar rumo aos meus sonhos e objectivos pessoais e profissionais, meus pais **Luciano** e **Graciete** e meus irmãos **Carla** e **Nelson**.*

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço á Deus, por ter-me dado forças para enfrentar cada obstáculo encontrado ao longo da minha caminhada de vida, em geral, e estudantil, em particular.

Ao Professor Doutor Eng^o. Jonas Valente Matsinhe, meu supervisor, que no meio de tantos compromissos, ajudou-me, dispondo-se a orientar este trabalho.

Á Direcção do Laboratório de Engenharia de Moçambique, por disponibilizar o seu laboratório para a realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Eng^o.José Alberto Tsambo, Sra Amélia Matabele, técnicos do Laboratório de cimento e ligantes hidráulicos do Laboratório de Engenharia de Moçambique,EP , pela colaboração ao longo da pesquisa.

Ao empreendedor Jojo, por disponibilizar matéria-prima essencial para a realização do trabalho.

À Direcção da Cimento Nacional, por disponibilizar matéria-prima fundamental para a realização do trabalho e o seu laboratório para a realização de ensaios laboratoriais.

Aos técnicos do Laboratório de Controlo de Qualidade da Cimento Nacional, e aos demais funcionários da mesma, pela colaboração ao longo da pesquisa.

Aos colegas, docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia especialmente aos pertencentes ao Departamento de Engenharia Química.

Aos meus colegas e companheiros de batalha ao longo do curso Claudina Hagenimana, Lemos Mahumane e Zila Cuambe.

Aos meus progenitores Luciano Pedro e Graciete Inês, pela bênção de me ter colocado nesse mundo, e por me tornarem na pessoa que hoje sou.

Aos meus irmãos Carla Luciano e Nelson Pedro, pelas palavras de força e consolo, por acreditarem no meu potencial.

Ao meu namorado Edson Mandane pelo apoio incondicional ao longo da minha caminhada durante o curso de Engenharia do Ambiente e durante a elaboração do presente trabalho.

E a minha mana, Benigna Mussane pela companhia e pelo apoio directo e indirecto, na minha caminhada de vida.

Muito Obrigado!

RESUMO

Como forma de reciclar o bagaço de cana-de-açúcar descartados pelos vendedores de sumo de cana-de-açúcar, o presente trabalho tem em vista o aproveitamento desse bagaço na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes. Inicialmente foi preparado a CBCA (cinza de bagaço de cana-de-açúcar) para incorporação na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes. Em seguida, foi produzido 6 amostras de cimento de acordo com as especificações presentes na norma NP EN 197-1:2017, as quais tiveram a seguinte designação e composição: A-Padrão composto por 100%Clínquer; A-6 composto por 94%Clínquer e 6%CBCA; A-13 composto por 87%Clínquer e 13%CBCA; A-20 composto por 80%Clínquer e 20%CBCA; A-27 composto por 73%Clínquer e 27%CBCA; A-34 composto por 66%Clínquer e 34%CBCA, onde foi adicionada 5% de gesso na composição do clínquer de modo a regular o tempo de presa. Em seguida, foi determinado as propriedades físicas e mecânicas das amostras de Cimento Portland e Cimento Portland de Cinzas Volantes produzidas em escala laboratorial de acordo com métodos de ensaios de cimentos definidos na norma NP EN 196. Embora os resultados experimentais obtidos através de ensaios mecânicos e físicos demonstrem o enfraquecimento de algumas propriedades, os mesmos encontram-se dentro dos limites aceitáveis pela norma NP EN 197-1:2017. O bagaço de cana-de-açúcar pode ser aproveitado sob a forma de cinzas como constituinte principal para incorporar na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes, pois foi possível a produção de cimento enquadrados nas classes de 32,5N e 42,5N. A incorporação de CBCA ótima foi de 27%, visto que os resultados das resistências mecânicas a uma composição superior á 27% de CBCA não foram satisfatórios, não podendo ser enquadrado em nenhuma das classes de resistência prevista para cimento corrente.

Palavras-chave: Aproveitamento, CBCA, produção, Cimento Portland e Cimento Portland de Cinzas Volantes.

ABSTRACT

As a way to recycle the sugarcane bagasse discarded by sugarcane juice sellers, the present work has in view the use of this bagasse in the production of Portland Cement of Cinzas Volantes. Initially, CBCA (sugarcane bagasse ash) was prepared for incorporation in the production of Portland Cement from Ash Volantes. Then, 6 cement samples were produced in accordance with the specifications present in the NP EN 197-1:2017 standard, which had the following designation and composition: A-Standard composed of 100%Clinker; A-6 composed of 94%Clinker and 6%CBCA; A-13 composed of 87%Clinker and 13%CBCA; A-20 composed of 80%Clinker and 20%CBCA; A-27 composed of 73%Clinker and 27%CBCA; A-34 composed of 66%Clinker and 34%CBCA, where 5% of gypsum was added in the clinker composition in order to regulate the setting time. Then, the physical and mechanical properties of Portland Cement and Fly Ash Portland Cement samples produced on a laboratory scale were determined in accordance with cement testing methods defined in the NP EN 196 standard. Demonstrate the weakening of some properties, they are within the acceptable limits according to the NP EN 197-1:2017 standard. Sugarcane bagasse can be used in the form of ash as the main constituent to be incorporated in the production of Portland Cement with Fly Ash, as it was possible to produce cement classified in the 32.5N and 42.5N classes. The incorporation of optimal CBCA was 27%, since the results of mechanical resistance to a composition greater than 27% of CBCA were not satisfactory, and cannot be included in any of the classes of resistance predicted for current cement.

Keywords: Recycling, CBCA, production, Portland cement and fly ash Portland cement.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa.....	3
1.2	Objectivos.....	3
1.2.1	Objectivo Geral.....	3
1.2.2	Objectivo Específico.....	3
1.3	Metodologia.....	4
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1	Cana-de-açúcar.....	5
2.1.1	Produção do sumo de cana-de-açúcar.....	5
2.1.2	Destino final do Bagaço de Cana-de-açúcar.....	7
2.1.3	Influência das CBCA nas propriedades do cimento.....	8
2.2	Cimento.....	11
2.2.1	Processo de Produção do Cimento Portland.....	11
2.2.2	Propriedades Físicas e Mecânicas do Cimento Portland.....	13
3	PARTE EXPERIMENTAL.....	15
3.1	Preparação da matéria-prima.....	15
3.1.1	Preparação do cimento Portland.....	15
3.1.2	Preparação da CBCA.....	16
3.2	Preparação das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes.....	17
3.2.1	Materiais Usados.....	18
3.2.2	Procedimentos.....	18
3.3	Determinação das propriedades mecânicas.....	18
3.3.1	Preparação dos Provetes.....	18
3.3.2	Resistência á flexão e compressão.....	22
3.4	Determinação das Propriedades Físicas.....	23
3.4.1	Determinação da Finura.....	23
3.4.2	Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade.....	27
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	31

4.1	Propriedades Mecânicas	31
4.2	Propriedades Físicas.....	32
4.2.1	Finura.....	32
4.2.2	Tempos de presa	33
4.2.3	Expansibilidade.....	33
4.3	Classificação do Cimento Portland de Cinzas Volantes	34
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	35
5.1	Conclusões.....	35
5.2	Recomendações.....	36
6	BIBLIOGRAFIA.....	37
6.1	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS.....	37
6.2	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	40
7	ANEXOS.....	0
7.1	ANEXO 1	1
	ANEXO 2-Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos especificados(NP EN 197-1)	2
	ANEXO 3-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-Padrão.....	3
7.1.1	Resultados dos ensaios mecânicos.....	3
7.1.2	Resultados dos ensaios físicos.....	4
	ANEXO 4-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-6	8
7.1.3	Resultados dos ensaios mecânicos.....	8
7.1.4	Resultados dos ensaios físicos.....	9
	ANEXO 5-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-13	13
7.1.5	Resultados dos ensaios mecânicos.....	13
7.1.6	Resultados dos ensaios físicos.....	14
	ANEXO 6-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-20	18
7.1.7	Resultados dos ensaios mecânicos.....	18
7.1.8	Resultados dos ensaios físicos.....	19
	ANEXO 7-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-27	23

7.1.9	Resultados dos ensaios mecânicos.....	23
7.1.10	Resultados dos ensaios físicos.....	24
ANEXO 8-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-34		28
7.1.11	Resultados dos ensaios mecânicos.....	28
7.1.12	Resultados dos ensaios físicos.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS

AMOR- Associação Moçambicana de Reciclagem;

BCA- Bagaço de Cana-de-Açúcar;

CBCA- Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar;

CEN- Comité Europeu de Normalização;

CEM- Cement (Cimento- Português);

EN- European norm (Norma europeia- Português);

FUNAE- Fundo Nacional de Energia;

LEM, EP- Laboratório de Engenharia de Moçambique, EP;

NP-Norma Portuguesa;

RSU- Resíduos Sólidos Urbanos;

UNEP- United Nations Environment Programme (Programa das Nações Unidas para o Ambiente- Português).

LISTA DE SÍMBOLOS

M₂- Massa do cimento;

ρ- Densidade;

V- Volume total da célula;

S- Área específica;

K- Constante do aparelho;

t- Tempo de escoamento;

T- Temperatura;

°C- Graus celsius.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Cana de-açúcar(Fonte: Google Photos)	5
Figura 2 -Empreendedor produzindo sumo de cana-de-açúcar.(Fonte:Google Photos) .	6
Figura 3 -Bagaço de Cana-de-Açúcar (Fonte:Google Photos)	6
Figura 4 -Fluxo básico da produção do cimento	13
Figura 5 -Produtos usados para produção de Cimento Portland(A-Clínquer; B-Gesso).	15
Figura 6 -Moínho de bolas.....	16
Figura 7 -Amostra de cimento após a primeira moagem	16
Figura 8 -Pré-calцинаção do BCA	17
Figura 9 - BCA pré-calcinado.....	17
Figura 10 - CBCA após á moagem.....	17
Figura 11 - Misturadora de argamassa e pasta de cimento.....	19
Figura 12 - Molde e prolonga fixados na compactador.....	20
Figura 13 - Molde prismáticos contendo argamassa após a compactação.	20
Figura 14 -Conservação dos moldes contendo os provetes (A-Moldes prismáticos contendo argamassas a dentro da Câmara de cura; B- Câmara de cura.)	21
Figura 15 -Provetes desmoldados e após 24h de cura devidamente identificados.	21
Figura 16 -Processo após a desmoldagem dos provetes (A-Provetes submersos em água//B-Tanque de água).....	22
Figura 17 - Prensa hidráulica para ensaio de resistência à flexão e resistência à compressão.....	23
Figura 18 -Provetes prismáticos após ruptura (A-Provetes prismático após ensaio de flexão//B-Provetes prismático após ensaio de compressão).	23
Figura 19 -Aparelho de peneiração por jato de ar.	24
Figura 20 -Tabuleiros contendo amostra de cimento na estufa para secagem com ventilação.	25
Figura 21 -Frasco volumétrico de Le Chatelier contendo petróleo e 65g de cimento. ...	26
Figura 22 -Aparelho blaine.....	27
Figura 23 -Aparelho de vicat com o molde de vicat e a sonda na posição de espera para determinação de: A-Consistência normal; B-Tempo de início de presa e C- Tempo de fim de presa.....	29
Figura 24 - Molde de Le Chatelier, placa de vidro e peso de 100g.....	30
Figura 25 -Banho-Maria contendo molde de Le Chatelier.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química das CBCA segundo diferentes autores.....	11
Tabela 2- Proporção de cimento portland e CBCA para preparação das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes.	18
Tabela 3- Resultados da finura para as 6 amostras em estudo.	32
Tabela 4- Resultados de tempos de presa para as 6 amostras em estudo.	33
Tabela 5- Resultados da Expansibilidade das amostras de cimento em estudo.....	34
Tabela 6- Os 27 produtos da família de cimento corrente(NP EN 197-1)	1
Tabela 7- Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos especificados.....	2
Tabela 8- Composição da amassadura.	3
Tabela 9- Resultados dos ensaios de flexão.....	3
Tabela 10- Resultados de ensaio de compressão.	4
Tabela 11- Resultados dos ensaios de resíduo	4
Tabela 12- Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade	6
Tabela 13- Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.	6
Tabela 14- Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.	7
Tabela 15- Resultados para ensaio de determinação de expansibilidade.	7
Tabela 16- Composição da amassadura.	8
Tabela 17- Resultados dos ensaios de flexão.....	8
Tabela 18- Resultados de ensaio de compressão.	9
Tabela 19- Resultados para ensaio de determinação de resíduo.....	9
Tabela 20- Resultados do ensaio para determinação de massa volúmica.	10
Tabela 21- Resultados de ensaio para determinação de área específica.....	10
Tabela 22- Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade.	11
Tabela 23- Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.	11
Tabela 24- Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.	12
Tabela 25- Resultados do ensaio para determinação de expansibilidade.	12
Tabela 26- Composição da amassadura.	13
Tabela 27- Resultados dos ensaios de flexão.....	13
Tabela 28- Resultados de ensaio de compressão.	14
Tabela 29- Resultados para determinação do resíduo.	14
Tabela 30- Resultados para ensaio de detrminação da massa volúmica.	15
Tabela 31- Resultados dos ensaios para determinação da área específica.	15

