



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Márcio Couceiro Saraiva de Melo

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE ALGAROBA COMO MATÉRIA-PRIMA
ALTERNATIVA PARA USO EM BLOCOS DE SOLO-CAL**

Campina Grande - PB
2018

Márcio Couceiro Saraiva de Melo

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE ALGAROBA COMO MATÉRIA-PRIMA
ALTERNATIVA PARA USO EM BLOCOS DE SOLO-CAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves (UFCG)

Orientador: Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes (UFCG)

Campina Grande - PB
2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M528u Melo, Márcio Couceiro Saraiva de.
Utilização de cinza de algaroba como matéria-prima alternativa para uso em blocos de solo-cal / Márcio Couceiro Saraiva de Melo. – Campina Grande, 2018.
104 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes".
Referências.

1. Cinza de Algaroba - Engenharia de Materiais. 2. Controle de Cura. 3. Bloco de Solo-cal com Resíduo. I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Menezes, Romualdo Rodrigues. III. Título.

CDU 620. 1:582.736.1(043)

MÁRCIO COUCEIRO SARAIVA DE MELO

- 1990 Graduação em engenharia elétrica pela Universidade Estadual de Pernambuco – UPE
- 2012 Curso de Pós graduação, nível mestrado em engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

MÁRCIO COUCEIRO SARAIVA DE MELO

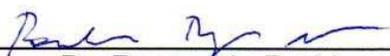
UTILIZAÇÃO DE CINZA DE ALGAROBA COMO MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA
PARA USO EM BLOCOS DE SOLO-CAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

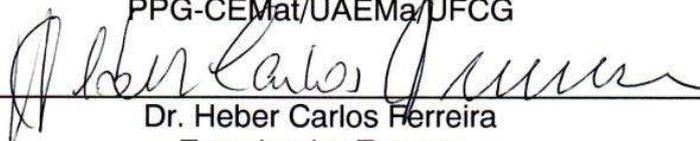
Aprovado em: 28/02/2018



Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG



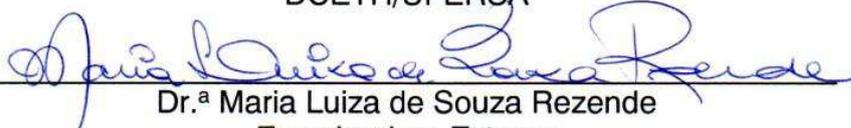
Dr. Romualdo Rodrigues Menezes
Orientador
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG



Dr. Heber Carlos Ferreira
Examinador Externo
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG



Dr.^a Sâmnea Valensca Alves Barros
Examinadora Externa
DCETH/UFERSA



Dr.^a Maria Luiza de Souza Rezende
Examinadora Externa
CCT/UAEP/UFCG



Dr.^a Lisiane Navarro de Lima Santana
Examinadora Interna
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Cinthya e às minhas filhas Gabriela e Maiara pelo incentivo e apoio que me fizeram começar, avançar e concluir mais esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida plena pela qual posso pensar e construir todos os meus objetivos.

À minha família, esposa, filhas, por tanta compreensão e apoio constantes que me dedicaram nas minhas inúmeras horas de ausência familiar.

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado durante toda a minha jornada de vida sempre me incentivando, apoiando e acreditando que longe é um lugar que não existe.

Aos amigos Ricardo e Jonatas, pela amizade e pelos incansáveis incentivos ofertados em todos os momentos vividos durante o meu doutorado.

À Coordenação da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPG-CEmat), na pessoa do Coordenador e Professor Doutor Romualdo Rodrigues Meneses, pelo incentivo e apoio constantes.

Ao meu orientador, Professor Doutor Gelmires de Araújo Neves (UFPE PPG-Cemat), pela confiança em mim depositada e pelo apoio irrestrito e incansável que me foi dado durante todo o percurso de orientação, os quais me permitiram chegar ao término do doutorado com dedicação e estímulo.

Ao professor Doutor Heber Ferreira (UFPE PPG-Cemat), que sempre com muita simplicidade ofertou-me seu vasto conhecimento.

Ao Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), pelos dois anos de afastamento concedidos para esta pesquisa.

À Coordenação do Laboratório de Materiais Construtivos da Universidade Federal de Pernambuco - Campus Agreste (UFPE-CAA), na pessoa da Coordenadora e

Professora Doutora Giuliana Bono, pela concessão de uso do laboratório para execução desta pesquisa.

À Professora Doutora Ana Cecília Vieira Nóbrega, da Universidade Federal de Pernambuco- Campus Agreste (UFPE-CAA), pelas contribuições ofertadas no Laboratório de Materiais Construtivos.

À Coordenação do Laboratório de Química da Universidade Federal de Pernambuco- Campus Agreste (UFPE-CAA), na pessoa da Coordenadora e Professora Doutora Érika Marinho, pela concessão de uso das instalações do laboratório durante a pesquisa.

Aos secretários da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPG-CEmat) André e Márcia, pela disposição e boa vontade constantes nos atendimentos burocráticos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais Construtivos (UFPE-CAA) Fabíola e Everton e aos do Laboratório de Química (UFPE-CAA) Amanda, Claudete, Henrique, Agilson e Wagner, pela disposição, boa vontade e oportunas discussões durante a execução dos experimentos.

Ao Sr. Silvano Silva, da Lavanderia Nova Geração, pelo fornecimento das cinzas de algaroba utilizadas na pesquisa.

RESUMO

A região agreste do estado de Pernambuco possui o terceiro maior polo de confecções do Brasil, no qual uma das etapas industriais utiliza a lenha de algaroba (*prosopis juliflora*) como matriz energética para produção de água quente e vapor gerando, assim, elevado volume de resíduo na forma de cinzas. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a incorporação das cinzas de base (*botton ash*) de lenha de algaroba em blocos de solo-cal por se tratar de um sistema construtivo que possui simplicidade na sua produção, podendo ser uma alternativa para construção de edificações de interesse social. As cinzas foram coletadas em uma lavanderia representativa do polo de confecções do agreste pernambucano. Em seguida, foi desenvolvido um processo de beneficiamento no qual as cinzas foram peneiradas em malha ABNT N°200 (0,074mm), lavadas, calcinadas e hidratadas, sendo produzido cal a partir de cinzas de algaroba. As cinzas de algaroba foram incorporadas aos blocos de solo-cal com a proporção de 1:10 (cal/solo) em substituição parcial ou total da cal comercial, nas proporções de 3, 5 e 7% por cinza de base de lenha de algaroba apenas peneirada em malha ABNT N°200 (0,074mm) e nas proporções de 50%, 75% e 100% por cal de cinza. Após análise dos resultados, verificou-se que a substituição da cal comercial por até 7% de cinza e até 100% de cal de cinza é viável, já que blocos com substituição apresentaram resultados semelhantes aos obtidos por blocos padrão (sem substituição) e de acordo com as exigências da ABNT.

Palavras-chave: Cinza de algaroba. Controle de cura. Bloco de solo-cal com Resíduo.

ABSTRACT

The agreste region of Pernambuco state has the third largest clothing pole in Brazil, where one of the industrial stages uses the algaroba wood (*prosopis juliflora*) as an energy matrix for the production of hot water and steam, thus generating a high volume of waste in the form of ash. The objective of this work was to evaluate the incorporation of algaroba wood bottom ash in blocks of soil-lime, because it is a constructive system that has simplicity in its production, and can be an alternative for the construction of social interest. The ashes were collected in a representative laundry of the clothing pole of Pernambuco state. The algaroba ashes were incorporated into the soil-lime blocks with proportion of 1:10 (lime / soil) in partial or total substitution of the commercial lime, in the proportions of 3, 5 and 7% per algaroba bottom ash (CBLA) only sieved in ABNT No. 200 mesh (0.074mm) and in the proportions of 50%, 75% and 100% by lime of CBLA. After analyzing the results, it was verified that commercial lime substitution by up to 7% of CBLA and up to 100% CBLA lime is feasible, since blocks with substitution presented results similar to those obtained by standard blocks (without substitution) and according to the ABNT requirement. Afterwards, a beneficiation process was developed in which the ashes were sieved in ABNT mesh No. 200 (0.074mm), washed, calcined and hydrated, and produced lime from algaroba ash (CBLA lime). A process for the use of controlled temperature in the cure of soil-lime blocks was also developed in order to avoid that the average variations of 5°C at the ambient temperature of the place where the research was carried out compromised the accuracy of the results of mechanical resistance and water absorption of cured blocks at different times of the year.

Keywords: Algaroba ash, Cure control, Block of soil-lime with residue.

PUBLICAÇÕES

MELO, M.C.S; NEVES,G.A.; MENEZES, R.R.;FERREIRA, H.C.; NOBREGA, A.C.V;
MARINHO, E.P., **Cal produzida a partir de cinza de biomassa rica em cálcio.**
Artigo aceito para publicação na revista Cerâmica em 12 de dezembro de 2017.

MELO, M.C.S; NEVES,G.A.; MENEZES, R.R.;FERREIRA, H.C.; NOBREGA, A.C.V;
MARINHO, E.P., **Use of controlled temperature to cure soil-lime blocks.**
Cerâmica. Artigo submetido à revista cerâmica em 21 de novembro de 2017.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Algaroba (Ribaski <i>et.al</i> ,2009).....	24
Figura 2 - Transformação da estrutura da cal (Guimarães, 2002).....	29
Figura 3 - Calcinação da Cal (Paiva <i>et al.</i> , 2007).....	29
Figura 4 - Argila floculada pela cal (NLA, 2004).....	34
Figura 5 – Argila com água (A) e floculação das partículas (B) (Little,1995).....	34
Figura 6 – Região geográfica onde foi coletado o solo (Google Maps, 2018).....	38
Figura 7 — Região geográfica onde foi realizada a coleta do solo (Google Maps, 2018).....	38
Figura 8 – Coleta do solo a 2,5m de profundidade.....	39
Figura 9- Fornalha da caldeira (A); Cinza de algaroba (B).....	40
Figura 10 - Cinza de algaroba em estado bruto.	40
Figura 11 - Fluxograma do estudo para produção de cal a partir de cinza de base de lenha de algaroba.....	43
Figura 12- Cinza como coletada (A) e Cinza após peneiramento (B).	43
Figura 13 – Forno tipo Mufla EDG.....	46
Figura 14– Cadinho Cadinho 45x 40 mm.....	46
Figura 15 – Cinza peneirada calcinada a 850°C (A); Calcinada a 900°C (B).....	46
Figura 16 – Lavagem da cinza.	47
Figura 17- Cinza calcinada com partículas desagregadas.....	49
Figura 18 – Cinza lavada e seca (A); Maceração (B).....	49
Figura 19 – Aquecimento da água para lavagem (A); Colocação da cinza (B).	50
Figura 20 – Mistura para homogeneização (A); Remoção de borra superficial (B). ..	50
Figura 21 - Cinza lavada e seca (A); Desagregação manual (B).	51
Figura 22- Recipiente metálico (A); Cerâmica vermelha (B); Porcela (C)	51
Figura 23 - Espaço ocupado pelas cinzas dentro o forno (A e B)	52
Figura 24- Concentração de K ₂ O e CaO nas CBLA(AM02) e CBLA lavadas (AM03).	53
Figura 25- Curvas TG/DTG da AM02(CBLA) (A) e AM03(CBLA lavada) (B).	54
Figura 26 - DRX das amostras AM01(cal CHI comercial), AM02(CBLA) e AM04(cal de CBLA).....	57

Figura 27 - Curvas TG/DTG da AM04, cal de CBLA (A) e M01(cal CHI comercial) (B).	58
Figura 28 - Distribuição granulométrica da AM04(cal de CBLA) e AM01(cal CHI comercial).....	60
Figura 29 - Fluxograma da produção de blocos curados com temperatura controlada	62
Figura 30 – Bloco (A); Prensa manual de blocos (B).	64
Figura 31 - Saco de polietileno (A); Bloco embalado (B).....	65
Figura 32- Saco Polietileno (A); Saco PET sobre o de polietileno (B); Embalagem dupla finalizada (C).	65
Figura 33 – Junção entre as duas partes do bloco cortada. Durante o processo (A) e depois de unidas (B)	66
Figura 34 – Forma fixa em folha plástica (A) e (B).	67
Figura 35 – Capeamento de uma das faces (A); Remoção da folha plástica (B).	67
Figura 36 - Padrões de cura natural 28, 60 e 90 dias.	68
Figura 37 - Acondicionamento dos blocos (A); Registrador de temperatura (B)	68
Figura 38 – Freezer modificado (A); Controle de temperatura digital externo (B)	69
Figura 39 – Controlador de temperatura digital	69
Figura 40- Histórico de temperatura ambiente na cidade de Caruaru-PE.....	70
Figura 41 - Blocos sendo curados a 40 +/- 1°C.....	70
Figura 42 - Classificação do solo de acordo com o diagrama Trilinear Textural (Embrapa modificado, 2006)	73
Figura 43 - Difração de raios X do solo	74
Figura 44 - Ensaio de compactação.....	75
Figura 45– Resistência dos blocos curados pelos processos CTAV e CTAIS.	76
Figura 46 – Determinação do tempo necessário para equivalência entre processo CTAV e TCC.	77
Figura 47 - Resistência mecânica de blocos curados pelos processos CTAV e TCC.	78
Figura 48- Absorção de água blocos curados nos processos CTAV e TCC.	79
Figura 49 - Fluxograma da fabricação e avaliação de blocos de solo cal com matéria prima alternativa.....	80
Figura 50 – Barras de argamassa em solução agressiva (A) e na estufa a 80°C (B).....	82
Figura 51 – Reatividade potencial do solo a reação álcali-agregado.	82
Figura 52 – Resistência mecânica de blocos com 3, 5 e 7% de substituição de cal comercial por cinza peneirada (CBLA).....	86

Figura 53 - Absorção de água de blocos com 3, 5 e 7% de substituição de cal comercial por cinza peneirada (CBLA).....	86
Figura 54 – Resistência mecânica de blocos com 50, 75 e 100% de substituição da cal comercial por cal de CBLA	87
Figura 55 – Absorção de água de blocos com 50, 75 e 100% de substituição da cal comercial por cal de CBLA.....	88
Figura 56 - Difração de raios X bloco de solo-cal padrão (cal comercial)	89
Figura 57 - Difração de raios X blocos com substituição de cal industrial por CBLA	90
Figura 58 - Difração de raios X blocos com substituição de cal industrial por cal de CBLA.....	91
Figura 59- TG/DTG blocos solo-cal com cal comercial (sem substituição) sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)	92
Figura 60- TG/DTG blocos solo-cal com 3% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	93
Figura 61- TG/DTG blocos solo-cal com 5% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	94
Figura 62- TG/DTG blocos solo-cal com 7% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	94
Figura 63- TG/DTG blocos solo-cal com 50% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	95
Figura 64- TG/DTG blocos solo-cal com 75% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	95
Figura 65- TG/DTG blocos solo-cal com 100% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B).....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da cinza de algaroba.....	25
Tabela 2 - Exigências químicas mínimas da cal hidratada.....	28
Tabela 3 - Exigências físicas mínimas da cal hidratada.....	28
Tabela 4 - Exigências químicas mínimas.	31
Tabela 5 - Exigências físicas mínimas.	31
Tabela 6- Rendimento do processo de beneficiamento.	55
Tabela 7 - Composição química das amostras por FRX: AM01(cal CHI.....	56
Tabela 8 – Comparativo da AM04(Cal de CBLA) com a ABNT NBR 7175 (2003)....	60
Tabela 9– Avaliação solo utilizado na pesquisa	72
Tabela 10 - Composição química do solo	72
Tabela 11 – Composição granulométrica do solo	73
Tabela 12 – Concentração de sódio e potássio por FRX: cal comercial CHI,	83
Tabela 13 - Amostras de aglomerante com substituição parcial ou total de cal	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CPRH	Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CBLA	Cinza de Base de Lenha de Algaroba
CTAV	Cura à Temperatura Ambiente no Verão
CTAIS	Cura à Temperatura Ambiente no Inverno Simulado
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difração de raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de raios X
IPA	Instituto Agrônomo de Pernambuco
NLA	National Lime Association
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TCC	Temperatura de Cura Controlada
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	CINZAS DE BIOMASSA.....	21
2.2	CINZAS DE BIOMASSA RICAS EM CÁLCIO	22
2.2.1	Cinza de algaroba	23
2.3	PRODUÇÃO DE POTÁSSIO A PARTIR DE CINZAS DE BIOMASSA	26
2.4	A CAL	27
2.4.1	Processo de fabricação	27
2.4.2	Fontes alternativas de carbonato de cálcio para a produção de cal.....	30
2.5	MATERIAL POZOLANICO	30
2.5.1	Influência da temperatura nas reações pozolânicas.....	32
2.6	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CAL (SOLO-CAL)	33
2.7	BLOCOS DE SOLO-CAL.....	35
2.8	DURABILIDADE.....	36
2.8.1	Reação alcali agregado (alcali-silica).....	36
3	MATERIAIS.....	38
3.1	SOLO.....	38
3.2	CAL.....	39
3.3	CINZA DE ALGAROBA	40
3.4	ÁGUA PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE SOLO-CAL	40
3.5	ÁGUA DE LAVAGEM DAS CINZAS.....	41
4	METODOLOGIA, RESULTADOS E CONCLUSÃO	42
4.1	PRODUÇÃO DE CAL A PARTIR DE CINZA DE LENHA DE ALGAROBA... 42	
4.1.1	METODOLOGIA.....	43
4.1.1.1	Beneficiamento das matérias-primas	43
4.1.1.2	Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas alternativas e convencionais.....	44
4.1.1.3	Processo de produção de cal a partir da cinza de algaroba.....	45
4.1.2	RESULTADOS	52
4.1.2.1	Avaliação da eficiência da lavagem da CBLA	53

4.1.2.2	Avaliação da produção de cal de CBLA	55
4.1.3	CONCLUSÃO PARCIAL	61
4.2	USO DE TEMPERATURA CONTROLADA PARA CURA DE BLOCOS DE SOLO CAL	61
4.2.1	METODOLOGIA.....	62
4.2.1.1	Beneficiamento das matérias primas	62
4.2.1.2	Caracterização física, química e mineralógica das matérias primas.....	63
4.2.1.3	Produção e avaliação dos blocos de solo-cal.....	64
4.2.1.4	Processos de cura.....	67
4.2.2	RESULTADOS	71
4.2.2.1	Matérias primas e insumos.....	71
4.2.2.2	Determinação do teor de água através do ensaio de compactação.....	75
4.2.2.3	Impacto da variação de temperatura ambiente na cura de blocos de solo-cal	76
4.2.2.4	Cura com temperatura controlada	77
4.2.2.5	CONCLUSÃO.....	79
4.3	AVALIAÇÃO DE BLOCOS DE SOLO-CAL COM SUBSTITUIÇÃO DA CAL COMERCIAL POR RESÍDUO BENEFICIADO	80
4.3.1	METODOLOGIA.....	81
4.3.1.1	Matérias-primas.....	81
4.3.1.2	Determinação dos percentuais de CBLA e de cal de CBLA a serem utilizado nos blocos de solo-cal	81
4.3.1.3	Produção e avaliação dos blocos de solo-cal.....	84
4.3.2	RESULTADOS	85
4.3.3	CONCLUSÃO	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e os hábitos de consumo têm provocado um aumento significativo na quantidade de resíduos sólidos produzidos. Do ponto de vista energético, a preocupação ambiental tem estimulado o uso crescente de fontes de energia renováveis para geração de energia elétrica e calor. Segundo o Balanço Energético Nacional do ministério das minas e energia (BEN, 2016), a biomassa é uma das fontes de energia com grande potencial para os próximos anos, já representando em 2015 uma referência de 8% de toda energia consumida no Brasil.

Cinzas produzidas pela queima de biomassa são resíduos sólidos gerados em grande quantidade e que normalmente não possuem destinação adequada para seu descarte, propiciando crescente interesse no desenvolvimento de alternativas para sua utilização visando minimizar os impactos ambientais (Hurtado *et al.*, 2014).

No agreste pernambucano, a lenha de algaroba (*prosopis juliflora*) é muito utilizada como combustível para aquecimento de água e para produção de vapor em lavanderias industriais no processo de beneficiamento do jeans no polo de confecções do estado, gerando cerca de 1100 ton/mês de cinza de base (*bottom ash*) que são descartadas sem nenhum tipo de controle, estimulando pesquisas para sua reutilização em produtos para a construção civil (Vassilev *et al.*, 2013), como o uso em blocos de solo estabilizados com cal (solo-cal) em substituição parcial ou total da cal comercial pelas cinzas beneficiadas.

A cinza de base lenha de algaroba (CBLA) é uma biomassa que apresenta na sua composição química uma elevada concentração de cálcio (Kumar e Chandrashekan, 2016) podendo ser, portanto, uma fonte alternativa para a produção de cal. A cal é produzida a partir de calcário do tipo cálcico (CaCO_3) ou dolomítico ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$) que após sua extração e britagem é aquecido a uma temperatura entre 750 e 900 °C, dependendo de sua composição química, produzindo assim cal viva, e caso seja hidratada se transforma em cal extinta ou cal hidratada (ABNT NBR 7175, 2003).

Assim, foi desenvolvido um processo de beneficiamento segundo o qual, através da redução da concentração do potássio existente nas cinzas foi permitida a produção de óxido de cálcio reativo (cal viva) no processo de calcinação, e que após sua hidratação foi obtido hidróxido de cálcio (cal hidratada). A remoção do potássio foi fundamental já que o mesmo, atuando como um fundente (Folletto *et al.*, 2005), antecipa estruturas de óxido de cálcio com baixa ou nenhuma reatividade e que só ocorreriam em temperaturas superiores a 950°C.

Blocos compactados de solo-cal utilizam o mesmo princípio da estabilização de solo com cal para adquirir resistência mecânica; ou seja, a argila presente no solo tem sua estrutura atacada pelo baixo pH propiciado pela cal na presença de água, solubilizando a sílica e a alumina presentes na argila, que por sua vez, reagem com a cal através de reação pozolânica (Al-Mukhtar *et al.*, 2010) e (Ouhadi *et al.*, 2014).

No entanto, a cinética de solubilização da sílica e alumina e da reação do Ca(OH)_2 , para formação dos silicatos, é influenciada pela temperatura do meio afetando a formação de fases hidratadas resultante da reação pozolânica (Rojas e Rojas, 2003). Caso a temperatura seja elevada, a reação pozolânica é acelerada promovendo o ganho de resistência em menor intervalo de tempo. Caso ocorra o inverso, a reação desacelera e pode até ser interrompida em temperaturas muito baixas, voltando a reagir quando a temperatura tornar a subir (Bell, 1996). Nesse cenário, como a cura na produção de blocos de solo-cal é realizada em condições ambientes, estes podem sofrer influência da variação de temperatura durante o processo de cura.

A variação média de temperatura ambiente ocorrida entre os períodos de inverno e verão é de 5°C na região onde foi realizado este trabalho, tomando como referência a série histórica de 30 anos (Climatempo, 2017). No entanto, salienta-se que essa região apresenta baixas variações de temperatura ao longo do ano por se localizar no hemisfério sul e com certa proximidade da linha do Equador. Em outras regiões do Brasil e do mundo podem ocorrer variações de temperatura bem superior ao longo do ano.

A possibilidade de produzir blocos de solo-cal com um resíduo industrial em substituição a cal é relevante tanto no aspecto econômico quanto no ambiental, já que além de evitar a extração do calcário mineral, desenvolve alternativas para uso

de um resíduo sólido gerado em grande quantidade e que não possui destinação adequada para seu descarte, poderá permitir a obtenção de materiais construtivos de menor custo.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de cinza de algaroba como matéria prima alternativa para a fabricação de blocos de solo-cal, através do comportamento da resistência mecânica a compressão simples e absorção de água de blocos de solo-cal com substituição parcial ou total da cal comercial por cinza de base de lenha de algaroba (CBLA), nas proporções de 3, 5 3 7% de substituição e por cal de cinza de base de lenha de algaroba (cal de CBLA), nas proporções de 50, 75 e 100% de substituição, em comparação com blocos fabricado com cal comercial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A preocupação com o meio ambiente tem levado a humanidade a buscar fontes de energia renováveis e dentre elas a biomassa vem ocupando cada vez mais espaço (BEN, 2015). Porém, além do lado benéfico, a combustão de biomassa gera resíduos sólidos no formato de cinzas que necessitam de disposição final adequada.

A gestão de resíduos sólidos é uma das grandes preocupações mundiais devido à sua crescente quantidade gerada, ao custo do transporte para descarte e ao local para os seus acondicionamentos finais. Desta forma, agregar valor ao resíduo e viabilizar sua reciclagem são as melhores opções (Siddique, 2012).

Segundo Vassilev *et al.* (2013), um dos melhores caminhos para reciclagem das cinzas de biomassa está na sua utilização em produtos para a construção civil, fato este ratificado por Genesan *et al.*(2007) e Cordeiro *et al.*(2008) que avaliaram o uso das cinzas na fabricação de produtos cimentícios buscando menor custo de produção e redução do impacto ambiental.

2.1 Cinzas de biomassa

As fontes de biomassa para produção de energia e calor podem ser agrícolas, aquáticas, florestais ou resíduos vegetais (Shane *et al.*, 2016) e as características das cinzas produzidas em relação à quantidade e à qualidade variam fortemente em função da origem da biomassa e do local onde elas foram produzidas (Vassiliev *et al.*, 2013).

Ramirez *et al.* (2012) estudaram o comportamento da adição de cinza de bagaço de cana como material pozolânico e cal para aumentar a durabilidade e as propriedades mecânicas em blocos de solo compactado. Na pesquisa, foram realizados ensaios com quatro amostras: a) 100% de solo; b) 90% de solo + 10% de cal; c) 90% de solo + 10% de cimento; e d) 80% de solo + 10% de cal +10% cinza de bagaço de cana. Como resultados, amostras de solo, cal e cinza propiciaram o segundo melhor resultado em relação à resistência mecânica e à durabilidade inferiores apenas da amostra com cimento. Isso ocorreu devido à reação química da cal com o solo e da cal com as cinzas, que em ambos os casos formaram

componentes químicos estáveis como silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH).

