

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM
EM TIJOLOS DE SOLO-CAL**

CÁSSIA MENDONÇA DOS ANJOS

Campina Grande
Data: FEVEREIRO / 11



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL



**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM TIJOLOS DE
SOLO-CAL**

Cássia Mendonça dos Anjos

CAMPINA GRANDE – PB
FEVEREIRO/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM TIJOLOS DE
SOLO-CAL**

Cássia Mendonça dos Anjos

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil e Ambiental da Universidade
Federal de Campina Grande como
requisito parcial à obtenção do grau
de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Co-Orientador: Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho

Agência Financiadora: CNPq

Campina Grande - PB

Fevereiro/2011



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

A599u Anjos, Cássia Mendonça dos.
Utilização de resíduos de caulim em tijolos de solo-cal / Cássia Mendonça dos Anjos. — Campina Grande, 2011.
78 f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Ph.D. João Batista Queiroz de Carvalho.

1. Geotécnica. 2. Tijolos. 3. Solo-cal. 4. Caulim. 5. Pozolana. 6. Reciclagem. I. Título.

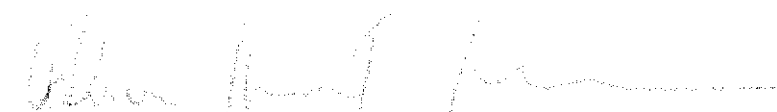
CDU – 624.13(043)

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM TIJOLOS DE SOLO-CAL

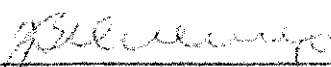
Cássia Mendonça dos Anjos

Dissertação Aprovada em 23 de fevereiro de 2011 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros.


Banca examinadora:



Prof. Dr. Gelmiros de Araújo Neves - UFCG
Orientador



Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho - UFCG
Co-orientador



Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes - UFPB
Examinador externo

*"O segredo de seguir em frente é começar
a trabalhar." (Agatha Christie)*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a coragem transmitida ao longo da minha trajetória.

Aos meus pais, Humberto Carnáuba e Lígia Benário, pelos valores morais e éticos ensinados, a minha avó Neusa Mendonça, pela presença, aos meus irmãos Raline, Humberto e Sérgio, pelos momentos de alegria, e ao meu noivo João Batista Soares, pelo carinho e companheirismo.

Aos orientadores Dr. Gelmires de Araújo Neves e PhD. João Batista Queiroz de Carvalho pelos conhecimentos adquiridos, pelo apoio e compreensão das dificuldades enfrentadas nesse trabalho.

À UFCG ao Laboratório de Solos I e ao Laboratório de Estruturas, da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, e ao Laboratório de Reciclagem, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Aos funcionários Jadilson e Edvaldo, de Engenharia Civil, e aos funcionários de Engenharia de Materiais, Joselito, Everaldo e Baiano, pela cooperação nos ensaios realizados.

Às alunas de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais, Ana Maria, Juliana, Suellen Lisboa, Izabelle Marie e Rosa, pela amizade e constante disponibilidade em ajudar nos ensaios e na interpretação dos mesmos.

Às amigas Suelen Figueiredo e Solange, pela parceria nos trabalhos desde o início da pesquisa até a fase de conclusão.

A Dayane Araújo, pela preciosa e sincera amizade.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento do trabalho.

Muito obrigada.

RESUMO

Há um crescimento evidente na geração de resíduos nas últimas décadas, principalmente nos países em desenvolvimento. O setor mineral os produz em grande quantidade e em diversos tipos e níveis de periculosidade, como por exemplo, a indústria de beneficiamento do caulim, a qual produz resíduos à base de sílica, mica e caulinita. O descarte desse resíduo ocasiona um forte impacto ambiental, que poderia ser minimizado com a utilização de matérias-primas para uso em construção civil. Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a incorporação de resíduos do beneficiamento de caulim em tijolos de solo-cal. Os materiais convencionais (solo, cal) e alternativa (resíduo) foram caracterizados através dos seguintes ensaios: análise granulométrica por difração de laser, análise química, difração de raios-X, análise térmica diferencial e análise termogravimétrica. Os resíduos de caulim foram calcinados a uma temperatura de 800°C para verificação da atividade pozolânica. Foram moldados corpos-de-prova convencionais (solo-cal) e alternativos incorporados com 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo de caulim em substituição do aglomerante cal. Posteriormente, os corpos-de-prova foram curados por períodos de 28, 60 e 90 dias. Verificaram-se as propriedades físico-mecânicas de resistência à compressão simples e absorção de água. Após a análise dos resultados, concluiu-se que os resíduos de caulim apresentam atividade pozolânica e propriedades adequadas para uso em solo-cal.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos, tijolos, solo-cal, caulim, pozolana, reciclagem

ABSTRACT

There is an evident growth in waste generation over the last decades, especially in developing countries. The mining industry produces large quantities and different kinds and levels of dangerousness, such as the kaolin processing industry, which produces waste based on silica, mica and kaolinite. Disposal of this residue causes a significant environmental impact, which could be minimized with the use of raw materials for use in civil construction. This research has as main objective to study the incorporation of the kaolin processing waste into soil-lime bricks. Conventional materials (soil, lime) and alternative (waste) were characterized by the following tests: particle size analysis by laser diffraction, chemical analysis, X-ray diffraction, differential thermal analysis and thermogravimetric analysis. The residues of kaolin were calcined at a temperature of 800 ° C for evaluation of pozzolanic activity. Foram moldados corpos-de-prova convencionais (solo-cal) e alternativos incorporados com 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo de caulim em substituição do aglomerante cal. Test specimens used in conventional (soil-lime) and alternative embedded with 10%, 20%, 30% and 40% of residual kaolin in place of the lime binder were molded. Posteriormente, os corpos-de-prova foram curados por períodos de 28, 60 e 90 dias. Later, the specimens were cured for periods of 28, 60 and 90 days. Verificaram-se as propriedades físico-mecânicas de resistência à compressão simples e absorção de água. Physical and mechanical properties of compressive strength and water absorption were verified. After analyzing the results, we concluded that residues of kaolin have pozzolanic activity and properties suitable for use in soil-lime.

KEYWORDS: residues, bricks, soil-lime, kaolin, pozzolan, recycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim.....	24
Figura 2.2 – Efeito da substituição parcial do cimento por pozolana natural italiana no calor de hidratação.....	28
Figura 2.3 – Sistema construtivo utilizando tijolos de solo-cimento.....	31
Figura 2.4 – Detalhe dos furos com encaixe saliente, que fica para cima durante o assentamento, do tijolo com dimensões 6,25 x 12,5 x 25 cm.....	34
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	37
Figura 3.2 – Processo de calcinação em forno elétrico Flyever FE50RP.....	41
Figura 3.3 – A) Corpos de prova acondicionados em sacos plásticos. B) Corpos de prova armazenados em câmara úmida.....	42
Figura 3.4 – Máquina Universal da marca Autograph da Shimadzu AG-15 100kN.....	43
Figura 3.5 – Tijolos de solo-cal incorporados com resíduo de caulim.....	44
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica do solo.....	46
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica da cal.....	47
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do resíduo grosso de caulim.....	48
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica do resíduo fino de caulim.....	48
Figura 4.5 – DRX do solo estudado nessa pesquisa.....	51
Figura 4.6 – DRX da cal estudada na pesquisa.....	52
Figura 4.7 – DRX do resíduo de caulim no estado natural.....	53
Figura 4.8 – DRX do resíduo de caulim calcinado.....	53
Figura 4.9 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica do solo.....	54
Figura 4.10 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica da cal.....	55
Figura 4.11 – Difratoograma dos corpos de prova de solo-cal sem incorporação de resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias.....	57
Figura 4.12 - Difratoograma dos corpos de prova de solo-cal com incorporação de 10% resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias.....	58
Figura 4.13 - Difratoograma dos corpos de prova de solo-cal com incorporação de 20% resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias.....	59

Figura 4.14 - Difratoograma dos corpos de prova de solo-cal com incorporação de 30% resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias.....	60
Figura 4.15 - Difratoograma dos corpos de prova de solo-cal com incorporação de 40% resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias.....	61
Figura 4.16 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.....	63
Figura 4.17 - Resistência à compressão simples (RCS) dos tijolos de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.....	65
Figura 4.18 – Área de concentração de tensões dos corpos de prova quando submetidos ao ensaio de compressão simples.....	67
Figura 4.19 – Área de concentração de tensões dos tijolos quando submetidos ao ensaio de compressão simples.....	67
Figura 4.20 – Gráfico comparativo dos valores de absorção de água para os corpos de prova de solo-cal e solo-cal-resíduo aos 28, 60 e 90 dias....	69
Figura 4.21 - Gráfico comparativo dos valores de absorção de água para os tijolos de solo-cal e solo-cal-resíduo aos 28, 60 e 90 dias.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Reserva e produção mundial.....	20
Tabela 2.2 – Principais estatísticas do Brasil.....	23
Tabela 2.3 – Classificação das pozolanas.....	29
Tabela 2.4 – Tipos e dimensões dos tijolos de solo-cimento ou de solo-cal.....	33
Tabela 3.1 – Ensaio realizado no solo.....	38
Tabela 3.2 – Requisitos para seleção do solo empregado em tijolo prensado.....	38
Tabela 3.3 – Quantitativo dos corpos de prova em diferentes composições	42
Tabela 4.1 – Caracterização física do solo.....	45
Tabela 4.2 – Frações granulométricas em volume dos materiais.....	49
Tabela 4.3 – Composição química das amostras estudadas.....	50
Tabela 4.4 – Especificações do resíduo de caulim.....	51
Tabela 4.5 – Índice de atividade pozolânica dos corpos de prova de solo-cal incorporados com resíduo de caulim.....	56
Tabela 4.6 - Índice de atividade pozolânica dos tijolos de solo-cal incorporados com resíduo de caulim.....	56
Tabela 4.7 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.....	62
Tabela 4.8 – Resistência à compressão simples (RCS) dos tijolos de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.....	64
Tabela 4.9 – Comparação das resistências à compressão simples dos corpos de prova com os tijolos, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.....	66

Tabela 4.10 – Absorção de água dos corpos de prova aos 28, 60 e 90 dias.....	68
Tabela 4.11 – Absorção de água dos tijolos aos 28, 60 e 90 dias.....	68
Tabela 4.12 – Percentual de resíduo incorporado para maior resistência e menor absorção dos corpos de prova e tijolos.....	71

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....14

1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16

CAPITULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....17

2.1 CAULIM	17
2.1.1 APLICAÇÃO.....	17
2.1.2 RESERVAS E PRODUÇÃO DE CAULIM.....	19
2.1.3 IMPACTOS AMBIENTAIS.....	23
2.2 POZOLANA.....	26
2.3 TIJOLOS ALTERNATIVOS.....	30
2.3.1 RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CAULIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	34

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....36

3.1 MATERIAIS.....	36
3.2 MÉTODOS.....	37
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO.....	37
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-MINERALÓGICA.....	39
3.2.3 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM.....	40
3.2.4 ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	41
3.2.5 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS.....	42
3.2.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	43

3.2.7 PRODUÇÃO DOS TIJOLOS.....	44
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	45
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	45
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-MINERALÓGICA.....	50
4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS: ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	55
4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	62
4.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	67
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais desencadeia um processo de contínua degradação, frente à produção de resíduos não aproveitados lançados indiscriminadamente ao meio ambiente. Por outro lado, a tecnologia e a pesquisa atuam como aliadas na apresentação de soluções que minimizem essa degradação ambiental.

Dada a falta de programa de incentivos à reciclagem, o volume de resíduos multiplica-se a cada ano. Nas atividades de mineração e beneficiamento, o volume de resíduos gerados vem se intensificando devido ao aumento da demanda provocado pelo crescimento da economia mundial (MENEZES, 2007a).

O setor mineral gera grandes quantidades de resíduos de diversos tipos e níveis de periculosidade, como por exemplo, a indústria de beneficiamento do caulim, a qual produz resíduos à base de sílica, mica e caulinita em grandes quantidades. A extração desse minério produz um percentual de resíduos correspondente a 80 a 90% do volume total explorado, representando, assim, um grande impacto ambiental.