Tabela 32- Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade.	16
Tabela 33- Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.	16
Tabela 34- Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.	17
Tabela 35- Resultados do ensaio para determinação da expansibilidade.	17
Tabela 36- Composição da amassadura.	18
Tabela 37- Resultados dos ensaios de flexão.....	18
Tabela 38- Resultados de ensaio de compressão.	19
Tabela 39- Resultados do ensaio para determinação de resíduo.....	19
Tabela 40- Resultados para determinação do teor de humidade.....	21
Tabela 41- Resultados do ensaio para determinação de consistência normal.	21
Tabela 42- Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.	22
Tabela 43- Resultados de ensaio para determinação de expansibilidade.	22
Tabela 44- Composição da amassadura.	23
Tabela 45- Resultados dos ensaios de flexão.....	23
Tabela 46- Resultados de ensaio de compressão.	24
Tabela 47- Resultados do ensaio para determinação da massa volúmica.	25
Tabela 48- Resultados do ensaio para determinação de área específica.....	25
Tabela 49- Composição da amassadura.	28
Tabela 50- Resultados dos ensaios de flexão.....	28
Tabela 51- Resultados de ensaio de compressão.	29
Tabela 52- Resultados da determinação de massa volúmica	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resultados da Resistência á Flexão em função da idade dos provetes.	31
Gráfico 2- Resultados da Resistência á Compressão em função da idade dos provetes.	31

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos no país é um grande desafio devido às dificuldades técnicas de organização da recolha e deposição final de resíduos, à falta de recursos financeiros e humanos destinados ao sector e à fraca cobertura dos serviços. Segundo o decreto nº 94/2014-Regulamento sobre a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos, constitui responsabilidade do Conselho Municipal e Governo Distrital, a implementação dos sistemas de recolha e tratamento de resíduos sólidos e limpeza pública. Porém, no país, a reciclagem é feita de forma muito limitada, normalmente no âmbito de projectos ou iniciativas individuais (Chandamela, 2019)

Em Moçambique existe pouca informação disponível sobre a quantidade de resíduos sólidos. Contudo, a produção de resíduos sólidos em Moçambique pode ser estimada à 2 milhões de toneladas por ano, com 60% dos resíduos orgânicos maioritariamente gerados por actividades comerciais, que por sua vez são depositados nas lixeiras a céu aberto sem nenhum controle e tratamento. (AMOR e Carbon Africa, 2014)

Dentre várias actividades comerciais que contribuem significativamente para a geração de resíduos sólidos, a produção de sumo de cana-de-açúcar tem crescido de forma considerável e sendo desenvolvida em diversos pontos de fluxo de pessoas, consequentemente tem gerado grandes quantidades de resíduos sólidos.

O trabalho a desenvolver tem em vista o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar como constituinte principal para incorporação na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes, como forma de reciclar o bagaço de cana-de-açúcar descartados pelos vendedores de sumo de cana-de-açúcar.

Neste trabalho, será produzidas amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes de acordo com as especificações presentes na norma NP EN 197-1:2017, no qual terá como matéria-prima o Clínquer, o Gesso e a CBCA. Será feita a avaliação das propriedades físicas e mecânicas de amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes produzidas em escala laboratorial de acordo com métodos de ensaios de cimentos definidos na norma NM NP EN 196 de modo a determinar a qualidade dos mesmos. E por fim, classificar-se-á os resultados dos ensaios físicos e mecânicos obtidos de acordo com os requisitos definidos na norma NP EN 197-2017.

O actual capítulo aborda as considerações iniciais a respeito do tema deste trabalho, ou seja, apresenta a proposta de trabalho, delimitando o tema.

O capítulo dois aborda a revisão da literatura para aprofundar nos conhecimentos necessários para fazer o que foi proposto no capítulo anterior.

O capítulo três estão descritos os procedimentos experimentais que foram executados para a obtenção de dados precisos e fiáveis. Os procedimentos experimentais vão desde a produção de Cimento Portland e Cimento Portland de Cinzas Volantes, até a classificação dos mesmos segundo os requisitos definidos na norma EN NP 197-1.

No capítulo seguinte estão apresentadas de uma forma mais didática, os resultados adquiridos no tópico anterior, mostrando-os de forma compilada, simples e directa, evidenciando assim as comparações e respostas a serem retiradas de tais análises, discutindo-as com os resultados encontrados por outros autores.

No capítulo cinco, aborda de maneira sucinta as conclusões em resposta aos objectivos traçados em função dos resultados encontrados e são apresentadas sugestões e estudos que podem ser feitos a fim de que complementar o tema em estudo.

No capítulo seis está apresentada a bibliografia que foi usada e consultada para elaboração do trabalho.

Por fim, nos anexos estão apresentados todos os resultados obtidos e os seus respectivos cálculos.

1.1 Justificativa

A grande disponibilidade de resíduos sólidos, tem motivado inúmeras pesquisas para cumprir-se com a hierarquia de gestão de resíduos sólidos que consiste na sequência adequada para gestão de resíduos sólidos (prevenção <redução <reutilização <reciclagem <valorização energética <deposição final), de modo a alcançar o objectivo 12 (garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis, tem como meta 12.5- Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização) dos 17 Objectivos de Desenvolvimento Sustentável definidos na Agenda 2030. Neste contexto, o trabalho proposto pretende aproveitar o bagaço de cana-de-açúcar que tem sido descartado pelos vendedores de sumo de cana-de-açúcar nos contentores de lixo e por fim é depositado nas grandes lixeiras pelo Conselho Municipal, sem obedecer a hierarquia dos resíduos sólidos contribuindo para grande disponibilidade de resíduos sólidos no País e no agravamento dos problemas associados a má gestão dos resíduos sólidos.

Dentre várias alternativas que tem sido estudadas para aproveitar o bagaço de cana-de-açúcar, a incorporação da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes é a melhor alternativa pois, 100% do resíduo é reciclado, o emprego de cinzas tende a promover melhorias nas propriedades do cimento e por outro lado reduz a produção e consumo de clínquer desta forma reduzindo os problemas ambientais associados á produção de clínquer.

1.2 Objectivos

1.2.1 Objectivo Geral

- Aproveitar o Bagaço de Cana-de-Açúcar na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes.

1.2.2 Objectivo Específico

- Produzir Cimento Portland de Cinzas Volantes em escala laboratorial com a incorporação de cinza de bagaço de cana-de-açúcar;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas do cimento produzido com a incorporação de Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar;
- Classificar o cimento com base nos resultados dos ensaios físicos e mecânicos obtidos de acordo com os requisitos definidos na norma NP EN 197-2017.

1.3 Metodologia

Para a realização do trabalho, recorreu-se a pesquisa qualitativa e quantitativa de modo a reunir dados necessários para a consecução do mesmo.

Na pesquisa qualitativa fez-se análise e combinação de conteúdos disponíveis em bibliografias tornadas públicas, como livros e artigos científicos referentes ao tema em estudo.

Na pesquisa quantitativa, fez-se a recolha de dados por meio de experiência laboratorial, de modo a obter dados fiáveis e precisos. No qual produziu-se uma amostra de Cimento Portland e cinco amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes e determinou-se as propriedades mecânicas (Resistência à Flexão e Resistência à Compressão) e propriedades físicas (Finura pelo método de peneiração e pelo método de Blaine, Teor de humidade, Tempos de presa e Expansibilidade).

Para a produção das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes, foi inicialmente produzido o Cimento Portland, de seguida misturou-se o Cimento Portland com as CBCA para a produção das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes, no qual a dosagem foi feita com base na Tabela 6 (Anexo 1).

A parte experimental do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Engenharia de Moçambique-LEM,EP. Porém, a colheita da matéria-prima (Clínquer e Gesso) para preparação do Cimento Portland e moagem dos mesmos foi feita no depósito da área fabril da Cimento Nacional no Laboratório de Controlo e Qualidade da Cimento Nacional, respectivamente.

O bagaço de cana-de-açúcar foi fornecido por um vendedor de sumo de cana-de-açúcar.

A preparação da CBCA, a produção das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes e os ensaios mecânicos e físicos foram feitos no Laboratório de Cimentos e Ligantes Hidráulicos do LEM,EP.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cana-de-açúcar

Cana-de-açúcar – é uma planta herbácea, cespitosa, da família das Gramíneas, nativa da Ásia e bastante cultivada em diferentes regiões tropicais e subtropicais, tem colmos lenhosos, grossos e elevados, folhas lineares e flores purpúreas dispostas em panículas piramidais. (Infopedia, 2021) É também conhecida como Cana-Doce e Cana-Sacarina (Figura 1).



Figura 1-Cana de-açúcar (Fonte: *Google Photos*)

A cana-de-açúcar é uma espécie de grande importância socioeconômica, por ser uma cultura de pequenos, médios e grandes produtores, e por apresentar enorme capacidade de agregação de valor à produção. A partir da cana-de-açúcar uma grande quantidade de produtos podem ser gerados, sendo o açúcar, o álcool, o suco natural, aguardente, rapadura, vinhaça e melado. (Harter, et al., 2016)

2.1.1 Produção do sumo de cana-de-açúcar

A produção de sumo de cana-de-açúcar é desenvolvida por jovens empreendedores nos mercados, nas paragens e terminais de transporte rodoviário, próximos as escolas, no calçadão das praias entre outros locais que há movimentação de pessoas.

Para a produção de sumo de cana-de-açúcar, primeiramente é feita a limpeza da mesma, que consiste na raspagem da parte externa da cana-de-açúcar com auxílio de uma faca. Em seguida, é feita a extração da parte líquida da cana-de-açúcar (Figura 2) por meio de um espremedor manual, designado por máquina de sumo de cana, e por fim pode ser adicionado limão, gengibre e gelo ao sumo de cana-de-açúcar. São necessários em média 1m de cana-de-açúcar para produção de 500ml de sumo de cana-de-açúcar.



Figura 2-Empreendedor produzindo sumo de cana-de-açúcar. (Fonte: *Google Photos*)

A produção de sumo de cana-de-açúcar gera bagaço de cana-de-açúcar (Figura 3) que é a parte sólida da cana-de-açúcar e constitui cerca de 30% da cana-de-açúcar.



Figura 3-Bagaço de Cana-de-Açúcar (Fonte:*Google Photos*)

O bagaço de cana-de-açúcar juntamente com outros resíduos sólidos é descartado nos contentores de lixo, que posteriormente é depositado nas grandes lixeiras contribuindo para os principais problemas que se verificam nas grandes lixeiras, nomeadamente:

- Emissão de biogás devido à decomposição da matéria orgânica contida nos RSU, que posteriormente promove a autocombustão;
- Acesso de diversos animais/pragas, que são vectores de proliferação de doenças, atraídos pela matéria orgânica;
- Infiltração da água da chuva pela massa de resíduos, que em conjugação com a água resultante da degradação da matéria orgânica, produz o lixiviado;
- A produção de lixiviado conduz à contaminação do solo e da água subterrânea através da infiltração, e também à contaminação da água superficial através das escorrências superficiais. Lixiviado pode contaminar poços e linhas de água usada para o consumo humano.

2.1.2 Destino final do Bagaço de Cana-de-açúcar

Actualmente têm sido utilizadas, ou estudadas, alternativas para dar destino final ambientalmente adequado ao bagaço de cana-de-açúcar com o objectivo de reduzir o excesso de RSU disponíveis, nomeadamente:

- Deposição final do bagaço de cana-de-açúcar em aterros sanitários

De acordo com o regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos n° 94/2014, a deposição final de RSU deve ser efectuada em aterros sanitários ou controlados. Porém em Moçambique, a deposição final do bagaço de cana-de-açúcar é efectuada nas grandes lixeiras juntamente com outros RSU, onde são depositadas a céu aberto, sem o uso de qualquer sistema de protecção ambiental, ou de controlo de operações, ou qualquer outra norma utilizada actualmente nos aterros sanitários. Este facto ocorre devido a falta de aterros sanitários disponíveis para o efeito, como consequência de dificuldades financeiras para a implantação de aterros no país e com a incompleta e desactualizada legislação em vigor. (UNEP, et al., 2018)

Aterro sanitário é um local preparado de acordo com princípios de engenharia, concebido para a deposição final de resíduos, e que permite mantê-los confinados de forma segura numa menor área e volume possíveis, cobrindo-os com uma camada de terra diária (ou com frequência regular), permitindo assim o controlo da poluição ambiental e a promovendo a protecção da saúde pública. O mesmo exige uma grande extensão de área para a sua implantação, grandes recursos financeiros e possui um tempo de vida útil.

Actualmente, estão sendo desenvolvidos projectos de implantação de um aterro sanitário com geração de biogás (para Nampula) com capacidade para 500 Ton/dia de RSU, outro aterro sanitário-biorreactor para a área Metropolitana de Maputo (Maputo, Matola e Boane), com uma capacidade de 1500 Ton/dia. (UNEP, et al., 2018)

- Valorização energética do bagaço de cana-de-açúcar

A valorização energética é um conjunto de processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos resíduos sólidos.

Na indústria açucareira, o bagaço de cana-de-açúcar é utilizado para produzir energia em cogeração, fornecendo vapor para o processo fabril e para a produção de electricidade. (FUNAE, 2021)

Este processo tem como resíduos a CBCA que são usadas como fertilizantes nos campos de cultivo de cana-de-açúcar, como fonte de nutriente, especialmente o potássio e atenuante da acidez do solo. (Assunção, 2015)

A presença de CBCA altera a composição química do solo aumentando a concentração de cálcio, magnésio, fósforo, nitrato e potássio e, quando ocorre o escoamento superficial após uma chuva, substâncias presente na CBCA atingem as águas subterrâneas e superficiais, contaminando-as. Compostos nitrogenados e potássio, especialmente, se solubilizam na água e, em altas concentrações, se tornam tóxicos às espécies aquáticas e aos organismos do solo e também afectam a qualidade da água. (Brito, 2019)

- Reciclagem de bagaço de cana-de-açúcar

A reciclagem, tem sido a melhor solução para reduzir os resíduos sólidos, e até gerar algum retorno financeiro para o produtor quando transforma esse resíduo num subproduto.