Carrasco *et al.* (2014) avaliaram a utilização de cinzas de biomassa produzidas pela queima de 40% de bagaço de azeitona e 60% de outros rejeitos agrícolas como pozolana, em substituição parcial do cimento em blocos de cimento. As cinzas eram compostas principalmente por: a) 27,87% de SiO_2 ; b) 29,96% de CaO e 23,22% de K_2O . Foram realizados ensaios com amostras contendo proporções de Si/Ca variando entre 1/9 a 9/1 e os resultados demonstraram que até a relação de 1/1 era viável a fabricação de blocos com substituição parcial do cimento por cinzas. Porém para sua otimização seriam necessárias ações para redução da concentração de K_2O nas cinzas, já que o mesmo poderia provocar deterioração dos blocos devido a processos como a reação álcali-agregado.

Modolo *et al* (2013) pesquisaram a substituição parcial do agregado fino por cinzas de casca de eucalipto em argamassa de revestimento industrializada. As cinzas foram utilizadas de duas formas: a) apenas peneiradas, com granulometria equivalente ao da areia e b) peneiradas e lavadas para redução de cloretos, já que os mesmos em elevadas concentrações podem comprometer a durabilidade. A composição química das amostras apresentaram principalmente os seguintes elementos nas cinzas peneiradas: a) 72,18% de SiO_2 e b) 17,15% de CaO ; . As cinzas peneiradas e lavadas apresentam os índices: a) 80,09% de SiO_2 e 11,79% de CaO . Os autores verificaram que as cinzas não eram inertes como a areia, e nas amostras com até 100% de ambas as cinzas apresentaram resultados semelhantes ao da amostra padrão demonstrando a possibilidade técnica da substituição.

2.2 Cinzas de biomassa ricas em cálcio

Cinzas de biomassa ricas em cálcio se diferenciam de outras cinzas tais como cinza de bagaço de cana e cinza de casca de arroz, por apresentarem na sua composição química elevada concentração de cálcio e reduzida concentração de silício e alumínio restringindo, assim, seu uso como material pozolânico (ABNT NBR 12653, 2014) estimulando pesquisas em áreas alternativas para seu reaproveitamento.

Maschowski *et al.* (2016) avaliaram o uso de cinza de lenha de oito espécies de árvores para uso como corretivo de solo na agricultura, na região da República dos Camarões na África. Verificaram que seis delas possuíam elevada concentração de cálcio, podendo assim substituir o calcário mineral como corretivo. Dentre estas espécies de árvores, se destacaram as variedades *mangifera Indica*, *alchornea cordifolia*, *triplochiton scleroxylon* e *musanga cecropioides*, que apresentaram 56,72%, 57,96%, 62,70% e 71,82% de cálcio, respectivamente, na forma predominante de CaCO_3 e CaO .

Cuenca *et al.* (2013) avaliaram a utilização de cinza da queima de pellets de resíduos de oliveira como *filler* em concretos auto adensáveis em substituição ao *filler* calcário comercial. As cinzas eram compostas principalmente por: a) CaO (54,82%); b) SiO_2 (11,84%); c) K_2O (9,26%); d) MgO (4,36%); e) Al_2O_3 (2,60%) e f) Fe_2O_3 (1,38%), indicando baixa atividade pozzolânica devido à reduzida concentração de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Como resultado, foi verificado que concretos auto-adensáveis com cinzas, curados nas idades de 3, 7 e 28 dias, apresentaram resultados de resistência mecânica semelhantes aos que utilizaram *filler* calcário comercial indicando a viabilidade da substituição.

2.2.1 Cinza de algaroba

A algaroba (*prosopis juliflora*) é uma árvore da família das leguminosas e foi introduzida na região agreste de Pernambuco no ano de 1942, no município de Serra Talhada - Pernambuco, com sementes procedentes do Peru. A espécie se desenvolve bem em regiões com precipitação pluviométrica entre 150 e 1200 mm anuais e resiste aos longos períodos de estiagem (Figura 1). É considerada uma árvore de uso múltiplo e seus frutos são importantes fontes de proteína e carboidrato para os animais, principalmente em regiões mais secas. Sua madeira é durável sendo utilizada em mourões, táboas, dormente, estacas para cerca, além do uso como lenha e carvão. A sua extração é permitida por se tratar de uma planta exótica (Rabaski *et al.*, 2009).

No agreste pernambucano, a lenha de algaroba é utilizada como fonte de energia devido à facilidade para aquisição e baixo custo, quando comparado com outros combustíveis. No polo de confecções do estado, pesquisa realizada pela

Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado de Pernambuco (CPRH, 2005) em uma amostragem de 59 lavanderias, identificou que a lenha representava 69% da energia consumida para geração de água quente e vapor, em mais de 200 lavanderias industriais, no processo de beneficiamento do jeans, gerando cerca de 1100 toneladas de cinza de base (*bottom ash*) de lenha de algaroba por mês.

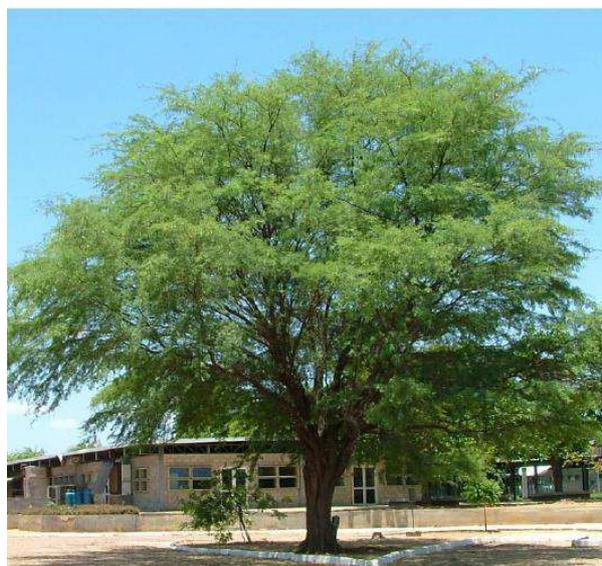


Figura 1– Algaroba (Ribaski *et.al*,2009).

Pernambuco possui o terceiro maior setor de confecções do Brasil ficando atrás apenas do Rio de Janeiro e São Paulo, com faturamento representando 7% do PIB pernambucano. A região agreste concentra 60% da produção do estado, onde existem 12 mil empreendimentos pertencentes ao arranjo produtivo local (APL) de confecções concentrados principalmente nos municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Surubim. O complexo emprega cerca de 76 mil pessoas e os principais produtos fabricados são o jeans, a malharia em algodão e as peças de moda casual em tecido (SEBRAE, 2008).

As cinzas de algaroba apresentam na sua composição química elevada concentração de cálcio, como pode ser observado nos estudos de Kumar e Chandrashekan (2016) que investigaram na Índia as propriedades da lenha de algaroba (*Prosopis juliflora*) como combustível, no que diz respeito ao calor

específico, características de carbonatação e composição química. Verificaram que as cinzas de algaroba apresentavam elevada concentração de cálcio e potássio e baixa concentração de silício e alumínio (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química da cinza de algaroba

Caracterização	Resultado (%)
CaO	68,0
K ₂ O	15,5
SO ₃	4,5
MgO	2,9
P ₂ O ₅	2,8
SiO ₂	1,0
Outros	1,3

Fonte: Kumar e Chandrashekan (2016).

O elevado volume de cinzas de lenha de algaroba gerados em importante polo econômico do estado de Pernambuco indica a necessidade do desenvolvimento de processos alternativos para sua reutilização, já que a mesma não possui as condições químicas adequadas para sua utilização como pozolâna (ABNT NBR 12653, 2014). Nesta perspectiva, considerar a utilização destas cinzas como fonte alternativa de cálcio para produção de cal torna-se importante, principalmente se for considerado a remoção de contaminantes como o potássio.

A produção de cal a partir da cinza de base de lenha de algaroba apresenta como vantagem a possibilidade de reutilização de um resíduo sólido gerado em grande quantidade e que normalmente não possui destinação adequada para seu descarte. Adicionalmente, a produção de cal a partir de cinza de algaroba, em comparação com o processo tradicional, não necessita das etapas de mineração, transporte, britagem e moagem, típicas do processo de produção usual da cal a partir do calcário mineral. Essas etapas de alto consumo energético são substituídas pela coleta das cinzas, peneiramento e lavagem. Na sequência, as etapas de calcinação, hidratação e ensacamento permeiam ambos os processos.

2.3 Produção de potássio a partir de cinzas de biomassa

Mais de 95% da produção mundial de sais de potássio mineral é usado como fertilizante. Outros usos dos compostos de potássio estão ligados à indústria de sabão/detergentes, cerâmicas, produtos químicos e farmacêuticos (Nascimento *et al.*, 2008). Diante da importância do potássio para a indústria, e por ele ser obtido através de uma fonte não renovável, pesquisas têm sido realizadas para produção deste componente químico através de cinzas de biomassa.

Simpson *et al.*(1985) estudaram a extração de potássio de resíduos da produção de cacau como fonte alternativa ao potássio mineral em função de ser uma cultura existente em várias partes do mundo e por apresentar na sua composição elevada concentração de potássio. Para isso, os resíduos em estado natural foram queimados em forno tipo mufla a 600°C para produção de cinza. Em seguida, 10g desta cinza foi colocada em 200 ml de água e depois agitada vigorosamente e deixado em repouso por 24h. Em seguida, o material foi filtrado e seco em estufa a 105°C. Como resultado, verificaram uma redução de 43,5% na massa da cinza original correspondendo principalmente ao potássio lixiviado no processo. Verificaram ainda que o potássio poderia ser concentrado através da evaporação da água demonstrando assim a viabilidade do processo.

Afrane (1992) avaliou o processo de lixiviação das cinzas provenientes da queima de resíduos da produção de cacau em água, uma vez que neste material a concentração de potássio variava entre 40 e 60% e estaria presente na forma de carbonatos e hidróxidos de potássio. Como resultado, verificou que as maiores concentrações de potássio dissolvido na água foram obtidas quando a matéria orgânica tinha sido queimada a 600°C e a cinza lixiviada em água por um período de 30min. numa proporção de 1:30. Observou ainda que essa concentração de potássio poderia ser otimizada pela redução das partículas da cinza e/ou com o aquecimento do soluto, sendo obtido os melhores resultados em temperaturas maiores que 90°C.

Taiwo e Osinowo (2000) relatam que a produção de sabão na Nigéria depende da importação de hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e carbonato de

potássio e apontam como alternativa a esta importação o uso de resíduos agrícolas. Realizaram então estudos de lixiviação de cinzas provenientes de resíduos da produção de cacau, palha de sorgo, palmeira e casca de amendoim, por terem verificado elevada concentração de potássio na forma de carbonato de potássio. Concluíram que era viável a utilização dessas biomassas como fonte de potássio para suprir este insumo na produção de sabão.

2.4 A cal

A cal utilizada na construção civil é um pó branco composto principalmente de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2) resultante da hidratação do óxido de cálcio (CaO) ou cal viva. Sua qualidade está relacionada com as impurezas presentes na matéria-prima, na sua granulometria e na superfície específica (Guimarães, 2002).

Segundo a ABNT NBR 7175 (2003), cal hidratada é um pó seco obtido pela adequada hidratação da cal virgem constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou pela mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido e óxidos de magnésio.

2.4.1 Processo de fabricação

A cal é produzida a partir de calcário do tipo cálcico (CaCO_3) ou dolomítico ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$) que após sua extração e moagem é aquecido a uma temperatura entre 750 e 900 °C, dependendo de sua composição química. Neste processo, o calcário se decompõe produzindo cal viva (CaO) e CO_2 e que para ser utilizada na construção civil deve ser hidratado pelo processo de imersão ou aspersão de água que a transforma em cal extinta ou cal hidratada. A ABNT NBR 7175 (2003) recomenda características químicas e físicas mínimas para a cal, conforme indicado na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 - Exigências químicas mínimas da cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratados		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais não voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: ABNT NBR 7175 (2003).

Tabela 3 - Exigências físicas mínimas da cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida)	Peneira 0,6 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,074mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades e protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: ABNT NBR 7175 (2003).

Segundo Guimarães (2002), a qualidade da cal virgem (CaO) industrial depende do forno e de seu operador, uma vez que dependendo da temperatura e tempo de permanência no forno de calcinação pode-se produzir cal virgem denominada de “soft”, de alta reatividade (temperatura e tempo adequados). Pode também ser produzida cal do tipo “dura”, de baixa reatividade, caso o forno seja operado visando apenas produtividade (alta temperatura e tempo de residência reduzido) e pode ainda ser produzida cal virgem “crua” com alto teor de CO₂, caso a temperatura e tempo de permanência sejam inferiores as especificações técnicas. Na Figura 2, podem ser observados croquis com a mudança de estrutura cristalina da cal à medida que a temperatura é elevada, podendo ser verificado que a partir de 950°C ocorrem aglomerações das partículas.

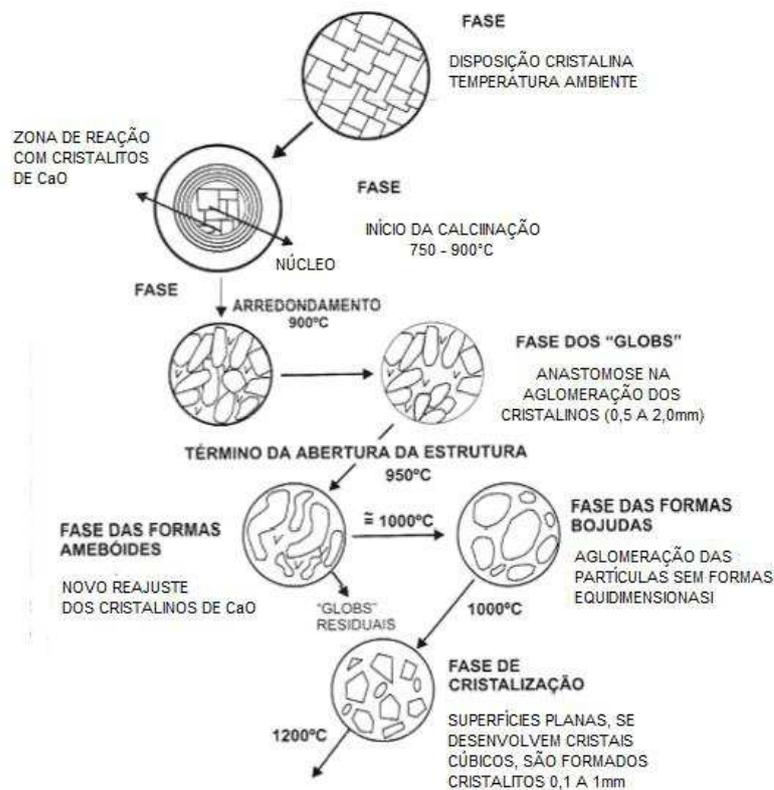


Figura 2 - Transformação da estrutura da cal (Guimarães, 2002).

Paiva *et al.* (2007) reportam que a qualidade da cal está relacionada com seu processo de fabricação e um dos parâmetros que deve ser controlado é a temperatura de calcinação, pois a baixa temperatura provoca núcleos carbonatados pela falta de calor e o excesso de temperaturas provoca a formação de cristais insolúveis (Figura 3).

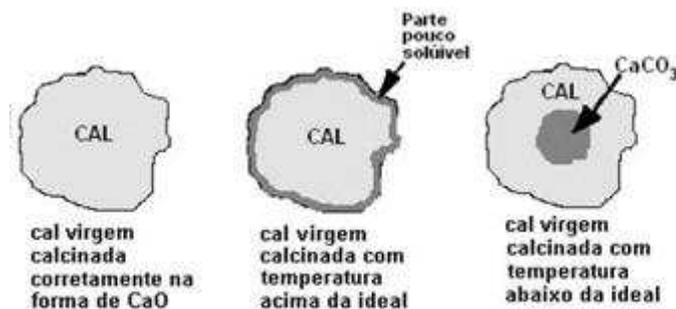


Figura 3 - Calcinação da Cal (Paiva *et al.*, 2007).

2.4.2 Fontes alternativas de carbonato de cálcio para a produção de cal

A cal é utilizada como corretivo de solos, produção de tintas, material de construção, tratamento de águas, entre outros fins. No entanto, como sua produção envolve a utilização de recursos naturais não renováveis, o emprego de fontes alternativas de carbonato de cálcio como conchas de ostras, (Yang *et al.*, 2005), (Lee *et al.*, 2008), (Yang *et al.*, 2010), (Li *et al.*, 2015), casca de ovo (Ferreira *et al.*, 2016), (Park *et al.*, 2007), (He *et al.*, 2017) e cinzas de biomassa ricas em cálcio se faz importante (Cuenca *et al.*, 2013), (Cheah *et al.*, 2017), (Kumar e Chandrasherkar, 2016), (Maschowski *et al.*, 2016).

Cal produzida a partir de conchas de ostra foi testada em tijolos não cozidos com cinzas volantes, em substituição parcial de cal comercial nas proporções de 5, 10, 15 e 20%. As conchas foram quebradas, calcinadas entre 850 e 950°C, moídas e a cal produzida apresentou concentração de cálcio 35% superior ao da cal comercial utilizada. Como resultado, tijolos com cal de conchas de ostras recicladas apresentaram maior resistência e durabilidade (Li *et al.* 2015).

Cal produzida a partir da casca de ovo foi avaliada para tratamento de água. Para isso, as cascas foram moídas, calcinadas a 800°C e a cal obtida (CaO) foi adicionada à águas residuais. Os resultados demonstraram a viabilidade do uso da cal produzida a partir de casca de ovo calcinada para remover metais pesados, além de contribuir na correção do pH de águas fortemente ácidas (Park *et al.* 2007).

Neste cenário de pesquisas, a reciclagem de cinzas de biomassa rica em cálcio, para a produção de cal, constitui-se como uma fonte interessante e promissora para a reciclagem destas cinzas, uma vez que, segundo o balanço energético nacional do Ministério das Minas e Energia BEN (2015), a biomassa é uma das fontes de energia com grande potencial para os próximos anos.

2.5 Material Pozolanico

Segundo Lea's (2004) as pozolanas são constituídas essencialmente de SiO₂ e Al₂O₃ e sozinhas não reagem com a água, mas quando finamente moídas na presença

de água e cal, reagem em temperatura ambiente para formar compostos de silicato de cálcio semelhantes aos produzidos pela hidratação do cimento Portland.

A ABNT NBR 12653 (2014) classifica as pozolanas em três classes:

- **Classe N** - pozolanas naturais ou artificiais como: Materiais vulcânicos, sílicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- **Classe C** - cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral;
- **Classe E** - qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

A divisão em três classes é baseada em características físicas e químicas conforme apontadas na Tabela 4 e a Tabela 5, a seguir.

Tabela 4 - Exigências químicas mínimas.

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % min	70	70	50
SO ₃ , % máximo	4	4	5
Teor de umidade, % máximo	3	3	3
Perda ao fogo, % máximo	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máximo	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

Tabela 5 - Exigências físicas mínimas.

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
Material retido mesh 325	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, % mínimo	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, MPa	6	6	6
Água requerida, % máximo	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

2.5.1 Influência da temperatura nas reações pozolânicas

Segundo Taylor (1997), a primeira reação que ocorre numa reação pozolânica é o ataque à estrutura do SiO_2 ou à estrutura $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ pelos íons OH^- , quebrando as ligações com os átomos de oxigênio. Depois disto ocorrer várias vezes, os íons Ca^{2+} se combinam com o silício e o alumínio solúveis produzindo silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado.

No entanto, a cinética de solubilização da sílica e alumina e a cinética da reação do Ca(OH)_2 para formação dos silicatos e aluminatos é influenciada pela temperatura do meio afetando a formação de fases hidratadas resultantes da reação pozolânica (Rojas e Rojas, 2003). Pesquisas sobre reações pozolânicas em função da temperatura são reportadas na literatura de Taylor (1997), George *et al.* (1992), Shi e Day (1993), Al-Mukhtar *et al.* (2010), Shi e Day (2000), Rojas e Cabrera (2002), Rojas e Rojas (2003), Lea's (2004), Zeng *et al.* (2012), Mirzahosseini e Riding (2014), Ouhadi *et al.*, (2014), Windt *et al.* (2014), Baris e Tanaçam (2017). Esses autores avaliaram a influência da temperatura em reações pozolânicas de sistemas tais como estabilização de solo com cal e solo cimento.

Para determinação da quantidade ideal de cal para estabilizar um solo argiloso, George *et al.* (1992) submeteram corpos de prova com diversas proporções de cal nas temperaturas de 20, 35 e 50°C curados nas idades de 7 dias e 21 dias. Os melhores resultados de resistência à compressão simples foram obtidos a 50°C, indicando uma aceleração no ganho de resistência com o aumento da temperatura.

Rojas e Cabrera (2002) realizaram uma pesquisa foi realizada sobre a reação de hidratação entre o metacaulim e a cal na proporção de 1:1 nas temperaturas de 20 e 60°C. Os resultados evidenciaram que as amostras curadas por 9 dias a 20°C apresentaram um consumo de 18% de cal, enquanto que 82% da cal foi consumida para a cura a 60°C. Foi verificado, portanto, que a temperatura apresentou importante papel na formação de fases hidratadas e na qualidade do produto obtido.

Vidro moído foi avaliado como material pozolânico em concreto curado nas temperaturas de 10, 23 e 50°C. A 10°C não foi verificado significativo consumo do Ca(OH)_2 até 91 dias de cura. Porém, a 50°C foi observado significativo consumo de

CaOH₂ em apenas 7 dias de cura indicando que a temperatura era um dos fatores que mais afetaram a reação pozolânica (Foletto *et al.*, 2005).

Estas pesquisas comprovam que caso a temperatura seja elevada, a reação pozolânica é acelerada, promovendo o ganho de resistência em menor intervalo de tempo. Caso ocorra o inverso, a reação desacelera e pode até ser interrompida em temperaturas muito baixas, voltando a reagir quando a temperatura volta a subir (Bell, 1996).

2.6 Estabilização do solo com cal (solo-cal)

Os solos desempenham várias funções na engenharia civil podendo servir como base para sustentação de obras como materiais de construção, barragens, aterros blocos, dentre outros. Independentemente da aplicação, os solos devem apresentar certas propriedades físicas e mecânicas relacionadas à estabilidade volumétrica, resistência, durabilidade e como solos argilosos normalmente não apresentam essas propriedades, a alternativa é promover sua estabilização (Ferreira *et al.*, 2005).

Solos argilosos na presença de aditivos pozolânicos como a cal, propiciam o processo conhecido como estabilização do solo no qual a sílica e a alumina presentes na argila reagem com a cal através de reação pozolânica, formando produtos cimentícios que garantem ao solo maior resistência mecânica (Miqueleiz *et al.*, 2012).

A mais importante reação entre o solo e a cal é a reação pozolânica, onde ocorre a interação entre cal, sílica e alumina presentes no sistema solo/água formando um gel cimentício que liga as partículas estabilizando a mistura. Este processo é afetado pelo pH do solo, matéria orgânica, presença de elevada concentração de íons de sódio e mineralogia da argila (George *et al.*, 1992).

Segundo a National Lime Association, dos Estados Unidos (NLA, 2004), estabilização do solo significa mudar suas características para que possua resistência mecânica permanente e estabilidade ao longo do tempo. Neste processo, a cal pode ser utilizada para tratar diversos tipos de solo. Em geral, solos argilosos com no mínimo 25% passando em malha ABNT N° 200 (0,074mm) e índice de

plasticidade superior a 10 são considerados propícios à estabilização. Solos contendo matéria orgânica superior a 1% e/ou mais que 0,3% de sulfatos podem requerer quantidade adicional de cal para atingir os resultados necessários. A química do tratamento do solo pela cal consiste em duas etapas: 1) modificação da estrutura e 2) estabilização do solo.

- **Modificação da estrutura**

Após as misturas iniciais, íons de cálcio da cal hidratada migram para a superfície das partículas de argila deslocando a água adsorvida e outros íons. O solo torna-se friável e granular e nesta fase o índice de plasticidade do solo diminui muito, assim como sua tendência para inchar e contrair (Figura 4). O processo é chamado de floculação ou aglomeração e em geral ocorre após algumas horas (NLA, 2004).



Figura 4 - Argila floculada pela cal (NLA, 2004).

Segundo Little (1995) em um solo argiloso as partículas de argila formam largas camadas de água deixando assim o solo instável (Figura 5 A) e quando a cal é adicionada ocorrem trocas iônicas que promovem a redução do sistema, aumento da fricção entre as partículas aglomeradas e melhora a trabalhabilidade devido à mudança de textura do solo (Figura 5 B).

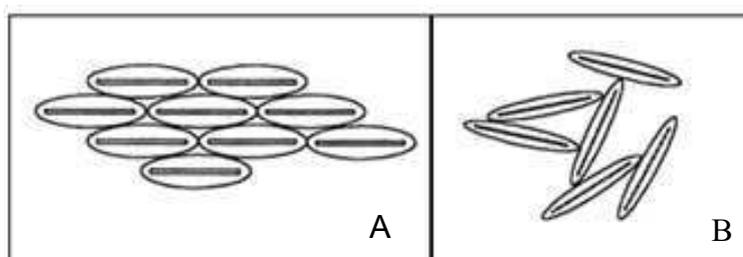


Figura 5 – Argila com água (A) e floculação das partículas (B) (Little, 1995).

- **Estabilização do solo**

Além das melhorias imediatas promovidas pela cal no solo argiloso, quando uma quantidade suficiente de cal e água são adicionadas o pH eleva-se rapidamente acima de 10,5 fazendo com que as partículas de argila se quebrem liberando sílica e alumina que através de reação pozolânica se combinam com a cal, formando ao longo do tempo produtos cimentícios iguais aos que são produzidos pela hidratação do cimento portland como o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o aluminato de cálcio hidratado (CAH) (Little ,1995).