Durante o processamento do caulim primário, dois tipos de resíduos são gerados: o primeiro é o resíduo grosso, proveniente da separação do quartzo do minério, gerado logo após a extração e que representa cerca de 70% do total de resíduo produzido; o segundo é o resíduo fino, que provém da segunda etapa do beneficiamento, quando o caulim é purificado. O depósito desse material é feito em céu aberto, afetando a saúde da população adjacente e a do meio ambiente.

A utilização do resíduo de caulim como matéria-prima para uso em construção civil, principalmente em tijolo de solo-cal poderá minimizar o impacto ambiental, reduzir custos, gerar emprego e construir habitação de interesse social.

A mistura solo-cal trata de uma estabilização do solo através de um aditivo químico, resultando no aumento da expansibilidade, retenção excessiva da umidade, plasticidade elevada do solo e rebaixamento das curvas de

compactação. Além desses fatores, as reações pozolânicas, que são reações entre materiais silicosos e hidróxido de cálcio em presença da água, formam compostos com propriedades aglomerantes, melhorando as características mecânicas do material.

O aglomerante cal, que tem o óxido de cálcio como principal componente, ataca quimicamente parte das argilas e até mesmo o próprio quartzo, resultando na formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, de notável capacidade cimentante.

No mecanismo das reações envolvidas entre a cal e os constituintes reativos do solo, as primeiras reações são as de floculação/aglomeração, seguidas das trocas iônicas entre as argilas e a cal. Tais reações resultam na alteração de suas propriedades geotécnicas. Posteriormente, ocorre a formação de compostos químicos sílico-aluminosos pelo ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo. Simultaneamente ocorrem os fenômenos de carbonatação, com o ataque do anidrido carbônico, presente no ar e na água de infiltração, aos hidroxidados da cal.

A adição do resíduo de caulim para uso como matéria-prima em argamassa, blocos, concreto vem sendo estudada por diversos pesquisadores. Rezende et al. (2008) introduziu o resíduo de caulim em substituição da areia em blocos de areia e cimento, nas proporções de 40%, 70% e 100%, e observou que embora inferior à convencional, a resistência à compressão simples obedeceu aos limites estabelecidos pela norma. Lima (2005) estudou a potencialidade do resíduo de caulim para uso em blocos de concreto simples sem função estrutural. Os resultados evidenciaram que valores das propriedades físico-mecânicas dos blocos incorporados com resíduo de caulim estão de acordo com especificações das normas da ABNT. Castro (2008) incorporou resíduo de caulim em argamassa de assentamento e revestimento em diversas composições, verificando uma viabilidade técnica na utilização dessa matéria-prima alternativa na construção civil.

Observa-se uma enorme potencialidade para o aproveitamento do resíduo do beneficiamento do caulim na construção civil. Dessa forma, pretende-se nesse trabalho analisar a influência da incorporação desse resíduo nas propriedades de tijolos de solo-cal.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a incorporação de resíduos do beneficiamento de caulim em tijolos solo-cal.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar as matérias-primas convencionais (solo, cal) e as alternativas (resíduos de caulim);
2. Analisar a atividade pozolânica dos tijolos solo-cal incorporados com resíduos de caulim;
3. Com os melhores resultados da atividade pozolânica, estudar traços para fabricação de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de caulim;
4. Caracterizar tecnologicamente através das propriedades físico-mecânicas dos tijolos solo-cal incorporados com resíduo de caulim;
5. Comparar os resultados obtidos com os tijolos convencionais e as normas da ABNT.

Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CAULIM

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha que contém a caulinita e também o produto resultante de seu beneficiamento. No passado, o caulim, conhecido como china clay, foi descoberto na região montanhosa de Jauchou Fu, na China. O nome caulim deriva da palavra chinesa kauling, que significa cume alto (SILVA, 2007).

O caulim é um mineral com grande gama de aplicações, como, por exemplo, nas indústrias de cerâmica, papel, borracha, plásticos, tintas, inseticidas e pesticidas, alimentos e rações, cimentos, fertilizantes e fármacos. Entretanto, apesar da grande importância tecnológica do caulim, sua extração e beneficiamento produzem enorme quantidade de resíduos, em virtude de seu processamento ter rendimento de, aproximadamente, apenas 20% do total extraído (ROCHA et al, 2008).

Dois tipos de resíduos são gerados durante o processamento do caulim, um oriundo da etapa de separação do quartzo do minério caulim, que representa cerca de 70% do total produzido e é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração. O outro resíduo origina-se na segunda fase do beneficiamento, que compreende processos de tratamento a úmido, que objetivam separar a fração fina do minério, purificando o caulim e gerando um resíduo na forma de lama (MENEZES et al, 2007a).

2.1.1 APLICAÇÃO

O caulim é um bem mineral extremamente versátil em função de suas características tecnológicas das quais se pode destacar:

- é quimicamente inerte em uma grande faixa de pH (3 a 9);
- é de coloração branca ou quase branca, isto é, possui alvura elevada;
- é macio e pouco abrasivo;
- tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento e reforçador para as aplicações de carga;

- é de fácil dispersão;
- possui baixa condutividade térmica e elétrica;
- possui compatibilidade com praticamente todos os adesivos (proteína, caseína), devido à dispersão e inércia química;
- é um produto de preço competitivo em relação aos materiais alternativos.

As características acima mencionadas são adequadas a um grande número de aplicações industriais importantes que fazem do caulim uma matéria-prima amplamente utilizada.

Essas aplicações podem ser classificadas em sete categorias, de acordo com suas funções primárias. Entre elas, ressaltam-se o caulim usado:

- para formação de filmes;
- como carga ou matéria-prima;
- na indústria cerâmica e na construção civil;
- para extensão e reforço de polímeros;
- para suporte de catalisadores e fibra de vidro;
- como veículo, adsorvente, diluente;
- como agente polidor.

Na engenharia civil, o caulim calcinado (metacaulinita) é utilizado no concreto de alto desempenho que surgiu no início da década de 1960, em razão da alta resistência mecânica e durabilidade requeridas para obras especiais da construção civil. Esse concreto está gradualmente substituindo o de resistência normal, principalmente, em estruturas expostas a ambientes agressivos. A metacaulinita proporciona ao concreto:

- aumento na densidade de empacotamento;
- reduz a quantidade de água necessária para o processamento;
- o preenchimento, por meio de partículas ultrafinas de caulinita, dos espaços vazios existentes entre as partículas de maior tamanho do concreto, causando-lhe melhor fluidez.

No Estado da Paraíba, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos sobre potencial do resíduo da indústria do caulim paraibano para o aproveitamento na

construção civil (ROCHA, 2005; LIMA, M., 2005; REZENDE et. al, 2006), mas ha pouco sobre o real impacto causado ao meio ambiente por esses resíduos na região produtora do Estado.

Há estudos do aproveitamento do resíduo de caulim argiloso também como filler em misturas asfálticas. Neto et al. (2004) em seu trabalho verificou que o resíduo como filler associado a um cimento asfáltico de petróleo apresentou uma interação razoável, melhorando a sua estabilidade sem, no entanto, torná-lo tão rígido quanto a cal o faz.

2.1.2 RESERVAS E PRODUÇÃO DE CAULIM

▪ OFERTA MUNDIAL

Depósitos de interesse de caulim têm ampla distribuição no mundo, e são classificados em dois tipos principais de acordo com sua gênese: os depósitos primários que resultam da alteração hidrotermal ou intempérica de rochas cristalinas, e os secundários que são resultado dos processos de erosão e deposição dos depósitos primários em grandes bacias.

O Departamento Nacional de Produção Mineral afirma que as reservas de caulim são abundantes, com destaque para o tamanho e qualidade do caulim secundário encontradas nos Estados Unidos e Brasil e de caulim primário do Reino Unido, localizadas no sudoeste da Inglaterra. Esse tipo de caulim tem seu uso direcionado, principalmente, para usos nobres, como o de enchimento e cobertura na indústria de papel (SENA et al, 2008).

Das reservas brasileiras (medidas e indicadas), aproximadamente 97% encontram-se na região norte do País, nos estados do Pará, Amapá e Amazonas. O mercado produtor de caulim apresenta-se concentrado e competitivo. Os Estados Unidos juntamente com a Comunidade dos Estados Independentes, Coréia do Sul, República Tcheca, Brasil e Reino Unido, são responsáveis por 62% do caulim produzido no mundo (Tabela 2.1). É importante ressaltar que apenas o Brasil disponibiliza o minério já beneficiado para o mercado interno e externo a ser utilizado na indústria de papel, o qual responde por 7% da produção mundial (SENA et al, 2008).

Tabela 2.1. Reserva e produção mundial

Discriminação	Reservas ⁽¹⁾ (10 ⁶ t)		Produção (10 ⁶ t)			
	2007	(%)	2006 ⁽²⁾	2007 ⁽³⁾	(%)	
Países						
Brasil	7.300		2.455	2.527	6,8	
Estados Unidos ⁽⁴⁾	Abundantes	n.d.	7.740	7.330	19,6	
Reino Unido ⁽⁴⁾		n.d.	2.500	2.100	5,6	
República Tcheca ⁽⁴⁾		n.d.	3.770	3.700	9,9	
Alemanha ⁽⁴⁾		n.d.	3.770	3.300	10,2	
Coreia do Sul ⁽⁴⁾		n.d.	2.400	2.400	6,4	
CEI ⁽⁴⁾		n.d.	6.020	6.000	16,1	
México		n.d.	875	900	2,4	
Turquia		n.d.	530	450	1,2	
Grécia ⁽⁴⁾		n.d.	60	50	0,1	
Itália		n.d.	470	470	1,3	
Outros Países		n.d.	6.730	7.030	20,4	
Total		n.d.		37.370	37.357	100,0

Fonte: DNFM, Mineral Commodity Summaries-2008. Notas: (1) Revisado (apenas para o Brasil, estimado para os outros países). * Comunidade dos Estados Independentes; (2) Dados preliminares; n.d. não disponível. (1) Reservas medidas + indicadas; (2) Vendas; (3) Produção bruta

▪ **PRODUÇÃO INTERNA**

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, no Brasil os principais produtores de caulim são Amazonas, Amapá, Bahia, Maranhão, Pernambuco, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Pará, Paraíba, Piauí, Paraná, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e São Paulo.

A produção brasileira de caulim beneficiado em 2007 foi 4% superior a do ano anterior, passando de 2,45 milhões de t para 2,53 milhões de t. Entre as principais empresas produtoras, a Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC mantém a liderança da produção nacional respondendo por 40%, sendo seguida pela empresa Caulim da Amazônia S/A (CADAM) com 32%, Pará Pigmentos S/A (PPSA) com 24% e outros com 4%. Todas as empresas apresentaram ligeira ampliação de sua produção visando abastecer suas fatias no comércio internacional, com exceção da Imerys que apresentou ligeira queda. Além do Amapá e Pará que produzem caulim para revestimento e cobertura de papel, são estados produtores São Paulo, Paraná, Bahia, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Santa Catarina utilizados, principalmente no setor

de cerâmicas brancas (vasos em geral, porcelanas, etc.). Apesar do Estado do Amazonas deter expressivas reservas, ainda não há empresa produzindo caulim naquele estado (SENA et al, 2008).

▪ **IMPORTAÇÃO**

Apesar de serem insignificantes comparadas à produção nacional, as importações de caulim (primário e manufaturado) apresentaram um significativo crescimento (59%) em 2007, passando de 27,1 mil t para 43,1 mil t no período, o que significou gastos de US\$ 30,6 milhões, 65,5% superior em relação a 2006. Os bens manufaturados responderam por 77% do valor das importações. Os principais países de origem, para os bens primários de caulim foram os EUA (91%), Reino Unido (4%), Argentina (3%) e França (2%). Quanto aos manufaturados, representados principalmente por aparelhos de porcelana branca de mesa, tiveram origem na China (93%), Hong Kong (4%) e outros 3% (SENA et al, 2008).