Alguns resíduos sólidos como o bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, lodo têxtil podem ser utilizados como matéria-prima para fabricação de materiais usados na construção civil devido ao seu índice de actividade pozolânica. (Armange, 2005)

2.1.3 Influência das CBCA nas propriedades do cimento

A produção de sumo de cana-de-açúcar gera resíduo sólido, bagaço de cana-de-açúcar, que se submetidos à temperatura de 700°C produz sólidos inertes, denominados “cinzas”, que podem ser utilizadas como constituinte principal na produção de cimento. Em média 1 kg de BCA produz cerca de 100 g de CBCA. (Oliveira, et al., 2017)

2.1.3.1 Propriedades Físicas e Químicas da CBCA

a) Propriedades físicas

A maioria das partículas têm um diâmetro compreendido entre menos de 1µm e 150 µm, podendo ser mais finas ou mais grossas do que as de cimento. O diâmetro médio das partículas de CBCA é menor que 5 µm, inferior que o diâmetro médio do cimento que

varia entre 7 μ m e 12 μ m. A superfície específica, aferida pelo método de Blaine, varia, em geral, de 250 m²/kg a 550 m²/kg (Azevedo, 2002).

As partículas com dimensões superiores a 125 μ m são muito porosas. A ocorrência destas partículas está associada a grandes quantidades de carbono. Este material não queimado é responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes. Como consequência, elevados teores de carbono implicam maior exigência de água em betões contendo CBCA. O teor de carbono também interfere na resistência: quanto maior for o teor de carbono das cinzas, menor é a resistência do betão (Alonso et al, 1991).

As CBCA devem apresentar granulometria e superfície específica semelhante ou inferior à do cimento, de modo a evitar variações nas propriedades físicas da massa resultante da aplicação do mesmo. (Chin, 2011)

b) Propriedades químicas

A grande maioria apresenta como principais constituintes compostos químicos e cristais de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃) e cal (CaO). Em quantidades substancialmente inferiores, existem outros componentes como MgO, Na₂O, K₂O, MnO e TiO₂.

Segundo a norma NP EN 196-5 a pozolanicidade é determinada comparando a concentração de ião cálcio, expresso em óxido de cálcio, presente na solução aquosa em contacto com o cimento hidratado, depois de um período de tempo determinado, com a quantidade de ião cálcio que faz saturar uma solução da mesma alcalinidade. A pozolanicidade das cinzas está intimamente relacionada com o teor de SiO₂, visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H. Cinzas com conteúdos de SiO₂ inferiores a 35% são praticamente inactivas como pozolanas e não devem ser incorporadas no betão ou na preparação de algum material cimentício. (Coutinho, 2006)

Em geral, o teor de carbono não é quantificado directamente, mas sim recorrendo à determinação do teor em não queimado (perda ao fogo). O teor de material não queimado inclui, além do carbono livre, perdas de água combinada e dióxido de carbono provenientes dos hidratos e dos carbonatos presentes na CBCA, sendo assumido, sem

cometer um grande erro, como aproximadamente igual ao conteúdo de carbono. (Chin, 2011)

A contribuição da quantidade de carbono presente nas cinzas é decisiva na exigência de água de pastas, argamassas e betões. O total de água necessário à obtenção de uma pasta de consistência normal é tanto maior quanto maior for o teor em carbono. O carbono contido na CBCA apresenta porosidade elevada e grande superfície específica, sendo capaz de absorver quantidades significativas não só de água, como de adjuvantes incluídos na amassadura do betão, nomeadamente superplastificantes, agentes introdutores de ar ou retardadores de presa. Assim sendo, quanto menor for o teor de carbono melhor será a CBCA para incorporação na composição do cimento. (Azevedo, 2002)

A cinza proveniente da queima de bagaço cana-de-açúcar é maioritariamente composta por sílica, em quantidades superior á 60% (Tabela 1). Propriedade esta que faz dele um material pozolânico, podendo assim, ser adicionado ao cimento como pozolana, a fim de melhorar as propriedades do cimento.

As pozolanas são materiais siliciosos, naturais ou artificiais, que contém um elevado teor de sílica em forma reactiva, isto é numa qualquer forma não cristalina (vítrea) e finamente pulverizada capaz de reagir, na presença de água e à temperatura ambiente, com hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do cimento. (Chin, 2011)

Cabe ressaltar que a composição química da cinza do bagaço pode variar em função do tipo de cana-de-açúcar cultivada, fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água. (Cordeiro, et al., 2008)

Tabela 1-Composição química das CBCA segundo diferentes autores.

Composto	Teor (% em massa)		
	<i>Cordeiro et al,2008</i>	<i>Marcos et al, 2009</i>	<i>Shahzadi, 2016</i>
SiO₂	60,96	83,707	66,28
CaO	5,97	1,183	3,75
K₂O	9,02	6,146	5,15
MgO	8,65	-	0,51
P₂O₅	8,34	-	-
SO₃	-	-	1,45
Al₂O₃	0,09	-	15,10
Fe₂O₃	0,09	6,537	3,40
Na₂O	0,70	-	1,55
MnO	0,48	0,081	-
Perda ao fogo	5,70	2,346	2,81

2.2 Cimento

Cimento- é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água. (NP EN 197-1 2017)

Cimento Portland- é um tipo de cimento que tem como constituinte principal o clínquer e constituinte minoritário que são adicionados com o objectivo de controlar o tempo de presa (exemplo: gesso). Podem ser adicionados a sua composição outros constituintes (escória do alto forno, sílica de fumo, pozolana, cinzas volantes, xisto cozido e calcário) com o objectivo de melhorar outras propriedades do Cimento Portland.

Cimento Portland de Cinzas Volantes- é um tipo de Cimento Portland que além do clínquer, tem como constituinte principal cinzas volantes siliciosas ou calcárias.

2.2.1 Processo de Produção do Cimento Portland

O processo de produção do cimento é uma combinação de fórmulas tradicionais e alta tecnologia em equipamentos. Desde a extração de calcário até a entrega do produto

final, as fábricas de cimento contam com etapas específicas no processo produtivo do cimento. (Galhardo, 2014)

A fase de preparação da matéria-prima marca o início de todo o processo de produção do cimento e consiste no doseamento das matérias-primas (calcário e argila) e redução da granulometria do material, através das operações de britagem e moagem, por forma a obter-se um pó fino designado por cru. (Chen, 2006)

A fase da cozedura é a etapa da produção do clínquer, indispensável para a produção do Cimento Portland. A cozedura dá-se no forno a altas temperaturas, cerca de 1450°C, onde o cru é descarbonatado, e convertido em clínquer, com libertação de gases, principalmente, o dióxido de carbono. (Chen, 2006)

A partir dos 1450°C, em que a formação do clínquer deve ser completa, começa o processo de arrefecimento, primeiro com o encaminhamento da massa para a entrada dos arrefecedores e depois através destes. Para facilitar o arrefecimento, é introduzido ar em contracorrente com o clínquer, aproveitando-se este ar aquecido para a queima de combustível. (Galhardo, 2014)

Os transportadores de clínquer, que têm de ser resistentes à temperatura de saída do forno (cerca de 200°C), conduzem-no para silos ou armazéns horizontais. (Galhardo, 2014)

A fase de preparação do cimento é a etapa final do processo de produção e compreende operações de dosagem do clínquer com os aditivos, nas proporções estabelecidas para o cimento desejado, seguida da moagem e embalagem do produto para a expedição. (Chen, 2006)

Na figura 4 está ilustrado o fluxo básico de produção de uma fábrica de cimento com as suas diversas etapas detalhadas.

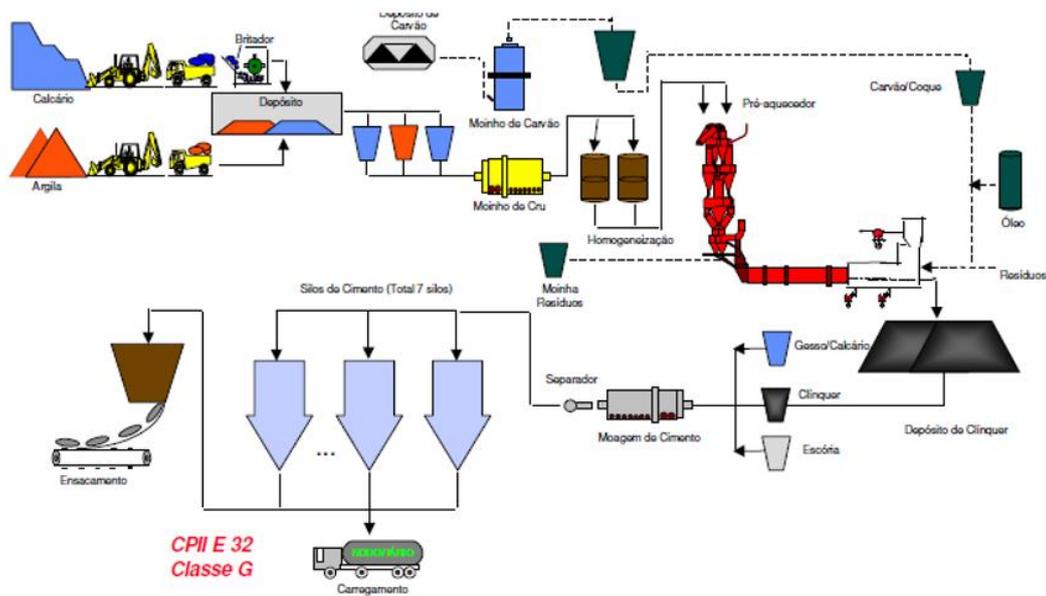


Figura 4-Fluxo básico da produção do cimento

Fonte ABCP,2002

2.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas do Cimento Portland

As propriedades do Cimento Portland são determinadas sob três formas distintas: produto em sua condição natural (em pó), mistura de cimento e água (pasta) e mistura de cimento, água e agregado padronizado (argamassas).

a) Finura

A finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. (Costa, 2003). A finura é determinada por dois métodos:

Método de peneiração- serve unicamente para detectar a presença de partículas grossas de cimento. É método apropriado para verificação e controle do processo de produção. (NP EN 196-6)

Método de permeabilidade ao ar- consiste na determinação da área específica através do tempo de escoamento de ar por uma massa de cimento, onde são usadas as formula (1) e formula (2) para determinar a massa do cimento necessária e área específica., respectivamente. A determinação da área específica serve principalmente para verificar a uniformidade do processo de moagem de uma determinada instalação. (NP EN 196-9) A área específica do cimento, é o factor que governa a velocidade da reacção de

hidratação do mesmo e tem também sua influência comprovada em muitas qualidades de pasta, das argamassas e dos concretos (Costa, 2003).

$$(1) \quad M_2 = 0,500 \times \rho \times V$$

$$(2) \quad S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho}$$

b) Consistência Normal

É usado para determinar a percentagem ótima de conteúdo de água necessária para uma pasta de cimento. Para preparar uma pasta, a consistência normal padrão varia entre 25-35% de água. (Civire, 2017)

c) Tempo de Presa

É um fenómeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Tal conceito se estende tanto a argamassa quanto aos concretos, nos quais a pasta de cimento esta presente e com missão aglutinadora dos agregados (Costa, 2003).

Tempo de início de presa- é o momento em que o cimento começa a endurecer e perder completamente sua plasticidade.

Tempo de fim de presa- é o momento em que o cimento perde completamente sua plasticidade e torna-se duro.

d) Expansibilidade

É essencial que a pasta de cimento, após presa não sofra grandes variações de volume, em particular expansões que, se impedidas podem causar a destruição do material. Esse tipo de expansões podem ser causadas por hidratação retardada ou lenta (ou outras reacções) de alguns compostos presentes tais como: óxido de cálcio livre, óxido de magnésio e sulfato de cálcio. (Coutinho, 2006)

e) Resistência mecânica

É a capacidade do provete de resistir a um determinado esforço de tensão sem ruptura.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Preparação da matéria-prima

A produção das amostras de cimento foi feita posteriormente à preparação do cimento Portland e CBCA.

3.1.1 Preparação do cimento Portland

3.1.1.1 Materiais Usados

Para a preparação do Cimento Portland foram usados os seguintes produtos e equipamentos (Figura 5):

Produtos: Clínquer e Gesso



Figura 5-Produtos usados para produção de Cimento Portland (A-Clínquer; B-Gesso).

Equipamentos: Pá, Balança, Balde, Moinho de Bolas, Chave grifo, Colher, Alpine, Cadinho de Vidro, Espátula, Balança e Pincel.

3.1.1.2 Procedimentos

- ✓ Pesou-se uma mistura (Clínquer+Gesso) de 3kg obedecendo a seguinte proporção: 95% de Clínquer e 5% de Gesso;
- ✓ Moeu-se a mistura (Clínquer+Gesso) no moinho de bolas devidamente limpo durante 1h30min (Figura 6);



Figura 6-Moinho de bolas.

- ✓ Pesou-se 25g de Cimento Portland para verificar a granulometria de acordo com a norma NP EN 196-6 1990 (Figura 7);



Figura 7-Amostra de cimento após a primeira moagem

- ✓ Após a verificação, voltou-se a moer-se por mais 1h de modo a obter finura necessária para um cimento adequado, registrando-se o tempo total de moagem;
- ✓ Moeu-se novamente 3kg da mistura durante 2h30min, por forma a obter as quantidades necessárias para a realização dos ensaios.

3.1.2 Preparação da CBCA

3.1.2.1 Materiais Usados

Para a preparação da CBCA foram usados os seguintes equipamentos e produtos:

Produtos: Bagaço de Cana-de-Açúcar (Figura 3).

Equipamentos: Sacos, Recipiente, Fósforo, 2 Cadinhos, Mufla, Moinho de Bolas de referência SC-MBL-01 e sacos plásticos.

3.1.2.2 Procedimentos

- ✓ Pré calcinou-se o BCA seco sem nenhum método científico, de modo a produzir cinzas (Figura8);



Figura 8-Pré-calcinação do BCA

- ✓ Introduziu-se o BCA pré-calcinado (Figura 9) na mufla, onde calcinou-se completamente a uma temperatura de 750°C durante 15min;
- ✓ Após 24h retirou-se da mufla os cadinhos contendo a CBCA;



Figura 9- BCA pré-calcinado

- ✓ Em seguida, moeu-se a CBCA durante 1h no moinho de bolas de referência SC-MBL-01 (Figura 10).