Na etapa de estabilização, o solo passa de um material granular a uma camada coesa, relativamente impermeável e com significativa capacidade de suportar carga. O processo começa em poucas horas e pode continuar por anos, desde que o pH do sistema continue elevado (NLA, 2004).

2.7 Blocos de solo-cal

Os blocos de solo compactados surgiram como uma versão melhorada dos blocos crus que através de inovações na fabricação e na compactação melhoraram as propriedades mecânicas e a durabilidade do material, o que permitiu a reconsideração do solo como valiosa matéria prima para edificações. Apesar deste avanço, muitos estudos ainda são necessários para o uso regular deste material nas edificações e dentre eles se destaca o uso de aditivos tais como cimento, cal, emulsões de asfalto e outros (Vilane, 2010 apud Ramirez, 2012).

No Brasil, após resultados positivos do emprego do solo-cal na Índia em 1972 e na Dinamarca em 1978, a Associação Brasileira de Produtores de Cal-ABPC passou a incluir em sua atividade a estabilização de solos com cal, incluindo estudos sobre a produção de blocos de solo-cal destinados às habitações de interesse social e aos projetos de auto-construção. Estas ações foram incentivadas pelo déficit habitacional existente e pela disponibilidade de solos argilosos em todo o país (Oliveira,1988).

O bloco de solo-cal é um material construtivo que, segundo Krishnaiah e Suryanarayana Reddy (2008) apud Figueiredo (2011), possui como vantagens a simplicidade de produção não necessitando de mão de obra especializada. Possui

resistência à compressão semelhante a do bloco convencional, pode ser fabricado no próprio local da obra utilizando o solo disponível na região e não necessita de cozimento evitando assim os impactos no meio ambiente causados por esse processo de fabricação.

Blocos compactados de solo-cal utilizam o mesmo princípio da estabilização de solo com cal para adquirir resistência mecânica; ou seja, a argila presente no solo tem sua estrutura atacada pelo baixo pH propiciado pela cal na presença de água, solubilizando a sílica e a alumina presentes na argila, que por sua vez reagem com a cal através de reação pozolânica (Al-Mukhtar *et al.*, 2010 e Ouhadi *et al.*, 2014).

No entanto, como a cinética de solubilização da sílica e alumina e a cinética da reação do Ca(OH)_2 para formação dos silicatos e aluminatos é influenciada pela temperatura do meio, afetando assim a formação de fases hidratadas resultantes da reação pozolânica (Rojas e Rojas, 2003), e como na produção de blocos de solo-cal a cura é realizada à temperatura ambiente, estas cinéticas podem sofrer influência da variação de temperatura ambiente.

2.8 Durabilidade

A durabilidade de um material pode ser definida como a capacidade de manter as suas características originais ao longo do tempo, quando o mesmo é submetido aos agentes agressivos, que imprimem algum esforço químico ou físico. Em materiais cimentícios como o concreto, um fator que pode comprometer a durabilidade é a reação expansiva alcali agregado, que pode ocorrer entre os alcalis presentes no cimento e alguns tipos de agregado.

Blocos de solo-cal ganham resistência através de reação pozolânica produzindo assim material cimentício. Desta forma, apesar de terem sido encontrados estudos sobre a deterioração de blocos de solo-cal pela reação alcali agregado, a mesma foi considerada de forma preventiva neste trabalho.

2.8.1 Reação alcali agregado (alcali-silica)

Segundo Taylor (1997), a reação álcali agregado no concreto ocorre quando ions hidroxila na solução dos poros do cimento reagem com alguns tipos de sílica

presentes nos agregados resultando em estresse interno que pode causar expansão e rachaduras. Falhas podem ocorrer após dias ou até após anos.

A reação álcali-agregado no cimento é essencialmente pozolânica, já que as hidróxilas (OH⁻) atacam a ponte Si-O-Si formando grupos de íons SiO²⁺. Este processo se repete várias vezes até fragmentar a rede tridimensional da sílica em várias dimensões e o balanço químico, então, é feito pelos cátions mais disponíveis K⁺ e Na⁺. A rede danificada é suficientemente deformável a ponto de em algumas situações absorver moléculas de água e expandir. O que é diferente da estrutura do silicato de cálcio hidratado (CSH), que é baseado na ligação CaO²⁺ e que possui estrutura relativamente rígida. Porém, as ligações do SiO⁻ com K⁺ e Na⁺ são instáveis na presença de Ca²⁺, ou seja, só permanecem ligados se o nível de cálcio no sistema for baixo (Taylor, 1997).

A melhor maneira de combater a reação álcali-agregado é evitar sua ocorrência e neste aspecto, o uso de cimentos com baixo teor de álcali é uma das alternativas mais recomendadas. A norma ASTM-C150 (2007) define que cimentos com baixo teor de álcali são aqueles que possuem na sua composição percentual de *sódio equivalente* inferior a 0,6%. O sódio equivalente pode ser calculado pela equação (1) colocando na equação os percentuais de sódio e potássio presentes na composição química do aglomerante.

$$(Na_2O_{equivalente} = Na_2O + 0,658K_2O) \leq 0,6 \quad (1)$$

3 MATERIAIS

3.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado na região de Terra Vermelha, zona rural do município de Caruaru – Pernambuco, localizado a $8^{\circ}20'53,0''$ Sul e $35^{\circ}59'6,1''$ Oeste (Figura 6, Figura 7).



Figura 6 – Região geográfica onde foi coletado o solo (Google Maps, 2018).

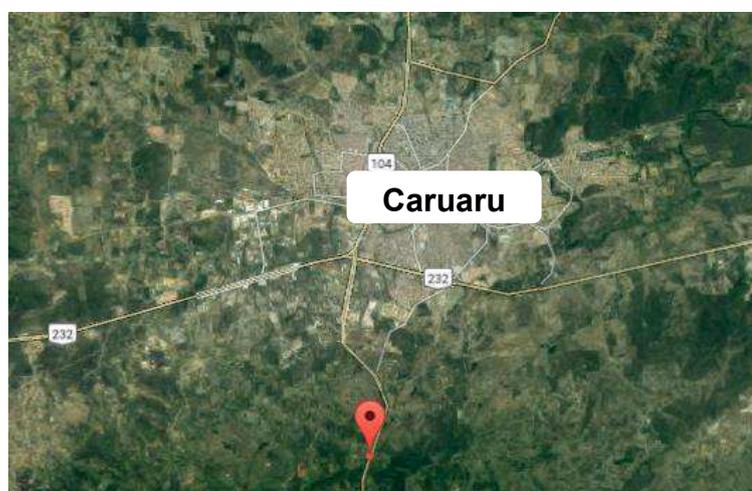


Figura 7 -- Região geográfica onde foi realizada a coleta do solo (Google Maps, 2018).

O solo foi coletado em um corte de barranco correspondendo a 2,5m de profundidade, sendo evitado assim excesso de matéria orgânica presente na

superfície do terreno que poderia comprometer a qualidade dos blocos de solo-cal (Figura 8).



Figura 8 – Coleta do solo a 2,5m de profundidade.

Este solo seguiu as especificações da ABNT NBR 10833 (2012) que define o solo a ser utilizado em blocos de solo-cimento pela quantidade de material passante em malha ABNT N°4 (4,8mm), ABNT N°200 (0,074mm), pelo limite de liquidez ou Atterberg e pelo limite de plasticidade, através das metodologias recomendadas pelas normas ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT NBR 7180 (2016), respectivamente. Este critério garante adequada trabalhabilidade, variação de volume e absorção de água durante e após a fabricação dos blocos.

Nesta pesquisa, a norma ABNT NBR 10833 (2012) foi utilizada de forma adaptada, substituindo o cimento pela cal em função da inexistência de norma específica para blocos de solo-cal.

3.2 Cal

A cal utilizada neste trabalho foi do tipo cálcica CH-I, fabricada no município de Limoeiro do Norte-Ceará e comercializada em sacos de papel “Kraft” de 20kg. Ao chegar ao laboratório, ela foi retirada da embalagem e colocada em sacos plásticos de polietileno para prevenir absorção de água e carbonatação.

3.3 Cinza de algaroba

A cinza de algaroba foi coletada numa lavanderia industrial representativa, situada no município de Caruaru-Pernambuco, que utiliza exclusivamente lenha de algaroba como combustível para aquecimento de água e produção de vapor. Na caldeira, a lenha é queimada (Figura 9A) e a medida que vai sendo consumida as cinzas mais pesadas vão caindo por gravidade ficando depositadas numa região sob uma grelha (Figura 9B), onde em seguida são removidas e descartadas (Figura 10). Esta lavanderia tem uma geração média de 5.500kg por mês desta cinza de base (*bottom ash*).



Figura 9- Fornalha da caldeira (A); Cinza de algaroba (B).



Figura 10 - Cinza de algaroba em estado bruto.

3.4 Água para produção dos blocos de solo-cal

Para fabricação dos blocos de solo-cal foi utilizada água potável fornecida pela concessionária Compesa (Companhia de Água e Esgoto de Pernambuco) para o sistema de abastecimento da cidade de Caruaru – PE.

3.5 Água de lavagem das cinzas

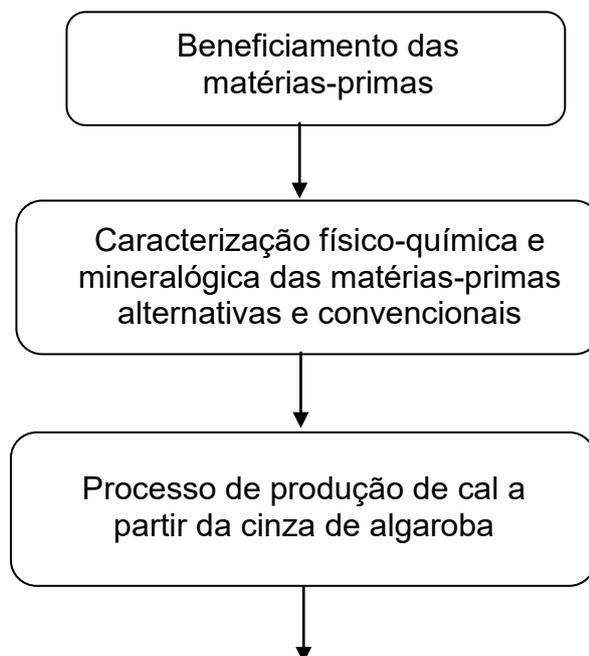
Devido às variações na qualidade da água da concessionária Compesa, em função do período de seca na região, para produção de cal de cinza de algaroba as cinzas foram lavadas utilizando água mineral com pH 6,5 e 26,55mg de sais solúveis por litro.

4 METODOLOGIA, RESULTADOS E CONCLUSÃO

Neste trabalho, metodologia, resultados e conclusão foram condensados em um único tópico, com a finalidade de permitir melhor entendimento do desenvolvimento da pesquisa, já que para ser possível avaliar o uso da cinza de lenha de algaroba como matéria-prima alternativa para produção de blocos de solo-cal foi necessário inicialmente, desenvolver dois processo independentes: **a) produção de cal a partir de cinza de lenha de algaroba e b) uso de temperatura controlada para cura de blocos de solo-cal.**

4.1 PRODUÇÃO DE CAL A PARTIR DE CINZA DE LENHA DE ALGAROBA

Neste tópico, propõe-se a produção de cal a partir de cinza de algaroba, por meio de um processo de beneficiamento baseado na produção do hidróxido de cálcio (cal hidratada) a partir da hidratação da cinza calcinada. Para isso foi seguido o fluxo ilustrado na Figura 11. Inicialmente foi avaliado a produção de cal através de processo de calcinação direta das cinzas de base de lenha de algaroba (cinzas pesadas) e em seguida adicionado uma etapa previa de lavagem antes da calcinação para remoção do potássio.



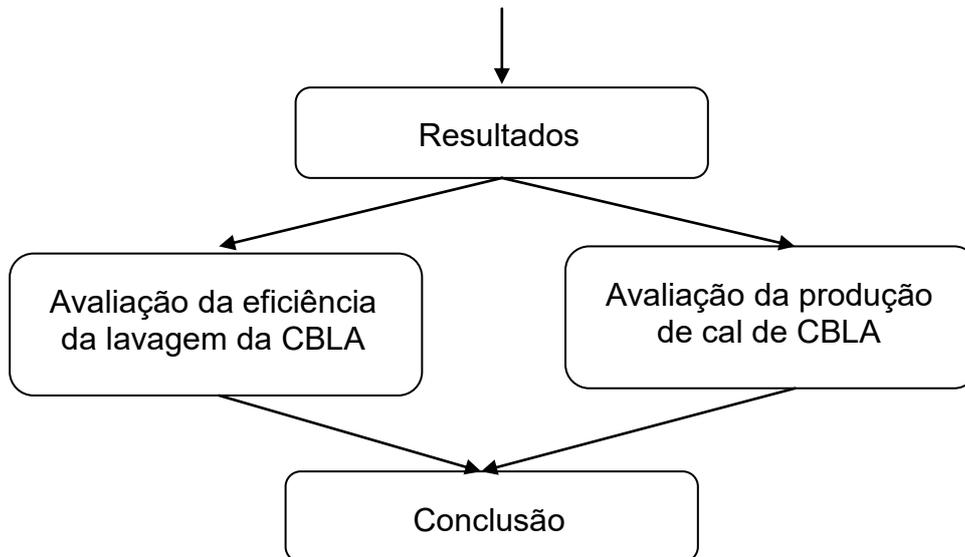


Figura 11 - Fluxograma do estudo para produção de cal a partir de cinza de base de lenha de algaroba.

4.1.1 METODOLOGIA

4.1.1.1 Beneficiamento das matérias-primas

- **Cinza de base de lenha de algaroba (CBLA)**

Após coletada na lavanderia, as cinzas foram peneiradas em malha ABNT N° 200 (0,074mm) (Figura 12 A e B), com objetivo de obter distribuição granulométrica semelhante à cal CHI utilizada na pesquisa (Tabela 3). Neste processo foi obtido rendimento médio de 26%.

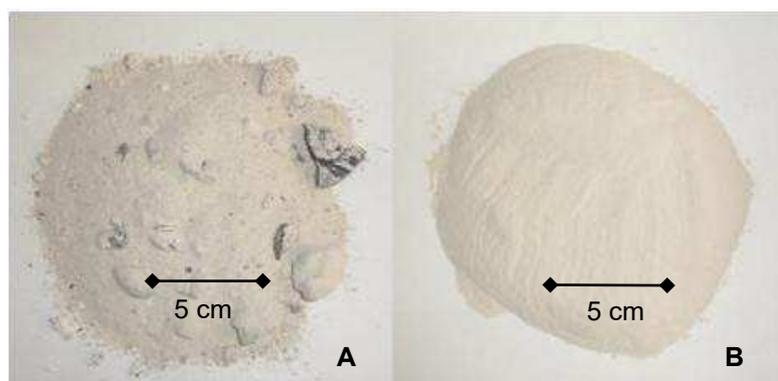


Figura 12- Cinza como coletada (A) e Cinza após peneiramento (B).

- **Cal**

A cal foi utilizada sem beneficiamento. Para sua caracterização, foi peneirada em malha ABNT n° 200 (0,0074mm).

4.1.1.2 Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas alternativas e convencionais

A cal comercial e as cinzas de base de lenha de algaroba (CBLA) foram caracterizadas através dos seguintes métodos: 1) análise granulométrica por difração a laser; 2) determinação da composição química (FRX); 3) difração de raios X (DRX) e 4) análise termogravimétrica (TG).

- **Análise granulométrica por difração de laser (AG)**

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado a um processo de medida óptica através de difração de laser. Neste método é combinada a relação proporcional entre a difração do laser, a concentração e o tamanho de partículas. Para realização da caracterização, as matérias primas naturais foram passadas em peneira ABNT n°200 (0,074mm) e dispersas em 250 mL de água destilada em um agitador Hamilton Beach N5000 na velocidade de 17.000rpm por 10min. Em seguida, estas dispersões foram colocadas em um equipamento CILAS modelo 1064, em modo úmido, até atingirem a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

- **Análise química por fluorescência de raios X (FRX)**

As matérias primas foram passadas em peneira ABNT N° 200 (0,074mm) e submetidas à análise química por fluorescência de raios X. O espectrômetro de fluorescência de raios-X determina semi quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra, através da aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos raios x fluorescentes emitidos em equipamento FRX 720 da Shimadzu.

- **Difração de raios X (DRX)**

As matérias primas foram passadas em peneira ABNT n°200 (0,074mm) e acondicionadas em porta amostra de alumínio para análise por difração de raios X, em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi a $K\alpha$ do Cu (40KV/30mA), a velocidade do goniômetro foi de 2°/min e passo de 0,02°, na faixa de 2° a 60°.

- **Análise termogravimétrica (TG)**

As análises termogravimétricas (TG) são úteis para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endotérmicas e exotérmicas. As curvas térmicas foram analisadas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia Indústria e Comércio, com razão de aquecimento 12,5°C/min. A temperatura máxima foi de 1000°C e o padrão utilizado na DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado em atmosfera de ar.

4.1.1.3 Processo de produção de cal a partir da cinza de algaroba

Foram avaliadas quatro amostras com as seguintes denominações:

- AM01 - Cal CHI comercial;
- AM02 - Cinza de base de lenha de algaroba (CBLA);
- AM03 - Cinza de base de lenha de algaroba lavada (CBLA lavada);
- AM04 - Cal de cinza pesada de lenha de algaroba (Cal de CBLA).

A amostra AM01 (cal CHI comercial) foi utilizada como referência e a amostra AM02 (CBLA) foi previamente peneirada em peneira ABNT NBR N°200 (0,074 mm). Antes da obtenção das amostras AM03 e AM04 foram realizados ensaios preliminares de calcinação utilizando forno tipo mufla modelo EDG 3P1 fabricado pela EDG (Figura 13) com dimensões internas de 100x100x200 mm e cadinho com 45 x 40 mm (largura x altura) (Figura 14).



Figura 13 – Forno tipo Mufla EDG.



Figura 14– Cadinho Cadinho 45x 40 mm

Foi realizado inicialmente processo de calcinação direta da AM02 (CBLA) a 850°C sendo obtido um material agregado e não reativo em água. A temperatura foi então aumentada para 900°C e o material ficou ainda mais compacto e com a tonalidade esverdeada, provavelmente por alterações na estrutura do ferro presente no material (Figura 15 A e B). A avaliação preliminar de reatividade das cinzas calcinadas com a água foi considerada pelo fato da reação de óxido de cálcio (CaO) em hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) ser exotérmica, sendo portanto simples e rápida para detectar a existência do óxido de cálcio no material calcinado.

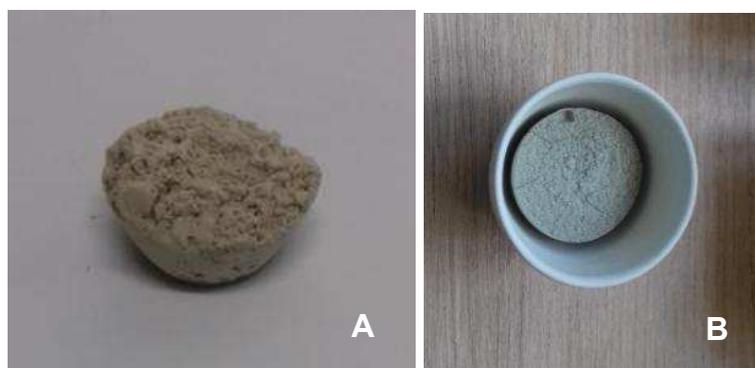


Figura 15 – Cinza peneirada calcinada a 850°C (A); Calcinada a 900°C (B).

Segundo Guimarães (2002) (Figura 2), essa morfologia de aglomeração dos cristalitos de CaO (material compacto) é típica da transformação da estrutura da cal em temperaturas superiores a 950°C e a não reatividade com a água está relacionada com a formação de cristais insolúveis por excesso de temperatura na calcinação (Paiva *et al.*, 2007).

Como a calcinação foi realizada a 850°C, acredita-se que a presença do potássio na cinza agiu como fundente, fato este também observado por Folleto *et al.* (2005) que avaliando a produção de sílica ativa a partir da cinza de casca de arroz, verificaram que não era possível a extração de sílica ativa através de calcinação direta das cinzas, já que a presença do potássio como impureza fazia acelerar a fusão das partículas e a cristalização do SiO₂ amorfo. Em função disso, foi incluída uma etapa de lavagem para retirada do potássio, obtendo-se a amostra AM03.

A amostra AM03 foi obtida por lavagem em água quente (100°C) por 30min seguindo metodologia de Afrane (1992). A temperatura de 100°C (ponto de ebulição) foi utilizada em função de aumentar a solubilização do potássio, além de garantir a precipitação de hidróxido de cálcio gerado a partir de algum eventual óxido de cálcio que tenha sido solubilizado durante o processo de lavagem (Figura 16). O carbonato de cálcio normalmente não é solúvel em água. Porém, se dissolve na presença de água com anidrido carbônico (Kleypas *et al.*, 1999), que pode estar presente em função da remoção de elementos solúveis da AM02 (CBLA), como o carbonato de potássio.



Figura 16 – Lavagem da cinza.

No desenvolvimento deste processo, foi realizado estudo para otimização da lavagem, considerando o consumo de água e a eficiência da remoção do potássio. Assim, foram avaliadas as seguintes relações

- 1x4 - 1kg de CBLA para 4 kg de água a 100°C por 30 min;
- 1x8 - 1kg de CBLA para 8 kg de água a 100°C por 30 min;
- 1x12 - 1kg de CBLA para 12 kg de água a 100°C por 30 min;
- 1x16 - 1kg de CBLA para 16 kg de água a 100°C por 30 min;
- 1x20 - 1kg de CBLA para 20 kg de água a 100°C por 30 min;
- 2 x (1x4) - 1kg de CBLA para 4 kg de água a 100°C por 30 min, repetindo a operação;
- 2x(1x6) - 1kg de CBLA para 6 kg de água a 100°C por 30 min, com repetição da operação;
- 2x (1x8) - 1kg de CBLA para 8 kg de água a 100°C por 30 min, com repetição da operação;
- 2 x (1x10) - 1kg de CBLA para 10 kg de água a 100°C por 30 min, com repetição da operação.

Nessa etapa de lavagem da CBLA, antes da calcinação, foi observado que quanto maior era o volume de água utilizado menor era a aglomeração das partículas (Figura 17) e maior era a reatividade da cinza calcinada com água, indicando aumento gradativo de estruturas de óxido de cálcio (CaO) reativos nas cinzas. Este fenômeno foi ainda mais intenso nos processos em que foi praticada a dupla lavagem.



Figura 17- Cinza calcinada com partículas desagregadas.

Para a obtenção da amostra AM04, após a lavagem, a CBLA foi filtrada, seca em estufa a 105 °C por 24h, macerada (Figura 18 A e B) e em seguida calcinada a temperatura de 850°C por 6h, tempo necessário para ser atingido o equilíbrio de massa, com taxa de aquecimento de 5°C/min em atmosfera estática. Para hidratação foi pulverizado 30% de água em relação à massa do material calcinado (Guimarães, 2002), e o excesso, que não foi quimicamente combinado, foi removido pelo aquecimento do material a 105°C em estufa até atingir o equilíbrio de massa obtendo-se como produto final a cal de CBLA (AM04).

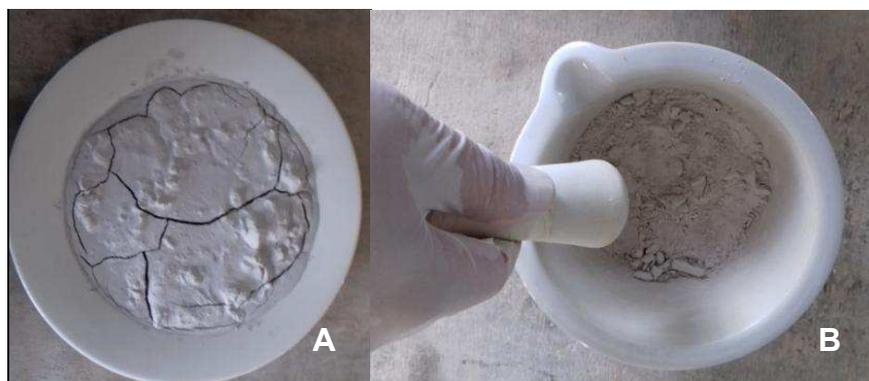


Figura 18 – Cinza lavada e seca (A); Maceração (B).

Após o desenvolvimento do processo em pequena escala (escala de laboratório) para obtenção da amostra AM04 (cal de CBLA), o processo foi adaptado para produção de um volume de cal de CBLA suficiente para a fabricação de blocos de solo-cal (escala de produção).

No processo de fabricação de cal de CBLA em escala de produção, as cinzas de base de lenha de algaroba (CBLA) foram lavadas em recipientes com revestimento interno de teflon e com capacidade para 4,7 litros de água (Figura 19

A). Para a lavagem foi utilizado 450g de CBLA para cada 3600g de água (relação 1/8) por ciclo e a lavagem repetida uma vez.

Nesta etapa, as cinzas foram adicionadas à água que estava a 100°C (Figura 19 B) e o fluido misturado manualmente com uma espátula para homogeneização (Figura 20 A). Quando necessário, a água era adicionada para manutenção do volume de 3600g perdido devido à evaporação. Após os primeiros cinco minutos, foi realizada a remoção da borra superficial com uma peneira (Figura 20 B) a fim de remover as partículas em suspensão formadas, principalmente, por material mais escuro proveniente da queima incompleta da lenha de algaroba. Após trinta minutos, os recipientes foram removidos da fonte de calor e o fluido filtrado.