▪ **EXPORTAÇÃO**

O mercado externo tem sido o principal consumidor (98%) do caulim produzido no País. As exportações de caulim beneficiado em 2007 permaneceram estáveis em relação ao ano que passou mantendo-se na faixa de 2,4 milhões de t, gerando divisas de US\$ 303 milhões. Ressalta-se que o País quase não exporta bens manufaturados a base de caulim. Os Países de destino das exportações brasileiras de caulim beneficiado foram: Bélgica (21%), Estados Unidos (20%), Japão (13%), Holanda (11%), Canadá (11%) e outros (24%). As três principais empresas produtoras IRCC (de capital francês), CADAM e PPSA (ambas controladas pela Vale) foram responsáveis por 95% do total exportado. A exportação de produtos manufaturados à base de caulim apresentou um aumento de 11%, em quantidade que, em valor, se traduziram em um incremento de 39%, demonstrando a venda de produtos com maior valor agregado. Os Países de destino dos bens manufaturados foram: Bolívia

(13%), Paraguai (13%), África do Sul (12%), Austrália (10%) Itália (9%), e outros (43%) (SENA et al, 2008).

▪ CONSUMO INTERNO

O consumo aparente de caulim em 2007 voltou a se recuperar após queda em 2006 de 83,3% em relação a 2005. O crescimento foi de 194% passando de 60,4 mil t para 177,4 mil t, em decorrência do aumento na produção e de ligeira queda nas exportações. Grande parte do caulim consumido no mercado interno provém das minas existentes nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e outros estados de menor produção, que forneceram, principalmente, caulim para uso na indústria de cerâmicas brancas, além de caulim do tipo carga para a indústria de papel. O caulim é utilizado em diversos setores industriais em todo o mundo, destacando-se o de papel (cobertura e enchimento), que consome 45%, cerâmica (porcelana, cerâmica branca e produtos refratários) 31% e o restante, 24% divididos entre tinta, borracha, plásticos e outros. O caulim tem, como principal competidor, no mercado de papel, o carbonato de cálcio (SENA et al, 2008).

A Tabela 2.2 apresenta os números do mercado brasileiro entre os anos de 2005 e 2007.

Tabela 2.2. Principais estatísticas do Brasil

Discriminação			2005 ⁽¹⁾	2006 ⁽¹⁾	2007 ⁽¹⁾
Produção	Bruta (minério)	(10 ³ t)	6.150	6.200	6.382
	Beneficiada	(10 ³ t)	2.410	2.455	2.527
Importação	Bens primários	(10 ³ t)	7,1	9,4	14,4
		(10 ³ US\$-FOB)	4,0	5,2	7,1
	Manufaturados	(10 ³ t)	15,7	17,7	28,7
		(10 ³ US\$-FOB)	8,7	13,4	23,5
Exportação	Bens primários	(10 ³ t)	2.072	2.404	2.384
		(10 ³ US\$-FOB)	225	289	303
	Manufaturados	(10 ³ t)	2,5	2,9	3,1
		(10 ³ US\$-FOB)	3.625	4.407	6.060
Consumo aparente (1)	Beneficiado	(10 ³ t)	345,1	60,4	177,4
Preço médio	Beneficiado ⁽²⁾	(US\$/t-FOB)	109,70	112,09	128,36

Fontes: CNPM/MCIC - SECEX. Notas: (1) Produção + Importação - Exportação; (2) Média de preços nacionais para o mercado externo; (p) Preliminar; (r) Revisado.

2.1.3 IMPACTOS AMBIENTAIS

No Brasil, a atividade minerária do caulim é de grande importância sócio-econômica, sendo, por isso, fundamental um conhecimento mais aprofundado sobre alguns aspectos técnicos e ambientais ainda pouco abordados.

Embora a extração e o beneficiamento do caulim contribuam para o crescimento da economia, a atividade também provoca sérios problemas ao meio ambiente. Durante o processo de beneficiamento, ocorre o acúmulo de rejeito sólido que é jogado em lugares inapropriados e que alteram as condições ambientais, causando inúmeros impactos que modificam o meio físico e biótico.

A indústria da mineração e beneficiamento de caulim do Estado da Paraíba produz milhares de toneladas de caulim por ano, sendo um importante segmento econômico em várias regiões do Estado. Entretanto, a indústria do caulim também produz uma elevada quantidade de resíduo, constituído mineralogicamente de quartzo, mica e feldspato, com aproximadamente 7% de

caulim (OLIVEIRA, 2004 apud NÓBREGA, 2007). Dois tipos de resíduos são gerados por essa indústria; um "grosso" (com tamanho de partículas $> 200 \mu\text{m}$), que é constituído basicamente por quartzo e é gerado na primeira etapa do beneficiamento do caulim, e um "fino" que é oriundo da etapa de purificação do caulim através de processos de separação a úmido do caulim da ganga do minério. Esses resíduos são geralmente descartados a céu aberto (Figura 2.1) e em leitos e várzeas de riachos e rios, causando danos à fauna, à flora e à saúde da população (MENEZES et al, 2007). Quando secos, transformam-se em pó e, pela ação dos ventos, esse pó espalha-se pelas ruas e avenidas, poluindo o ar e comprometendo o aspecto visual do local onde a empresa atua.



Figura 2.1 - Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim

Durante o processamento do caulim, ocorre a produção de rejeitos líquidos (que são lançados nos rios) e sólidos (geralmente aterrados). Esses rejeitos podem conter, além de outros contaminantes, concentração de metais como o Ferro (Fe), Alumínio (Al), Zinco (Zn) e Cádmiio (Cd), acima do permitido

pela legislação. Os reflexos dessa contaminação extravasam, freqüentemente, os limites das áreas de trabalho, atingindo também a topografia, flora, fauna, sistema hídrico e morfofisiológico do solo, etc. (AUMONDO & BALISTIERI, 1997 apud SILVA, 2001).

O alumínio, embora seja o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, possui reduzida função biológica. Esse elemento pode interferir no metabolismo de diversas formas de vida. No fitoplâncton, é capaz de inibir a absorção e os processos fisiológicos do fósforo; enquanto que, nos peixes, o excesso de alumínio torna-se uma potencial causa de problemas respiratórios. No homem, elevadas concentrações desse metal podem acarretar, entre outros distúrbios, perda de memória e surgimento de demências como as provocadas pela doença de Alzheimer (SILVA, 2001).

Os efeitos toxicológicos decorrentes da ingestão, por seres vivos, de altas concentrações de "Fe" ainda são bastante escassos. Entretanto, sabe-se que o seu excesso pode ocasionar aumento na produção de radicais livres de oxigênio no organismo, responsáveis por doenças degenerativas e pelo processo de envelhecimento. Comumente, nesses efluentes, prevalece Fe^{2+} , que, por meio do consumo do oxigênio dissolvido no meio, oxida-se a Fe^{3+} . As conseqüências da baixa concentração de oxigênio dissolvido nas águas são mais sensíveis à ictiofauna, devido ao aumento do período de incubação dos ovos, reduzindo o tamanho e o vigor dos embriões, produzindo deformidade nos filhotes, formando coágulos no sangue, diminuindo a tolerância a certos agentes tóxicos e a velocidade de nado dos peixes (SILVA, 2001).

O zinco, em níveis-traço, é um elemento essencial aos seres humanos, animais e vegetais superiores. Nos humanos e animais, esse elemento age como um componente catalítico e estrutural de numerosas enzimas envolvidas no metabolismo de energia, na transdução e na translação. Nesses organismos, a deficiência de zinco provoca depressão, lesões de pele e infertilidade. Por outro lado, o excesso de zinco pode acarretar a redução de cobre no organismo, provocando o surgimento de dor muscular, anorexia, sangramento intestinal e anomalias cerebrais (SHIMMA, 1995, apud SILVA, 2001).

A gravidade da poluição pelo "Zn" é acentuada pela possibilidade de sua associação com o "Cd", que não possui uma função biológica definida, mas é

altamente tóxico às plantas e aos animais. O cádmio possui um período de meia-vida biológica que pode exceder 20 anos. Esse elemento apresenta uma diversidade de efeitos tóxicos, como: nefrotoxicidade, disfunções hepáticas e renais, hipertensão arterial e problemas imunológicos (MATSUOKA et al., 2000, apud SILVA, 2001).

2.2 POZOLANA

Pozolana é um material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que apresenta propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio.

O emprego de pozolana como material cimentício remonta à antiguidade. Registros históricos indicam que, há cerca de 2000 anos, os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli (antiga Puteoli do Império Romano), Itália, o que conferiu a denominação "pozolana" ao material (CORDEIRO et al., 2009).

A principal propriedade de uma pozolana é sua capacidade de reagir e de se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Durante as reações de hidratação do cimento Portland, ocorre a liberação do hidróxido de cálcio $[Ca(OH_2)]$ em grande quantidade (em torno de 20% da massa dos compostos hidratados). A reação entre compostos amorfos presentes na pozolana, como sílica e alumina, e o hidróxido de cálcio produz silicatos/aluminatos de cálcio hidratado, similares aos produzidos na hidratação do cimento. Essas reações são denominadas de pozolânicas. O hidróxido de cálcio, ao contrário dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento hidratada e é, dentre os produtos da hidratação, o primeiro a ser solubilizado e lixiviado pela água. Assim, o seu consumo pela pozolana produz benefícios para a resistência mecânica e a durabilidade de concretos e argamassas. Os efeitos benéficos da utilização de pozolanas em concretos não se limitam à reação pozolânica. Há também o efeito físico proveniente da capacidade das partículas destes

materiais, que em geral apresentam tamanho micrométrico, posicionarem-se nos interstícios entre partículas de cimentos e na interface agregado-pasta. Este efeito é conhecido como efeito filler de preenchimento (CORDEIRO et al., 2010).

Para que haja atividade pozolânica, isto é, capacidade de um material de combinar com o hidróxido de cálcio, é necessário que a sílica e o alumínio não estejam em elevado grau de cristalinidade: o quartzo, por exemplo, é perfeitamente inerte. A reatividade da pozolana está, portanto, vinculada a sua estrutura interna: será tanto maior quanto mais afastado estiver do estado cristalino.

Como a reação entre a pozolana e a cal $[Ca(OH)_2]$ se realiza com um dos componentes – a pozolana – no estado sólido, o estado da superfície é determinante para sua reação. Além disso, a área superficial deve estar em maior contato com o outro reagente – o hidróxido de cálcio dissolvido.

As pozolanas são classificadas em naturais ou artificiais. Pozolanas naturais são provenientes de magmas geralmente ácidos, isto é, ricas em sílica, que solidificaram rapidamente durante uma erupção e que ficaram no estado amorfo, ou cripto-cristalino (COUTINHO, 1988). Pozolanas artificiais, por outro lado, são argilas que só exibem propriedades pozolânicas quando aquecidas a temperatura entre 500 e 900°C (SOROKA, 1993).

Das pozolanas naturais calcinadas, salienta-se a metaculinita, que é obtida da argila caulinitica a uma temperatura entre 650°C e 850°C e posterior moagem, até se obter uma finura de cerca de 700 a 900 m²/kg (NEVILLE, 1995). A metacaulinita como substituta parcial do cimento contribui para a durabilidade do concreto.

A Figura 2.2 mostra o efeito no calor de hidratação quando da substituição parcial do cimento por pozolana natural italiana, apresentando uma constante diminuição desse valor.