Figura 10- CBCA após á moagem

3.2 Preparação das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes

A preparação das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes foi feito seguindo os procedimentos descritos neste subcapítulo.

3.2.1 Materiais Usados

Produtos: Cimento Portland e CBCA

Equipamentos: Moinho de bolas de referência SC-MBL-01, Balança com erro de $\pm 1g$.

3.2.2 Procedimentos

- Pesou-se 2kg de uma mistura contendo Cimento Portland e CBCA com as proporções apresentadas na tabela 2.

Tabela 2-Proporção de cimento Portland e CBCA para preparação das amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes.

Componente	A-6	A-13	A-20	A-27	A-34
Cimento Portland (%)	94	87	80	73	66
CBCA (%)	6	13	20	27	34

Homogeneizou-se de forma fracionada 2kg da mistura (Cimento Portland+CBCA) até 6kg para cada amostra durante 2h no moinho de bolas de referência SC-MBL-01.

3.3 Determinação das propriedades mecânicas

Este ensaio consiste na determinação de resistência à compressão e a flexão, de provetes de forma prismática com dimensões 40mm X 40mm X 160mm. Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos definidos na norma NP EN 196-1 2017.

3.3.1 Preparação dos Provetes

Para cada amostra de cimento foram preparados 9 provetes totalizando um universo de 54 provetes, os quais foram ensaiados aos 2, 7, e 28 dias de idade. Para cada idade, 3 dos 9 provetes prismáticos foram submetidos aos ensaios de resistência à flexão e compressão.

3.3.1.1 Materiais Usados

Materiais: (225 \pm 1)g de Água destilada, (450 \pm 2)g de Cimento, (1350 \pm 5) Areia Normalizada CEN e Óleo mineral.

Equipamentos: Misturadora, Balança, Molde prismático, Compactador, Termohigrómetro, Câmara de Cura, Tanques de água, Martelo de borracha, Placa de vidro, Pedacos de borracha, Espátula de borracha, Espátula de alumínio, Giz e Régua metálica plana.

3.3.1.2 Procedimentos

a) Preparação da argamassa

- Deitou-se água e cimento no recipiente da misturadora e pôs-se imediatamente em funcionamento. (Figura 11);



Figura 11- Misturadora de argamassa e pasta de cimento.

- Após 30s, introduziu-se regularmente a areia normalizada CEN durante 30s;
- Após 30s retirou-se o recipiente do misturador, por meio de uma espátula de borracha retirou-se toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocou-se no meio deste;
- Continuou-se a amassadura durante 30s.

b) Moldagem dos provetes

Os provetes foram moldados logo após a preparação da argamassa.

- Com o molde oleado e a sua prolonga fixados firmemente à mesa do compactador (Figura 12), introduziu-se directamente do recipiente do misturador, com recurso a uma colher, uma camada de argamassa em cada compartimento do molde.



Figura 12- Molde e prolonga fixados no compactador.

- Nivelou-se a face superior da argamassa com uma espátula grande e compactou-se com 60 pancadas durante 60 s;
- Em seguida introduziu-se a segunda camada, nivelou-se novamente a face superior da argamassa com uma espátula curta, e compactou-se com mais 60 pancadas, durante 60s;
- Retirou-se o molde cheio da mesa do compactador e a prolonga (Figura 13), retirou-se imediatamente o excesso de argamassa e alisou-se a superfície dos provetes com uma régua metálica plana.



Figura 13- Molde prismáticos contendo argamassa após a compactação.

c) Conservação dos moldes contendo os provetes

- Após a moldagem, colocou-se sobre o molde uma placa de vidro apoiado por pedaços de borracha posicionados nas extremidades do molde;
- Em seguida, colocou-se o molde na Câmara de cura (Figura 14), durante 24h a temperatura de (20 ± 1) °C.

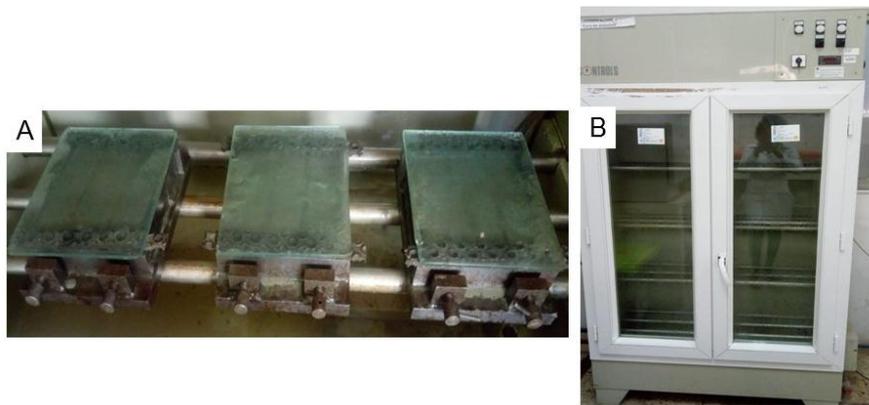


Figura 14-Conservação dos moldes contendo os provetes (A-Moldes prismáticos contendo argamassas a dentro da Câmara de cura; B- Câmara de cura.)

d) Desmoldagem dos provetes

- Após 24h, retirou-se os moldes da Câmara de cura e desmoldou-se os provetes com auxílio de um martelo de borracha, dando algumas pancadas suaves nos vértices do molde de modo a libertar com facilidade os provetes;
- Em seguida, identificou-se os provetes com giz obedecendo a seguinte sequencia: Composição da CBCA, número do molde e idade (Figura 15).



Figura 15-Provetes desmoldados e após 24h de cura devidamente identificados.

e) Conservação dos provetes na água

- Os provetes desmoldados após 24h de cura e devidamente identificados foram imersos em água à 20°C na posição vertical, num tanque cheio de água (Figura 16).

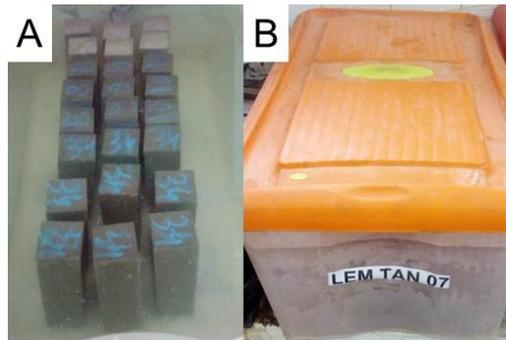


Figura 16-Processo após a desmoldagem dos provetes (A-Provetes submersos em água//B-Tanque de água).

- Os provetes permaneceram submersos em água até completarem as idades para a realização dos ensaios de resistência à flexão e compressão.

3.3.2 Resistência à flexão e compressão

Os provetes foram submetidos aos ensaios de resistência à flexão e compressão 2, 7 e 28 dias de idade.

- Para o ensaio de resistência à flexão, colocou-se o provete numa Prensa Hidráulica (Figura 17), com capacidade de 500KN, onde a face lateral de moldagem estava assente nos cilindros de apoio e o eixo longitudinal do provete, perpendicular aos apoios. Aplicou-se a carga verticalmente por meio do cilindro de carga sobre a face lateral oposta do provete e aumentou-se uniformemente à uma velocidade de carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura, dando origem a semi-provetes (Figura 18).

Conservou-se os semi-provetes cobertos com um pano húmido até ao momento do ensaio à compressão.

- Para o ensaio de resistência à compressão, cada semi-provete foi centralizado lateralmente em relação aos pratos da Prensa Hidráulica. Aumentou-se a carga uniformemente à velocidade de (2.400 ± 200) N/s durante toda a aplicação da carga, até a ruptura (figura 18).



Figura 17- Prensa hidráulica para ensaio de resistência à flexão e resistência à compressão.

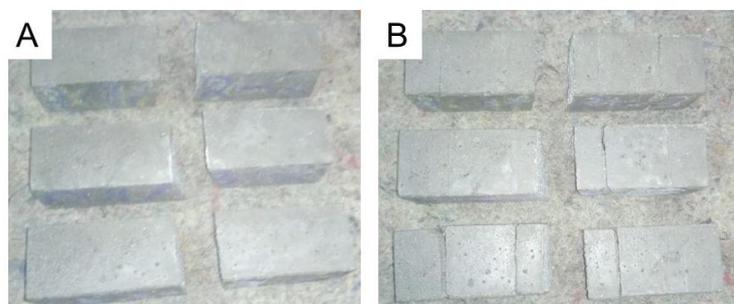


Figura 18- Provetes prismáticos após ruptura (A-Provetes prismático após ensaio de flexão//B-Provetes prismático após ensaio de compressão).

3.4 Determinação das Propriedades Físicas

Foram determinadas as seguintes propriedades físicas: finura, tempo de início de presa, tempo de fim de presa e expansibilidade.

3.4.1 Determinação da Finura

A determinação da finura do cimento pode oferecer informações tanto quanto á presença de partículas grossas no cimento, como ao grau de moagem.

Existem dois métodos para determinação desta propriedade do cimento segundo a norma NP EN 196-6:2017, nomeadamente: Método de Peneiração e Método de Permeabilidade ao ar (Método de Blaine).

3.4.1.1 Método de Peneiração

Consiste na peneiração do cimento em peneiros normalizados, onde posteriormente calcula-se a percentagem com a massa dos grãos de dimensões superiores (resíduo de

peneiração) às da malha utilizada para o ensaio, e a massa total necessária para a peneiração que é de 25g de amostra.

3.4.1.1.1 Materiais Usados

Produtos: Amostras de cimento em estudo.

Equipamentos: Balança, Cadinho, Aparelho de peneiração por jato de ar, Peneiro de malha 90 μ m.

3.4.1.1.2 Procedimentos

- Fixou-se o peneiro de malha 90 μ m ao peneirador a vácuo;
- Pesou-se 25g de cimento e deitou-se cuidadosamente no peneiro ao ponto de evitar perdas;
- Agitou-se a amostra com uma vareta seca para dispersar as partículas do cimento, em seguida colocou-se a tampa no peneiro e peneirou-se por 5 minutos (Figura 19);



Figura 19-Aparelho de peneiração por jato de ar.

- Retirou-se o resíduo do peneiro e pesou-se;
- Determinou-se a percentagem do resíduo na amostra de cimento.

Repetiu-se o procedimento acima descrito 3 vezes para as 6 amostras de cimento.

3.4.1.2 Método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)

Consiste em observar o tempo que leva uma dada quantidade de ar a atravessar uma camada compactada de cimento com dimensões e porosidade especificadas.

3.4.1.2.1 Materiais Usados

Produtos: Amostras de cimento em estudo, Óleo, Petróleo.

Equipamentos: Tabuleiros, Balança, Estufa, Frasco volumétrico de Le Chatelier, Banho-maria, Termómetro, Cronómetro e Permeabilímetro Blaine.

3.4.1.2.2 Procedimentos

a) Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada

- Pesou-se e registou-se o tabuleiro, em seguida pesou-se e registou-se o tabuleiro mais 100g de cimento;
- Colocou-se o tabuleiro contendo 100g de cimento na estufa e deixou-se durante 4h (Figura 20);



Figura 20-Tabuleiros contendo amostra de cimento na estufa para secagem com ventilação.

- Após 4h, retirou-se o tabuleiro contendo cimento, pesou-se e registou-se o peso do mesmo, e colocou-se novamente na estufa;
- Após 20h, retirou-se o tabuleiro contendo o cimento, pesou-se e registou-se o peso do mesmo, e determinou-se o teor de humidade por secagem.

b) Determinação da massa volúmica

- Introduziu-se petróleo no frasco volumétrico de Le Chatelier e registou-se o volume;
- Conservou-se o frasco volumétrico de Le Chatelier contendo petróleo em banho-maria durante 15min e registou-se o volume;
- Introduziu-se cuidadosamente 65g de cimento no frasco volumétrico de Le Chatelier e registou-se o volume (Figura 21);



Figura 21-Frasco volumétrico de Le Chatelier contendo petróleo e 65g de cimento.

- Conservou-se o frasco volumétrico de Le Chatelier contendo cimento em banho-maria durante 15min;
- Após 15min, fez-se a leitura do volume deslocado pela massa de cimento;
- Determinou-se a densidade dividindo a massa pelo resultado obtido.

c) Determinação da finura pelo método de Blaine

- Com base na fórmula (1) calculou-se a massa do cimento necessária para o ensaio;
- Com a célula metálica na posição vertical, introduziu-se um papel de filtro cobrindo totalmente o fundo poroso da célula e introduziu-se a M_2 dando ligeiras pancadas de modo a obter uma superfície plana de cimento;
- Colocou-se um segundo papel de filtro sobre o cimento e comprimiu-se levemente com ajuda de um pistão;
- Introduziu-se a célula no Permeabilímetro de Blaine (Figura 22) e tapou-se a mesma com um bujão específico;
- Abriu-se a torneira do aparelho e aspirando moderadamente elevou-se o líquido até a marca superior, em seguida fechou-se a torneira;
- Retirou-se o bujão da célula e o líquido começou a escorrer, ligou-se o cronómetro quando o líquido atingiu a segunda marca e registou-se o tempo de escoamento quando o líquido coincidiu com a terceira marca;



Figura 22-Aparelho blaine

3.4.2 Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade

A norma NP EN 196-3:2017 estabelece que a pasta de cimento com consistência normal tem uma resistência especificada à penetração de uma sonda normalizada. A quantidade de água necessária para se obter uma pasta com consistência normal é determinada por tentativas em pastas com quantidades de água diferentes. O tempo de presa é determinado observando a penetração de uma agulha numa pasta de cimento com consistência normal até atingir um valor especificado. A expansibilidade é determinada observando a expansão volúmica de uma pasta de cimento com consistência normal, indicada pelo deslocamento relativo de duas agulhas.