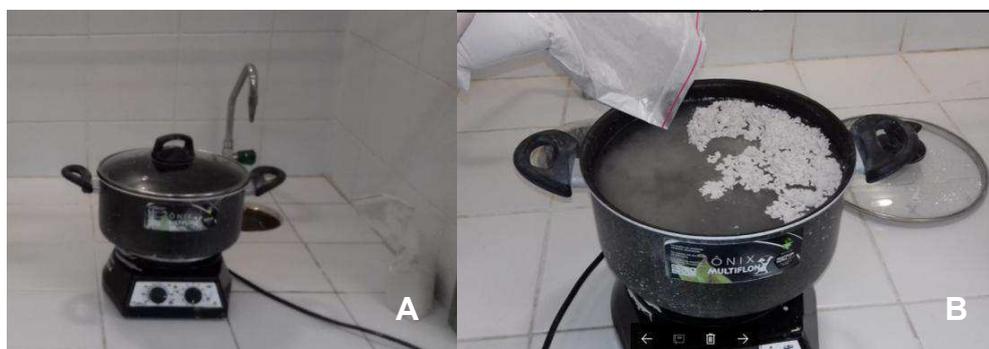


Figura 19 – Aquecimento da água para lavagem (A); Colocação da cinza (B).



Figura 20 – Mistura para homogeneização (A); Remoção de borra superficial (B).

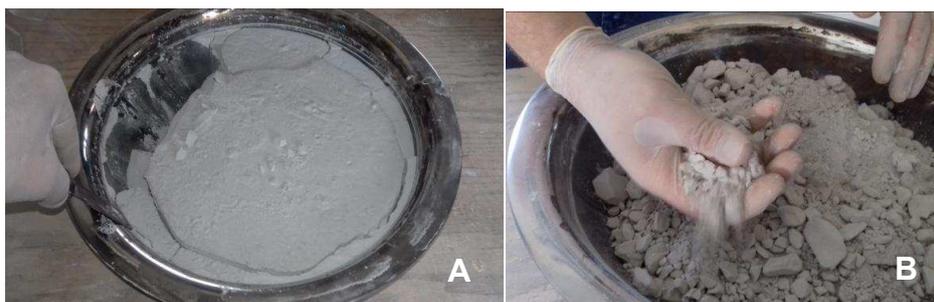


Figura 21 - Cinza lavada e seca (A); Desagregação manual (B).

Após lavagem, a solução foi filtrada e as cinzas de base de lenha de algaroba lavadas (CBLA lavadas) foram acondicionadas em recipiente de inox com capacidade para até 5kg de cinza por vez. Em seguida foram secas numa temperatura de 105°C por 24 horas (equilíbrio de massa) e após resfriadas ao tempo, foram desagregadas manualmente (Figura 21 A e B), peneiradas em malha ABNT N° 50 (0,30mm) para homogeneização das partículas e em seguida ensacadas.

As cinzas CBLA lavadas foram calcinadas utilizando forno mufla com dimensões internas de 150 x 150 x 400mm fabricado pela Zezimaq e foram avaliados três recipientes para acondicionamento para calcinação da CBLA lavada. O primeiro em metal (aço inox) com capacidade para 1500g de CBLA lavada (Figura 22 A), o segundo em cerâmica vermelha com capacidade para 500g (Figura 22 B) e o terceiro em porcelana com capacidade para 900g (Figura 22 C).



Figura 22- Recipiente metálico (A); Cerâmica vermelha (B); Porcela (C)

O recipiente metálico apresentou baixo rendimento, provavelmente devido a sua maior profundidade, o que dificultou a remoção do CO₂ do carbonato de cálcio presente nas cinzas. Além disso, promoveu a contaminação da CBLA lavada devido ao desprendimento de partículas de óxido de ferro durante seu resfriamento. O de

cerâmica vermelha foi eficiente na calcinação, porém acondicionava pouca cinza. E o de porcelana foi o mais equilibrado em relação ao volume acondicionado e ao tempo de ciclo na mufla sendo, portanto, o recipiente utilizado até o final deste trabalho.

Na etapa de calcinação foi necessário ajustar a temperatura e o tempo do patamar de queima que passou de 850°C/6 horas na escala de laboratório para 875°C/10 horas na escala de produção, mantendo a mesma taxa de aquecimento de 5°C/min e atmosfera estática a fim de que fosse possível atingir os mesmos percentuais de perdas de massa indicados no ensaio de termogravimetria da CBLA lavadas (Figura 25 B). Estas alterações ocorreram em função do grande volume de material a ser calcinado por batelada (900g), sendo necessária maior quantidade de energia para eliminação do CO₂ das CBLA lavadas (Figura 23 A e B).



Figura 23 - Espaço ocupado pelas cinzas dentro o forno (A e B)

Para hidratação foi seguido o mesmo princípio utilizado em escala de laboratório sendo pulverizado 30% de água em relação a massa do material calcinado (Guimarães, 2002) e o excesso, que não foi quimicamente combinado, foi removido pelo aquecimento do material a 105 °C em estufa até o equilíbrio da massa.

4.1.2 RESULTADOS

4.1.2.1 Avaliação da eficiência da lavagem da CBLA

As concentrações de K_2O e CaO nas amostras de CBLA (AM02) e de CBLA lavadas (AM03) nas diferentes proporções de massa de cinza e massa de água, com e sem repetição do processo de lavagem obtidas por fluorescência de raios X, encontram-se expostas na Figura 24. Pode ser visto que a amostra no início do processo de lavagem apresenta teor de K_2O de 9,73%. Após sucessivas lavagens, observou-se a redução da concentração de potássio alcançando-se valores inferiores a 1% nas proporções 2x(1:8) e 2x(1:10). Evidencia-se que estas proporções apresentaram valores de redução do K_2O próximos, indicando assim o limite de eficiência do processo para as condições estabelecidas. Desta forma, por redução no consumo de água, optou-se por padronizar o uso da proporção 2x(1:8).

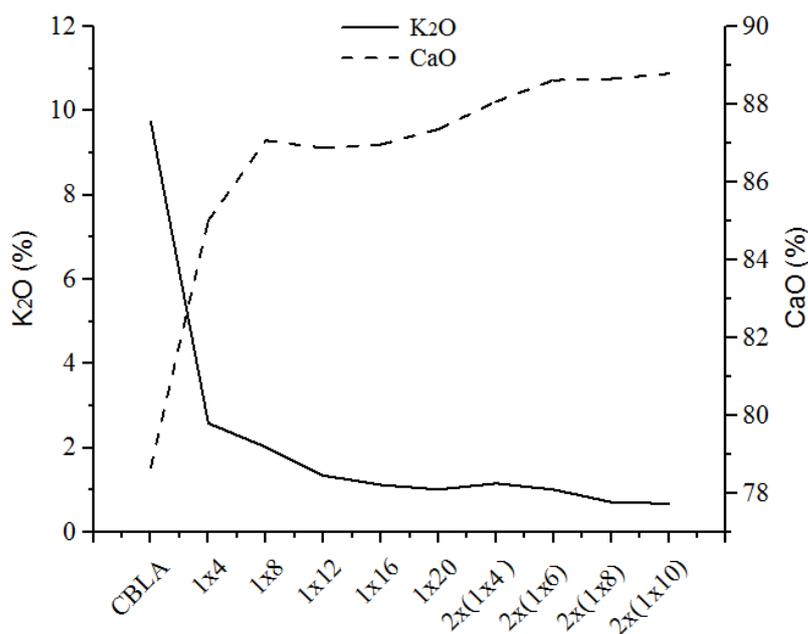


Figura 24- Concentração de K_2O e CaO nas CBLA(AM02) e CBLA lavadas (AM03).

Além da remoção/redução dos elementos solúveis como o potássio, a lavagem gerou o incremento na concentração dos não solúveis como o cálcio, que passou de 78,66% na CBLA (AM04) para 88,66% considerando o processo 2x(1:8) (Figura 24). Salienta-se que enquanto a solubilidade do carbonato de potássio aumenta com a temperatura da água de lavagem, o hidróxido de cálcio e o

carbonato de cálcio se tornam mais insolúveis resultando na precipitação e conseqüentemente na manutenção do óxido de cálcio no sistema durante o processo de lavagem. Esse efeito benéfico permitiu que a concentração de cálcio atingisse níveis comparáveis com uma cal comercial, segundo classificação da norma ABNT NBR 7175 (2003).

Para avaliar a eficiência da lavagem na remoção de impurezas solúveis da CBLA (AM02) foi realizada análise termogravimétrica comparativa da CBLA (AM02) com a CBLA lavada (AM03).

Na análise termogravimétrica da CBLA (AM02), Figura 25A, percebeu-se que o resíduo apresentou quatro perdas de massa características: a) de 30 e 220°C, 3% proveniente da água adsorvida; b) de 380 e 480°C, 1,5% correspondente à matéria orgânica e à decomposição do Ca(OH)_2 em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$; c) de 580 e 840°C, 33% correspondente predominantemente à decomposição do CaCO_3 em $\text{CaO} + \text{CO}_2$; e d) de 840 a 980°C, 3% correspondente à decomposição do K_2CO_3 em $\text{K}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Estas faixas de temperatura são similares às faixas indicadas por Misra et al. (1993), Lehman et al. (1998), Souza Santos (1989).

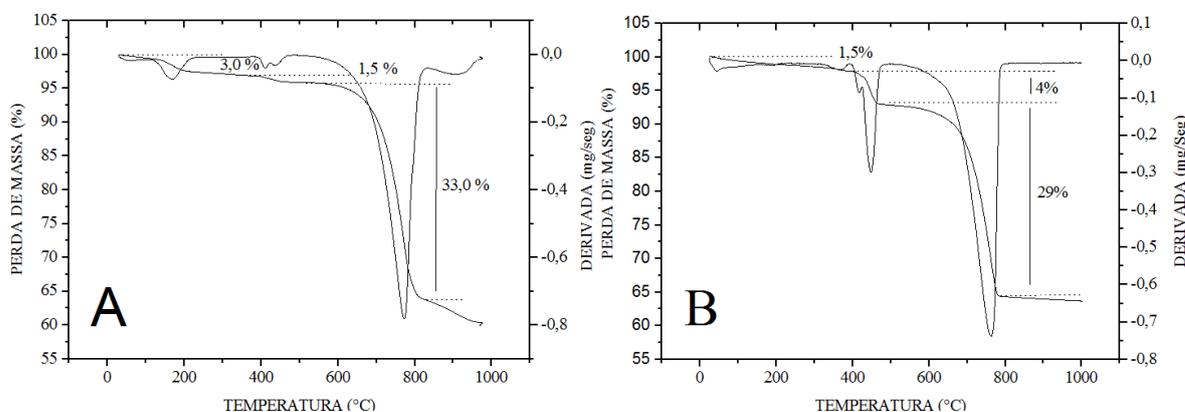


Figura 25- Curvas TG/DTG da AM02(CBLA) (A) e AM03(CBLA lavada) (B).

Na Figura 25 B pode-se observar a análise termogravimétrica da AM03 (CBLA lavada). Verificou-se que nas amostras lavadas os eventos de perda de massa foram bem mais definidos, indicando maior pureza do material e comprovando, assim, a eficiência do processo de lavagem. Como destaque pode ser observado o aumento da concentração de Ca(OH)_2 na AM03 (CBLA lavada), já

que observou-se maior perda de massa no intervalo entre 410 e 480°C associado à decomposição do Ca(OH)_2 . Outra evidência é a significativa redução de K_2CO_3 observada nas temperaturas acima de 840°C. Assim, comprova-se a eficiência da lavagem na remoção de impurezas solúveis da amostra AM02 (CBLA). Salienta-se que a incremento no hidróxido de cálcio (Figura 25 B) está relacionado com a solubilização do carbonato de cálcio, endossando a viabilidade da utilização de 100 °C como temperatura de lavagem.

4.1.2.2 Avaliação da produção de cal de CBLA

Após definição do processo de lavagem a amostra AM03 (CBLA lavada) foi calcinada e hidratada, sendo observado elevada reatividade com água devido a grande liberação de calor, bem como foi obtido um produto finamente dividido ratificando a eficiência da remoção do potássio para a produção de cal a partir da CBLA (AM02).

Com relação à hidratação, foi obtido o percentual de 24% de água quimicamente combinada, representando, assim, um rendimento médio na produção de da AM04 (cal de CBLA) de 17,19% em relação à massa inicial da amostra AM02 (CBLA). Na Tabela 6 pode ser observada a variação de massa em cada etapa do processo de beneficiamento para produção da AM04 (cal de CBLA) tomando como exemplo 1000 g iniciais da AM02 (CBLA) até ser obtido no final 171,9 g da amostra AM04 (cal de CBLA).

Tabela 6- Rendimento do processo de beneficiamento.

Etapa do processo	Perda/ ganho de massa %	Massa resultante
Cinza Bruta inicial	-	1000,0g
Peneiramento malha ABNT n°200 (0,074mm)	Perda 74,0%	260,0g
Processo de lavagem	Perda 17,5%	214,5g
Calcinação	Perda 35,4%	138,6g
Hidratação	Ganho 24,0%	171,9g

A qualidade da AM04 (cal de CBLA) produzida foi avaliada em termos químicos, termogravimétrico, cristalográficos e físicos em comparação com a cal comercial e com a norma ABNT NBR 7175 (2003). Quando pertinente, ainda foi comparada com dados de caracterização da CBLA (AM02) e da CBLA lavada (AM03).

Tabela 7 está contida a composição química da AM01(cal CHI comercial), AM02(CBLA), AM03(CBLA lavada) e AM04 (cal de CBLA) na qual pode ser observado que a AM02(CBLA) apresenta teor de cálcio (CaO) de 78,66%, seguido pelo potássio (K₂O) de 9,73%. Esta elevada concentração também foi observada no trabalho de Kumar e Chandrasherkar (2016) quando estudaram o processo de combustão da lenha de algaroba (*prosopis juliflora*) na Índia, comprovando a característica desta biomassa como fonte de cálcio mesmo sendo cultivada em regiões diferentes.

Tabela 7 - Composição química das amostras por FRX: AM01(cal CHI comercial), AM02 (CBLA), AM03 (CBLA lavada) e AM04 (cal de CBLA).
Concentração (%)

Elemento químico	CBLA	CBLA lavada	Cal de CBLA	Cal CHI comercial
CaO	78,66	88,66	88,76	96,11
K ₂ O	9,73	0,73	0,52	0,06
MgO	3,06	3,06	3,31	2,59
P ₂ O ₅	2,35	2,95	3,02	0,06
SiO ₂	1,41	1,80	1,76	0,57
Na ₂ O	0,72	0,0	0,0	0,0
SO ₃	1,12	0,25	0,28	0,0
Al ₂ O ₃	0,53	0,63	0,58	0,29
Fe ₂ O ₃	0,51	0,70	0,61	0,24
Outros óxidos	1,91	1,22	1,16	0,08
PF*	37,5	35,0	23,7	26,4

*PF- Perda ao fogo percentual em relação a massa total.

Em seguida, na AM03 (CBLA lavada), pode ser observado redução do percentual de solúveis e o aumento da concentração de cálcio, fato este mantido na AM04 (cal de CBLA). O somatório dos teores de óxido de cálcio e magnésio para a amostra AM04(cal de CBLA) foi de 92,07% sendo classificada como uma cal CHI, conforme preconizações da norma ABNT NBR 7175 (2003).

Além disso, como subproduto do processo de beneficiamento tem-se a geração de potássio dissolvido na água de lavagem, que pode ser utilizado como matéria-prima para fertilizantes, material de limpeza, entre outros (Simpson *et al.*, 1985) (Nascimento *et al.*, 2008).

Pode ser observado na Tabela 7 que 9,21% do potássio presente na CBLA foi dissolvido na água durante o processo de lavagem para obter AM03 (CBLA lavada). Esse percentual corresponde a uma massa de 92,1g de potássio diluído para cada 1kg de AM04 (cal de CBLA) produzido, que poderá ser concentrado pela evaporação da água (Taiwo e Osinowo, 2001). É importante destacar que o potássio tem um valor comercial agregado maior do que a cal hidratada, contribuindo para a viabilidade de processo de reciclagem do resíduo cinza de algaroba.

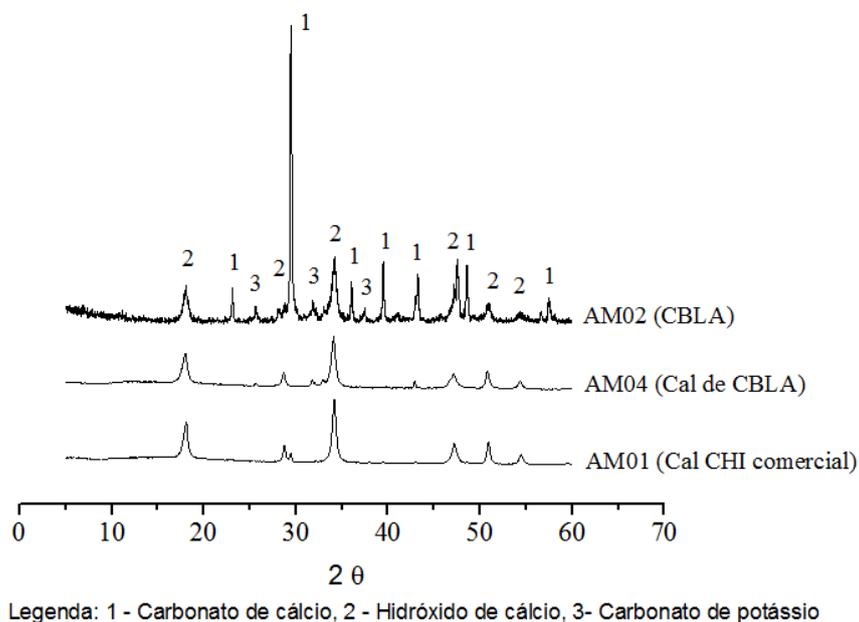


Figura 26 - DRX das amostras AM01(cal CHI comercial), AM02(CBLA) e AM04(cal de CBLA).

Os difratogramas de raios X das amostras AM01(cal CHI comercial), AM02 (CBLA) e da AM04(cal de CBLA) encontram-se expostos na Figura 26. As fases mineralógicas identificadas para a AM02 (CBLA) foram: CaCO_3 , distância interplanar basal de 2,71 Å (JCPDS : 5-0586), Ca(OH)_2 distância interplanar basal de 2,24Å (JCPDS : 4-0733), K_2CO_3 (JCPDS: 71-1466). Para a amostra AM04(cal de CBLA) os picos foram bem característicos da fase hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), além do desaparecimento da fase CaCO_3 , demonstrando a qualidade do processo de beneficiamento desenvolvido e que permitiu a AM04 (cal de CBLA) apresentar difratograma de raios X praticamente idêntico ao da cal comercial(AM01). Na curva AM04(cal de CBLA), verifica-se a existência de um discreto pico a 32° (2θ), sugerindo a presença de resíduo de carbonato de potássio e indicando que a lavagem não foi 100% eficiente, endossando a presença do potássio (< 1%, Fig. I). Para a curva da amostra AM04 (cal CHI comercial), o pico a $29,5^\circ$ (2θ) é relativo à presença de resíduo de carbonato de cálcio não decomposto.

Análises térmicas (curvas TG/DTG) da amostra AM04 (cal de CBLA) (Figura 27 A), comparativamente à AM01 (cal CHI comercial) (Figura 27 B), complementam as análises realizadas até o momento para comprovação da eficácia do processo de beneficiamento proposto na produção de cal a partir da AM02 (CBLA).

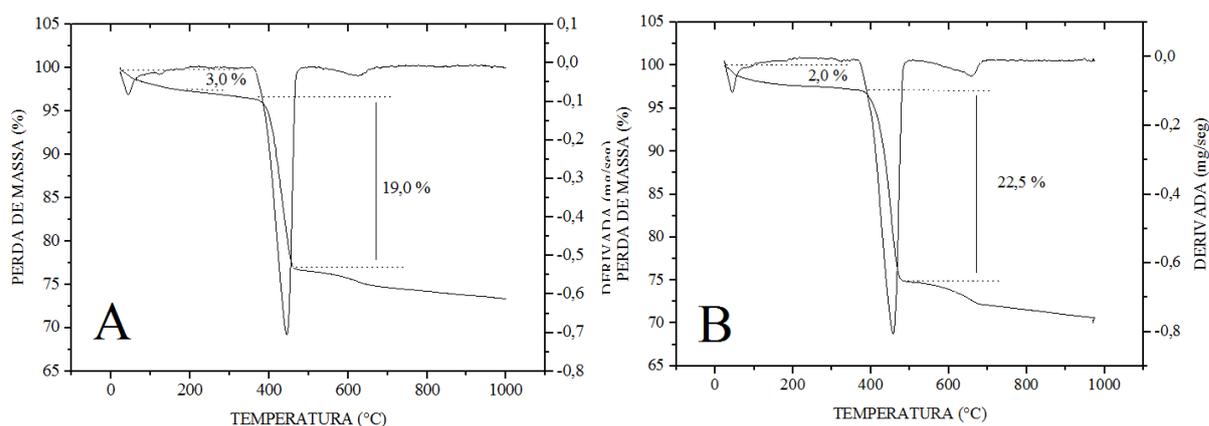


Figura 27 - Curvas TG/DTG da AM04, cal de CBLA (A) e M01(cal CHI comercial) (B).

Na Figura 27 A percebe-se que a AM04 (cal de CBLA) apresenta três perdas de massa características: a) de 30 a 220°C, 3% proveniente da água adsorvida; b) de 380 a 480 °C, 19% correspondente à decomposição do Ca(OH)_2 em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$;

c) de 600 a 700°C uma pequena perda decorrente da decomposição de carbonato de CaCO_3 em CaO e CO_2 ; d) acima de 700°C, uma pequena perda decorrente da decomposição de K_2CO_3 em K_2O + CO_2 . Estas faixas de temperatura são similares às faixas indicadas por Misra et al. (1993), Lehman et al. (1998), Souza Santos (1989).

Verificou-se que o valor de 19% para a decomposição do Ca(OH)_2 em CaO + H_2O obtido pela análise termogravimétrica confirma o percentual de 24% de água combinada obtida durante a etapa de hidratação da AM04(cal de CBLA) (Tabela 6), ratificando que a metodologia empregada utilizando hidratação com excesso de água, seguida de secagem em estufa, foi efetiva.

Na Figura 27B encontra-se exposta as curvas termogravimétricas da amostra AM01 (cal CHI comercial) utilizada como referência, onde se observa eventos de perda de massa nas mesmas faixas AM04 (cal de CBLA), ratificando, assim, os resultados obtidos na análise química (Tabela 7) e na curva de DRX (Figura 26). Sendo assim, comprovou-se a eficácia do processo de beneficiamento proposto na produção de cal a partir da AM02(CBLA).

Entretanto, observou-se que a concentração de hidróxido de cálcio na amostra AM01 (cal CHI comercial) é maior do que na amostra AM04 (cal de CBLA), correspondendo a 92% e 78% respectivamente. Os percentuais de hidróxido de cálcio foram calculados em função da perda de massa entre 380 e 480 °C ocorrida nas análises térmicas (Figura 27 A e B). Essa diferença era esperada em função da amostra AM01 (cal CHI comercial) ser de elevada qualidade.

Na sequência, foram realizadas análises para verificar se a AM04 (cal de CBLA) tinha potencial para uso comercial. Foi realizada análise da AM04(cal de CBLA) em comparação com amostra AM01(cal CHI comercial) e com a norma ABNT NBR 7175 (2003).

Na Tabela 8 estão os resultados das características químicas e finura obtida para as amostras AM01 e AM04. A amostra AM04 (cal de CBLA) apresentou características químicas e de finura que permitem sua classificação como cal do tipo CHI, conforme ABNT NBR 7175 (2003).

Tabela 8 – Comparativo da AM04(Cal de CBLA) com a ABNT NBR 7175 (2003).

Composto		Exigência da ABNT 7175 Cal CHI	AM01 (Cal CHI Comercial)	AM04 (Cal de CBLA)
CO ₂		≤ 7%	2,5	0,65
CaO+ MgO não hidratados		≤ 10%	6,8	7,93
CaO + MgO totais		≥ 90%	98,7	92,2
Finura (% retido peneira)	0,600mm	≤ 0,5%	0,20	0,10
	0,074mm	≤ 10%	1,10	0,40

Com relação à cal comercial, o menor percentual de anidrido carbônico, bem como a menor concentração de componentes não hidratados da amostra AM04 (cal de CBLA), indicam um maior controle da produção. O que já era esperado por estar sendo comparado um processo controlado em laboratório com um processo de cunho industrial. Além disso, a amostra AM01 (cal CHI comercial) apresentou teor de óxido de cálcio e óxido de magnésio totais superior ao da AM04 (cal de CBLA), o que também já era esperado por se tratar de uma cal comercial de elevada pureza (96,11% de CaO e 2,59% de MgO por FRX) (Tabela 8)

Observou-se ainda que a amostra AM04 (cal de CBLA) apresentou granulometria semelhante ao da amostra AM01 (cal CHI comercial), que pode ser verificado na Figura 28, onde as curvas granulométricas da amostra AM04 (cal de CBLA) e da AM01 (cal CHI comercial) praticamente se sobrepõem, o que garante equivalência em aplicações que utilizem cal como corretivo de solos, produção de tintas, materiais de construção, tratamento de águas, e outros fins.