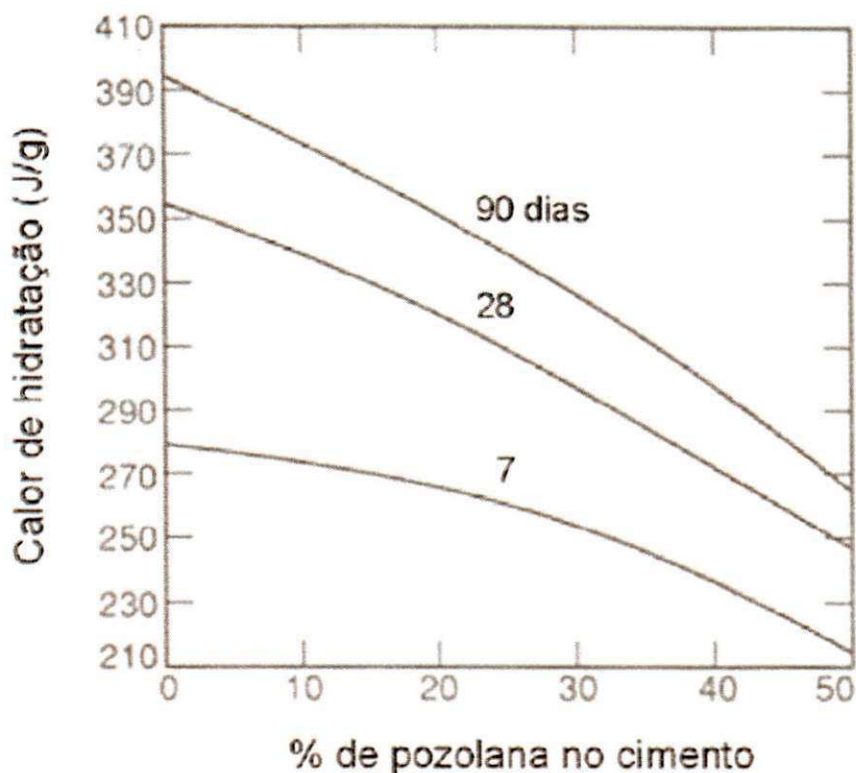


Figura 2.2 - Efeito da substituição parcial do cimento por pozolana natural italiana no calor de hidratação (SOROCA, 1993)

Segundo Farias Filho (2007), a aptidão dos materiais pozolânicos de reagirem com a cal em condições normais de temperatura e pressão e formarem compostos de propriedades aglomerantes reside no fato de que o silício e alumínio presentes na sua composição se encontram em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

A Tabela 2.3 apresenta os tipos de pozolana, natural e artificial, além e exemplificá-las.

Tabela 2.3. Classificação das pozolanas

Pozolana Natural	Pozolana Artificial
Rochas vulcânicas ácidas: rochas contendo minerais de opala, em geral são encontradas em forma de xistos, contendo outras formas de sílica que não a amorfa, necessitando de uma calcinação para sua ativação completa.	Escórias ácidas de alto forno
Tufos vulcânicos: são talvez as primeiras pozolanas de que se tem notícia, usadas na antiguidade pelos romanos e que são ainda hoje exploradas.	Cinzas volantes: são resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado e granulado.
Terras diatomáceas: são as pozolanas mais ativas na reação com a cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de microorganismos. São rochas de origem biogênica com alto teor de sílica amorfa.	Resíduos argilosos de folhelhos betuminosos após extração.
Arenitos e folhelhos opalinos	Microssílica: resíduo do processo de produção de ferro-silício (silício metálico)
Argilitos de argilas mal cristalizadas	Argilas calcinadas (metacaulinita) afinidade e intensidade de reação em presença da água, do hidróxido de cálcio com o tipo de componente ativo presente no composto mineralógico, independentemente da origem da rocha.

Fonte: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 23 (1), 13-24, 2002.

Atualmente, inúmeros materiais são utilizados como pozolanas, tais como cinza volante, sílica ativa, cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Além dos materiais citados, um solo argiloso pode adquirir propriedades pozolânicas quando submetido a processos adequados de ativação térmica e moagem mecânica. Neste caso, as matérias-primas devem conter elevado percentual de argila em sua composição, uma vez que a atividade pozolânica aumenta com o teor de argilominerais. As argilas utilizáveis como matéria-prima podem ser caulínicas ou montmoriloníticas, muito embora, outros argilominerais utilizados, como illita, sepiolita e mica, apresentem resultados satisfatórios como adições ativas em concretos e argamassas. As argilas calcinadas apresentam atividade pozolânica distintas

em função das características físico-químicas do material e das condições de queima adotadas.

O resíduo de caulim argiloso apresenta grande potencial para ser aplicado na indústria da construção como pozolana, mas passando sempre por um processo de beneficiamento, como a calcinação e moagem. Quanto ao resíduo arenoso, outro tipo do resíduo de caulim, pouco é mencionado sobre seu aproveitamento em concretos e argamassas. Na literatura são escassos estudos que tratam da caracterização do resíduo arenoso e do aproveitamento dos dois tipos dos resíduos de caulim na sua forma in natura na construção civil.

2.3 TIJOLOS ALTERNATIVOS

A produção de tijolos alternativos, tais como os tijolos de solo-cimento e de solo-cal, foi favorecida devido ao crescente número de pesquisas e o acesso a máquinas de produção manual de tijolos.

Com a utilização racional dos recursos naturais, o resgate do uso do solo como material de construção tem se intensificado ultimamente, tendo seu comportamento físico-mecânico melhorado por meio da estabilização com aglomerantes minerais.

Sistemas de construção de solo-cimento podem minimizar danos ambientais, baratear e dar mais agilidade às obras (Figura 2.3). A técnica é o resultado da mistura homogênea de solo, cimento e água em proporções previamente determinadas, depois compactada na forma de tijolos, blocos ou paredes monolíticas. Desde que bem executado, o componente apresenta boa durabilidade e resistência à compressão.

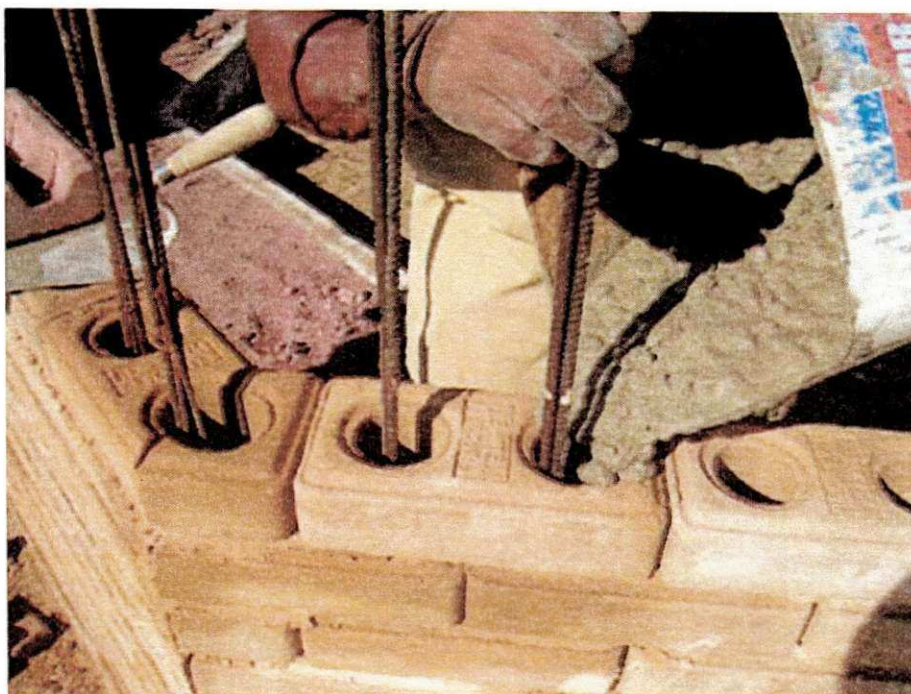


Figura 2.3 - Sistema construtivo utilizando tijolos de solo-cimento (FONTE: <http://www.vimaqpressas.com.br/etapas-de-obras-com-tijolo-ecologico/>)

Todavia, embora se trate de uma técnica aparentemente simples, diversos fatores devem ser analisados para garantir um bom desempenho mecânico do tijolo. As características físico-mecânicas tanto do solo-cimento como do solo-cal compactados dependem do tipo de solo (granulometria, fração argila, grau de plasticidade), do tipo e teor do agente estabilizante, e das condições de compactação e cura.

Quanto mais fina a granulometria do solo, maior é sua área específica, o que significa que a área a ser envolvida pelo aglomerante é maior. De um modo geral, solos de granulometria bem graduados são ideais, pois além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo.

Segundo a ABCP (1985), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar, à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas.

A possibilidade de utilização de solo do próprio local constitui-se numa das grandes vantagens do solo-cimento, sendo que, na mistura solo-cimento, o solo é o elemento que entra em maior proporção, devendo ser tal que permita o uso da menor quantidade possível de cimento.

Na estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (MILANI & FREIRE, 2006).

Os tijolos de solo-cal apresentam uma série de vantagens em sua utilização:

- Podem, em geral, ser produzidos com o próprio solo local e no canteiro de obras, reduzindo ou evitando o custo do transporte;
- A regularidade de suas formas, a planeza e a lisura de suas faces requerem argamassa de assentamento de espessura mínima e uniforme;
- Podem dispensar o uso de revestimento desde que protegidos da ação direta da água, sendo, portanto, recomendáveis para paredes com tijolos à vista;
- Utilizam basicamente mão-de-obra especializada.

No mercado brasileiro são encontrados diversos tamanhos e modelos de tijolos de solo-cimento, os quais podem ter o aglomerante substituído pela cal. Esses são escolhidos de acordo com o projeto, mão-de-obra, materiais e equipamentos locais e outras condicionantes físicas. A Tabela 2.4 relaciona alguns tipos:

Tabela 2.4. Tipos e dimensões de tijolos de solo-cimento ou solo-cal

Tipo	Dimensões	Características
maciço comum	5 x 10 x 20 cm 5 x 10 x 21 cm	Assentamento com consumo de argamassa similar dos tijolos maciços comuns
maciço com encaixes	5 x 10 x 21 cm 5 x 11 x 23 cm	Assentamento com encaixes com baixo consumo de argamassa
1/2 tijolo com encaixes	5 x 10 x 10,5 cm 5 x 11 x 11,5 cm	Elemento produzido para que não haja quebra na formação dos aparelhos com juntas desencontradas
tijolos com dois furos e encaixes	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 7,5 x 15 x 30 cm	Assentamento a seco, com cola branca ou argamassa bem plástica. Tubulações passam pelos furos verticais
1/2 tijolo com furo e encaixe	5 x 10 x 10 cm 6,25 x 12,5 x 12,5 7,5 x 15 x 15 cm	Elemento produzido para acertar os aparelhos, sem a necessidade de quebras
canaletas	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 7,5 x 15 x 30 cm	Elemento empregado para execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagens de tubulações horizontais

Ressalta-se que todos os tijolos acima podem ser confeccionados para serem revestidos ou para serem utilizados à vista, para vedação ou estruturais. As alvenarias também podem receber pinturas de diversas matérias-primas para estarem mais protegidas contra as intempéries. Os tijolos podem ser totalmente maciços, similares aos tijolos maciços comuns, ou furados (Figura 2.4). Os furos nos tijolos objetivam:

- Encaixar uns sobre os outros, facilitando assim o assentamento e diminuindo o tempo de execução e a quantidade de argamassa ou cola empregadas;
- Diminuir o peso das alvenarias, o que implica diretamente em diminuir o dimensionamento das fundações e outras estruturas;
- Aumentar o isolamento termo-acústico, pois os furos compõem câmaras de ar no âmago das alvenarias.