3.4.2.1 Materiais necessários

Produtos: Água destilada, amostras de cimento

Equipamentos: Misturadora, Aparelho de Vicat, Agulhas (consistência, início de presa, fim de presa), molde de vicat, paquímetro, cronómetro e câmara de cura.

3.4.2.2 Procedimento experimental

Amassadura da pasta de cimento

- Colocou-se acima de 125g de água e 500g de cimento no recipiente do misturador;
- Pôs-se imediatamente a misturadora a funcionar;

- Após 90s retirou-se o recipiente da misturadora, com auxílio a uma espátula de borracha retirou-se toda a pasta aderente às paredes e ao fundo do recipiente da misturadora durante 30s;
- Posicionou-se novamente o recipiente da misturadora e ligou-se a misturadora. Após 90s retirou-se o recipiente, colocou-se a pasta no molde de vicat ligeiramente oleado e alisou-se com uma espátula metálica.

a) Determinação da consistência normal

- Ajustou-se o aparelho de vicat fazendo descer a sonda até à placa da base do molde, ajustando a marca ao zero da escala;
- Levantou-se a sonda até a posição de espera, colocou-se o molde de vicat incluindo a placa da base, logo após o alisamento da pasta, no eixo da sonda do aparelho de Vicat (Figura 23);
- Baixou-se a sonda com cuidado até que esta entrou em contacto com a pasta, fez-se uma pausa de 3s nesta posição de modo a evitar uma velocidade inicial ou aceleração forçada das partes móveis;
- Após os 3s, soltou-se rapidamente as partes móveis de modo que a sonda penetre verticalmente no centro da pasta;
- Efectuou-se a leitura da escala 30s depois da libertação da sonda.

Repetiu-se o ensaio aumentando ou diminuindo a quantidade de água até que a leitura da escala estivesse (6 ± 2) mm, de modo a obter a pasta de consistência normal para determinação dos tempos de presa e expansibilidade.

b) Determinação do tempo de início de presa

- Encheu-se o molde de vicat com pasta de cimento com consistência normal preparada segundo os procedimentos de amassadura da pasta de cimento descritos acima;
- Colocou-se o molde de vicat cheio num recipiente contendo água, de modo que a superfície da pasta fique submersa a uma profundidade de pelo menos 5mm, e conservou-se na câmara de cura à uma temperatura de (20 ± 1) °C;
- Ajustou-se o aparelho de vicat fazendo descer a sonda até à placa da base do molde de vicat que foi utilizada ajustando a marca ao zero da escala;
- Levantou-se a sonda até a posição de espera, colocou-se o molde de vicat e a placa da base (Figura 23);

- Baixou-se a sonda com cuidado até que esta entrou em contacto com a pasta, fez-se uma pausa de 3s nesta posição de modo a evitar uma velocidade inicial ou aceleração forçada das partes móveis;
- Após os 3s, soltou-se rapidamente as partes móveis de modo que a sonda penetre verticalmente no centro da pasta;
- Efectuou-se a leitura da escala 30s depois da libertação da sonda.

Repetiu-se o ensaio de penetração no mesmo provete em posições convenientemente espaçadas, a pelo menos 8mm do bordo do molde de vicat ou 5mm uma a outra e a pelo menos 10mm da posição da última penetração e com intervalos de tempo de 30min até que a distância entre a agulha e a placa da base fosse de (6 ± 3) mm, registando-se os tempos lidos do cronómetro.

d) Determinação do tempo de fim de presa

- Após o registo do tempo de início de presa, inverteu-se o molde de vicat sobre a placa da base de modo que os ensaios para a determinação do fim de presa sejam efectuados sobre a face do provete originalmente em contacto com a placa da base (Figura 23);
- Mergulhou-se o molde e a placa da base no recipiente cheio de água e conservou-se na câmara de cura á uma temperatura de (20 ± 1) °C;
- Em intervalos de 30min efectuaram-se as medições no aparelho de vicat até ao momento em que o acessório anelar deixou pela primeira vez de fazer uma marca no provete e registrou-se o tempo a partir do tempo zero.

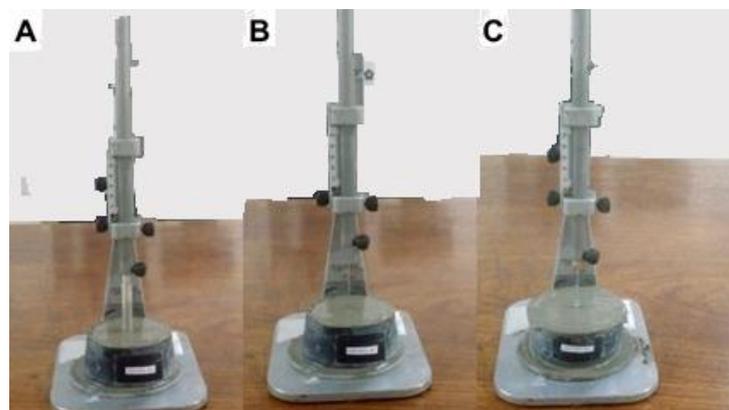


Figura 23-Aparelho de vicat com o molde de vicat e a sonda na posição de espera para determinação de: A-Consistência normal; B-Tempo de início de presa e C- Tempo de fim de presa.

e) Determinação da expansibilidade

- Encheu-se um molde de Le Chatelier (com uma placa de vidro na parte inferior ligeiramente oleada) com pasta de consistência normal preparada segundo os procedimentos de amassadura de pasta de cimento descritos acima;
- Tapou-se a parte superior do molde de Le Chatelier com uma placa de vidro ligeiramente oleada e colocou-se um peso de 100g (Figura 24);

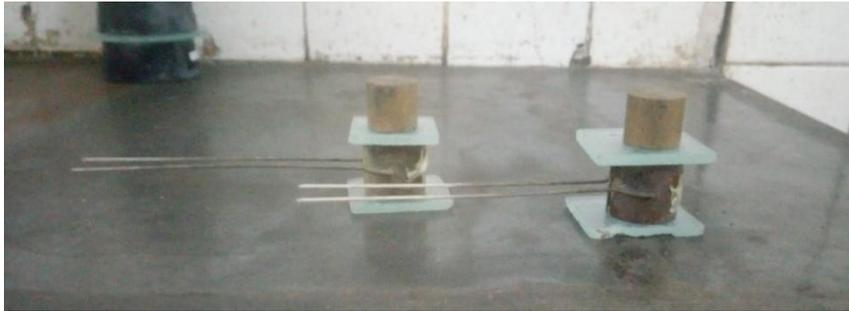


Figura 24- Molde de Le Chatelier, placa de vidro e peso de 100g.

- Conservou-se o molde de Le Chatelier dentro de um recipiente contendo água na Câmara de cura a uma temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ durante $24\text{h} \pm 30\text{min}$;
- Após $24\text{h} \pm 30\text{min}$, retirou-se o molde de Le Chatelier e mediu-se o afastamento das agulhas com um Paquímetro;
- Em banho-maria (Figura 25), aqueceu-se o molde até a ebulição da água durante 30min e manteve-se em banho-maria à temperatura de ebulição da água durante $3\text{h} \pm 5\text{min}$.



Figura 25-Banho-Maria contendo molde de Le Chatelier.

- Após $3\text{h} \pm 5\text{min}$, retirou-se a tampa do Banho-maria, deixou-se os moldes arrefecer até a temperatura ambiente e mediu-se o afastamento entre as agulhas com um Paquímetro.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos após a realização dos ensaios laboratoriais e os respectivos cálculos de média aritmética estão apresentados nos anexos 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Na presente secção encontram-se os resultados após o cálculo de média aritmética.

4.1 Propriedades Mecânicas

Nos gráficos 1 e 2 estão representadas as variações das resistências á flexão e compressão em função da idade de cada provete da argamassa de cimento em estudo, respectivamente.

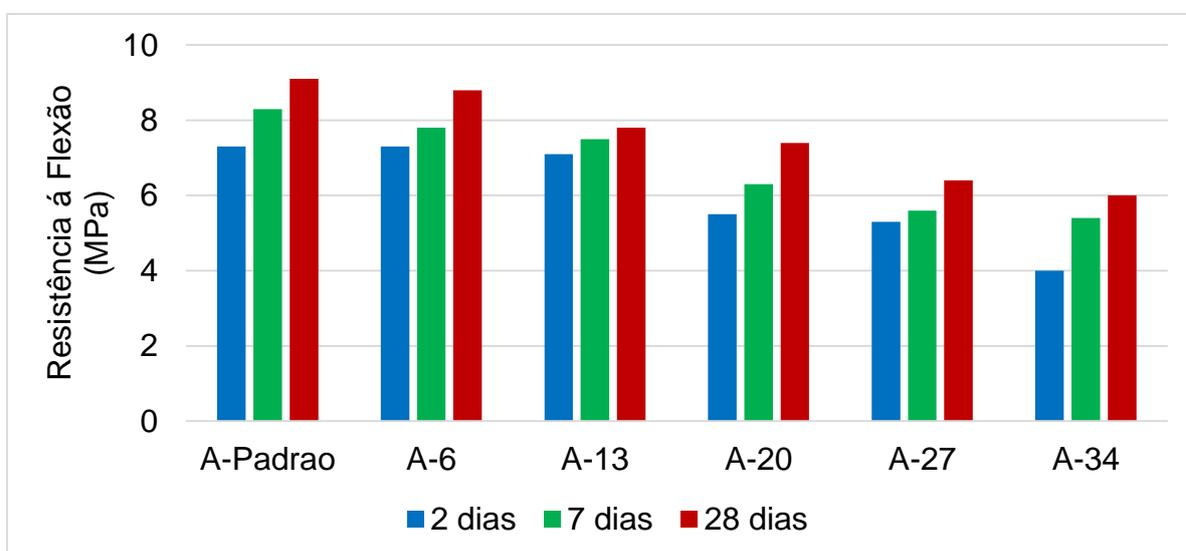


Gráfico 1-Resultados da Resistência á Flexão em função da idade dos provetes.

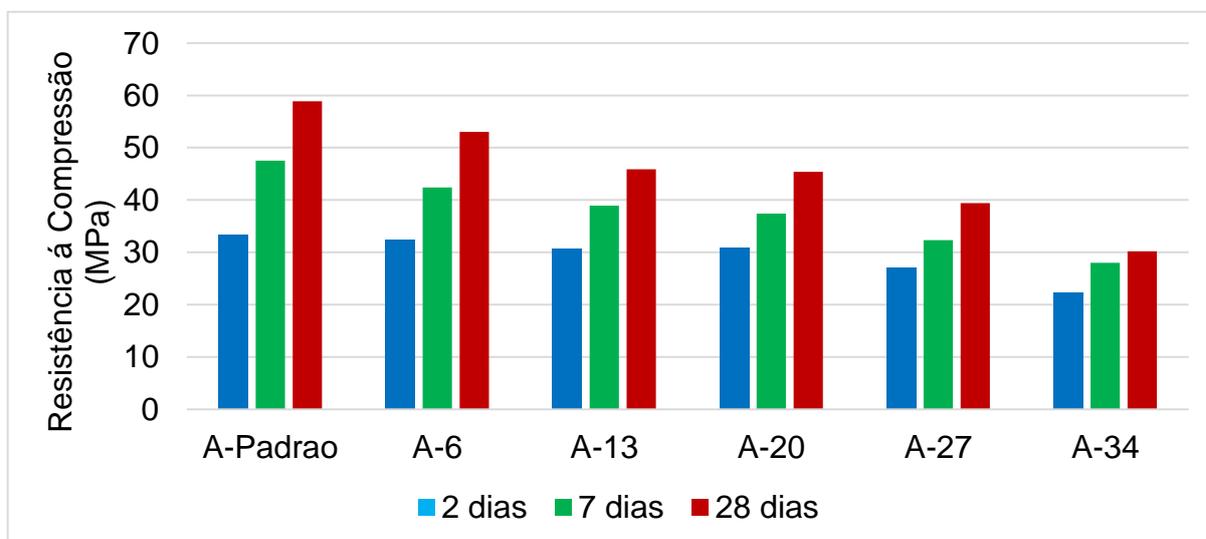


Gráfico 2-Resultados da Resistência á Compressão em função da idade dos provetes.

Os gráficos 1 e 2 mostram o seguinte:

- As resistências á flexão e á compressão das amostras de cimento em estudo aumentam com o aumento do tempo de cura independentemente da composição do cimento;
- Redução nas resistências á flexão e á compressão das amostras de cimento em estudo em função do aumento da quantidade de CBCA na composição dos mesmos. Esse facto deve-se, a redução da quantidade de clínquer devido ao uso da CBCA, que consequentemente empobrece a mistura final em componentes que acrescem qualidades ao cimento, também observado por Marcos (2008).

4.2 Propriedades Físicas

4.2.1 Finura

Os resultados dos ensaios de determinação da finura das amostras de cimento em estudo pelos métodos de peneiração e permeabilidade ao ar encontram-se na tabela 3.

Os resultados da tabela 3 mostra uma diminuição do resíduo de peneiração em função do aumento da quantidade de CBCA na composição do cimento devido a acentuada finura que as CBCA já possuíam antes de serem incorporadas no processo de moagem e homogeneização juntamente com o Cimento Portland.

Tabela 3- Resultados da finura para as 6 amostras em estudo.

Parâmetro	A-Padrão	A-6	A-13	A-20	A-27	A-34
Resíduo de Peneiração (%)	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4	1,2
Teor de humidade (%)	1,2	0,7	0,9	0,6	0,8	1,1
Massa Volúmica (g/cm ³)	2,80	2,94	3,08	2,81	2,90	3,11
Área Específica (cm ² /g)	4 485,7	4 451,3	4 543,0	4 599,7	4 616,3	5 061,0

Os resultados da tabela 3 mostra um aumento na área específica em função do aumento da quantidade de CBCA na composição do cimento como consequência do aumento de partículas finas presentes na amostra de cimento em estudo, respectivamente. Menth e

Monteiro (1994) apontam também que a redução da permeabilidade ao ar ocorre devido á diminuição da porosidade que é consequência da redução de resíduos em função do aumento da quantidade de CBCA.