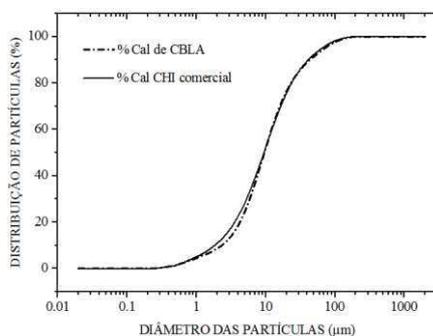


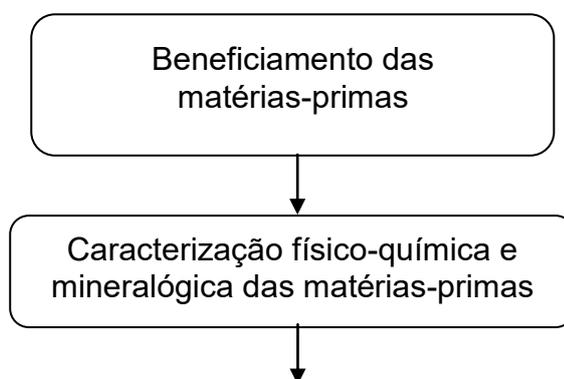
Figura 28 - Distribuição granulométrica da AM04(cal de CBLA) e AM01(cal CHI comercial)

4.1.3 CONCLUSÃO PARCIAL

Após estudos com cinza de algaroba para produção de cal pode-se chegar as seguintes conclusões: a calcinação direta da AM02 (CBLA) para produção de cal se mostrou inadequada em função da elevada concentração de potássio na AM02 (CBLA). O processo de lavagem com água quente (100°C) da AM03 (CBLA lavada) foi eficiente, tanto na redução de potássio de 9,73% para níveis abaixo de 1%, quanto para o incremento da concentração de óxido de cálcio no sistema em função da remoção dos elementos químicos solúveis. Foi verificado através das curvas de DRX e TG a presença de 78% de hidróxido de cálcio na AM04 (cal de CBLA) e a mesma apresentou características físico-químicas e mineralógicas correspondentes às de uma cal comercial, sendo classificada pela norma ABNT como uma cal CHI.

4.2 USO DE TEMPERATURA CONTROLADA PARA CURA DE BLOCOS DE SOLO CAL

Neste tópico, foi avaliada a influência da temperatura ambiente na cura de blocos de solo-cal e definidas alternativas para garantir a reprodutibilidade de resultados tecnológicos em qualquer época do ano mantendo o controle de qualidade dos blocos produzidos. Para tanto, foi avaliado o comportamento mecânico e a absorção de água de blocos de solo cal curados em três condições: a) cura à temperatura ambiente no verão; b) cura à temperatura ambiente no inverno simulado; e c) cura com temperatura controlada, seguindo o fluxograma ilustrado na Figura 29.



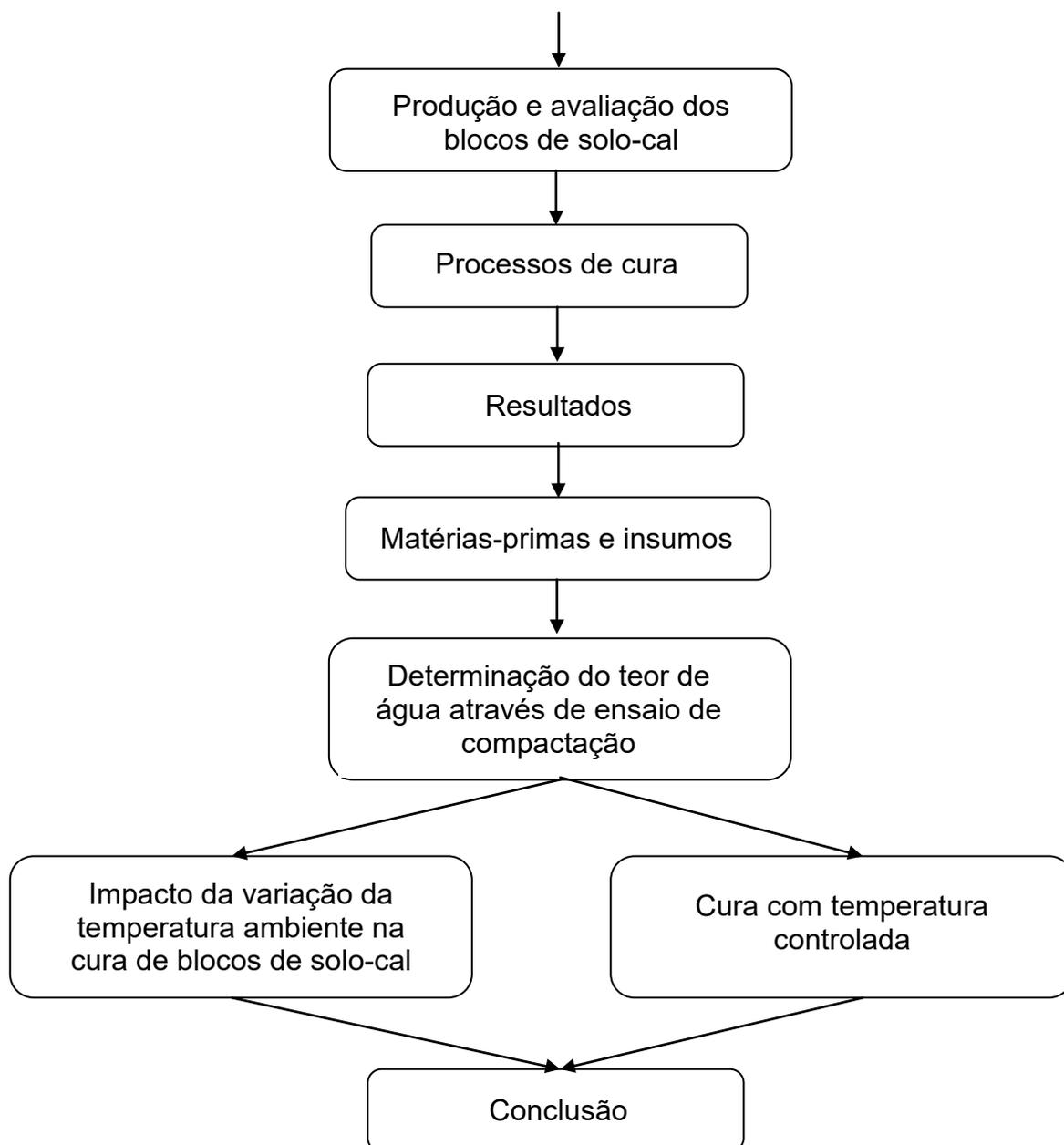


Figura 29 - Fluxograma da produção de blocos curados com temperatura controlada

4.2.1 METODOLOGIA

4.2.1.1 Beneficiamento das matérias primas

- Solo

O solo foi destorroado, peneirado em malha ABNT N°4. (4,8mm) e em seguida seco em estufa a 105°C por 24 horas. Para sua caracterização, foi peneirado em malha ABNT n° 200 (0,0074mm).

- **Cal**

Para produção dos blocos de solo-cal foi utilizado a mesma cal comercial CHI escolhida como referência no item 4.1, sem nenhum beneficiamento.

4.2.1.2 Caracterização física, química e mineralógica das matérias primas.

Nesta etapa foram utilizados os dados de caracterizações já apresentados no item 4.1 deste trabalho, uma vez que a cal comercial CHI utilizada para o desenvolvimento do processo de cura de blocos de solo-cal com temperatura controlada foi a mesma.

Com relação ao solo, foi realizada caracterização através dos seguintes métodos: 1) análise granulométrica por difração a laser; 2) determinação da composição química (FRX); 3) difração de raios X (DRX); 4) análise termogravimétrica, cujas técnicas foram descritas no item 4.1. deste trabalho. Além dessas técnicas, foi realizada análise granulométrica por peneiramento e sedimentação e ensaio de compactação.

- **Análise granulométrica do solo por peneiramento/sedimentação**

Foi determinada a distribuição granulométrica do solo de acordo seguindo a metodologia da norma ABNT NBR 7181(2016).

- **Ensaio de compactação**

Foi realizado ensaio de compactação do solo conforme recomendado pela norma ABNT NBR 7182 (2016) para obtenção da relação entre o peso específico seco máximo do solo e o do solo com 10% de cal, com o objetivo de determinar a quantidade de água que permitisse a maior compactação possível

do sistema. O resultado permitiu definir a quantidade de água necessária para a moldagem dos blocos utilizados na pesquisa.

4.2.1.3 Produção e avaliação dos blocos de solo-cal

Foram produzidos blocos vazados de solo-cal nas dimensões de 25cm x 12,5cm x 6,5cm, moldados em prensa manual modelo MTSC12 fabricada pela Permaq (Figura 30), com capacidade para produzir dois blocos por ciclo e dotada de regulagem volumétrica. Foi utilizada a proporção de 1:10 (cal:solo) em massa, tomando como referência os trabalhos de Figueiredo *et al.*, (2011) e Patrício *et al.*, (2013). Foi utilizado 21,2% de água em relação à massa seca total (solo+cal) para obtenção da máxima compactação do sistema solo-cal ABNT NBR 7182 (2016) e para controle do processo, foi definido que os blocos conformados deveriam ter a massa de 2900g \pm 87g (3%) para serem considerados aptos para avaliação.



Figura 30 – Bloco (A); Prensa manual de blocos (B).

Para realização da mistura das matérias primas, foi utilizado misturador planetário com capacidade para 20 litros, em ciclo de 02min por batelada a 220 rpm. O solo e a cal foram adicionados, homogeneizados manualmente, a água foi adicionada e em seguida o conjunto foi batido no misturador por 1min. Logo após, o sistema foi interrompido e as paredes laterais da cuba raspadas e em seguida, o ciclo foi repetido por mais 1min.

Foram confeccionados 150 blocos, sendo 30 para cura à temperatura ambiente no verão (CTAV), 18 para cura a temperatura ambiente no inverno simulado (CTAIS) e 102 para temperatura controlada de cura (TCC). Após

fabricação, os blocos foram acondicionados em sacos plásticos para prevenir carbonatação e manter a perda de umidade abaixo de 5%. Os blocos foram acondicionados em duas condições: 1) em um único saco de polietileno (Figura 31 A e B) para os processos de cura CTAV e CTAIS e 2) em dois sacos plásticos, o primeiro em polietileno e o segundo de PET (Figura 32 A, B e C) para os blocos curados no processo TCC.



Figura 31 - Saco de polietileno (A); Bloco embalado (B)



Figura 32- Saco Polietileno (A); Saco PET sobre o de polietileno (B); Embalagem dupla finalizada (C).

Após a cura, os blocos foram avaliados com relação à resistência mecânica, à compressão simples e à absorção de água, tomando como referência as normas da ABNT NBR 8492 (2013) e ABNT NBR 8491 (2012) para blocos de solo-cimento, adaptadas para solo-cal. Estas normas recomendam que os blocos devam ter resistência mecânica a compressão simples superior a 2Mpa e absorção de água inferior a 20% aos 28 dias. Os ensaios foram realizados conforme descritos abaixo:

- Ensaio de resistência à compressão simples

Para realização do ensaio de resistência a compressão simples, inicialmente os blocos curados foram cortados ao meio com serrote para alvenaria e em seguida as partes cortadas foram unidas com gesso na proporção de 1:0,55 (gesso /água)(.Figura 33 A e B).

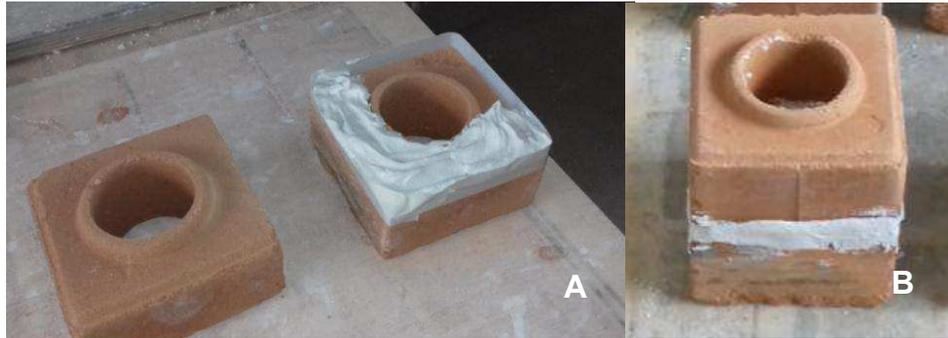


Figura 33 – Junção entre as duas partes do bloco cortada. Durante o processo (A) e depois de unidas (B)

Para realização do capeamento das faces superior e inferior dos blocos cortados, após a junção das partes (Figura 33 B), inicialmente foram confeccionadas plataformas quadradas em madeira, com parafuso em cada uma das extremidades para permitir o nivelamento usando régua de nível.

Em seguida, foram confeccionadas formas (em alumínio) que foram fixadas com fita crepe em uma fórmica lisa (Figura 34 A e B). Para o capeamento, foi colocado gesso nestas formas na proporção de 1:0,55 (gesso /água) até o limite superior do perfil de alumínio e em seguida foram colocados os blocos cortados e unidos, sendo nivelados em seguida com uma régua de nível (.Figura 35 A). Após a cura, as fórmicas foram removidas e o processo repetido na outra face (Figura 35 B).

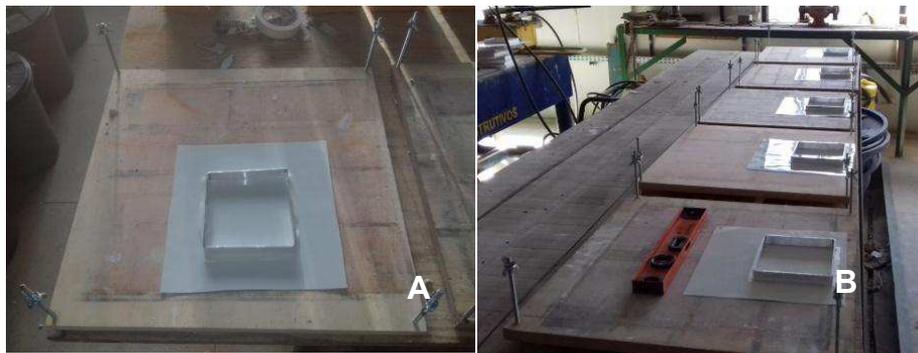


Figura 34 – Forma fixa em folha plástica (A) e (B).

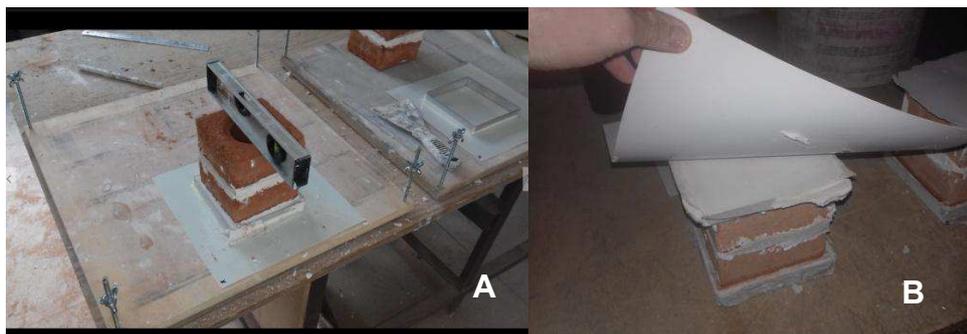


Figura 35 – Caapeamento de uma das faces (A); Remoção da folha plástica (B).

Para avaliação da resistência mecânica à compressão simples, os blocos foram ensaiados utilizando prensa hidráulica Shimadzu com capacidade para 2000kN utilizando os fundos de escalas de 40kN e 100kN, alteradas em função da idade de cura dos blocos e velocidade de deslocamento de 0,5mm/s.

- **Ensaio de absorção de água**

A absorção de água foi realizada conforme metodologia recomendada pela norma ABNT NBR 8492 (2013), onde os blocos curados foram secos em estufa a 105°C por 24 horas e em seguida pesados. Após a primeira pesagem, os blocos foram imersos em uma caixa d'água por 24 horas e em seguida pesados novamente para determinação do percentual de água absorvido.

4.2.1.4 Processos de cura

O processo de cura foi realizado em três condições: 1) cura à temperatura ambiente no verão (CTAV); 2) cura à temperatura ambiente no inverno simulado (CTAIS); e 3) temperatura controlada de cura (TCC).

O processo de cura CTAV serviu como padrão e nele os blocos foram curados à temperatura ambiente no período de verão da região onde foi realizada a pesquisa nos meses de novembro, dezembro de 2016 e janeiro de 2017. Este período foi escolhido por ser o mais quente do ano permitindo, assim, um maior ganho de resistência. Após fabricação, os blocos foram acondicionados em caixas de isopor para minimizar a variação térmica diária (Figura 36).

As temperaturas de cura foram medidas por um *data logger*, modelo RC-5 fabricado pela Elitech (Figura 37), sendo registradas as temperaturas médias de 25°C, 25°C e 27,5°C para as idades de cura de 28d, 60d e 90d respectivamente.



Figura 36 - Padrões de cura natural 28, 60 e 90 dias.



Figura 37 - Acondicionamento dos blocos (A); Registrador de temperatura (B)

Para o processo de cura CTAIS, os blocos de solo-cal foram curados em um freezer vertical no qual foi instalado um controle de temperatura digital externo com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Figura 38 A e B). Como controle adicional da temperatura de cura, foi realizada medição da temperatura interna do freezer (Figura 39) com o mesmo *data logger* ilustrado na Figura 37 B.

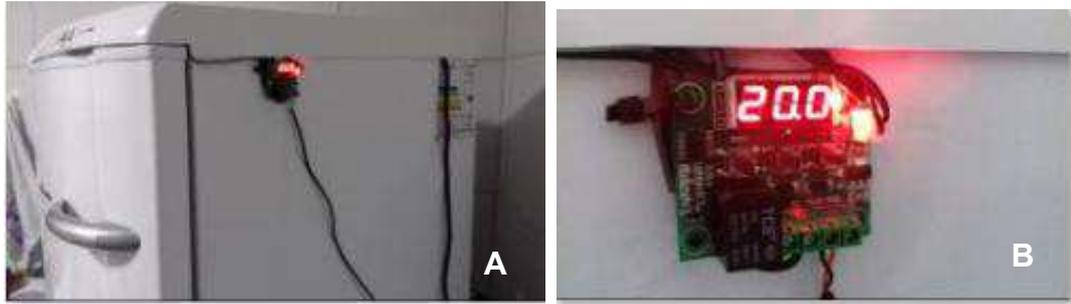


Figura 38 – Freezer modificado (A); Controle de temperatura digital externo (B)



Figura 39 – Controlador de temperatura digital

No processo de cura CTAIS, os blocos de solo-cal foram curados nas temperaturas de 20°C, 20°C e 22,8°C para as idades de 28, 60 e 90 dias, respectivamente. A redução de 5°C em todas as idades em relação ao processo CTAV foi utilizada em função de ser a variação média da temperatura ambiente ocorrida entre os períodos de inverno e verão na região onde foi realizada a pesquisa, tomando como referência a série histórica de 30 anos do Climatempo (2017) (Figura 40).

O processo de cura TCC consistiu na produção de blocos de solo-cal na temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$ em estufa (Figura 41), por tempo adequado para obtenção dos mesmos resultados de resistência mecânica à compressão simples e de absorção de água de blocos curados no processo CTAV.

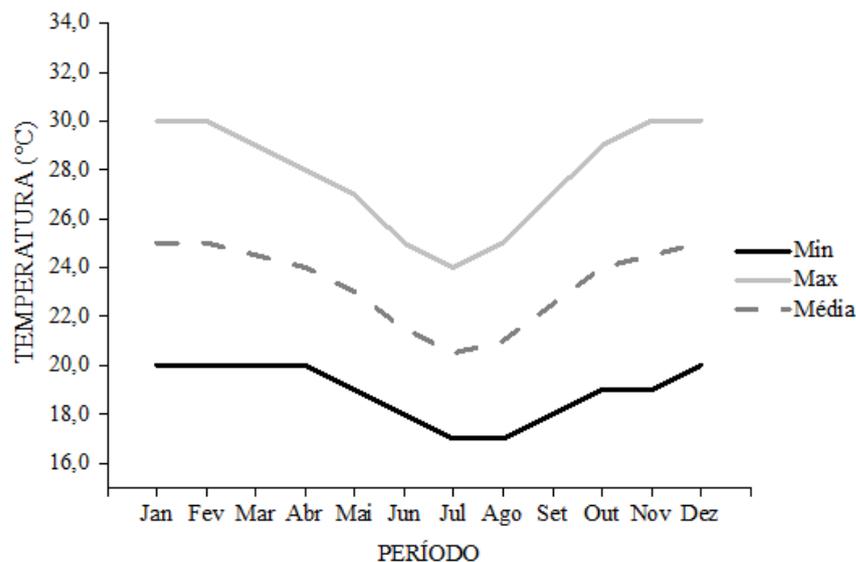


Figura 40- Histórico de temperatura ambiente na cidade de Caruaru-PE.

O processo TCC teve como objetivo avaliar a possibilidade da reprodutibilidade dos resultados do processo CTAV em qualquer época do ano e sob qualquer temperatura ambiente. A temperatura de 40°C foi escolhida por ser o limite recomendado quando é necessário acelerar, em laboratório, a cura de amostras de solo estabilizado com cal destinada à obras de pavimentação (Little, 1995) e (ASTM D5102, 2009). Esta recomendação decorre do fato de que até 40°C a reação de solo com cal resulta nos mesmos produtos de reação pozolânica que ocorreriam à temperatura ambiente.



Figura 41 - Blocos sendo curados a 40 +/- 1°C.

Desta forma, entende-se que outras temperaturas para cura controlada de blocos de solo-cal poderiam ser consideradas, desde que mantidas fixas, levando

em consideração que em função da cinética da reação quanto menor for à temperatura em relação a 40°C, maior será o tempo necessário para equiparação dos resultados entre a cura de blocos de solo-cal com temperatura controlada e a cura à temperatura ambiente no verão.

Para o desenvolvimento do processo TCC, foi definido inicialmente o tempo necessário para que blocos curados a 40°C atingissem as mesmas resistências mecânicas obtidas no processo CTAV, baseado no princípio de que reações pozolânicas são aceleradas com o aumento da temperatura (Bell, 1996). Para isso, foi plotado um gráfico de tendência da resistência mecânica em função do tempo de cura para os blocos curados a 40°C nas idades de 2d, 4d, 6d, 8d, 10d, 12d, 14d, 16d, 18d, 20d, 22d e 24d. Em seguida, foram posicionados nesta curva os valores de resistência mecânica do processo CTAV curado nas idades de 28d, 60d e 90d, sendo definido o tempo necessário para equivalência de resultados dos processos CTAV e TCC.

4.2.2 RESULTADOS

4.2.2.1 Matérias primas e insumos

- **Cal**

Nesta etapa da pesquisa foi utilizada a mesma cal comercial apresentada no item 4.1 por apresentar elevada pureza e qualidade.

- **Solo**

Na Tabela 9 estão contidos os valores de características físicas do solo, onde se observa que o solo apresentou limite de plasticidade de 14,5% sendo classificado como medianamente plástico (Caputo, 2015).

Na Tabela 10 estão contidos os valores da composição química, e analisando-se os resultados observa-se elevado teor de sílica ($\text{SiO}_2=47,49\%$) e alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 34,71\%$) típicos de solos argilosos (Souza Santos, 1989). O teor de Fe_2O_3 presente na faixa de 12,33% explica a coloração avermelhada do solo.

Tabela 9– Avaliação solo utilizado na pesquisa

Ensaio	Resultado do solo (%)	Exigência NBR 10833 (%)
Passando na peneira ABNT 4,8 mm (N°4)	100,0	100,0
Passando na peneira ABNT 0,0075mm (N°200)	48,5	10,0 a 50,0
Limite de liquidez	39,6	= < 45,0
Índice de plasticidade	14,5	= < 18,0

Tabela 10 - Composição química do solo

Óxidos	Resultado (%)
SiO ₂	47,49
Al ₂ O ₃	34,71
Fe ₂ O ₃	12,33
K ₂ O	1,94
TiO ₂	1,61
MgO	1,51
Outros	0,41
PF*	11,04

PF* - Perda ao fogo percentual em relação a massa total

Estes resultados (Tabela 9 e Tabela 10) estão de acordo com os dados de granulometria do solo contidos na Tabela 11 na qual se observa que o solo apresentou elevado teor de fração argila (41%) em relação à fração silte, areia fina e areia grossa, bem como com a classificação de solo de acordo com o diagrama trilinear textural (Figura 42), que indica se tratar de um solo argiloso EMBRAPA (2006).

Tabela 11 – Composição granulométrica do solo

Composição granulométrica	%
Areia grossa	28
Areia Fina	26
Silte	5
Argila	41

Fonte: IPA (2016)

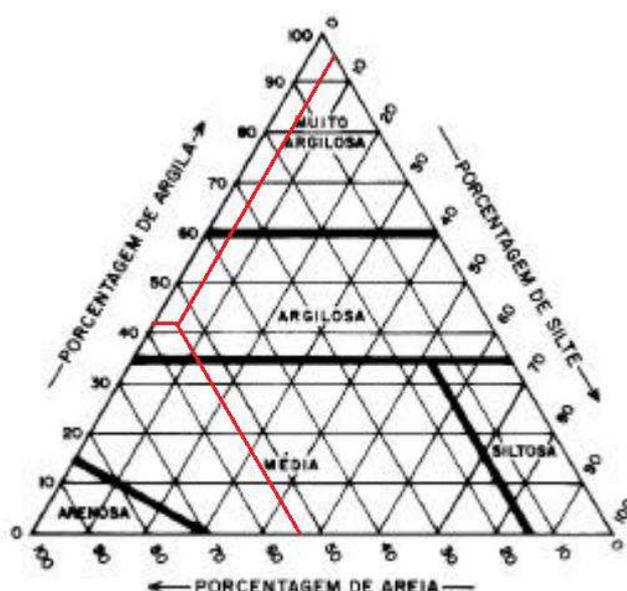


Figura 42 - Classificação do solo de acordo com o diagrama Trilinear Textural (Embrapa modificado, 2006)

A Figura 43 ilustra os padrões de raios X do solo e de cal utilizadas nesta pesquisa. No solo, foi verificada a presença das seguintes fases: a) Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), distância interplanar basal de 7,1Å (JCPDS:14-0164); b) Quartzo (SiO_2), distância interplanar basal de 3,25Å (JCPDS:46-1045).e, c) mica moscovita (JCPDS: 83:1803). Na cal CHI as fases: a) Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), distância interplanar basal de 2,24 Å (JCPDS: 4-0733); e, b) traços de carbonato de cálcio (CaCO_3), distância interplanar basal de 2,71 Å (JCPDS:5-0586). Esses resultados são similares aos estudos de Patrício *et al.*, (2013).