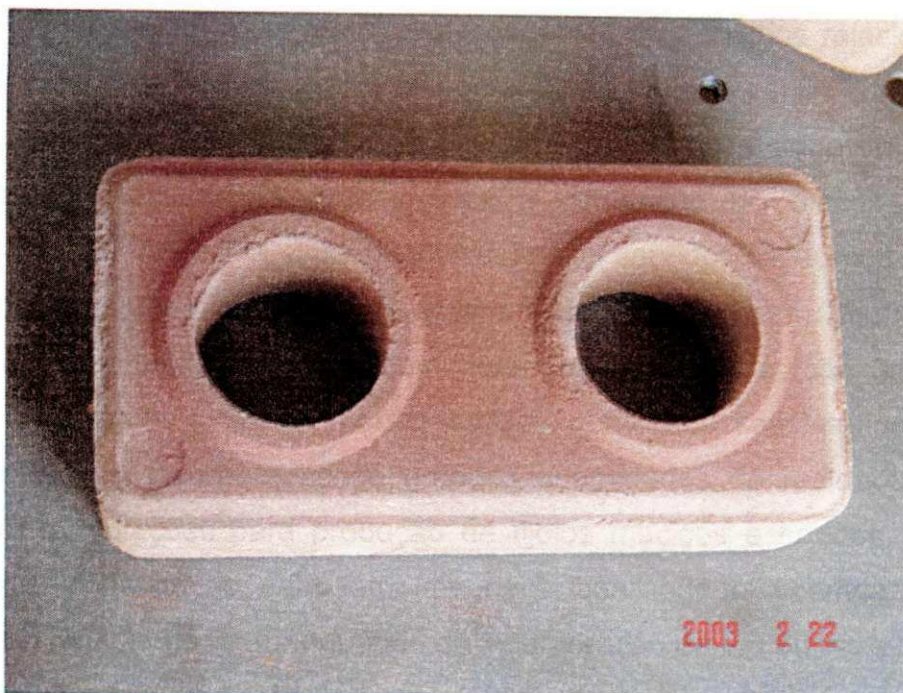


Figura 2.4 – Detalhe dos furos com encaixe saliente, que fica para cima durante o assentamento, do tijolo com dimensões 6,25 x 12,5 x 25 cm. (FONTE: Pisani, 2006)

2.3.1 RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CAULIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Rezende et al. (2008) estudou a introdução de resíduo de caulim em blocos de cimento e areia na proporção de 1:6. O resíduo foi utilizado em substituição à areia nas proporções de 40%, 70% e 100%. Os corpos-de-prova foram curados a 28, 60 e 63 dias e submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e absorção.

Observou-se, nessa pesquisa, que o comportamento mecânico dos blocos contendo resíduo foi inferior ao do convencional, mas ainda dentro das especificações. O mesmo ocorreu em relação à absorção, que embora tenha sofrido um aumento com a introdução do resíduo de caulim, não ultrapassou o limite estabelecido na normalização. Sob o ponto de vista ambiental, o estudo representa uma boa alternativa e ainda uma aplicação com viabilidade econômica.

Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – MATERIAIS

Foram utilizados os seguintes materiais nessa pesquisa:

- **SOLO**

Foi utilizado um solo argiloso proveniente do município de Lagoa Seca, PB, classificado como A-6 (solo argiloso) segundo a AASHO (American Association of State Highway Officials) e como SM de acordo com a Classificação Unificada dos Solos (The Unified Soil Classification System – USCS).

- **CAL**

Utilizou-se na pesquisa uma cal hidratada conhecida comercialmente como Carbomil, fabricada no município de Limoeiro do Norte - CE. A cal foi retirada da embalagem comercial e acondicionada em sacos plásticos lacrados, com a finalidade de não alterar suas propriedades originais.

- **RESÍDUO DE CAULIM**

O resíduo foi proveniente do beneficiamento de caulim, extraído das minerações da Planície Pegmatítica da Borborema, e cedido pela empresa CAULISA Indústria S/A, Município de Juazeirinho - PB. O material utilizado foi composto de 50% de fração grossa (obtida na primeira etapa do beneficiamento) e 50% de fração fina, material não retido na peneira ABNT n°200 (0,074mm). Os teores foram escolhidos baseados nos trabalhos desenvolvidos por Dias (2010), que analisou uma série de composições com os dois resíduos e verificou que esses foram os percentuais mais adequados para atividade pozolânica.

- **ÁGUA**

Foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba, para o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande – PB.

3.2 – MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa pode ser resumido através da seguinte metodologia adotada (Figura 3.1):

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa

3.2.1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Primeiramente, coletou-se o material segundo a norma da ABNT NBR 10007/04, que foi seco ao ar, destorroado e peneirado em peneira ABNT n°4 (4,8mm).

Em seguida, realizou-se a caracterização física do solo, através dos ensaios de granulometria por peneiramento, limites de consistência (limite de liquidez e de plasticidade) e compactação. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos I da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade federal de Campina Grande – UFCG e estão dispostos na Tabela 3.1, com as respectivas normas de execução da ABNT.

Tabela 3.1. Ensaio realizado no solo

Ensaio	Norma ABNT
Granulometria por peneiramento	NBR 7181/84
Limite de liquidez	NBR 6459/84
Limite de plasticidade	NBR 7180/84
Compactação (Proctor Normal)	NBR 7182/86

O solo componente da mistura solo-cal foi determinado de acordo com os critérios relacionados à granulometria e consistência estabelecidos pela ABNT, segundo a norma NBR 10833/89 (Tabela 3.2):

Tabela 3.2. Requisitos para seleção do solo empregado em tijolos prensados

Característica	Requisitos NBR 10833/89
% passando na peneira ABNT n°4	100%
% passando na peneira ABNT n°200	10% a 50%
Limite de liquidez (LL)	≤ 45%
Índice de plasticidade (IP)	≤ 18%

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 12023: "Solo cimento – Ensaio de compactação". Houve a adaptação da norma, substituindo o cimento pela cal, devido à inexistência de uma norma específica à compactação da mistura solo-cal.

A mistura solo-cal foi compactada com o teor de cal determinado pela granulometria, seguindo o método A descrito na Norma Geral de Dosagem do Solo-Cimento da PCA (Portland Cement Association). O cilindro moldado foi submetido a ensaio de resistência à compressão simples, verificando se atingiria a mínima resistência para atender às especificações. Caso o resultado não fosse o requerido, novos teores do traço solo-cal seriam analisados e novos corpos-de-prova seriam moldados.

3.2.2 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-MINERALÓGICA

As matérias-primas, o solo, a cal e os resíduos de caulim foram submetidos à análise granulométrica por difração de laser, análise química (EDX), difração de raio X (DRX), análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG). Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Caracterização e de Reciclagem da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

▪ **Análise granulométrica por difração de laser**

O ensaio consiste na dispersão do material em 250 mL de água destilada em agitador Hamilton Beach modelo 936 na velocidade de 17000 rpm por 20 min, utilizando como defloculante o hexametáfosfato de sódio. Depois dessa etapa, 15 mL são colocados em dispersor ultrassônico por 10 minutos e, finalmente, em um equipamento CILAS modelo 1064 para o alcance da concentração ideal de 150 unidades de difração por área de incidência.

▪ **Análise química**

As determinações usuais são: perda ao fogo, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O . A caracterização quanto à composição química ocorreu com a utilização do equipamento EDX-720 da marca Shimadzu, pelo método de Espectrofotometria Fluorescente de Raio X.

▪ **Difração de raio X**

As análises foram realizadas no equipamento XRD 6000 da Shimadzu. As amostras foram submetidas à radiação $K\alpha$ do Cu (40,0 KV/ 30 mA) à

velocidade do goniômetro de $0,02^\circ$ para 2θ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo.

▪ **Análise térmica diferencial**

O ensaio, que consiste em aquecer simultaneamente uma amostra e uma substância quimicamente inerte, foi efetuado no equipamento BP Engenharia, modelo RB 3000, operando a $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. A máxima temperatura utilizada foi 1000°C e o padrão foi o óxido de alumínio calcinado (Al_2O_3). Em um processo contínuo são medidas as diferenças de temperatura entre a amostra e o material inerte, evidenciando as reações endo e exotérmicas provocadas pelo aquecimento.

▪ **Análise termogravimétrica**

Com os mesmos parâmetros da análise térmica diferencial, nessa análise foram realizadas medidas de peso na amostra, registrando as variações de massa em função da temperatura de queima. Tais mudanças são decorrentes da perda de água ou CO_2 , ganho de oxigênio, queima de matéria orgânica, oxidação de enxofre, etc.

3.2.3 – PREPARAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM

Depois da coleta das amostras, o resíduo foi peneirado na peneira ABNT n° 8 (2,4 mm) para a retirada dos fragmentos maiores e com o intuito de não danificar o moinho. O resíduo de caulim passou por um processo de moagem em um moinho de bolas durante 6 horas. Após atingir a granulometria requerida, passando em peneira ABNT n°200 (0,074), misturaram-se as duas frações com a composição de 50% de cada. O material foi calcinado (queimado) à temperatura de 800°C (Figura 3.2), por um período de 2 horas, a fim de produzir a metacaulinita, com alta capacidade pozolânica.

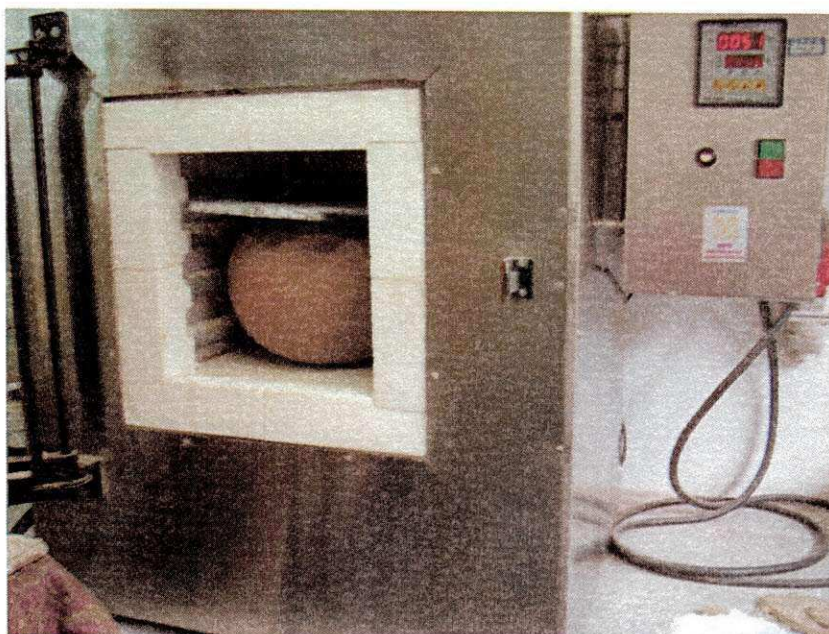


Figura 3.2 – Processo de calcinação em forno elétrico Flyever FE50RP

Esse resíduo, que se trata de uma matéria-prima alternativa, foi incorporado à mistura solo-cal sob diversos percentuais de adição, que variam de 10% a 40% da proporção da cal nos traços estudados.

3.2.4 – ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Os corpos-de-prova com dimensões 5cm x 10cm foram moldados no traço 1:10 e o fator água aglomerante determinado através da umidade ótima da compactação. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em pequenos sacos plásticos para manutenção da umidade e curados em câmara úmida com 100% de umidade relativa por períodos de 28, 60 e 90 dias (Figura 3.3).



Figura 3.3 - A) Corpos de prova acondicionados em sacos plásticos. B) Corpos de prova armazenados em câmara úmida.

Para cada composição foram moldados 24 corpos-de-prova para ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água, separados em grupos de 8 para cada período de cura (de 28, 60 e 90 dias). Os percentuais de caulim em relação à quantidade de cal variaram de 10% a 40%. A Tabela 3.3 apresenta o quantitativo dos corpos de prova em diferentes composições.

Tabela 3.3 – Quantitativo dos corpos de prova em diferentes composições

Resíduo de caulim	0%		10%		20%		30%		40%	
	res.	abs.	res.	abs.	res.	abs.	res.	abs.	res.	abs.
cura										
28 dias	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3
60 dias	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3
90 dias	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3
por composição	24		24		24		24		24	
total	120									

3.2.5 – PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Após os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de:

- Resistência à compressão simples;

Para a determinação da resistência à compressão simples utilizou-se um equipamento de ensaio universal da marca Autograph modelo AG-IS, com célula de carga de 100 kNA (Figura 3.4). Os ensaios foram realizados segundo a norma da ABNT NBR 8492/84.