4.2.2 Tempos de presa

Os resultados dos ensaios de determinação dos tempos de presa e da consistência normal das amostras de cimento em estudo encontram-se na tabela 4.

Tabela 4- Resultados de tempos de presa para as 6 amostras em estudo.

	A-Padrão	A-6	A-13	A-20	A-27	A-34
Consistência Normal (%)	28,7	27,5	27,6	28,5	29,0	29,3
Tempo de Início de Presa (min)	120	120	120	120	150	160
Tempo de Fim de Presa (min)	299	302	305	434	450	505

A consistência normal é usado para determinar a percentagem ótima de conteúdo de água necessária para uma pasta de cimento. Tal como encontrado por Civire 2017, os resultados apontam que a consistência varia entre 27%-29%, que afirma que para preparar uma pasta, a consistência normal deve variar entre 25-35% de água.

Os tempos de presa sofreram alterações nas amostras de cimento em estudo em relação a A-Padrão, esta variação ocorreu devido a lenta hidratação do cimento, ocasionada pela diminuição das fases mais reactivas do clínquer. A composição do clínquer controla a cinética da hidratação do cimento, devido as fases mais potencialmente reactivas (KIRCHHEIM, 2008). O índice de hidratação das fases no cimento se processa na seguinte ordem: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ (RAMACHANDRAN, et al., 1999).

O aluminato tricálcico é a fase que reage mais rápido quando em contacto com a água, formando rapidamente os aluminatos de cálcio hidratado (C_3AH_6 , C_4AH_{19} e C_2AH_8) (KIRCHHEIM, 2008).

4.2.3 Expansibilidade

Os resultados dos ensaios de determinação dos tempos de presa das amostras de cimento em estudo encontram-se na tabela 5.

Tabela 5- Resultados da Expansibilidade das amostras de cimento em estudo.

Parâmetro	A-Padrão	A-6	A-13	A-20	A-27	A-34
Expansibilidade (mm)	0,27	1,14	2,81	5,21	7,32	9,12

Os resultados mostram um aumento na expansibilidade das amostras de cimento em estudo em função do aumento da composição de CBCA em relação à A-Padrão. Este aumento ocorre devido a hidratação retardada ou lenta de MgO e CaO presentes na CBCA.

Se a matéria-prima com que o forno é alimentado contém um pouco mais de CaO do que o necessário para se combinar com os silicatos e aluminatos ou se a queima ou arrefecimento são insatisfatórios, o CaO em excesso continuará livre. A sua posterior a hidratação será muito lenta e acompanhada por expansões, na medida em que corresponde à extinção dessa cal livre. O mesmo acontece com o MgO, o mesmo poderá cristalizar em cristais grandes (periclase) o que provoca a instabilidade e expansibilidade do volume da pasta de cimento endurecido. De facto o MgO é reactivo apenas sob a forma cristalina de periclase (em quantidade superior a 2% do cimento, em massa, pois até 2% combina-se com os componentes principais do cimento). (Coutinho, 2006)

4.3 Classificação do Cimento Portland de Cinzas Volantes

A partir dos resultados obtidos e com base na tabela de requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos especificados na norma NP EN 197-1:2017 (Anexo2), as amostras de Cimento Portland de Cinzas Volantes classificam-se como sendo:

- CEM II/A-L 42.5N, de A-6 à A-20;
- CEM II/B-L 32.5N, de A-20 à A-27;

A-34 não cumpre com os requisitos mínimos estabelecidos pela norma para cimentos correntes, portanto não possui nenhum enquadramento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Tendo em conta os objectivos traçados e os resultados obtidos quando aproveitado o bagaço de cana-de-açúcar na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes, conclui-se que:

- A CBCA pode ser utilizada como constituinte principal para incorporar na produção de Cimento Portland de Cinzas Volantes, a utilização deste resíduo na indústria cimenteira pode ser considerado uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental causado pelo seu descarte nas lixeiras;
- A incorporação de CBCA é recomendável até o teor de 27%, visto que os resultados das resistências mecânicas para valores superiores á 27% de CBCA, não satisfazem os mínimos estabelecidos para cimentos correntes;
- Verifica-se uma diminuição na finura em função do aumento de CBCA por estas serem mais finas que o cimento, permitindo desta forma uma maior compacidade das pastas e argamassas de cimento;
- As cinzas volantes provocam reacções ligeiramente expansivas na pasta de cimento hidratado a partir de A-20, sem exercer influência nas reacções cimentantes no cimento e sem interferir na formação de produtos cimentícios, visto que os resultados de expansibilidade obtidos são inferiores a 10 mm, valor máximo admissível para cimentos correntes;
- Os resultados de resistência à compressão aos 2 e 28 dias dos cimentos com a incorporação das CBCA decrescem em função do aumento do teor de cinzas, quando comparados os resultados do cimento ordinário CEM I 52.5N, passando os mesmos a serem classificados como Cimento Portland de cinzas volantes CEM II / A-L 42.5 N para amostras contendo uma percentagem de 6% á 20% de CBCA e Cimento Portland de Cinzas volantes CEM II / B-L 32.5N para amostras contendo 21%-27% de CBCA.

5.2 Recomendações

Tendo em conta que o presente trabalho limitou-se na realização de ensaios físicos e mecânicos do Cimento Portland e Cimento Portland de Cinzas Volantes, seria adequado também a realização de ensaios químicos sobre o teor de sulfatos e teor de cloretos.

Recomenda-se também, um estudo sobre calcinação, composição e índice de actividade pozolânica da CBCA para a produção de material amorfo e homogéneo quimicamente, com elevado índice de actividade pozolânica.

Recomenda-se ainda a elaboração de um sistema de gestão de bagaço de cana-de-açúcar, de modo a quantificar o bagaço de cana-de-açúcar disponível, definir o método de recolha e outros aspectos referentes á gestão ambiental do mesmo, que possa ser útil para complementar o presente trabalho.

6 BIBLIOGRAFIA

6.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

1. About Us: CemNet.com Sitemap. *CemNet.com Sitemap*. [Online] <http://www.cemnet.com>.
2. AMOR e Carbon Africa. 2014. *A Comprehensive Review of the Municipal Solid Waste Sector in Mozambique*. Maputo : s.n., 2014.
3. Armange. 2005. *Tipos de resíduos resultantes de processos industriais*. Brasil : s.n., 2005.
4. Assunção, Júlio César. 2015. *Uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como fonte de potássio*. Maringá : s.n., 2015.
5. Azevedo, Aires Fernando. 2002. *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volante*. Minho : Universidade de Minho. Tese de doutoramento, 2002.
6. Belato, Mariana Natale. 2013. *Análise Da Geração De Poluentes Na Produção De Cimento Portland Com O Coprocessamento De Resíduos Industriais*. Itajubá : Universidade Federal De Itajubá Instituto De Engenharia Mecânica Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, 2013.
7. Brito, Darlan. 2019. Embrapa. *Embrapa*. [Online] 29 de Janeiro de 2019. <https://www.embrapa.br>.
8. Chandamela, Mélica Helena. 2019. *Gestão de Resíduos Sólidos em Moçambique*. Cidade de Maputo : Observatório do Meio Rural, 2019.
9. Chen, Jacky. 2006. Relatório do EIA. *Estudo de Impacto Ambiental e Plano de Gestão Ambiental*. Maputo : FÁBRICA DE CIMENTO DA MATOLA CIMENTOS DE MOÇAMBIQUE, SARL, 2006, pp. 3-8.
10. Chin, Tok Teng. 2011. *Estudo da Influência do Calcário Cru e Cinzas Volantes nas Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas do Cimento Portland produzido em Moçambiqu*. Maputo : s.n., 2011.
11. Chissico, Rodolfo. 2014. *Avaliação de Riscos Ambientais do Uso de Agrotóxicos na Produção da Cana-de-Açúcar(Saccharum officinarum L) em Xinavane – Moçambique*. Manaus : CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE, 2014.
12. *Cimento natural. História e perspectivas de uso na conservação de edifícios em Portugal*. LNEC. 2015. Lisboa : s.n., 2015. Conferência Património Industrial.Tradição, inovação, conservação.
13. *Construcao Civil: Desafios Para 2020*. Arpon, Andréia, Gonçalves, Rafael de Jesus e Da Cunha, Roberto. 2014. Rio de Janeiro : s.n., 2014. Sistema Firjan.

- 14.2018. COPYRIGHT 2013 - ANGOP. ANGOP. [Online] 21 de Fevereiro de 2018. [Citação: 14 de Maio de 2020.] <http://m.portalangop.co.ao>.
15. Cordeiro, Guilherme Chagas, Filho, Romildo e Fairbairn, Eduardo. 2008. *Caracterizacao de Cinza de Bagaco de Cana de Acucar para emprego como pozolanas em materiais cimenticios*. Rio de Janeiro : Quimica Nova, 2008.
16. Coutinho, Joana de Sousa. 2006. *Ligantes e Caldas*. Portugal : Universidade do Porto, 2006.
17. econergy. 2008. *Avaliação dos Biocombustíveis em Moçambique*. Maputo : Econergy Internatinal Corporation, 2008.
18. FUNAE. 2021. *Atlas de energia renováveis em Moçambique*. Maputo : s.n., 2021.
19. Fungaro, Denise Alves. 2017. *Produção de Sílica Gel e Nanosílica de Alta Pureza a partir de Cinzas da Biomassa de Cana-de-Açúcar com Alto Potencial de Comercialização*. Brasil : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2017.
20. Galhardo, Pedro. 2014. *ESTUDO DA PRODUÇÃO DE CIMENTO COM ÊNFASE NO CLASSE G*. Rio de Janeiro : s.n., 2014.
21. Garside, M. 2020. About Statista. *Statista Web site*. [Online] 12 de Fevereiro de 2020. [Citação: 16 de Maio de 2020.] <http://www.statista.com>.
22. Guimarães, Gabriella Casimiro. 2011. *Consumo sustentável para a minimização de residuos solidos urbanos*. Brasília : s.n., 2011.
23. Harter, Adilson, et al. 2016. *Sistema de Produção da Cana-de-açúcar para o Rio Grande do Sul*. Pelotas : Embrapa Clima Temperado, 2016.
24. Infopedia. 2021. Infopedia. *Dicionarios Porto Editora*. [Online] 1 de Março de 2021. <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/cana-sacarina?intlink=true>.
25. IPCC. 2005. 2005.
26. Jonhson, GB. 1998. *Environment*. 2nd. 1998, p. 488.
27. KIRCHHEIM, Ana Paula. 2008. *Aluminatos tricálcico cúbico e ortorrômbico: análise da hidratação in situ e produtos formados*. Porto Alegre : Universidade Federal Rio Grande do Sul, 2008.
28. Lima, Jéssica, Quinonez, Victor e Magalhães, Tereza. 2018. *Produção do concreto ecológico: a utilização da cinza do bagaço de cana de açúcar em substituição parcial do cimento Portland*. Belo Horizonte : Centro Universitário Newton Paiva, 2018.

29. Marcos, Paula, et al. 2008. *Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland*. 3. Campina Grande : s.n., 2008. pp. 353-357. Vol. 13.
30. Maury, Maria e Blumenschein, Raquel. 2012. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. 1st. Brasília : s.n., 2012, Vol. III, pp. 75-96.
31. OLIVEIRA, Gabriele e CREPALDI, Avelino. 2017. CIMENTO ALUMINOSO: CARACTERÍSTICAS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES. *Revista Para Graduandos Interdisciplinares*. 1. São Paulo : s.n., 2017, Vol. II, pp. 42-54.
32. Oliveira, Sandra, et al. 2017. *Cinza a partir do bagaço da cana-de-açúcar reutilizada como parte integrante em argamassas e concretos na indústria civil*. Brasil : s.n., 2017.
33. PILAR, Ronaldo. 2012. Florianópolis, SC : PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2012.
34. RAMACHANDRAN e BEAUDOIN. 1999. 1999.
35. *Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review*. Jang, Ali. 2019. Coreia : s.n., 21 de Janeiro de 2019, mdpi.
36. 2019. Secretariado Permanente do Forum para a Cooperacao Economica e Comercial entre a China e os Países de Lingua Portuguesa. [Online] 24 de Setembro de 2019. [Citação: 15 de Junho de 2020.] <http://www.forumchinapl.org.mo/west-china-cement-joins-mozambican-cement-works-venture>.
37. Silva e Cruz, Teresa. 2005. *A organização dos trabalhadores do sector informal dos mercados. O papel da Associação dos Operadores e Trabalhadores do*. Genebra : Organizacao Nacional do Trabalho, 2005.
38. Sitóe, Rogério. 2016. Sociedade de Noticias, SA. *Online Noticias*. [Online] 12 de Julho de 2016. [Citação: 17 de Maio de 2020.] <http://www.jornalnoticias.co.mz>.
39. Soares. 2012. *Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos*. Lorena : Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2012.
40. Sutton, John. 2014. *Mapa Empresarial de Moçambique*. Londres : International Growth Centre, 2014. pp. 131-134.
41. —. 2014. *Mapa Empresarial de Moçambique*. Londres : International Growth Centre, 2014.

42. UNEP, GEF e UDP. 2018. *Plano de acção tecnológica e ideias de projecto- Tecnologias de geração de electricidade e de gestão e tratamento de resíduos sólidos urbanos*. Maputo : s.n., 2018.
43. *Utilização Da Cinza De Bagaço Cana-De-Açúcar Como “Filler” Em Compostos De Fibrocimento*. Zardo, Adelson Et Al. 2004. São Paulo : Isbn 85-89478-08-4, 2004. I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído .
44. XU, Qing, et al. 2018. *Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials*. USA: <https://doi.org/10.3390/ma12010039>, 2018.