4.2.2.2 Determinação do teor de água através do ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado com a finalidade de determinar o teor ótimo de água e a densidade a máxima da compactação do solo.

A Figura 44 ilustra a curva de compactação do solo e do traço 1:10 (solo-cal). Ao analisar as curvas da Figura 44, verifica-se que houve aumento no valor da umidade ótima e decréscimo da densidade máxima com adição da cal ao solo, sendo esses valores para o solo de 1,85 (kgf/cm³) para densidade máxima seca e 18,80% para o teor de umidade ótima. Para o traço solo-cal os valores foram de 1,60(kgf/cm³) para densidade máxima seca e de 21,20% para o teor de umidade ótima. Segundo Bell (1996), estes valores estão coerentes já que a adição de cal em materiais argilosos aumenta o percentual de água da mistura ideal e reduz a densidade seca para a mesma energia aplicada em função das reações que ocorrem pela interação entre argila e cal na presença de água.

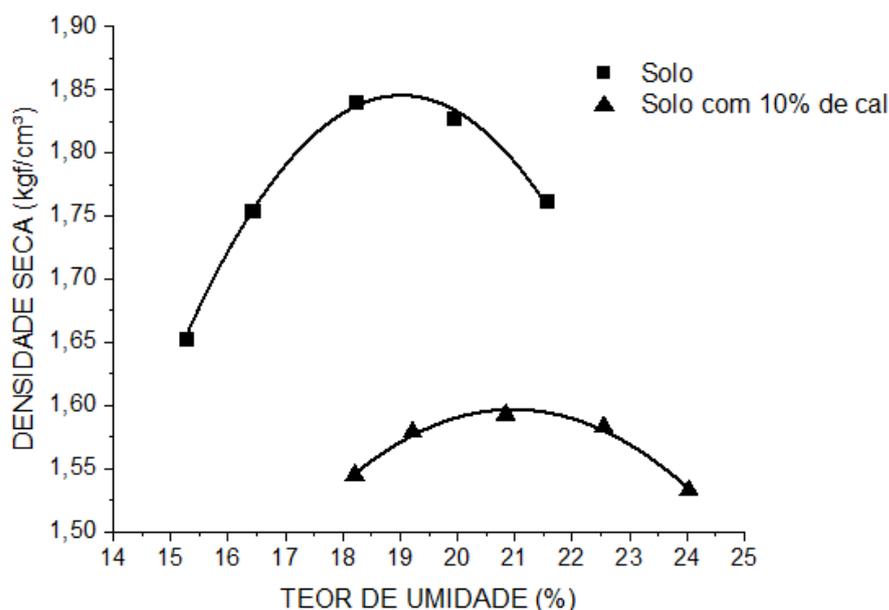


Figura 44 - Ensaio de compactação.

Em função dos resultados obtidos, foi definido para esta pesquisa o percentual de água de 21,20% em relação aos materiais secos para o traço 1:10 (solo-cal).

4.2.2.3 Impacto da variação de temperatura ambiente na cura de blocos de solo-cal

Na Figura 45 podem ser observados os valores de resistência mecânica à compressão simples dos blocos com cura à temperatura ambiente no verão (CTAV) e à temperatura ambiente no inverno simulado (CTAIS).

Conforme pode ser visto na Figura 45, valores de resistência à compressão simples superiores a 2MPa, ABNT NBR 8492 (2013) foram obtidos para as idades de cura de 60d e 90d em blocos curados pelo processo CTAV, confirmando a qualidade das matérias-primas e indicando, por este aspecto, que os blocos estariam adequados para uso na construção civil. Esses resultados foram superiores ao obtidos por Figueiredo *et. al*, (2011) para blocos solo-cal.

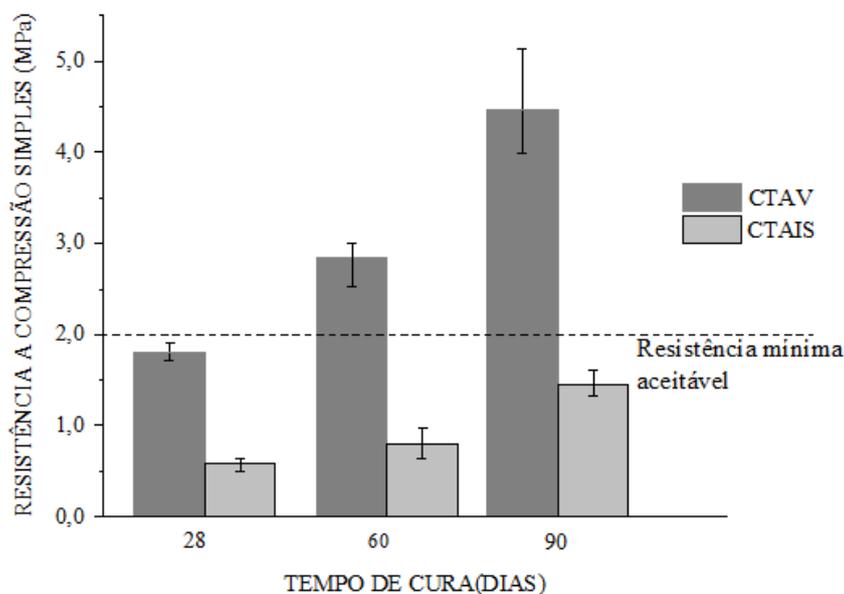


Figura 45– Resistência dos blocos curados pelos processos CTAV e CTAIS.

Entretanto, blocos curados no processo CTAIS conduziram valores de resistência mecânica inferiores a 2MPa recomendado pela ABNT NBR 8492 (2013), sendo estes até três vezes menores do que os valores obtidos no processo CTAV.

A partir desses resultados ficou comprovado que variações da temperatura ambiente ao longo do ano comprometeram a repetibilidade de resultados e a qualidade dos blocos produzidos, mesmo que sejam utilizadas as mesmas matérias-primas e processo de fabricação.

4.2.2.4 Cura com temperatura controlada

Na Figura 46 pode ser observada a curva de tendência, resistência mecânica em função do tempo de cura, de blocos curados nas idades de 2d, 4d, 6d, 8d, 10d, 12d, 14d, 16d, 18d, 20d, 22d e 24d a 40°C, na qual se observa a evolução da resistência mecânica dos blocos com o aumento do tempo. No gráfico, também pode ser observado o posicionamento dos valores de 1,80, 2,85 e 4,47 MPa correspondentes aos valores obtidos no processo de cura CTAV nas idades de 28d, 60d e 90d, respectivamente.

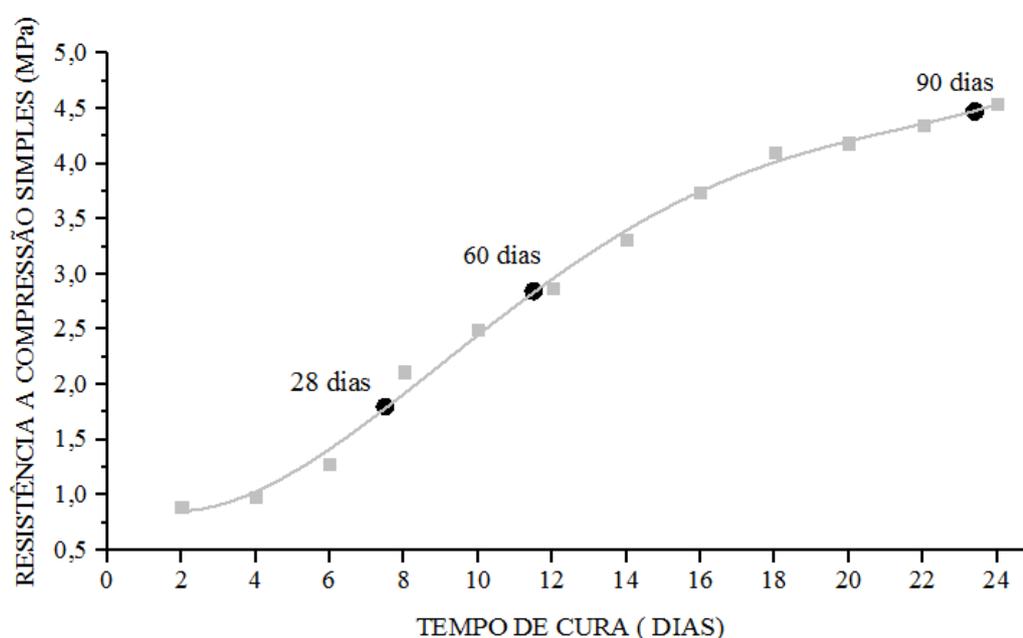


Figura 46 – Determinação do tempo necessário para equivalência entre processo CTAV e TCC.

Neste cruzamento de dados foi verificada a possibilidade de serem atingidos os mesmos resultados de resistência mecânica do processo CTAV, curando os blocos à temperatura controlada de 40°C. Desta forma, foi definido o processo de temperatura controlada de cura (TCC) que consistiu na cura de blocos a 40°C nas idades de 7,5d, 11,5d e 23,4d e cujos resultados seriam equivalentes aos obtidos no processo CTAV curados por períodos 28d, 60d e 90d, respectivamente.

A validação do processo TCC foi comprovada pela comparação dos resultados dos blocos de solo-cal curados por período de 7,5d, 11,5d e 23,4d na temperatura de 40°C, com os blocos curados pelo processo CTAV nas idades de 28d, 60d e 90d.

A Figura 47 e Figura 48 ilustram os resultados de resistência mecânica à compressão simples e à absorção de água, respectivamente, de blocos curados utilizando o processo TCC em comparação com blocos curados no processo CTAV. Percebeu-se que houve equivalência de resultados entre os dois processos e com a manutenção da qualidade do processo TCC para as maiores idades (ABNT NBR 8492, 2013). Com esta equivalência, ficou comprovada a viabilidade do uso do processo TCC na manutenção e reprodução de resultados tecnológicos de blocos curados à temperatura ambiente no verão (processo CTAV), e em qualquer época do ano e sob qualquer temperatura ambiente. Como ganho adicional do processo TCC, foi obtida significativa redução de tempo de cura passando de 28d, 60d e 90d no processo CTAV para 7d,5d, 11,5d e 23,4d, respectivamente, no processo TCC (Figura 47 e Figura 48). O que já era esperado devido ao aumento na cinética da reação pozolânica pelo efeito da temperatura de cura,

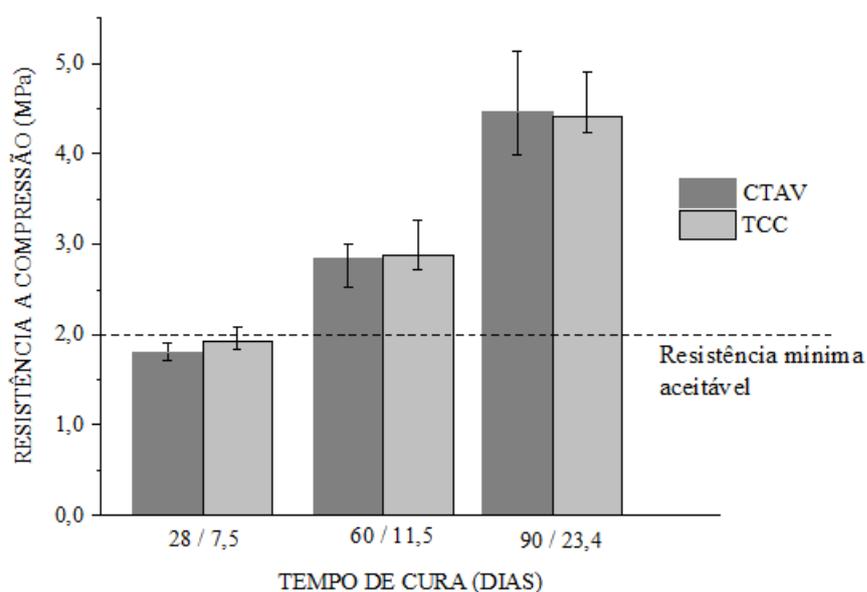


Figura 47 - Resistência mecânica de blocos curados pelos processos CTAV e TCC.

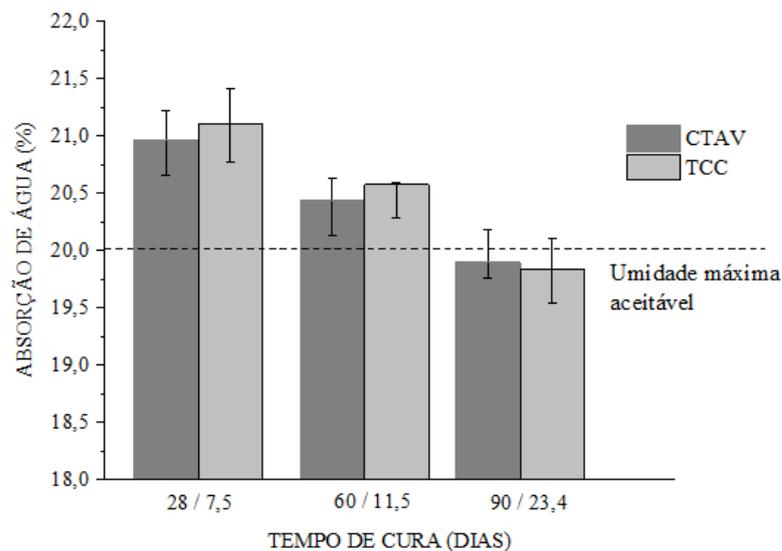


Figura 48- Absorção de água blocos curados nos processos CTAV e TCC.

Sendo assim, a reprodutibilidade de resultados tecnológicos em qualquer época do ano e temperatura ambiente, tanto em nível laboratorial para pesquisas científicas como em nível de produção industrial, são factíveis de serem realizadas com controle de qualidade na produção de blocos de solo-cal.

4.2.2.5 CONCLUSÃO

Após estudos da cura de blocos de solo-cal com temperatura controlada e cura ao longo do ano pode-se concluir que a cura à temperatura ambiente não permite a garantia da qualidade dos blocos produzidos em diferentes épocas do ano, já que apenas blocos curados no verão atendem às exigências da norma ABNT. Os resultados da cura à temperatura controlada foram similares aos obtidos por blocos curados à temperatura ambiente no verão, utilizados como padrões, permitindo assim a reprodução de blocos dentro dos padrões de qualidade da ABNT em qualquer época do ano. Além disso, como ganho adicional da cura à temperatura controlada de 40°C, foi possível a redução no tempo de cura em todas as idades passando de 28d, 60d e 90d na cura à temperatura ambiente no verão para 7,5d; 11,5d e 23,4d, respectivamente. Do ponto de vista industrial, além do ganho de qualidade, o processo de cura controlada a 40°C resulta em menor tempo de cura, o que permite uma maior eficiência do processo produtivo.

4.3 AVALIAÇÃO DE BLOCOS DE SOLO-CAL COM SUBSTITUIÇÃO DA CAL COMERCIAL POR RESÍDUO BENEFICIADO

Nesta etapa da pesquisa foi realizada avaliação de blocos de solo-cal com substituição parcial e/ou total de cal comercial do tipo CHI por cinza de base de lenha de algaroba (CBLA) e por cal de cinza de lenha de algaroba (cal de CBLA), cujo desenvolvimento foi apresentado no item 4.1, utilizando a metodologia de cura com temperatura controlada a 40°C discutida no item 4.2 desta pesquisa. Para isso, foram definidos inicialmente os percentuais máximos de CBLA e cal de CBLA baseados no limite de álcali equivalente recomendado para materiais cimentícios. Em seguida, os blocos foram moldados, curados e ensaiados em relação à resistência mecânica e à absorção de água e avaliados com relação a sua microestrutura, seguindo o fluxograma ilustrado na Figura 49.

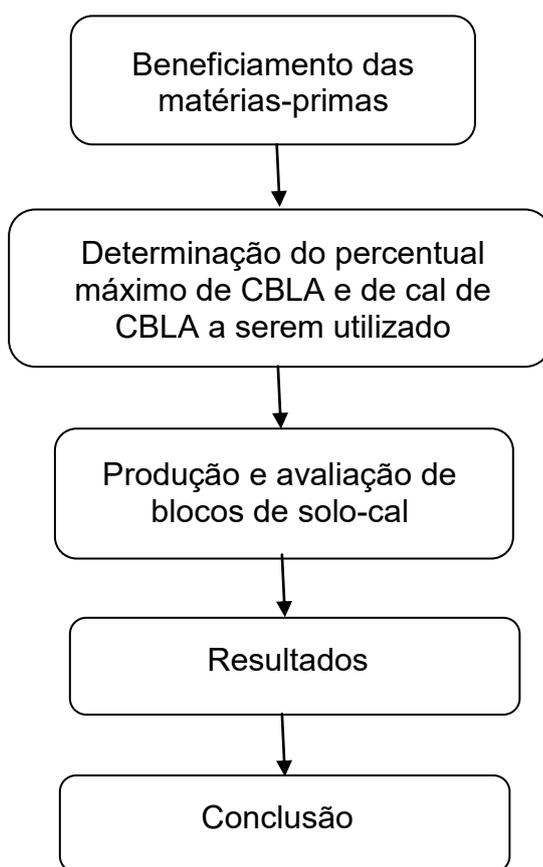


Figura 49 - Fluxograma da fabricação e avaliação de blocos de solo cal com matéria prima alternativa.

4.3.1 METODOLOGIA

4.3.1.1 Matérias-primas

Nesta etapa da pesquisa foi utilizada como matéria-prima, os mesmos materiais utilizados nos item 4.1 e 4.2 desta pesquisa. Ou seja, solo argiloso, cal comercial CHI e cinza de base de lenha de algaroba (CBLA). Além disso, foi utilizada ainda a cal de cinza de base de lenha de algaroba (cal de CBLA) cujo desenvolvimento foi apresentado no item 4.2. Desta forma, o beneficiamento das matérias-primas utilizadas nesta etapa do trabalho seguiu os mesmos procedimentos já descritos nos itens 4.1 e 4.2 .

4.3.1.2 Determinação dos percentuais de CBLA e de cal de CBLA a serem utilizado nos blocos de solo-cal

Em materiais cimentícios, elevados teores de Na_2O e K_2O podem desencadear a reação álcali-agregado que, por ser expansiva, deteriora o material cimentício. Segundo Taylor (1992), a reação álcali-agregado é de caráter pozolânico, já que íons de silício se combinam com íons de sódio e potássio formando uma rede deformada que pode absorver moléculas de água e expandir. Em sistemas com oferta de íons Ca^{2+} , o cálcio prevalece sobre o sódio e o potássio formando a estrutura de silicato de cálcio hidratado (CSH) que é estável.

Vale ressaltar, que não foram encontrados estudos sobre a reação álcali-agregado em tijolos de sol-cal. Os estudos existentes avaliam sistemas que contenham apenas cimento na sua composição. Porém, como no tijolo de solo-cal ocorre a formação de material cimentício através da reação pozolânica e com o passar do tempo o nível de cálcio diminui em função da formação de silicatos, a prevenção à reação álcali-agregado foi considerada nesta pesquisa.

Para avaliação dos riscos do desenvolvimento da reação álcali-agregado nos blocos, foi seguida a metodologia recomendada pela norma da ABNT NBR 15577-4 (2008), que avalia se o solo (agregado) possui potencial para desenvolver a reação álcali-agregado e, caso possua, ações preventivas devem ser tomadas como limitar o teor de alcali equivalente no aglomerante (ASTM-C150, 2007).

Para determinação do potencial do solo (agregado) no desenvolvimento da reação álcali-agregado, foi avaliada a expansão de barras de argamassa com 285 mm de comprimento por 25 mm de largura, confeccionadas com o solo utilizado neste trabalho, cimento CP-V ARI, relação água/cimento de 0,47 (ABNT NBR 13276, 2016) e curadas em solução de hidróxido de sódio a 80°C por 30 dias, seguindo a recomendação da norma ABNT NBR 15577-4 (2008) (Figura 50 A e B), que limita em 0,19% a expansão máxima admissível para as barras de argamassa, após o período de 30 dias de cura agressiva, para que um solo não seja considerado reativo.



Figura 50 – Barras de argamassa em solução agressiva (A) e na estufa a 80°C (B)

Na figura Figura 51 ilustra-se os resultados do ensaio para determinação do potencial de expansão do solo por reação álcali-agregado realizado segundo os critérios determinados pela ABNT NBR 15577-4 (2008).

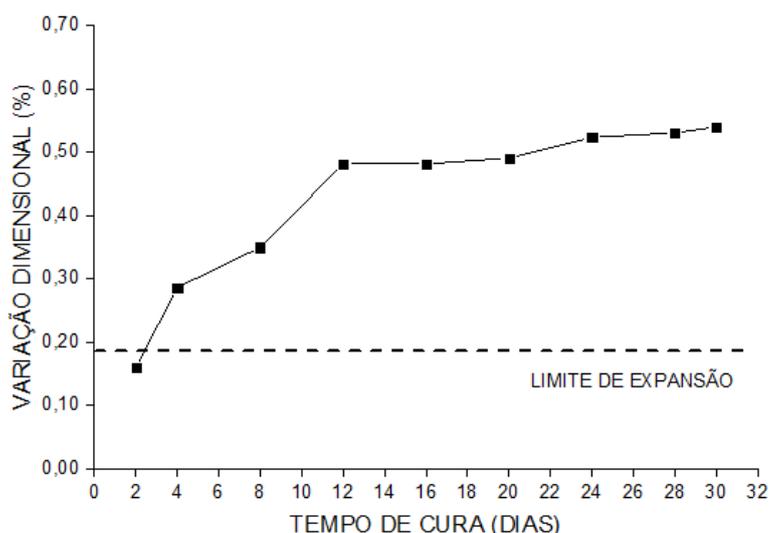


Figura 51 – Reatividade potencial do solo a reação álcali-agregado.

Pode ser observado na Figura 51 que o percentual de expansão atingido pelas barras de argamassa aos 30 dias de cura foi de 0,54%, ultrapassando assim o limite máximo de 0,19% recomendado pela norma ABNT NBR 15577-1 (2008) e indicando desta forma que o solo utilizado na pesquisa era potencialmente reativo e que ações preventivas deveriam ser consideradas para sua utilização em materiais cimentícios.

Segundo a ASTM-C150 (2007), a melhor maneira de combater a reação álcali-agregado é evitar sua ocorrência e, nesse aspecto, limitar o teor de álcali equivalente em 0,6% no aglomerante, conforme descrito no item 2.8.1 desta pesquisa, é uma das alternativas mais recomendadas. Desta forma, para serem definidos os percentuais de substituição da cal comercial por CBLA e por cal de CBLA foi seguido o critério recomendado pela ASTM substituindo o cimento pela cal.

Na Tabela 12 ilustrada-se o teor de sódio e potássio presentes na cal comercial, na cal de CBLA e na CBLA, obtidos por FRX. Utilizando estes dados e a equação 1 (item 2.8.1), foi realizado cálculo do sódio equivalente de misturas de cal comercial com CBLA e com cal de CBLA, com a finalidade de definir o maior percentual possível de substituição, sem ultrapassar o valor máximo de 0,6% de álcali equivalente na mistura. Segundo este critério, foram definidos os percentuais máximos de substituição da cal comercial por CBLA de 7% e por cal de CBLA de 100%, já que nestes percentuais os valores de sódio equivalente atingiram respectivamente 0,54 e 0,34%, estando, portanto, dentro das exigência da ASTM para aglomerantes com baixo teor de álcali.

Tabela 12 – Concentração de sódio e potássio por FRX: cal comercial CHI, cal de CBLA e CBLA.

Elemento químico	Concentração (%)		
	Cal CHI Comercial	Cal de CBLA	CBLA
K ₂ O	0,06	0,52	9,73
Na ₂ O	0,00	0,00	0,72

Com a definição do limite máximo de substituição da cal comercial pela matéria-prima alternativa, foi definido para desta etapa do trabalho a adição de mais duas substituições menores, tanto para CBLA quanto para cal de CBLA, com o objetivo de permitir entender eventual tendência na variação da resistência mecânica e absorção de água com o aumento das substituições. Desta forma, foram definidos os percentuais de 3, 5 e 7% de substituição da cal comercial por CBLA e de 50, 75 e 100% de substituição por cal de CBLA, cujos percentuais de sódio equivalente ficaram de acordo com a ASTM (Tabela 13).

Tabela 13 - Amostras de aglomerante com substituição parcial ou total de cal comercial por CBLA ou cal de CBLA

Amostra	CBLA (%)	Cal de CBLA (%)	Cal comercial (%)	Sódio Equivalente (%)
Cal comercial (Padrão)			100	0,04
3% CBLA	3		97	0,25
5% CBLA	5		95	0,39
7% CBLA	7		93	0,54
50% cal de CBLA		50	50	0,19
75% cal de CBLA		75	25	0,27
100% cal de CBLA		100	0	0,34

4.3.1.3 Produção e avaliação dos blocos de solo-cal

Foram produzidos 180 blocos sendo 30 para cada um dos percentuais avaliados. Ou seja, 3, 5 e 7% de CBLA e 50, 75 e 100% de cal de CBLA, sendo 10 para cada uma das três idades de cura. Como padrão, foram utilizados os resultados de resistência mecânica e absorção de água apresentados no item 4.2, de blocos confeccionados com cal comercial curados a 40°C por 7,5; 11,5 e 23,4 dias.

Os blocos com substituição foram conformados, colocados em dois sacos plásticos, para prevenir a perda de umidade e carbonatação e curados a 40°C idades de 7,5; 11,5 e 23,4 dias e, para avaliação da qualidade, após a cura os blocos foram ensaiados com relação à resistência mecânica a compressão simples e

à absorção de água seguindo os mesmos procedimentos descritos no item 4.2 desta pesquisa.