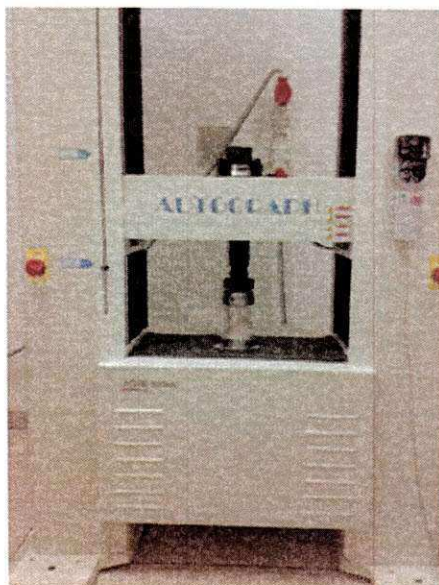


Figura 3.4 – Máquina Universal da marca Autograph da Shimadzu AG-IS 100 kN

- Absorção de água

A absorção consistiu em colocar os corpos-de-prova em estufa a temperatura de 100°C por 24 horas. Após esse período, foram pesados, registrando o peso seco. Em seguida, foram colocados em um tanque com água em temperatura ambiente por 24 horas novamente, para a verificação do peso úmido. A relação percentual entre os pesos seco e úmido caracterizou a absorção do material à água. Os ensaios foram realizados segundo a norma ABNT NBR 8492/84.

3.2.6 – ATIVIDADE POZOLÂNICA

A atividade pozolânica do resíduo de caulim foi avaliada em relação ao fator de água-aglomerante e o solo utilizado e as condições de cura, segundo a norma da ABNT NBR 5751/92 modificada. O Índice de atividade pozolânica foi determinado pela diferença de resistência à compressão simples do traço

convencional (solo+cal) e o traço alternativo incorporado com resíduo (solo+cal + resíduo), baseado na metodologia de Thompson (1966).

3.2.7 – PRODUÇÃO DOS TIJOLOS

De acordo com as especificações da norma NBR 8491/84, foram produzidos blocos furados convencionais de solo-cal e alternativos incorporados com resíduos (solo+cal+resíduo). A Figura 3.5 apresenta os tijolos solo-cal incorporados com resíduos.



Figura 3.5 – Tijolos de solo-cal incorporados com resíduo de caulim

Os resultados obtidos da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com resíduos foram comparados com os valores do tijolo de referência, a fim de inferir acerca da influência da adição do resíduo em suas características.

Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 4.1 apresenta os resultados referentes aos ensaios de limites de Atterberg, granulometria e compactação do solo estudado nessa pesquisa.

Tabela 4.1. Caracterização física do solo

Ensaio	Determinação	Resultados	Limite NBR 10832/89
Limites de Atterberg	LL	33,30%	45%
	LP	22,40%	-
	IP	10,90%	18%
Granulometria	pedregulho	6,43%	-
	areia grossa	27,49%	-
	areia fina	30,77%	-
	silte+argila	35,31%	> 10% e < 50%
	classificação	SM	-
Compactação	hot	15,50%	-
	Dmáx.	1,74g/cm ³	-

Analisando os resultados na Tabela 4.1, verifica-se que o solo apresentou limite de liquidez de 33% e índice de plasticidade de 10,9%. Comparando esses resultados com a norma ABNT NBR 10832/89, observa-se que esses valores estão dentro da especificação para uso em tijolos de solo-cal por apresentarem limite de liquidez inferior a 45% e índice de plasticidade menor que 18%. Para a distribuição de tamanho de partículas, constata-se que a fração silte+argila foi de 35,31%, estando esses valores de acordo com a norma ABNT NBR 10832/89 (entre 10% e 50%).

Segundo o sistema de Classificação Unificada dos Solos, o solo estudado na pesquisa foi classificado como SM, ou seja, areia siltosa e

misturas de areia e silte mal graduadas. Trata-se de um solo com uma apreciável quantidade de finos e caracterizado fisicamente como mal graduado, ou seja, há predominância de partículas de um certo diâmetro.

Na Figura 4.1, está apresentada a distribuição do tamanho de partículas do solo.

Analisando os resultados da Figura 4.1, verifica-se que a curva apresenta um comportamento modal com estreita faixa de distribuição de partículas entre 1 a 100 μm com maior concentração em torno de 60 μm . O tamanho médio de partícula do solo é de 29,82 μm e os valores de q_1 , q_2 e q_3 são de 3,45, 26,21 e 61,05 μm , respectivamente.

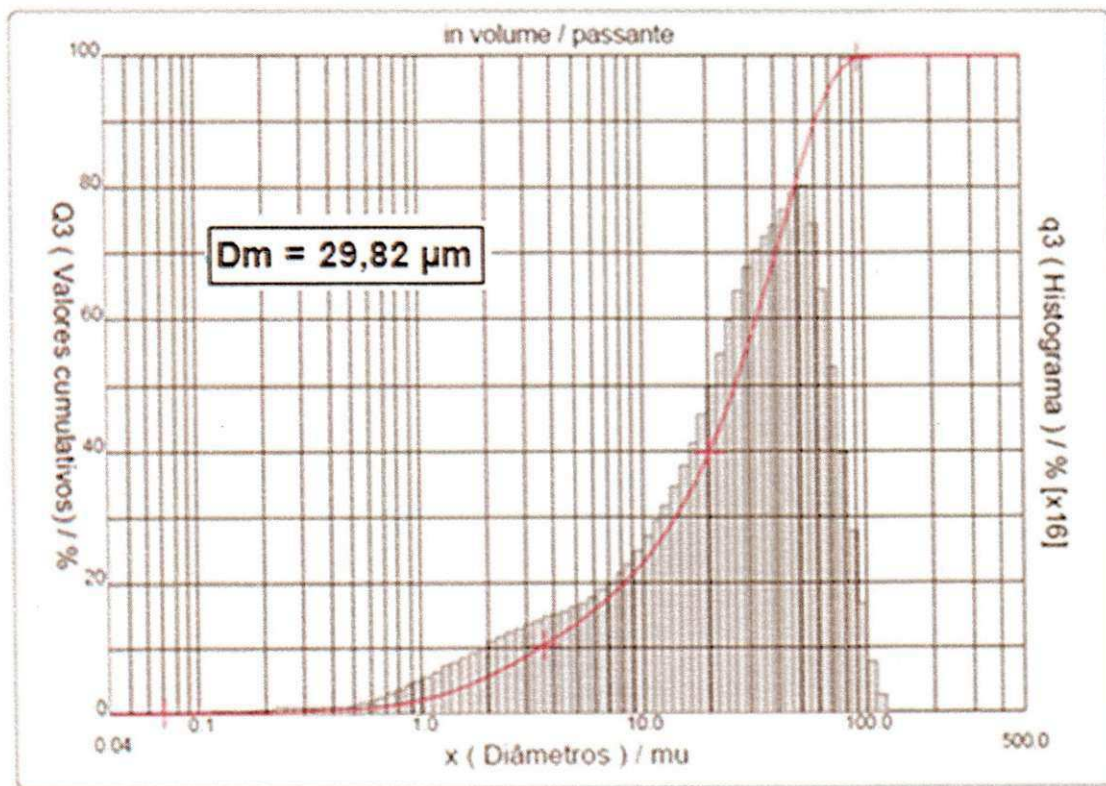


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica do solo

A Figura 4.2 apresenta os resultados referentes à distribuição do tamanho de partículas da cal Carbomil.

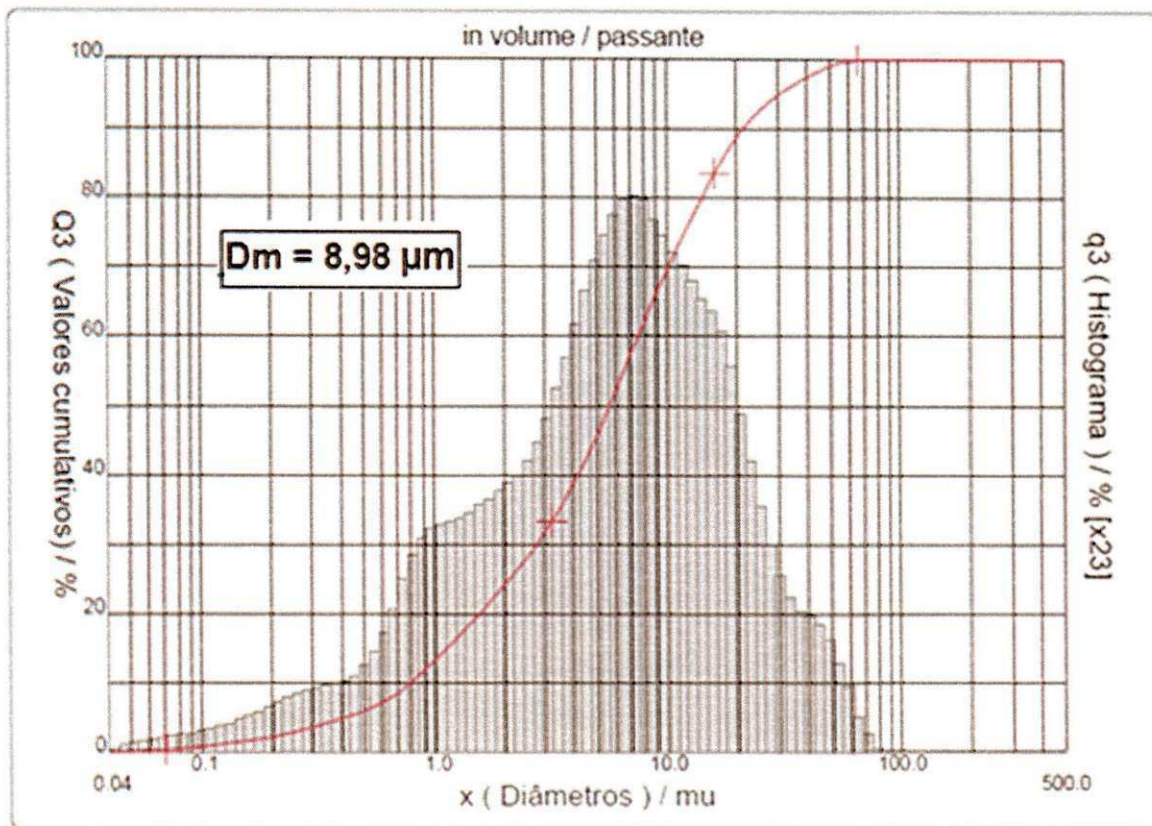


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica da cal

Analisando a Figura 4.2, verifica-se que a cal apresenta uma curva com comportamento bimodal, com larga faixa de distribuição do tamanho de partículas entre 0,04 μm a 100 μm e pico de aproximadamente 70 μm . O diâmetro médio de partícula da cal foi de 8,98 μm e os valores de d_{10} , d_{50} e d_{90} são de 0,79, 5,66 e 21,12 μm , respectivamente.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 estão apresentadas as distribuições de tamanho de partículas dos resíduos de caulim, previamente moídos.