6.2 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. **NP EN 197-1:2017**-Parte 1- Composição especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
2. **NP EN 196-1** Métodos de ensaio de cimentos: Determinação das resistências mecânicas.
3. **NP EN 196-3** Métodos de ensaio de cimentos: Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade.
4. **NP EN 196-6** Métodos de ensaio de cimentos: Determinação da finura.
5. **Decreto n° 94/2014**-Regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1

Tabela 6-Os 27 produtos da família de cimento corrente (NP EN 197-1)

Tipos Principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa)										Constituintes adicionais (minoritários)	
			Constituintes principais											
			Clinker K	Escória de alto-forno S	Silica de fumo D	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido T	Calcário			
Natural P	natural calcinada Q	Siliciosa V				Calcária W	L	LL						
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento portland de escória	CEM II/A-S	80-94	4-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cimento portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cimento portland composto	CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5	
	CEM III	Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento Composto	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5	

ANEXO 2-Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos especificados(NP EN 197-1)

Tabela 7-Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos especificados.

Classe de Resistência	Resistência à compressão(Mpa)				Tempo de início de presa(min)	Expansibilidade(mm)
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência			
	2 dias	7 dias	28 dias			
32,5N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10,0
32,5R	≥10,0	-				
42,2N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5R	≥20,0	-				
52,5N	≥20,0	-	≥52,5	-	≥45	
52,5R	≥30,0	-				

ANEXO 3-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-Padrão

7.1.1 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 10h57 7dias: hora: 11h07 28dias: hora: 11h15
- Temperatura do local: 22°C Humidade relativa do local: 56%
- Data: 10/02/2021

Tabela 8-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/2-1	1357,3	450,3	225,2
COM001/3-1	1357,9	450,2	225,2
COM001/4-1	1357,3	450,3	225,1

Tabela 9-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/2-1	2	598,9	3,155	7,39	7,3
COM001/3-1		590,8	2,938	6,89	
COM001/4-1		589,8	3,245	7,61	
COM001/2-2	7	594,5	3,549	8,32	8,3
COM001/3-2		601,0	3,428	8,03	
COM001/4-2		594,0	3,666	8,59	
COM001/2-3	28	602,5	3,863	9,05	9,1
COM001/3-3		598,7	3,882	9,10	
COM001/4-3		598,6	3,841	9,00	

Tabela 10-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:12/02/2021 Hora:10h57	COM001/2-1	54,178	33,86	33,4
	COM001/2-1	56,116	35,07	
	COM001/3-1	53,931	33,71	
	COM001/3-1	54,995	34,37	
	COM001/4-1	55,223	34,51	
	COM001/4-1	46,390	28,99	
Idade:7dias Data:17/02/2021 Hora:11h07	COM001/2-2	74,662	46,66	47,5
	COM001/2-2	76,064	47,54	
	COM001/3-2	76,889	48,06	
	COM001/3-2	77,095	48,18	
	COM001/4-2	76,521	47,83	
	COM001/4-2	74,981	46,87	
Idade:28dias Data:10/03/2021 Hora:11h15	COM001/2-3	91,697	57,31	58,9
	COM001/2-3	97,634	61,02	
	COM001/3-3	91,298	57,06	
	COM001/3-3	96,829	60,52	
	COM001/4-3	95,276	59,55	
	COM001/4-3	92,511	57,82	

7.1.2 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Tabela 11-Resultados dos ensaios de resíduo

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	25,1	0,50	1,99	1,9
	2	25,1	0,50	1,99	
	3	24,8	0,44	1,77	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

onde: Ri -resíduo de peneiração do cimento na determinação i;

M₁ -massa do provete;

M₂ -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Massa da amostra (g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65,02	17	18	0,6	0,0	23,5	23,2	2,8

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)}$$

onde: ρ – é a massa volúmica;

M₁- massa do provete seco;

V₁- valor lido no início, no voluminímetro, no ensaio;

V₂- valor lido no fim, no voluminímetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	91	4,519	4,486
Constante de calibração(K)	25,3*	90	4,494	
Porosidade(ε)	0,500*	88	4,444	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$Formação\ da\ camada = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 3,11 \times 1,836 = 2,86g$$

$$S = \frac{52,43xKx\sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa:100,5g; Temperatura da estufa:110°C.

Tabela 12-Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade(%)
1.	Tabuleiro	215,0	17/03/21-07h50	1,2
2.	Tabuleiro+Cimento	315,5	17/03/21-08h00	
3.	1ª pesagem	314,1	17/03/21-12h10	
4.	2ª pesagem	314,3	18/03/21-08h40	
5.	M ₃ = (linha4 – linha1) = 99,3g			

- **Consistência normal**

Tabela 13-Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
150,4	0	500,1
145,4	3	500,0
143,4	8	500,1

-Quantidade de água para consistência normal=143,4g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 28,68\%$$

- **Tempos de presa**

Tabela 14-Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	3:00	-
1:30	0	4:00	-
2:00	7	4:59	0,5

-Tempo de início de presa=120min

-Tempo de fim de presa=299mn

Tabela 15-Resultados para ensaio de determinação de expansibilidade.

	Afastamento das agulhas depois de 24h na câmara de cura		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
	LA(mm)		LC(mm)	
Aparelho de Le Chatelier		74,93		75,20
	LD(mm)	35,43	LE(mm)	36,10

Expansibilidade: $L=L_C-L_A=75,20-74,93=0,27\text{mm}$

ANEXO 4-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-6

7.1.3 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 11h09 7dias: hora: 11h19 28dias: hora: 11h32
- Temperatura do local:19,8°C Humidade relativa do local:54%
- Data: 02/03/2021

Tabela 16-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/2-1	1356,9	450,1	225,1
COM001/3-1	1356,0	450,1	225,1
COM001/4-1	1357,9	450,2	225,1

Tabela 17-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/2-1	2	599,5	3,182	7,46	7,3
COM001/3-1		596,6	3,220	7,55	
COM001/4-1		596,2	2,977	6,98	
COM001/2-2	7	599,6	3,352	7,86	7,8
COM001/3-2		596,8	3,141	7,36	
COM001/4-2		599,4	3,428	8,03	
COM001/2-3	28	605,4	3,798	8,90	8,8
COM001/3-3		598,9	3,841	9,00	
COM001/4-3		602,2	3,562	8,35	

Tabela 18-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:04/03/2021 Hora:11h09	COM001/2-1	49,786	31,12	32,3
	COM001/2-1	49,951	31,22	
	COM001/3-1	53,304	33,32	
	COM001/3-1	51,872	32,42	
	COM001/4-1	52,210	32,63	
	COM001/4-1	52,851	33,03	
Idade:7dias Data:09/03/2021 Hora:11h19	COM001/2-2	67,439	42,15	42,4
	COM001/2-2	64,769	40,48	
	COM001/3-2	71,727	44,83	
	COM001/3-2	68,829	43,02	
	COM001/4-2	67,560	42,22	
	COM001/4-2	66,248	41,41	
Idade:28dias Data:30/03/2021 Hora:11h32	COM001/2-3	82,189	51,37	53
	COM001/2-3	85,369	53,36	
	COM001/3-3	85,507	53,44	
	COM001/3-3	85,245	53,28	
	COM001/4-3	87,458	54,66	
	COM001/4-3	82,887	51,80	

7.1.4 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Tabela 19-Resultados para ensaio de determinação de resíduo.

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	24,99	0,45	1,79	1,8
	2	25,02	0,46	1,85	
	3	24,99	0,44	1,76	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

onde: Ri -resíduo de peneiração do cimento na determinação i;

M₁ -massa do provete;

M₂ -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 20-Resultados do ensaio para determinação de massa volúmica.

Massa da amostra (g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65,01	17	18,5	0,4	0,2	22,5	22,3	2,94

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)}$$

onde: ρ – é a massa volúmica;

M₁- massa do provete seco;

V₁- valor lido no início, no voluminómetro, no ensaio;

V₂- valor lido no fim, no voluminómetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 21-Resultados de ensaio para determinação de área específica.

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	96	4,421	4,451
Constante de calibração(K)	25,3*	96	4,421	
Porosidade(ε)	0,500*	100	4,512	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$\text{Formação da camada} = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 2,94 \times 1,836 = 2,7g$$

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa:100,5g. Temperatura da estufa 110°C.

Tabela 22-Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade.

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade(%)
1.	Tabuleiro	215,1	17/03/21-07h50	0,7
2.	Tabuleiro+Cimento	315,5	17/03/21-08h00	
3.	1ª pesagem	314,5	17/03/21-12h10	
4.	2ª pesagem	314,8	18/03/21-08h40	
5.	M ₃ = (linha4 – linha1) = 99,7g			

- **Consistência normal**

Tabela 23-Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
140,4	2	500,1
137,5	5	500,1

-Quantidade de água para consistência normal=137,5g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 27,5\%$$

- **Tempos de presa**

Tabela 24-Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	3:00	-
1:30	2	4:00	-
2:00	9	5:02	0,5

-Tempo de início de presa=120min

-Tempo de fim de presa=302min

Tabela 25-Resultados do ensaio para determinação de expansibilidade.

Aparelho de Le Chatelier	Afastamento das agulhas depois de 24h câmara de cura		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
	LA(mm)	LD(mm)	LC(mm)	LE(mm)
	14,92	28,93	16,06	29,57

Expansibilidade: $L=L_C-L_A=16,06-14,92=1,14\text{mm}$

ANEXO 5-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-13

7.1.5 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 09h13 7dias: hora: 09h18 28dias: hora: 09h27
- Temperatura do local:19,9°C Humidade relativa do local:51%
- Data: 08/03/2021

Tabela 26-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/6-1	1357,8	450,2	225,1
COM001/8-1	1356,9	450,1	225,1
COM001/10-1	1357,2	450,2	225,1

Tabela 27-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/6-1	2	593,9	3,146	7,37	7,1
COM001/8-1		588,1	2,955	6,93	
COM001/10-1		591,6	2,949	6,91	
COM001/6-2	7	597,3	3,357	7,87	7,7
COM001/8-2		584,3	2,222	6,21	
COM001/10-2		596,2	3,004	7,04	
COM001/6-3	28				
COM001/8-3					
COM001/10-3					

Tabela 28-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:10/03/2021 Hora:09h13	COM001/6-1	50,209	31,38	30,7
	COM001/6-1	48,425	30,27	
	COM001/8-1	48,845	30,53	
	COM001/8-1	48,801	30,50	
	COM001/10-1	50,305	31,44	
	COM001/10-1	48,144	30,09	
Idade:7dias Data:15/03/2021 Hora:09h18	COM001/6-2	63,472	39,67	38,9
	COM001/6-2	64,035	40,02	
	COM001/8-2	58,571	36,61	
	COM001/8-2	58,939	36,84	
	COM001/10-2	64,101	40,06	
	COM001/10-2	63,799	39,87	
Idade:28dias Data:05/04/2021 Hora:09h27	COM001/6-3	77,175	48,23	45,9
	COM001/6-3	69,756	43,60	
	COM001/8-3	70,935	44,33	
	COM001/8-3	76,559	47,85	
	COM001/10-3	73,923	46,20	
	COM001/10-3	72,587	45,37	

7.1.6 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Tabela 29-Resultados para determinação do resíduo.

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	25,0	0,41	1,65	1,7
	2	25,0	0,41	1,64	
	3	25,02	0,45	1,81	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \quad \text{onde: } Ri \text{ -resíduo de peneiração do cimento na determinação } i;$$

M_1 -massa do provete;

M_2 -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 30-Resultados para ensaio de detrminação da massa volúmica.

Massa da amostra (g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65,02	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	3,08
	19	19	0,4	0,2	21,6	21,3	

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)} \quad \text{onde: } \rho \text{ – é a massa volúmica;}$$

M_1 - massa do provete seco;

V_1 - valor lido no início, no voluminímetro, no ensaio;

V_2 - valor lido no fim, no voluminímetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 31-Resultados dos ensaios para determinação da área específica.

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	110	4,517	4,543
Constante de calibração(K)	25,3*	112	4,557	
Porosidade(ε)	0,500*	112	4,557	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$\text{Formação da camada} = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 3,11 \times 1,836 = 2,86g$$

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa:100,6g; Temperatura na estufa 110°C.

Tabela 32-Resultados do ensaio para determinação do teor de humidade.

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade(%)
1.	Tabuleiro	215,4	17/03/21-07h50	0,9
2.	Tabuleiro+Cimento	316,0	17/03/21-08h00	
3.	1ª pesagem	315,0	17/03/21-12h10	
4.	2ª pesagem	315,1	18/03/21-08h40	
5.	M ₃ = (linha4 – linha1) = 99,7g			

- **Consistência normal**

Tabela 33-Resultados do ensaio para determinação da consistência normal.

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
135,4	22	500,1
138	6	500

-Quantidade de água para consistência normal=138g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 27,6\%$$

- **Tempos de presa**

Tabela 34-Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	3:00	-
1:30	3	4;00	-
2:00	5	5:05	0,5

-Tempo de início de presa=120min

-Tempo de fim de presa=305min

Tabela 35-Resultados do ensaio para determinação da expansibilidade.