Os blocos também foram avaliados em relação a sua microestrutura, sendo realizado análise por difração de raios X e análise térmica diferencial (TG) de amostra de blocos antes e depois do período de cura. As análises foram utilizadas para avaliar a mudança da estrutura na formação de elementos estáveis bem como para verificar se ocorreu processo de carbonatação nos blocos.

Blocos de solo-cal adquirem resistência mecânica quando a argila presente no solo tem sua estrutura atacada pelo baixo pH propiciado pela cal na presença de água, solubilizando a sílica e a alumina que reagem com o cálcio da cal através de reação pozolânica, formando material cimentício na forma de silicatos (CSH). Além disso, durante a cura pode haver um ganho de resistência mecânica adicional, caso ocorra o fenômeno da carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no sistema formando carbonato de cálcio (CaCO_3) (Taylor, 1993).

Apesar da carbonatação contribuir para o ganho de resistência mecânica, caso os blocos sejam utilizados em regiões úmidas, o carbonato de cálcio que é insolúvel, pode reagir com o CO_2 presente na água formando bicarbonato de cálcio que por ser solúvel, pode ser lixiviado formando espaços vazios que podem comprometer a durabilidade dos blocos. Desta forma, para uma maior abrangência no uso dos blocos, a carbonatação deve ser evitada.

4.3.2 RESULTADOS

Foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão simples e de absorção de água em blocos com substituição parcial da cal industrial por CBLA nas proporções de 3, 5 e 7% e nas idades de 7,5; 11,5 e 23,4 dias. Os resultados foram comparados com um traço padrão de solo-cal produzidos sem substituição. (Figura 52 e Figura 53).

Pode ser observado na Figura 52 que houve equivalência de resultados entre os blocos com substituição de cal por CBLA e os blocos padrão (sem substituição), em todas as idades de cura e para todos os percentuais de substituição, sugerindo, porém, leve tendência na redução da resistência aos 23,4 dias na medida em que foi sendo aumentado o percentual de substituição da cal comercial por CBLA. Outro

aspecto observado foi que em função da equivalência de resultados, todas as proporções ensaiadas obtiveram resultados de resistência mecânica superior a 2 MPa, que é o mínimo exigido pela ABNT NBR 8492 (2013) para blocos de solo-cal.

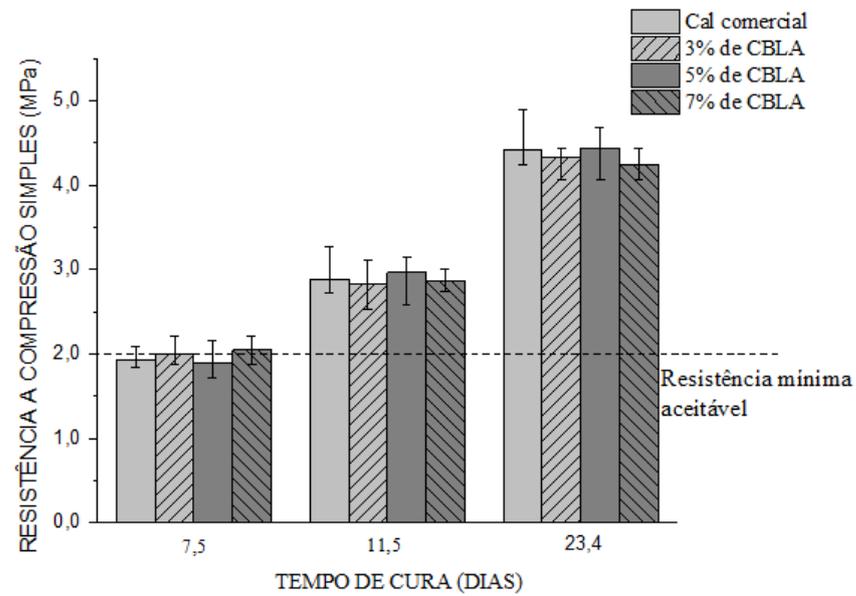


Figura 52 – Resistência mecânica de blocos com 3, 5 e 7% de substituição de cal comercial por cinza peneirada (CBLA)

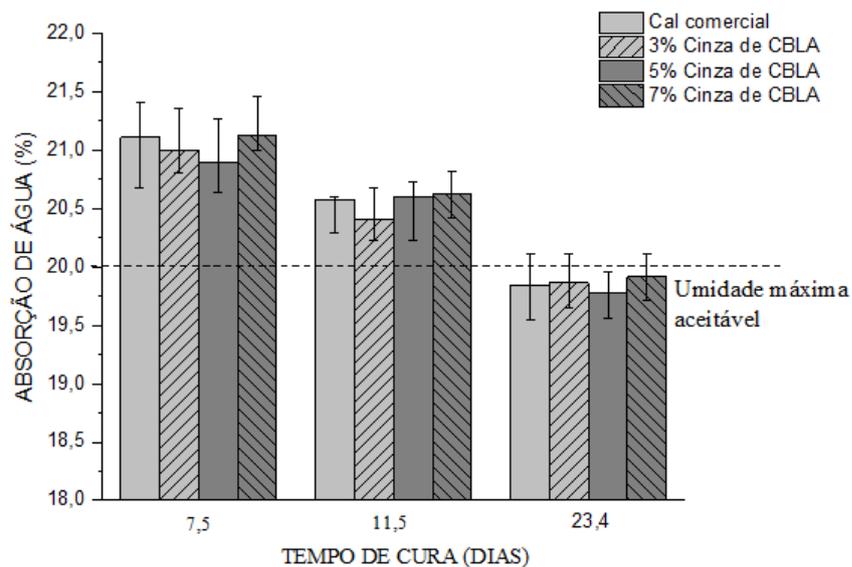


Figura 53 - Absorção de água de blocos com 3, 5 e 7% de substituição de cal comercial por cinza peneirada (CBLA).

No ensaio de absorção de água (Figura 53), foi observado equivalência nos resultados entre os blocos com substituição de cal por CBLA em todos os percentuais 3,5, e 7%. Foi observado ainda leve tendência no aumento da absorção à medida que foi aumentando a quantidade de CBLA nos blocos. Apesar desta leve tendência, os blocos se mantiveram dentro das especificações mínimas de absorção de água na maior idade, atingindo valor inferior a 20% recomendado pela ABNT NBR 8492 (2013). Desta forma, foi evidenciado a viabilidade da substituição de cal comercial por até 7% de cinza de CBLA.

Para avaliação da cal de CBLA como matéria prima alternativa foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão simples e à absorção de água em blocos com substituição parcial ou total de cal industrial por cal de CBLA nas proporções de 50, 75 e 100% de substituição curadas nas idades de 7,5; 11,5 e 23,4 dias a 40°C. Os resultados obtidos foram então comparados com blocos padrão produzidos apenas com cal comercial (sem substituição)(Figura 54 e Figura 55).

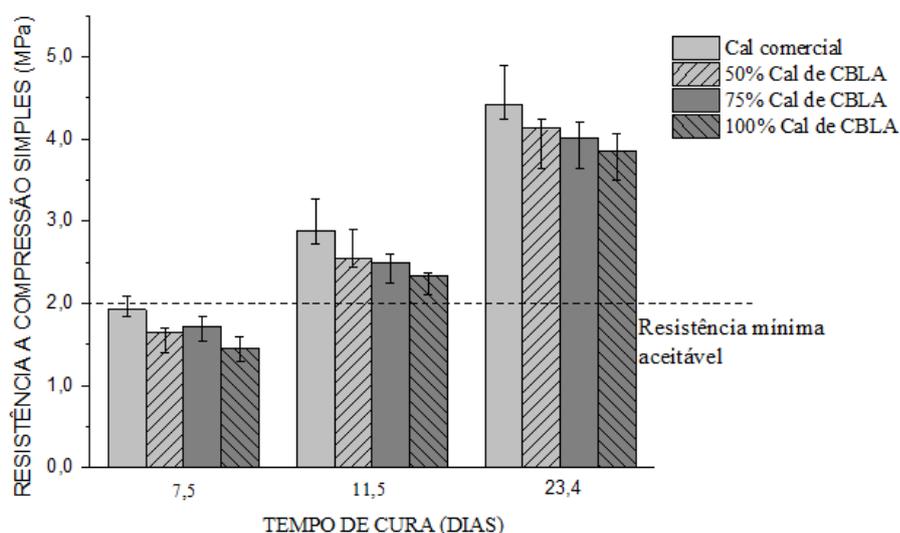


Figura 54 – Resistência mecânica de blocos com 50, 75 e 100% de substituição da cal comercial por cal de CBLA

Pode ser observado na Figura 54 que houve perda na resistência mecânica à medida que foi sendo aumentada a substituição da cal comercial pela cal de CBLA, sendo maior nos blocos com 100% de substituição em comparação com blocos padrão (sem substituição). Esta redução era esperada uma vez que a cal de CBLA

apresentou concentração de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 14% menor do que a cal industrial utilizada, conforme ilustrado na Figura 27 do item 4.1 deste trabalho. Porém, esta perda de resistência não comprometeu o uso da cal de CBLA, pois mesmo nos maiores percentuais de substituição, nas idades de 11,5 e 23,4 dias de cura, os resultados de resistência mecânica foram superiores a 2 MPa ficando dentro das exigências da norma ABNT NBR 8492 (2013).

No ensaio de absorção de água (Figura 55) foi observada tendência do aumento da absorção de água na idade de 23,4 dias com o aumento da substituição da cal comercial pela cal de CBLA atingindo com 100% de substituição o valor limite recomendado pela ABNT NBR 8492 (2013) de 20% de absorção. Este aumento na absorção é coerente por indicar o aumento na porosidade e conseqüentemente redução da resistência, confirmando o motivo da perda de resistência mecânica observada na Figura 54. Apesar disso, blocos conformados com todos os percentuais de substituição, 50, 75 e 100% de cal comercial por cal de CBLA se mantiveram dentro das especificações de absorção de água na maior idade comprovando por estes aspectos a viabilidade da completa substituição da cal comercial pela cal de CBLA.

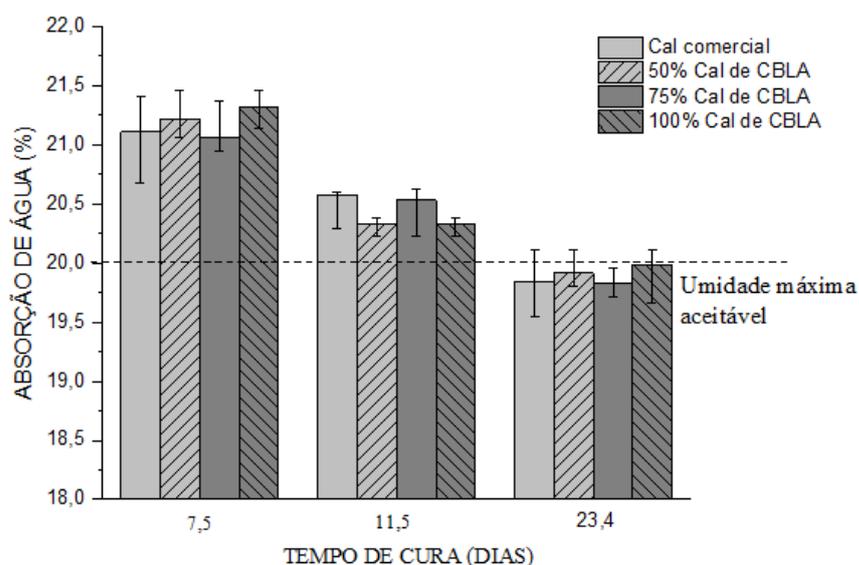
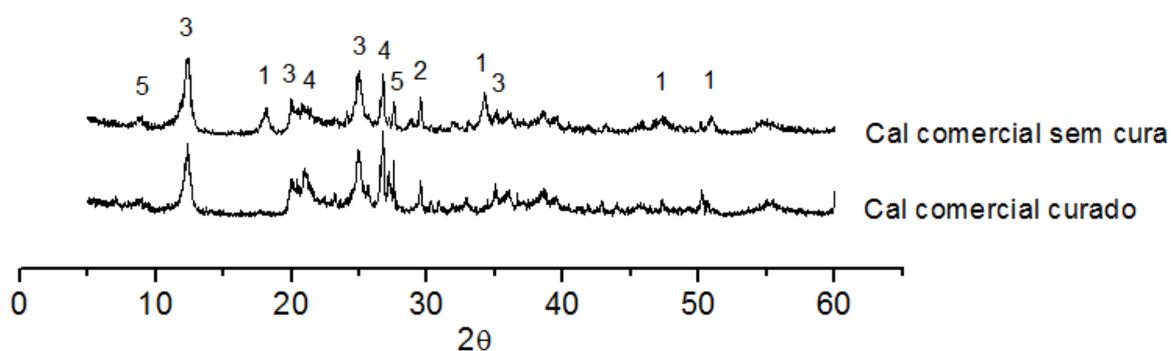


Figura 55 – Absorção de água de blocos com 50, 75 e 100% de substituição da cal comercial por cal de CBLA

Nas Figura 56 podem ser observados os difratogramas de raios-X dos blocos de solo-cal, antes e depois de serem curados por 23,4 dias a 40°C, sem substituição da cal comercial (padrão),. Antes da cura, foi verificada a presença das seguintes fases: a) Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), distância interplanar basal de 2,24Å (JCPDS: 4-0733); b) traços de carbonato de cálcio (CaCO_3), distância interplanar basal de 2,71 Å (JCPDS:5-0586), c) Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), distância interplanar basal de 7,1Å (JCPDS:14-0164); d) Quartzo (SiO_2), distância interplanar basal de 3,25Å (JCPDS:46-1045) e e) Mica moscovita (JCPDS: 83:1803) .Resultados estes similares aos encontrado por Patrício *et al.*, (2013) e Chaves *et al.*(2013)



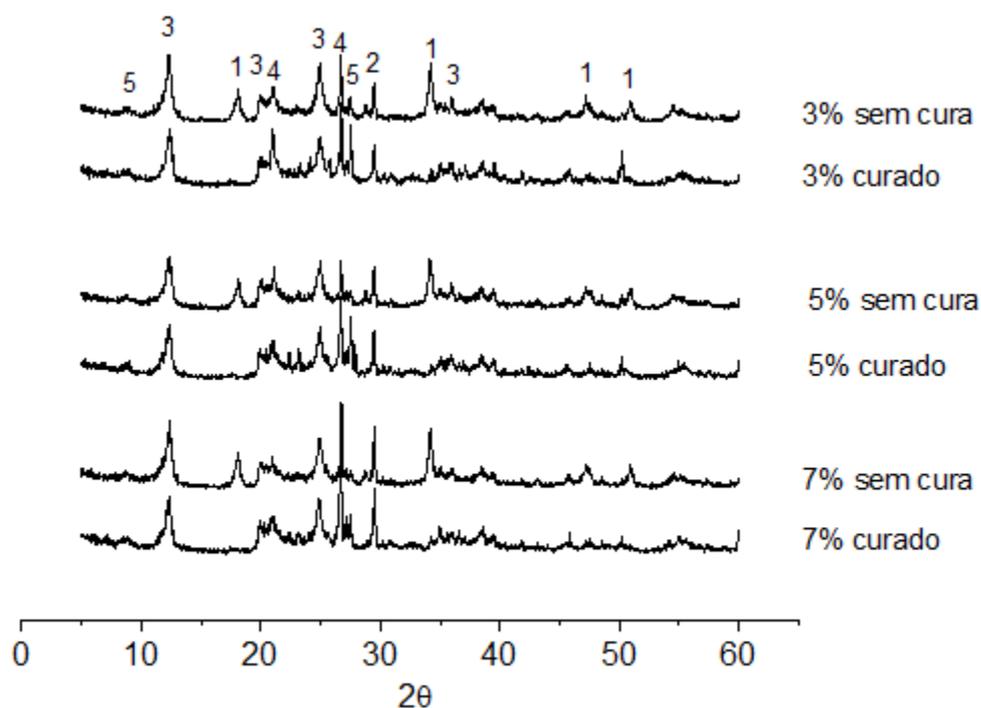
Legenda: 1 - Hidróxido de calcio, 2 - Carbonato de cálcio, 3- Caulinita, 4 - Quartzo, 5 - Mica

Figura 56 - Difração de raios X bloco de solo-cal padrão (cal comercial)

Após o período de cura pode ser observado no difratograma de raios x (Figura 56) o desaparecimento da fase hidróxido de cálcio e a redução dos picos da fase caulinita. Esta observação indica que o hidróxido de cálcio foi consumido na reação com a calulinita gerando como produto silicato de cálcio hidratado (CSH), cuja estrutura é amorfa ou de baixa cristalinidade (Taylor, 1997). O que está coerente com o ganho de resistência obtido pelos blocos após o período de cura. Na Figura 56 pode ser observada ainda que após o período de cura não houve aumento na intensidade do pico do carbonato de cálcio indicando, assim, não ter havido carbonatação e que consequentemente o ganho de resistência mecânica obtida pelos blocos ocorreu exclusivamente pela formação de material cimentício.

Na Figura 57 podem ser observados os difratogramas de raios x dos blocos de solo-cal com substituição parcial de cal comercial por cinza de base de lenha de algaroba (CBLA) nas proporções de 3, 5 e 7% de substituição, antes e depois da

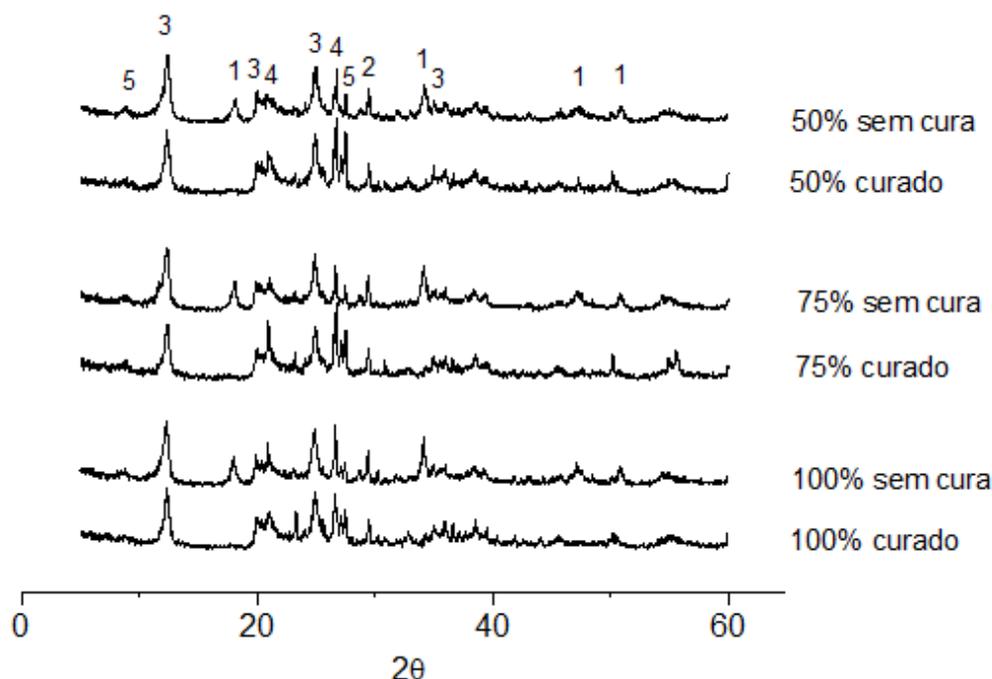
cura por 23,4 dias a 40°C, na qual pode ser verificada a presença das mesmas fases mineralógicas com picos de intensidade equivalentes aos obtidos nos difratogramas dos blocos padrão (Figura 56). A equivalência indica que até o percentual de 7% de CBLA, em substituição a cal comercial não é percebido alterações na microestrutura. O que está coerente com a equivalência de resultados obtidos no ensaios mecânicos entre blocos com substituição de cal comercial por CBLA e blocos padrão (Figura 52 e Figura 53).



Legenda: 1 - Hidróxido de cálcio, 2 - Carbonato de cálcio, 3- Caulinita, 4 - Quartzo, 5 - Mica

Figura 57 - Difração de raios X blocos com substituição de cal industrial por CBLA

Na Figura 58 estão ilustrados os difratogramas de raios x dos blocos de solo-cal com substituição parcial ou total de cal comercial (padrão) por cal de cinza de base de algaroba (cal de CBLA), nas proporções de 50, 75 e 100% de substituição antes e depois da cura de 23,4 dias a 40°C. Nestes difratogramas, pode ser observado que blocos com substituição da cal comercial por cal de CBLA apresentaram resultados equivalentes ao padrão, sendo observada a presença das mesmas fases mineralógicas com picos de intensidade equivalente aos obtidos pelos blocos padrão, antes e depois do período de cura.



Legenda: 1 - Hidróxido de cálcio, 2 - Carbonato de cálcio, 3- Caulinita, 4 - Quartzo, 5 - Mica

Figura 58 - Difração de raios X blocos com substituição de cal industrial por cal de CBLA

Pode ser verificado ainda na Figura 58 que após o período de cura houve o desaparecimento da fase hidróxido de cálcio, a redução da intensidade de pico da caulinita e a manutenção da fase carbonato de cálcio. Isso indica que não houve carbonatação e que o ganho de resistência mecânica observado nos blocos com cal de CBLA foi propiciado pela formação de material cimentício (CSH). Desta forma pela difração de raios-X se verifica que com até 100% de substituição da cal comercial por cal de CBLA não se percebe alterações significativas da microestrutura em relação aos blocos padrão, justificando assim resultados semelhantes obtidos nos ensaios mecânicos (Figura 54 e Figura 55).

Na Figura 59A pode ser observado o resultado da termogravimetria de bloco de solo-cal com cal comercial sem substituição (padrão) antes do processo de cura. E na Figura 59B, pode ser observado o resultados após o período de 23,4 dias de cura a 40°C. Na Figura 59A pode ser verificado quatro perdas de massa característica: a) de 30 a 110°C, com pico endotérmico a 70°C, de 6% devido a perda de água superficial; b) de 380 e 480°C, com pico endotérmico a 450°C, de 2,45% proveniente da decomposição do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$; c) de 450 a

600°C, com pico endotérmico a 490°C, de 9% referente a desidroxilação da caulinita e d) de 620 a 720°C, com pico endotérmico a 675°C, uma pequena perda de 1% decorrente da desidroxilação da mica. Estas faixas de temperatura são similares às faixas indicadas por Souza Santos (1989) e Al-Mukhtar *et al.* (2010).

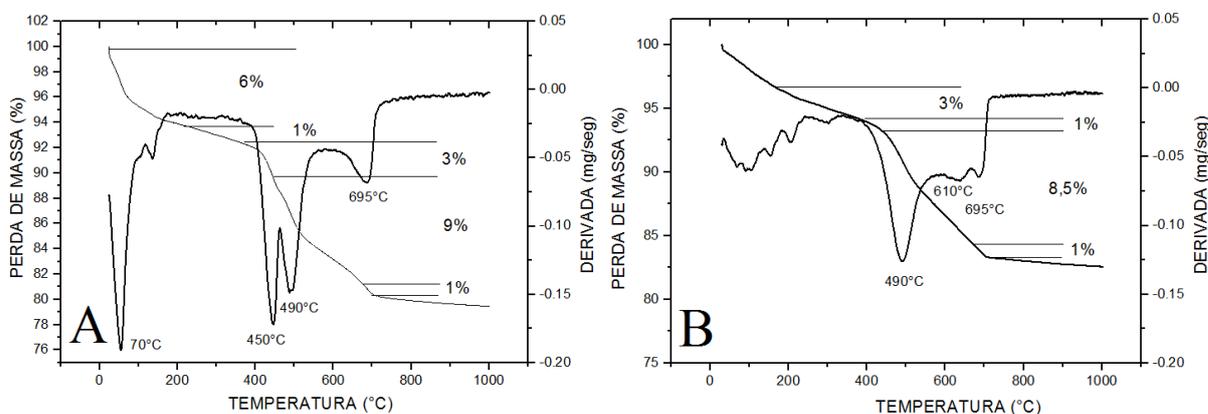


Figura 59- TG/DTG blocos solo-cal com cal comercial (sem substituição) sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

Na Figura 59B, em comparação com a Figura 59 A, pode ser observado que de 110°C a 400°C houve perda de massa 2% maior, decorrente da perda de água combinada dos silicatos de cálcio hidratado (CSH), formado pela reação pozolânica ocorrida durante o período de cura (Al-Mukhtar *et al.*,2010). Também pode ser observado, o desaparecimento do pico endotérmico a 450°C com a redução da perda de massa para 1% na faixa de temperatura entre 380 e 480°C referente à decomposição do Ca(OH)_2 em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. E na faixa de temperatura de 450 a 600°C, redução da perda de 0,5% da perda de massa referente à desidroxilação da caulinita. Estes eventos ratificam o que pode ser observado no difratograma de raio X (Figura 56) e comprovam que o ganho de resistência obtida pelos blocos de solo-cal ocorreu devido a reação pozolânica.

Na Figura 59 B pode ser observado que após consumo parcial da caulinita, após o período de cura dos blocos de solo-cal, houve o destaque de pequeno pico endotérmico a 610°C, rereferente à desidroxilação da mica presente no solo, indicando a sobreposição de eventos mais intensa na Figura 59 A. Pode ser observado também, a manutenção em 1% de perda de massa decorrente da

decomposição de carbonato de CaCO_3 em CaO e CO_2 na faixa de temperatura de 620 a 720°C indicando que não houve carbonatação durante a cura dos blocos, confirmando assim que todo ganho de resistência obtido pelos blocos foi decorrente da formação de material cimentício (CSH), sendo este um aspecto positivo.