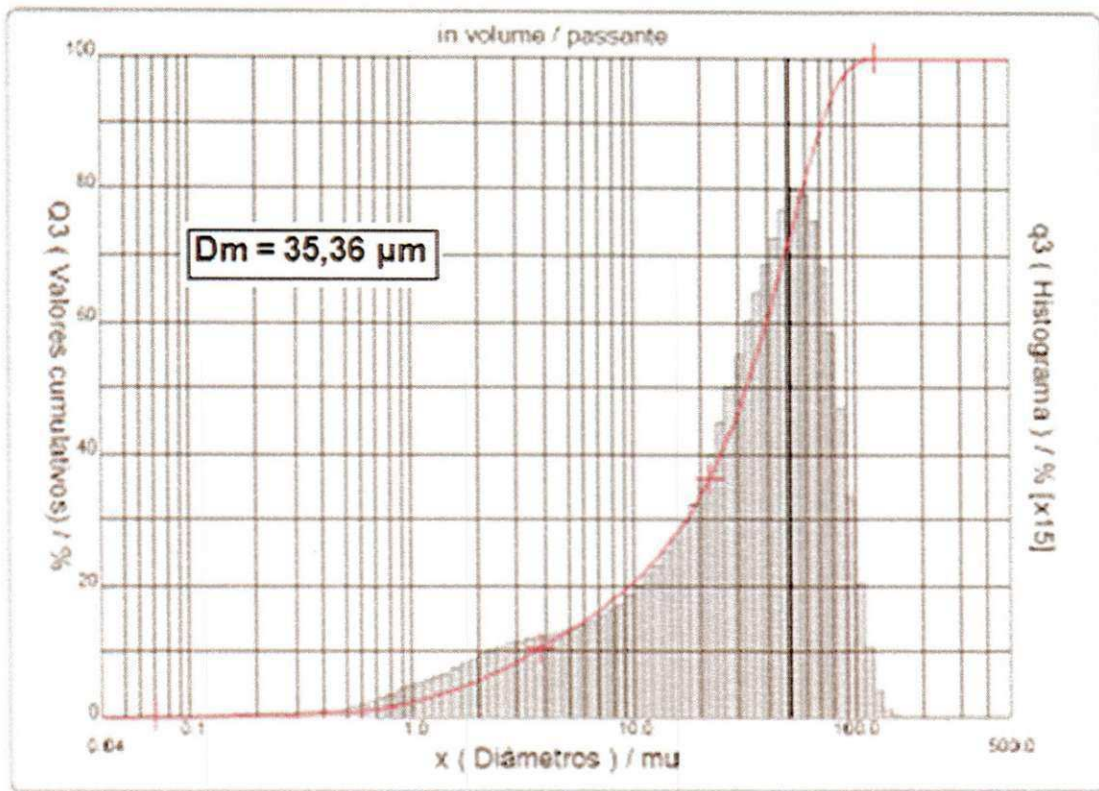


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do resíduo grosso de caulim

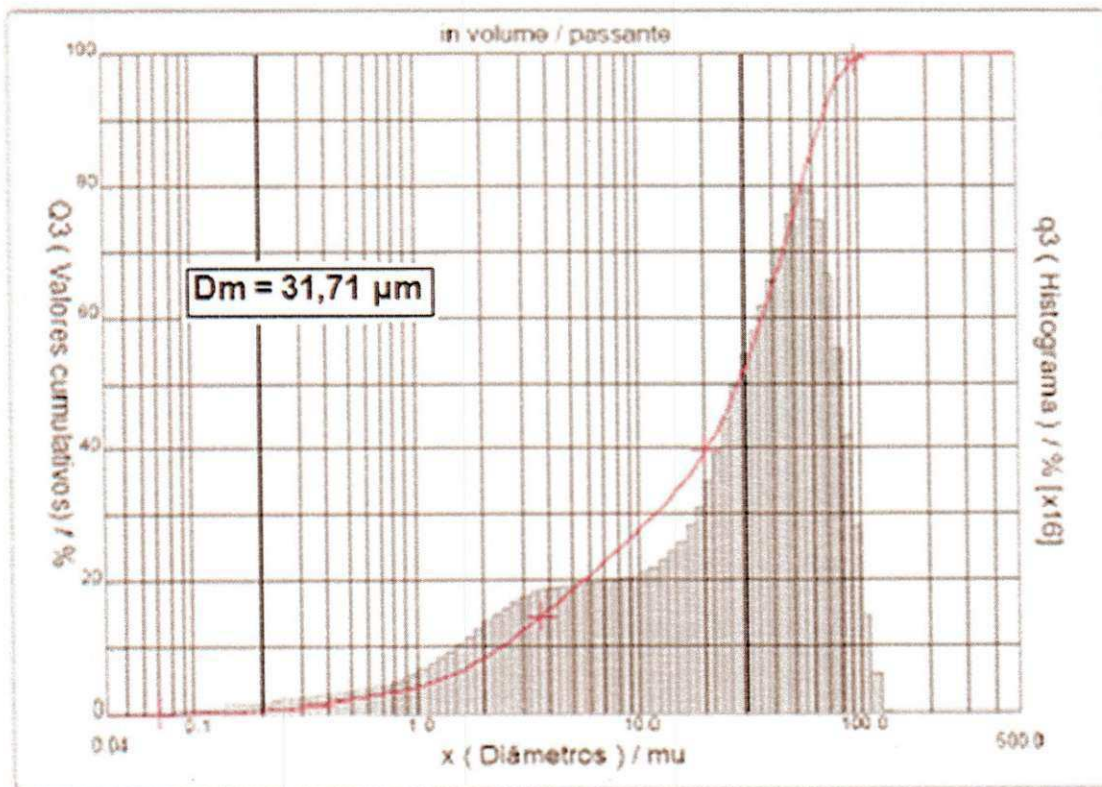


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica do resíduo fino de caulim

Analisando as Figuras 4.3 e 4.4 observa-se que após a cominuição para formação de partículas com dimensão e formato pré requerido, os resíduos apresentam semelhantes distribuições granulométricas, destacando uma concentração de partículas em torno dos 50-60 μm . O tamanho médio de partícula do resíduo grosso é de 35,36 μm e os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} são de 3,54, 32,26 e 71,29 μm , respectivamente. Em relação ao resíduo fino, o tamanho médio de partícula é de 31,71 μm e os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} são de 2,43, 28,21 e 67,47 μm , respectivamente.

Embora verificado um alto teor de partículas com dimensão inferior a 45 μm nos dois resíduos (68 a 70% em volume), observa-se em trabalhos anteriores (Farias Filho et al., 2000; Rocha, 2005; Lima et al., 2006) que em relação ao cimento Portland, os resíduos apresentam de uma forma geral uma distribuição mais grosseira, o que indica que o resíduo analisado está de acordo com os dados da literatura. No cimento o teor é de aproximadamente 95% das partículas com dimensões inferiores a 45 μm . Comparando com outro aglomerante, o teor da cal hidratada é de aproximadamente 85% (ABNT NBR 7175 (2003)). Portanto, seguiria a mesma distribuição mais grosseira do resíduo quando comparado ao aglomerante. Além disso, de acordo com a ABNT NBR 12653 (1992) e a ASTM 618C (1991), um material para ser considerado pozolânico deve apresentar no máximo 34% retido na peneira ABNT n°325 (45 μm). Dessa forma, pode-se concluir que os resíduos apresentam granulometria superior ao cimento, porém apresentam distribuição de tamanho de partícula adequada para uso como pozolana.

A Tabela 4.2 apresenta as frações granulométricas do solo, da cal e do resíduo de caulim segundo a difração a laser.

Tabela 4.2. Frações granulométricas em volume dos materiais

material	argila ($X < 2 \mu\text{m}$)	silte ($2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$)	areia ($60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$)	$D_{\text{méd.}}$ (μm)
solo	5,55%	83,77%	10,68%	29,82
cal	24,14%	75,66%	0,20%	8,98
resíduo grosso	6,20%	75,15%	18,64%	35,36
resíduo fino	8,40%	76,73%	14,87%	31,71

Analisando a Tabela 4.2, verifica-se que o aglomerante cal apresenta granulometria mais fina que os demais componentes ($D_m = 8,98 \mu\text{m}$), enquanto o resíduo grosso apresenta maior valor de tamanho médio de partícula ($D_m = 35,36 \mu\text{m}$). Em todos os componentes, constata-se que o silte é a fração predominante: no solo o percentual é de 83,77%, na cal é de 75,66%, no resíduo grosso é de 75,15% e no resíduo fino de caulim é de 76,73%. A argila, que se refere a uma fração granulométrica menor que $2 \mu\text{m}$, é mais presente na cal (24,14%), reafirmando ser esse o componente de granulométrica mais fina.

4.1.2 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-MINERALÓGICA

A composição química dos materiais está disposta na Tabela 4.3. Em relação ao resíduo, trata-se da composição com 50% de cada resíduo, grosso e fino.

Tabela 4.3. Composição química das amostras estudadas

material	Percentual de óxidos						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	CaO	TiO_2
solo	51,50	37,14	6,52	2,06	1,10	1,03	0,56
cal	0,92	0,49	0,24	0,38	2,28	95,64	-
resíduo	66,25	26,19	0,85	6,38	traços	traços	traços

Analisando a composição química, verifica-se que o solo apresentou teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) superior a 50% e 37%, respectivamente. Os teores de sílica são provavelmente provenientes da fração tamanho argila da sílica livre, mica e feldspato. O teor de ferro de 6,1% é provavelmente da goetita, o teor de potássio (K_2O) de 2,06% e óxido de magnésio (MgO) de 1,10% são provenientes da mica ou do feldspato e o teor de óxido de cálcio (CaO) de 1,03% é proveniente da calcita.

Para a cal, verifica-se um teor de óxido de cálcio de 95,3%, sendo classificada como calcítica. Os outros teores foram inferiores a 2%.

Em relação ao resíduo, verifica-se um teor de 66,25% de sílica, de 26,19% de alumina e de 6,38% de potássio.

A Tabela 4.4 apresenta as especificações do resíduo de caulim.

Tabela 4.4. Especificações do resíduo de caulim

Determinações	IS 1344 (1968)	ASTM C 618 (1991)	NBR 12653 (1992)	resíduo
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ -min	70%	70%	70%	93,20%
SiO ₂ -min	40%	NL	NL	66%
Diâmetro médio (µm)	NL	NL	NL	33,50%
Partículas >45 µm -máx.	12%	34%	34%	31%
Perda ao fogo -máx.	5%	10%	10%	8,80%

NL: parâmetro não legislado pela norma de referência

Analisando a Tabela 4.4, verifica-se que a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ é superior a 70%, o que atendeu ao mínimo requerido na ABNT NBR 12653 (1992) e na ASTM 618C (1991) para que um material tenha atividade pozolânica.

A Figura 4.5 apresenta o difratograma de raios-X do solo estudado na pesquisa.

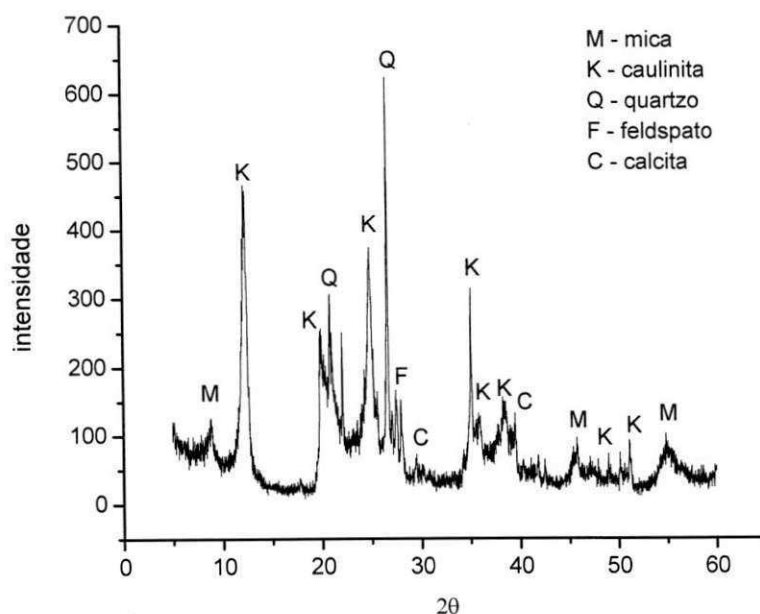


Figura 4.5 – DRX do solo estudado nessa pesquisa

Analisando os resultados da Figura 4.5, verifica-se que o solo apresenta as seguintes fases mineralógicas: mica biotita (caracterizada pelas distâncias interplanares basais de 9,99Å, 1,98Å e 1,69Å), caulinita (caracterizada por 7,21Å, 4,38 Å, 3,58Å, 2,55Å, 2,50Å, 2,35Å, 2,28Å, 1,86Å e 1,78 Å), quartzo (caracterizado por 4,26Å e 3,34Å), calcita (3,17Å e 2,8Å) e feldspato sanidina (3,19Å). Esses resultados estão de acordo com a composição química (Tabela 4.3).

A Figura 4.6 apresenta o difratograma de raios-X da cal hidratada estudada na pesquisa.