	Afastamento das agulhas depois de 24h na câmara de cura		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
	LA(mm)	LD(mm)	LC(mm)	LE(mm)
Aparelho de Le Chatelier	17,85	23,85	20,66	26,64

Expansibilidade: $L=L_C-L_A=20,66-17,85=2,81\text{mm}$

ANEXO 6-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-20

7.1.7 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 09h30 7dias: hora: 09h38 28dias: hora: 09h47
- Temperatura do local:19,9°C Humidade relativa do local:51%
- Data: 08/03/2021

Tabela 36-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/1-1	1357,2	450,2	225,1
COM001/3-1	1354,8	450,2	225,1
COM001/5-1	1356,1	450,2	225,1

Tabela 37-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/1-1	2	594,5	2,903	6,8	5,5
COM001/3-1		598,3	2,654	6,22	
COM001/5-1		597,3	1,542	3,61	
COM001/1-2	7	595,3	2,881	6,75	6,3
COM001/3-2		599,9	2,810	6,59	
COM001/5-2		599,7	2,397	5,62	
COM001/1-3	28	599,9	3,198	7,50	7,4
COM001/3-3		602,0	3,064	7,18	
COM001/5-3		604,3	3,196	7,49	

Tabela 38-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:10/03/2021 Hora:09h30	COM001/1-1	46,159	28,85	30,9
	COM001/1-1	45,992	28,04	
	COM001/3-1	44,861	33,36	
	COM001/3-1	42,684	28,74	
	COM001/5-1	53,370	26,68	
	COM001/5-1	54,615	34,13	
Idade:7dias Data:15/03/2021 Hora:09h38	COM001/1-2	57,199	35,75	37,4
	COM001/1-2	56,528	35,33	
	COM001/3-2	56,710	35,44	
	COM001/3-2	57,183	35,74	
	COM001/5-2	65,677	41,05	
	COM001/5-2	65,487	40,93	
Idade:28dias Data:05/04/2021 Hora:09h47	COM001/1-3	70,580	44,11	45,4
	COM001/1-3	67,933	42,46	
	COM001/3-3	78,076	48,80	
	COM001/3-3	70,608	44,13	
	COM001/5-3	70,743	44,21	
	COM001/5-3	77,397	48,37	

7.1.8 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Tabela 39-Resultados do ensaio para determinação de resíduo.

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	25,0	0,38	1,52	1,5
	2	25,0	0,378	1,51	
	3	25,0	0,373	1,49	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \quad \text{onde: } Ri \text{ -resíduo de peneiração do cimento na determinação } i;$$

M_1 -massa do provete;

M_2 -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Massa da amostra(g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65,01	16	17	0,7	0,3	23,6	23,4	2,81

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)} \quad \text{onde: } \rho \text{ - é a massa volúmica;}$$

M_1 - massa do provete seco;

V_1 - valor lido no início, no voluminímetro, no ensaio;

V_2 - valor lido no fim, no voluminímetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	95	4,6	4,599
Constante de calibração(K)	25,3*	96	4,623	
Porosidade(ε)	0,500*	94	4,576	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$\text{Formação da camada} = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 2,81 \times 1,836 = 2,58g$$

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa:100,2g. Temperatura na estufa:110°C.

Tabela 40-Resultados para determinação do teor de humidade.

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade
1.	Tabuleiro	211,6	17/03/21-07h50	0,6
2.	Tabuleiro+Cimento	311,8	17/03/21-08h00	
3.	1ª pesagem	311,0	17/03/21-12h10	
4.	2ª pesagem	311,2	18/03/21-08h40	
5.	$M_3 = (\text{linha4} - \text{linha1}) = 99,6\text{g}$			

- **Consistência normal**

Tabela 41-Resultados do ensaio para determinação de consistência normal.

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
138,4	32	500,1
143	3	500
142,5	6	500,1

-Quantidade de água para consistência normal=142,5g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 28,5\%$$

- **Tempos de presa**

Tabela 42-Resultados do ensaio para determinação dos tempos de presa.

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	5:00	-
1:30	3	6:00	-
2:00	5	7:14	0,5

-Tempo de início de presa=120min

-Tempo de fim de presa=434min

Tabela 43-Resultados de ensaio para determinação de expansibilidade.

	Afastamento das agulhas depois de 24h na câmara de cura		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
	LA(mm)		LC(mm)	
Aparelho de Le Chatelier		23,24		28,45
	LD(mm)	24,39	LE(mm)	28,6

Expansibilidade: $L=L_C-L_A=28,45-23,24=5,21\text{mm}$

ANEXO 7-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-27

7.1.9 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 09h10 7 dias: hora: 09h28 28 dias: hora: 09h30
- Temperatura do local: 22°C Humidade relativa do local: 56%
- Data: 14/04/2021

Tabela 44-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/8-1	1355,9	450,2	225,2
COM001/9-1	1356,1	450,2	225,2
COM001/10-1	1356,3	450,2	225,1

Tabela 45-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/8-1	2	585,9	2,627	6,16	5,3
COM001/9-1		584,4	1,303	3,05	
COM001/10-1		582,9	2,829	6,63	
COM001/8-2	7	583,5	2,646	6,20	5,6
COM001/9-2		585,2	1,613	3,78	
COM001/10-2		583,2	2,867	6,72	
COM001/8-3	28	590,2	2,824	6,62	6,4
COM001/9-3		590,4	3,004	7,04	
COM001/10-3		586,8	2,323	5,44	

Tabela 46-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:16/04/2021 Hora:09h10	COM001/8-1	44,809	28,01	27,1
	COM001/8-1	44,259	27,66	
	COM001/9-1	42,310	26,44	
	COM001/9-1	42,821	26,76	
	COM001/10-1	43,798	27,37	
	COM001/10-1	42,549	26,59	
Idade:7dias Data:21/04/2021 Hora:09h20	COM001/8-2	50,761	31,73	32,3
	COM001/8-2	52,941	33,09	
	COM001/9-2	51,528	32,21	
	COM001/9-2	52,238	32,65	
	COM001/10-2	51,443	32,15	
	COM001/10-2	51,111	31,94	
Idade:28dias Data:12/05/2021 Hora:09h30	COM001/8-3	62,529	39,08	39,4
	COM001/8-3	61,256	38,29	
	COM001/9-3	63,236	39,52	
	COM001/9-3	64,610	40,38	
	COM001/10-3	63,568	39,73	
	COM001/10-3	63,205	39,50	

7.1.10 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	25,1	0,36	1,45	1,4
	2	24,9	0,34	1,35	
	3	25,0	0,35	1,4	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

onde: Ri -resíduo de peneiração do cimento na determinação i;

M₁ -massa do provete;

M₂ -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 47-Resultados do ensaio para determinação da massa volúmica.

Massa da amostra(g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65,01	18	18	0,5	0,0	22,6	22,4	2,9

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)}$$

onde: ρ – é a massa volúmica;

M₁- massa do provete seco;

V₁- valor lido no início, no voluminímetro, no ensaio;

V₂- valor lido no fim, no voluminímetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 48-Resultados do ensaio para determinação de área específica.

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	100	4,571	4,616
Constante de calibração(K)	25,3*	103	4,639	
Porosidade(ε)	0,500*	103	4,639	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$\text{Formação da camada} = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 2,9 \times 1,836 = 2,66g$$

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa: 100,5g; Temperatura da estufa: 110°C.

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade
1.	Tabuleiro	215	16/04/21-07h50	0,8
2.	Tabuleiro+Cimento	315,5	16/04/21-08h00	
3.	1ª pesagem	314,1	16/04/21-12h10	
4.	2ª pesagem	314,3	17/04/21-08h40	
5.	$M_3 = (\text{linha4} - \text{linha1}) = 99,3g$			

- **Consistência normal**

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
150,4	0	500,1
145	8	500

-Quantidade de água para consistência normal=145g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 29,0\%$$

- Tempos de presa

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	5:30	-
1:30	0	6:00	-
2:00	0	6:30	-
2:30	2	7:00	-
2:50	6	7:30	0,5

-Tempo de início de presa=150min

-Tempo de fim de presa=450min

	Afastamento das agulhas depois de 24h de cura na câmara húmida		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
Aparelho de Le Chatelier	L _A (mm)	74,93	L _C (mm)	82,25
	L _D (mm)	30,43	L _E (mm)	36,10

Expansabilidade: $L=L_C-L_A=82,25-74,93=7,32\text{mm}$

ANEXO 8-Resultados dos ensaios físicos e mecânicos da A-34

7.1.11 Resultados dos ensaios mecânicos

Amassadura:

- O cimento, a areia normalizada, a água e o equipamento a uma temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 2 dias: hora: 09h45 7 dias: hora: 09h55 28 dias: hora: 10h05
- Temperatura do local: 22°C Humidade relativa do local: 56%
- Data: 14/04/2021

Tabela 49-Composição da amassadura.

Molde	Areia CEN(g)	Cimento(g)	Água destilada(g)
COM001/3-1	1358,1	450,2	225,1
COM001/4-1	1357,5	450,2	225,3
COM001/5-1	1357,8	450,2	225,2

Tabela 50-Resultados dos ensaios de flexão.

N° do Provete	Idade(dias)	Peso(g)	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão rotura(Mpa)
COM001/3-1	2	574,2	2,632	6,17	3,9
COM001/4-1		577,9	1,356	3,18	
COM001/5-1		579,0	1,099	2,58	
COM001/3-2	7	576,6	2,673	6,26	5,4
COM001/4-2		581,3	2,834	6,64	
COM001/5-2		579,6	1,412	3,31	
COM001/3-3	28	580,9	3,652	8,56	5,5
COM001/4-3		589,8	0,403	0,94	
COM001/5-3		576,8	2,947	6,91	

Tabela 51-Resultados de ensaio de compressão.

Ensaio	N° do Provete	Força(kN)	Tensão(Mpa)	Tensão de Rotura(Mpa)
Idade:2dias Data:16/04/2021 Hora:09h45	COM001/3-1	34,760	21,73	22,4
	COM001/3-1	34,645	21,65	
	COM001/4-1	35,794	22,37	
	COM001/4-1	36,575	22,86	
	COM001/5-1	37,768	23,61	
	COM001/5-1	35,536	22,21	
Idade:7dias Data:21/04/2021 Hora:09h55	COM001/3-2	43,465	27,17	28,0
	COM001/3-2	42,915	26,82	
	COM001/4-2	44,254	27,66	
	COM001/4-2	46,530	29,08	
	COM001/5-2	46,957	29,35	
	COM001/5-2	44,911	28,07	
Idade:28dias Data:12/05/2021 Hora:10h05	COM001/3-3	44,529	27,83	30,2
	COM001/3-3	46,860	26,36	
	COM001/4-3	50,605	29,29	
	COM001/4-3	42,181	30,00	
	COM001/5-3	47,999	31,63	
	COM001/5-3	57,568	35,98	

7.1.12 Resultados dos ensaios físicos

- Resíduo

Peneiro	Provete	M ₁ (g)	M ₂ (g)	R _i (%)	R(%)
90µm	1	25,3	0,32	1,25	1,2
	2	25,5	0,3	1,3	
	3	24,7	0,26	1,05	

$$Ri = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

onde: Ri -resíduo de peneiração do cimento na determinação i ;

M_1 -massa do provete;

M_2 -massa do provete retido no peneiro.

- **Massa volúmica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Tabela 52-Resultados da determinação de massa volúmica

Massa da amostra(g)	Temperatura do banho(°C)		Leituras de volume(cm ³)				Massa volúmica (g/cm ³)
	Inicial	Final	Inicial	Corrigida(V ₁)	Final	Corrigida(V ₂)	
65	16	17	0,7	0,3	21,6	21,2	3,11

$$\rho = \frac{M_1}{(V_2 - V_1)}$$

onde: ρ – é a massa volúmica;

M_1 - massa do provete seco;

V_1 - valor lido no início, no voluminímetro, no ensaio;

V_2 - valor lido no fim, no voluminímetro, no ensaio.

- **Área específica**

Condições da sala(Temperatura: 22°C; Humidade Relactiva; 55%)

Permeabilímetro Blaine	LEM-BLA 001	Tempo de escoamento(s)	Área específica(cm ² /g)	Média(cm ² /g)
Volume da camada(cm ³)	1,836*	138	4,99	5,061
Constante de calibração(K)	25,3*	142	5,076	
Porosidade(ϵ)	0,500*	144	5,118	

*valores tabelados (norma moçambicana NP EN 196-6)

$$Formação\ da\ camada = M_2 = 0,500 \times \rho \times V = 0,500 \times 3,11 \times 1,836 = 2,86g$$

$$S = \frac{52,43xKx\sqrt{t}}{\rho}$$

onde: **S**- Área específica;

K- constante de calibração;

t-tempo de escoamento;

ρ-massa volúmica.

- **Teor de humidade por secagem em estufa ventilada**

Massa do provete a secar em estufa:100,5g; Temperatura da estufa:110°C

	Operação	Pesagem(g)	Data-Hora	Teor de humidade(%)
1.	Tabuleiro	215	16/0421-07h50	1,1
2.	Tabuleiro+Cimento	315,5	16/0421-08h00	
3.	1ª pesagem	314,1	16/04/21-12h10	
4.	2ª pesagem	314,3	17/04/21-08h40	
5.	M ₃ = (linha4 – linha1) = 99,7g			

- **Consistência normal**

Quantidade de água(g)	Distância entre a sonda e a placa de base(mm)	Quantidade de cimento (g)
150,4	0	500,1
146,7	8	500,1

-Quantidade de água para consistência normal=146,7g

$$\text{Teor de água da pasta normal} = \frac{\text{água}}{500} \times 100\% = 29,3\%$$

- Tempos de presa

Tempo de início de presa		Tempo de fim de presa	
Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)	Tempo(h:min)	Penetração da agulha(mm)
1:00	0	6:30	-
1:30	0	7:00	-
2:00	0	7:30	-
2:30	2	8:00	-
2:40	7	8:25	0,5

-Tempo de início de presa=160min

-Tempo de fim de presa=505min

Aparelho de Le Chatelier	Afastamento das agulhas depois de 24h de cura na câmara húmida		Afastamento das agulhas depois de 3h em ebulição	
	LA(mm)	66,08	LC(mm)	75,20
	LD(mm)	27,43	LE(mm)	36,10

Expansabilidade: $L=L_C-L_A=75,20-66,08=9,12\text{mm}$