Nas Figura 60A, Figura 61A e Figura 62A podem ser observados os resultados de análise termogravimétrica de bloco de solo-cal sem cura, com substituição parcial da cal comercial por cinza de base de lenha de algaroba (CBLA) nas proporções de 3, 5 e 7%, respectivamente. E nas figuras 61B, Figura 61B e Figura 62B, após o período de 23,4 dias de cura a 40°C podem ser verificados picos endotérmicos e perdas de massa equivalentes aos observados na termogravimetria dos blocos padrão (Figura 59 A e B). Como alteração, observa-se pequeno acréscimo na perda de massa entre 620 a 720°C, após a cura, na medida em que se aumenta o percentual de substituição, provavelmente decorrente da decomposição de carbonato de CaCO_3 em CaO e CO_2 presente na CBLA.

A equivalência nos resultados indica que a substituição da cal comercial pela CBLA nas proporções utilizadas não interferiu no comportamento dos blocos, ratificando assim os resultados obtidos nas difrações de raios X (Figura 57) bem como nos resultados de resistência mecânica e absorção de água obtidos pelos blocos (Figura 52 e Figura 53).

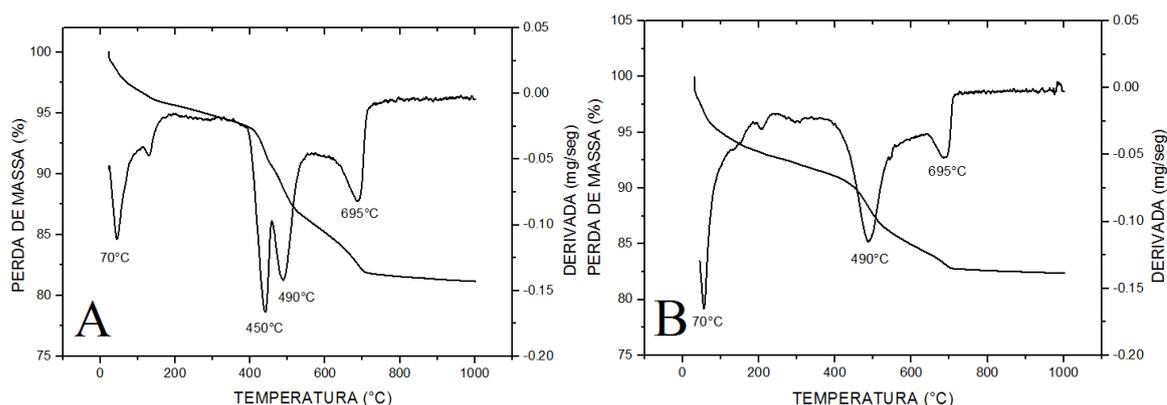


Figura 60- TG/DTG blocos solo-cal com 3% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

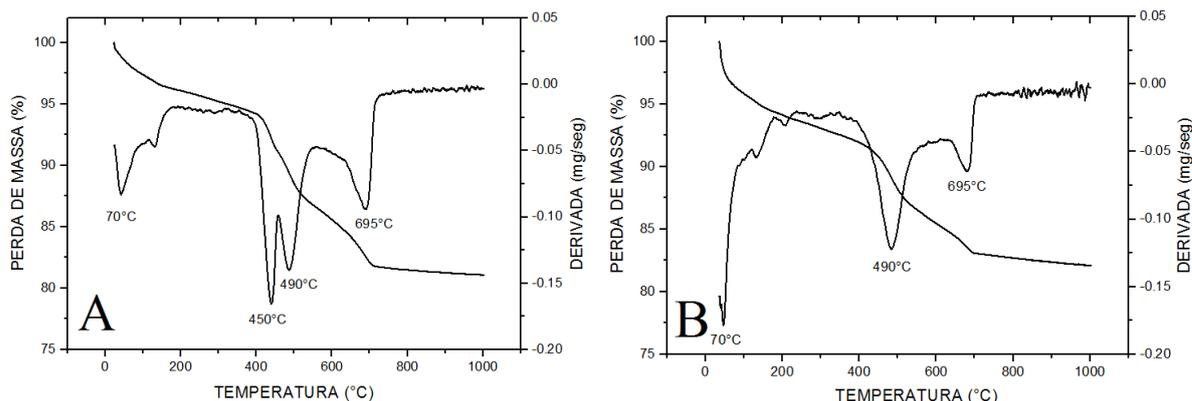


Figura 61- TG/DTG blocos solo-cal com 5% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

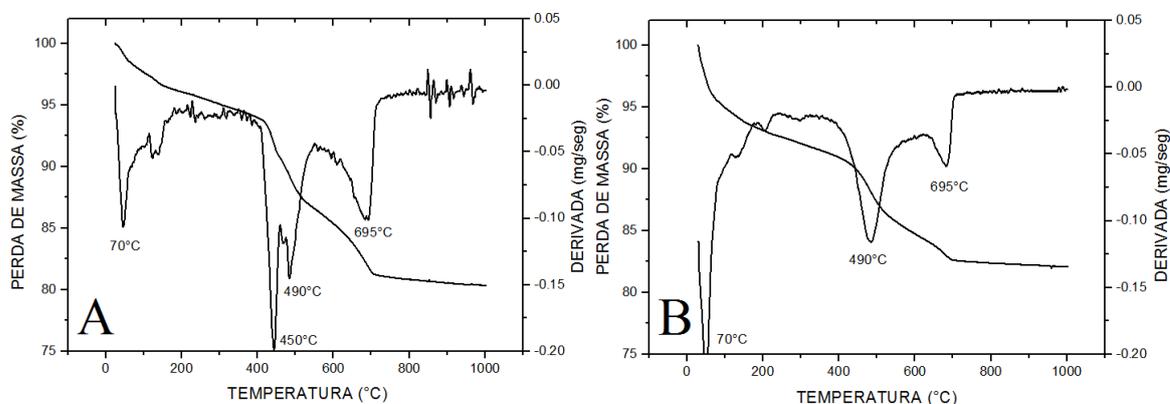


Figura 62- TG/DTG blocos solo-cal com 7% de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

Nas figuras 64A, 65A e 66A podem ser observados os resultados de análise termogravimétrica de bloco de solo-cal sem cura, com substituição parcial ou total da cal comercial por cal de cinza de base de lenha de algaroba (cal de CBLA) nas proporções de 50, 75 e 100%, respectivamente. E nas figuras 64B, 65B e 66B podem ser observados os resultados de blocos de solo-cal com substituição de cal comercial por 50, 75 e 100% de cal de CBLA após o período de 23,4 dias de cura a 40°C. Pode ser verificado que em qualquer uma das proporções, antes ou depois da cura, os blocos com substituição tiveram resultados equivalentes aos encontrados nos blocos com cal comercial (padrão) (Figura 59 A e B) e estão de acordo com os dados encontrados nos difratogramas de raios X (Figura 58).

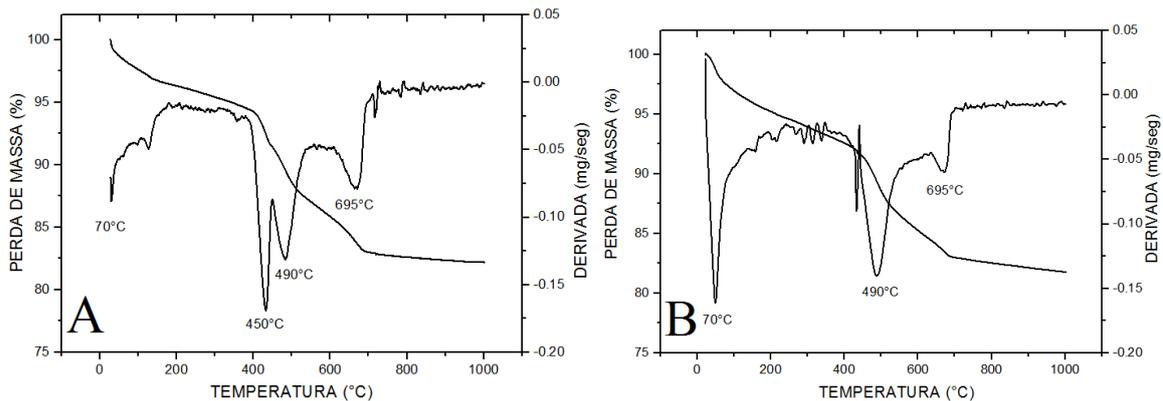


Figura 63- TG/DTG blocos solo-cal com 50% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

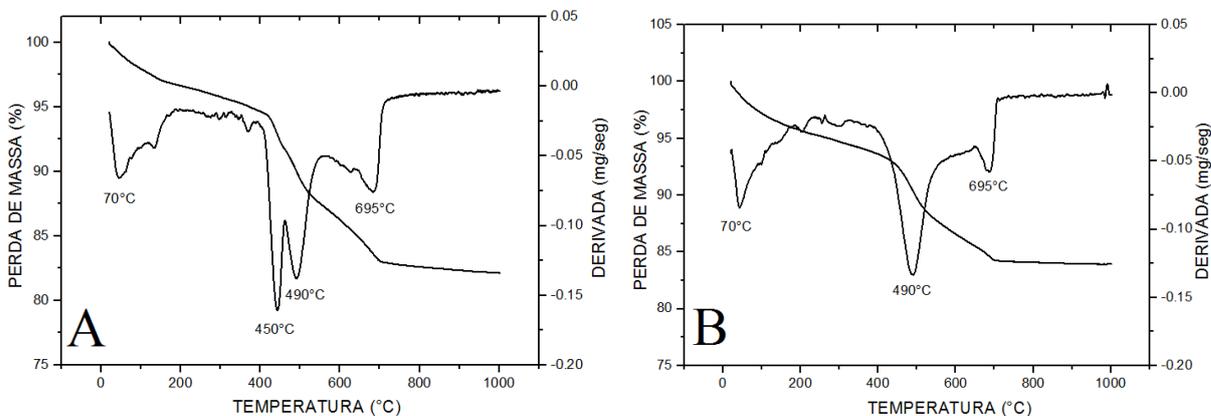


Figura 64- TG/DTG blocos solo-cal com 75% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

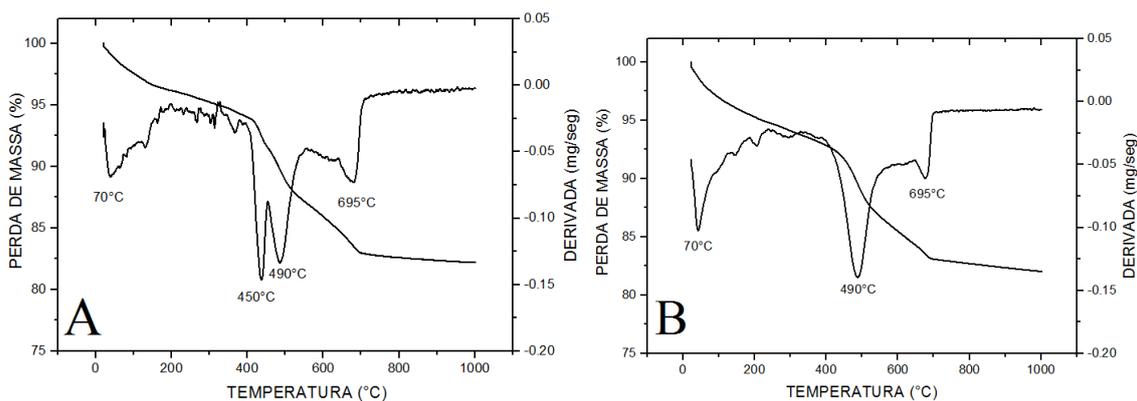


Figura 65- TG/DTG blocos solo-cal com 100% de cal de cinza sem cura (A), curados por 23,4 dias (B)

Os resultados obtidos na termogravimetria (Figura 63 A e B, Figura 64 A e B e Figura 65 A e B) ratificam a equivalência de qualidade da cal de CBLA em relação a cal comercial, conforme observado no item 4.2, bem como os resultados obtidos nos difratogramas de raios X (Figura 58). Isso justifica a equivalência de resultados de resistência mecânica e absorção de água obtidas por blocos com substituição da cal comercial por cal de CBLA em relação aos blocos padrão (bloco sem substituição) (Figura 54 e Figura 55).

4.3.3 CONCLUSÃO

O solo utilizado neste trabalho apresentou elevado potencial para desenvolver a reação expansiva álcali-agregado sendo necessário limitar teor de álcali equivalente no aglomerante, o que limitou em 7% o uso de cinza de base de lenha de algaroba (CBLA) e em 100% o uso de cal de cinza de lenha de algaroba (cal de CBLA) em substituição da cal comercial. Ensaio de resistência mecânica à compressão simples e à absorção de água de blocos com 3, 5 e 7% de CBLA e 50, 75 e 100% de cal de CBLA, em substituição a cal comercial apresentaram resultados semelhantes aos dos blocos padrão. Fato este ratificado pela análise microestrutural que além de indicar equivalência de resultados entre os blocos avaliados, comprovou que o ganho de resistência obtida por todos os blocos avaliados foi devido, exclusivamente, à formação de material cimentício. Desta forma, foi comprovado que o uso de CBLA e cal de CBLA nas proporções utilizadas são viáveis para substituir a cal comercial em blocos de solo-cal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo desenvolvido para produção de cal de cinza de base de lenha de algaroba (cal de CBLA) permitiu a produção de uma cal com características equivalentes as de uma cal CHI segundo a ABNT NBR 7175 (2003) e que sua utilização em blocos de solo-cal na substituição de até 100% cal comercial propiciou a obtenção de bloco com resultados de resistência mecânica e absorção de água dentro das exigências da ABNT. Fato também verificado quando utilizado até 7% de CBLA em substituição parcial da cal comercial. Os resultados demonstraram a viabilidade dos processos desenvolvidos para reutilização da CBLA, resíduo sólido industrial produzido em elevada quantidade e que não possui destinação adequada para seu descarte, propiciando uma alternativa de grande impacto ambiental. Além disso, foi desenvolvido processo para uso da temperatura controlada na cura de blocos de solo-cal o que permitiu a eliminação do efeito da variação da temperatura ambiente que ocorre ao longo do ano, garantindo a repetibilidade de resultados em ensaios tecnológicos com uma expressiva redução no tempo de cura, o que em níveis industriais permite um significativo ganho de produtividade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram verificadas oportunidades para a continuidade do estudo em relação aos itens avaliados na pesquisa, conforme então abaixo relacionados e que deixamos como sugestão para trabalhos futuros.

- Avaliação da durabilidade de blocos de solo-cal com substituição da cal industrial por cinza de lenha de algaroba (CBLA) e por cal de CBLA nas proporções utilizadas neste trabalho.
- Avaliação do impacto da reação álcali agregado em blocos de solo-cal com adição de CBLA em percentuais superiores aos 7% utilizados neste trabalho.
- Avaliação da utilização de temperaturas controladas superiores a 40°C na produção de blocos de solo-cal visando maior ganho de produtividade durante a cura.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM

____ **D5102** : Standard test methods for unconfined compressive strength of compacter soil-lime mixture. Pensilvânia,USA, 2009

____ **C150** :Standard specification for Portland cement. Pensilvânia, USA, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

____ **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

____ **NBR 7180**: Solo Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 8491**: Bloco maciço de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

____ **NBR 8492**. Bloco de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

____ **NBR 10833**: Fabricação de bloco e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica- Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

____ **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

____ **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência – Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 15577-1**: Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto Rio de Janeiro, 2008.

____ **NBR 15577-4**: Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

____ **NBR 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

AFRANE, G.; Leaching of caustic potash from cocoa husk ash. **Bioresource Technology**, v 41, p.101-104, 1992.

AI-MUKHTAR, M. A.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. F.; Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50°C. **Applied clay science**, v.50, p. 199-203. 2010.

AI-MUKHTAR, M. A.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J. F.; Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering geology**, v.139-140, p.17-27, 2012.

AI-MUKHTAR, M. A.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. F.; Lime consumption of different clayey soils. **Applied clay science**, v.50, p. 13, 2014.

BARIS, K. E.; TANAÇAN, L.; Earth of Datça: development of pozzolanic activity with steam curing. **Construction and building material**, v. 139, p.212-220, 2017.

BELL, F. G.; Lime stabilization of clay mineral and soil. **Engineering Geology**, v.42, p.223-237,1996.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2015**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf > Acesso em: 20 fev. 2016.

CARRASCO, B.; CRUZ, N.; TERRADOS, J.; CORPAS, F. A.; PEREZ, L.; An evaluation of bottom ash from plan biomass as replacement for cement in building blocks. **FUEL**, v. 118, p. 272-280, 2014.

CAPUTO, A. N.; **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Volume 1. LTC, 2015.

CHAVES, A. C.; NEVES, G. A.; SILVA, F. A.; LIMA, R. C. O.; FRANÇA, K. B. Obtenção e caracterização de membranas cerâmicas tubulares a partir de massas incorporadas com argila, caulim e quartzo. **Cerâmica**, v.59, p. 192-197, 2013.

CHEAH, C. B.; SAMSUDIN, M. H.; RAMLI, M.; PART, W. K.;TAN, L. E. The use of high calcium wood ash in the preparation of ground granulated blast furnace slag pulverized fly ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 114-123, 2017.

CLIMATEMPO. Climatologia Caruaru. Disponível em <<https://www.climatepo.com.br/climatologia/764/caruaru-pe>>. Acesso em :22/04/2017.

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

CPRH - AGENCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSO HÍDRICOS. Diagnóstico Ambiental das Lavanderias de Toritama-2005. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/toritama.pdf>>, Acesso em: 20 fev. 2015.

CUENCA, J.; RODRIGUEZ, J.; MORALES, M.; ROLDAN, Z. S.; ZAMARANO, M.; Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. **Construction and building materials**, v.40, p.702-709, 2013.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª edição, Brasília, 2006

FERREIRA, R. C.; FALEIRO, H.T.; Desempenho físico-mecânico de sol argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando aplicação em construções rurais. **Pesquisa agropecuária industrial**, v.35, p 191-198, 2005.

FERREIRA, J. R. M.; LOURO, L. H. L.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. B.; PRADO DA SILVA, M. H.; Eggshell as calcium source for synthesis of hydroxyapatite and hydroxyapatite partially substituted with zinc. **Cerâmica**, v. 62, p. 386-391, 2016.

FIGUEIREDO, S. S; SILVA, C. G.; NEVES, G. A.; Durabilidade de blocos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. **Revista Escola de Minas**, v.64, p.273-279, 2011.

FOLETTTO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S; PORTUGAL, U. L.; JAHN, S. L.; Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química nova**, v.64, p273-279, 2005.

GEORGE, S. Z.; PONNIAH, D. A.; LITTLE, J. A.; Effect of temperature on lime-soil stabilization. **Construction and Building Material**, v.6, p. 247-252, 1992.

GOOGLE MAPAS. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-8.3483866,-35.9834017,127a,35y,290.03h,45t/data=!3m1!1e3>> acesso em 17/01/2018.

GUIMARÃES. J. E. P.; **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2002.

GENESAN, K.; RAJAGOPAL, K; THANGAVEL, K.; Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 515-524, 2007.

HE, S.; HU, Y.; HU,T.; MA, A.; JIA, Q. SU, H.;SHAN, S.; Investigation os CaO-based sorbents derived from eggshell and red med for CO₂ capture. **Journal of alloys and Compounds**, v.701, p 828-833, 2017.

HURTADO, B. C.; IGLESIA, F. A. C.; PEREZ, C. N.; CEPEDA, J. T.; VILLAREJO, L. P.; Addition of bottom ash from biomass in calcium silicate masonry units for use as

construction material with thermal insulating properties. **Construction and Building Materials**, v. 52, p 155-165, 2014.

IPA- EMPRESA PERNAMBUCANA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, relatório de análise granulométrica, 2016

KLEYPAS, J. A.; BUDDEMEIER, R. W ; ARCHER, D. ; GATTUSO, J.P. ; LANGDON, C.; OPDYKE, B.N.; Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. **Sciences**, v.284, p. 118-120, 1999.

KUMAR, R.; CHANDRASHEKAR, N., Study on fuelwood and carbonization characteristics of *prosopis juliflora*. **Indian Acad Wood Sci**, v.13, p.101-107, 2016.

LEA´S. **Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. London: Elsevier Science & Technology, 2004.

LEE, C. H.; LEE, D. K.; ALI, M. A.; KIM, P. J.; Effect of oyster shell on soil chemical and biological biological properties and cabbage productivity as liming materials. **Waste management**, v.28, p. 2702-2708, 2008.

LEHMAN, R. L.; GENTRY, J. S. ; GLUMAC, N. G.; Thermal stability of potassium carbonate near its melting point. **Thermochimica Acta**. v.316, p. 1-9, 1998.

LITTLE, D. N.; **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. Texas estados unidos., 1995. Disponível em <http://www.limetexas.org/publications/txt_567414o.pdf>,. Acesso em 20 fev. 2015.

LI, G.; XU, X.; CHEN, E.; FAN, J.; XIONG, G.; Properties of cement-based bricks with oyster-shell ash. **Journal of cleaner production**, v.91, p.279-287,2015.

MASCHOWSKI, C.; ZANGNA, M. C.; TROUVÉ, G. GIERÉ, R.; Bottom ash of trees from cameroon as fertilizer. **Applied Geochemistry**, v. 72, p. 88-96, 2016.

MIQUELEIZ, L.; RAMIREZ, F.; SECO, A.; NIEDZAM, R. M.; KINUTHIA, J. M; ABUTAIR, A.; GARCIA, R.; The use of stabilised Clay soil for sustainable construction materials. **Engineerin Gleology**, v.133-134, p 9-15,2012.

MIRZAHOSSEINI, M.; RIDING, K.; Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder .**Cement and Concrete Research**, v.58, p. 103-111, 2014.

MISRA, M. K.; RAGLAND, K. W.; BAKER, A. J.; Wood ash composition as a functional of furnace temperature. **Biomass and Bioenergy**, v.4 , p.103-116, 1993.

MODOLO,R. C. E.; FERREIRA, V. M. TARELHO, L. A.; LABRINCHA, J. A.; SENFF, L.; SILVA,L.; Mortar formulation with bottom ash from biomass combustion. **Construction and Building Material**, v.45, p.275-281, 2013.

NASCIMENTO, M; MONTE, M. B. M.; LOUREIRO, F. E. L.; Agrominerais-potássio In: LUZ, A.B., LINS, F.A., **Rochas e minerais industriais**, Rio de Janeiro, CETEM, 2008.

NLA - NATIONAL LIME ASSOCIATION DOS ESTADOS UNIDOS. **Lime-treated soil construction manual**. Boletim 326, Disponível em http://lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual2004.pdf acesso em 20 fev. 2015.

OLIVEIRA, A. A.; PICCHI, F. A.; CINCOTTO, M. A.; GUIMARÃES, J. E. P.; Bloco solo-cal uma opção para a construção civil. **Revista Tecnológica**, Setembro, 1988

OUHADI, V. R.; YONG, R. N.; AMIRI, M.; OUHADI, M. H.; Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. **Applied clay science**, v.95, p.111-118, 2014.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A.; Controle de qualidade da cal para argamassas- metodologias alternativas. **Revista ciência & tecnologia**, v.1, 2007. Pernambuco.

PARK, H. J.; JEONG, S. W.; YANG, J. K.; KIM, B. G.; LEE, S. M.; Removal of heavy metals using waste eggshell. **Journal of environmental science**, v.19, p. 143601441, 2007.

PATRÍCIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil. **Cerâmica**, v.59, p 27 a 33, 2013.

RABASKI, J; DROMOND, M. A; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S.; Algaroba (*prosopis juliflora*): Árvore de uso múltiplo para região semiárida Brasileira. **EMBRAPA**: Comunicado técnico 240. Colombo/PR, 2009.

RAMIREZ, R. A.; GARCIA, P. M.; PONCE, Y.G.; The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil block. **Construction and building material**, v. 34, p. 296-305, 2012.

ROJAS, M. F.; ROJAS, S.; The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60°C. **Cement and concrete research**, v.33, p. 643-649, 2003.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J.; The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p.133-138, 2002.

SEBRAE.-SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS Perfil econômico e principais oportunidades de negócio em Pernambuco, 2008.

SHANE, A.; GHEEWALA, S. H.; FUNGTAMMASAN, B.; SILALERTRUKSA, T.; BONNET, S.; PHIRI, S.; Bioenergy resource assessment for Zambia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.53, p.93-104,2016.

SHI, C.; DAY, R.L.; Acceleration of strength gain of lime-pozzolancementes by thermal activation. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p.824-832, 1993.

SHI, C.; DAY, R. L.; Pozzolanic reaction in presence of chemical activators partII. Reaction products and mechanism. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p.607-613, 2000.

SIDDIQUE,R.; Utilization of wood ash in concrete manufactorin. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, p.27-33, 2012.

SIMPSON, B. K.; OLDHAM, J. H.; MARTIN, A. M.; Extraction of potash from cocoa pod husks, **Agricultural Wastes**, v.13,p.69-73, 1985.

SOUSA SANTOS, P.; **Ciência e tecnologias de argilas**, 2° edição, vol1.Editora Edgarg Blucher Ltda, 1989.

TAIWO,O. E.; OSINOWO, F. A. O.; Evaluation of varios agro-wastes for tradicional black soap production. **Bioresource Technology**, v 79, p.95-97, 2000.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G.; An overview of the composition and application of biomass ash. Part2.Potentiall utilization, technological and ecological advantages and challengers. **FUEL**, v.105, p.19-39,2013.

YANG, E. I.; YI, S. T.; LEEM, Y.M.; Effect of oyster shell substituted of fine aggregate on concrete character. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 2175-2182, 2005.

Yang, E. I.; KIM, M. Y.; PARK, H. G.;YI, S. T.; Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p 758-765, 2010.

ZENG, Q.; LI, K.; FEN-CHING, T.; DANGLA, P.; Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes. **Construction and building materials**. v.27,p.560-569, 2012.

WINDT, L. D.; DENELEE, D.; MAUBEC, N.; Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reaction at 20 and 50°C:batch test and modeling. **Cement and concrete research**, v.59, p. 34-42, 2014.