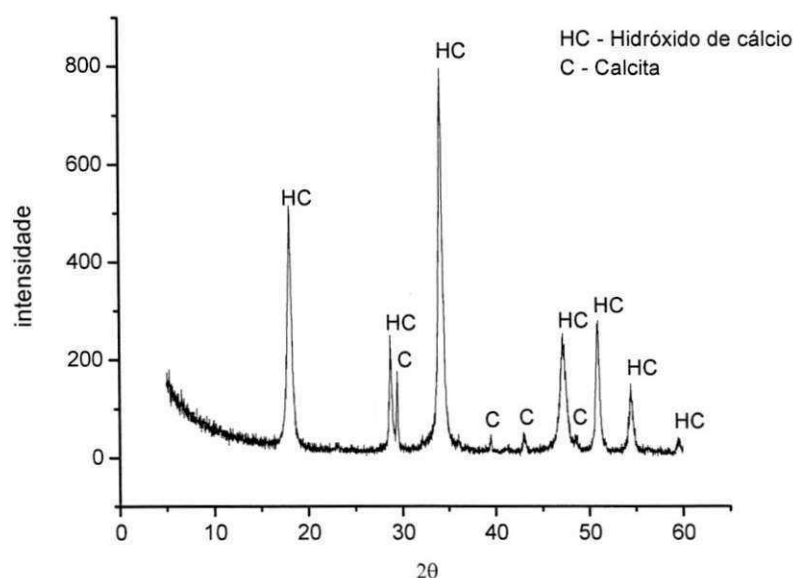


Figura 4.6 – DRX da cal estudada na pesquisa

Observando a Figura 4.6, verifica-se que a cal apresenta as seguintes mineralógicas: hidróxido de cálcio (caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,91Å, 3,10Å, 2,62Å, 1,92Å, 1,79Å, 1,68Å e 1,55Å) e calcita ou carbonato de cálcio (distâncias de 3,03Å, 2,28Å, 2,10Å e 1,87Å).

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os difratogramas do resíduo de caulim no estado natural e calcinado, respectivamente. O resíduo grosso misturado em 50% a 50% de fino foi calcinado a 800°C, por 2 horas.

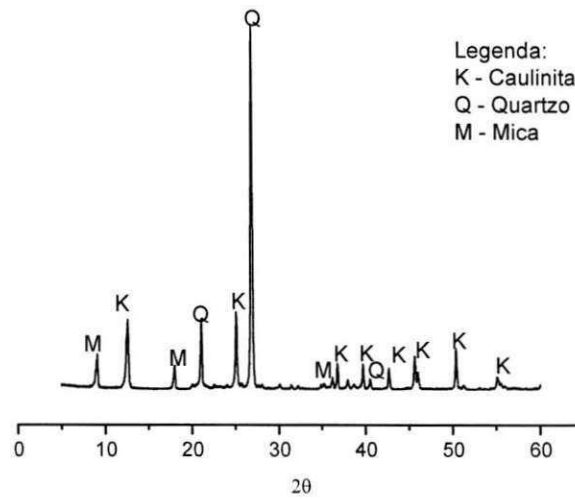


Figura 4.7 – DRX do resíduo de caulim no estado natural

Analisando a Figura 4.7, verifica-se que o caulim no estado natural apresenta as seguintes fases mineralógicas: caulinita (nas distâncias interplanares de 7,01Å, 3,54Å, 2,46Å, 2,28Å, 2,54Å, 2,10Å, 1,80Å e 1,66Å), quartzo (caracterizado por 3,55Å, 3,32Å e 2,50Å) e mica (9,85Å, 4,57Å e 2,48Å).

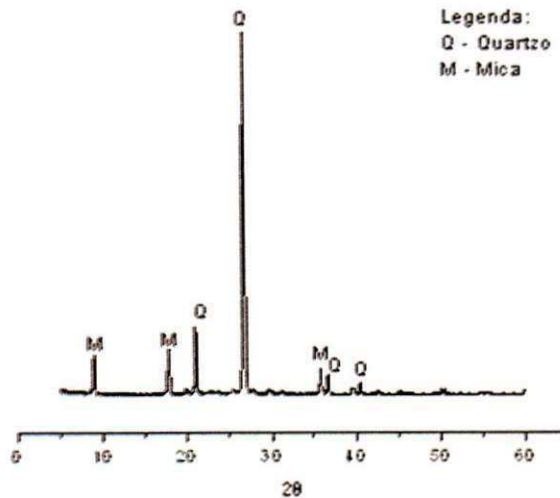


Figura 4.8 – DRX do resíduo de caulim calcinado

Analisando a Figura 4.8, verifica-se a ausência da caulinita, ou seja, com a calcinação a 800°C o material foi transformado em metacaulinita. Esses resultados são similares aos obtidos por Castro (2008), cujo resíduo é proveniente da Província Pegmatítica da Borborema.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas das análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) do solo.

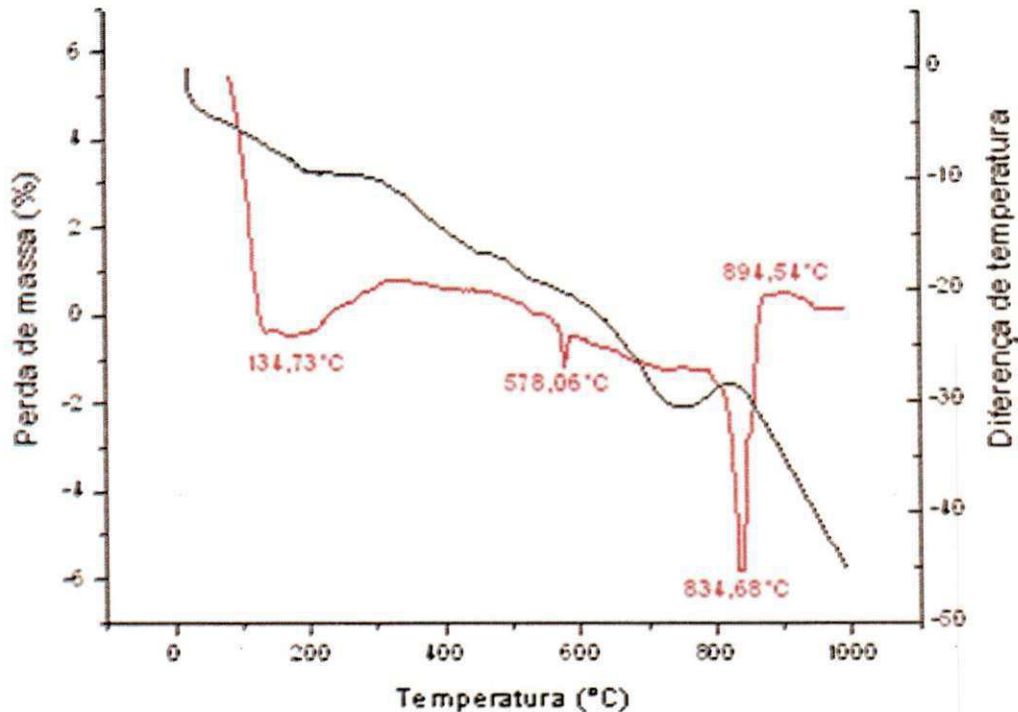


Figura 4.9 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica do solo

Analisando as curvas da Figura 4.9 referente ao solo, observa-se um pequeno pico endotérmico a 134,73°C caracterizando a presença de água livre e adsorvida, pequeno pico endotérmico a 578,06°C caracterizando a presença de hidroxila, e um pico de média intensidade a 834,68°C caracterizando a presença de carbonato de cálcio. Para a análise termogravimétrica, verifica-se uma perda de massa de 7,8%.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as curvas das análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) da cal.

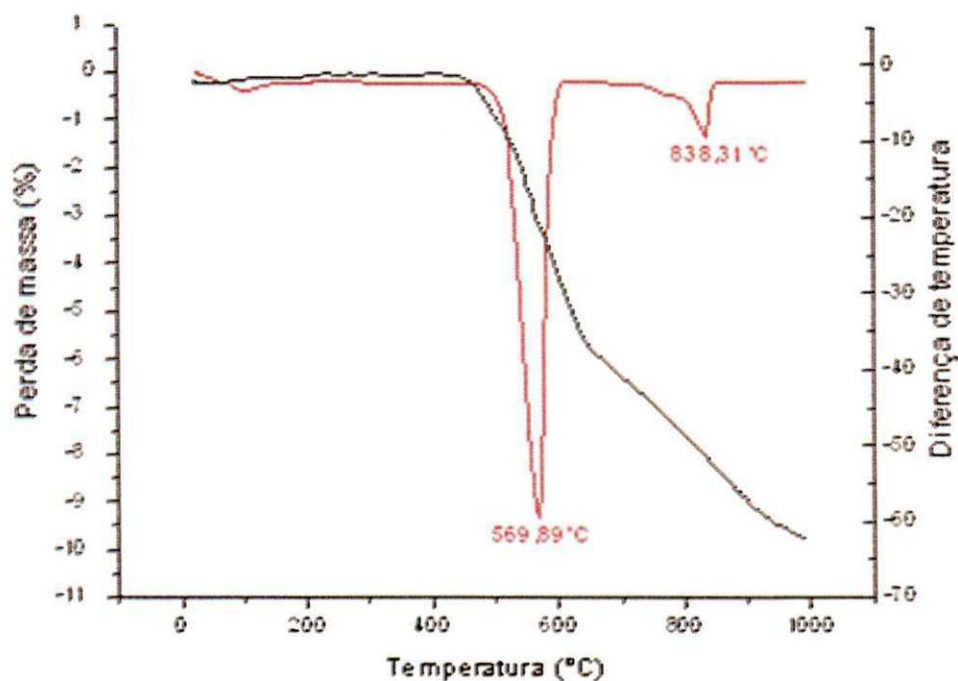


Figura 4.10 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica da cal

Em relação à cal (Figura 4.10), observa-se na curva de análise térmica diferencial um grande pico endotérmico de 569,89°C caracterizando a presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e um pico menos acentuado de 838,31°C caracterizando a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3 ou calcita). Na curva termogravimétrica, verifica-se uma perda de massa de 9,3% correspondente à água livre e adsorvida, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio.

4.2 – ENSAIOS TECNOLÓGICOS: ATIVIDADE POZOLÂNICA

A Tabela 4.5 apresenta o índice de atividade pozolânica dos corpos-de-prova.

Tabela 4.5. Índice de atividade pozolânica dos corpos-de-prova de solo-cal incorporados com resíduo de caulim

Índice de atividade pozolânica dos corpos-de-prova (MPa)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
10	0,17	0,24	0,70
20	0,52	0,60	1,21
30	0,36	0,74	0,15
40	0,19	0,35	-

Analisando a Tabela 4.5, verifica-se um aumento da atividade pozolânica dos corpos-de-prova quando comparados com o convencional. O maior índice de atividade pozolânica foi de 1,21 MPa, verificado para a incorporação de 10% de resíduo aos 90 dias de cura. Não foi constatado índice de atividade pozolânica aos 90 dias para o percentual de 40% de resíduo, ou seja, a resistência nesses corpos-de-prova foi inferior à resistência do corpo-de-prova convencional.

A Tabela 4.6 apresenta o índice de atividade pozolânica dos tijolos.

Tabela 4.6. Índice de atividade pozolânica dos tijolos de solo-cal incorporados com resíduo de caulim

Índice de atividade pozolânica dos tijolos (MPa)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
10	0,05	0,07	0,09
20	0,08	0,10	0,13

Em relação aos tijolos (Tabela 4.6), houve atividade pozolânica, porém menor quando comparada a dos corpos-de-prova. O maior índice observado foi de 0,13 MPa, sugerindo pequeno aumento da resistência nos blocos até os 90 dias de cura.

A Figura 4.11 apresenta o difratograma da composição de solo-cal sem resíduo para os corpos-de-prova.

- M - Mica
- K - Caulinita
- H - Hidróxido de Cálcio
- Q - Quartzo
- C - Calcita
- S - Silicato de Cálcio Hidratado

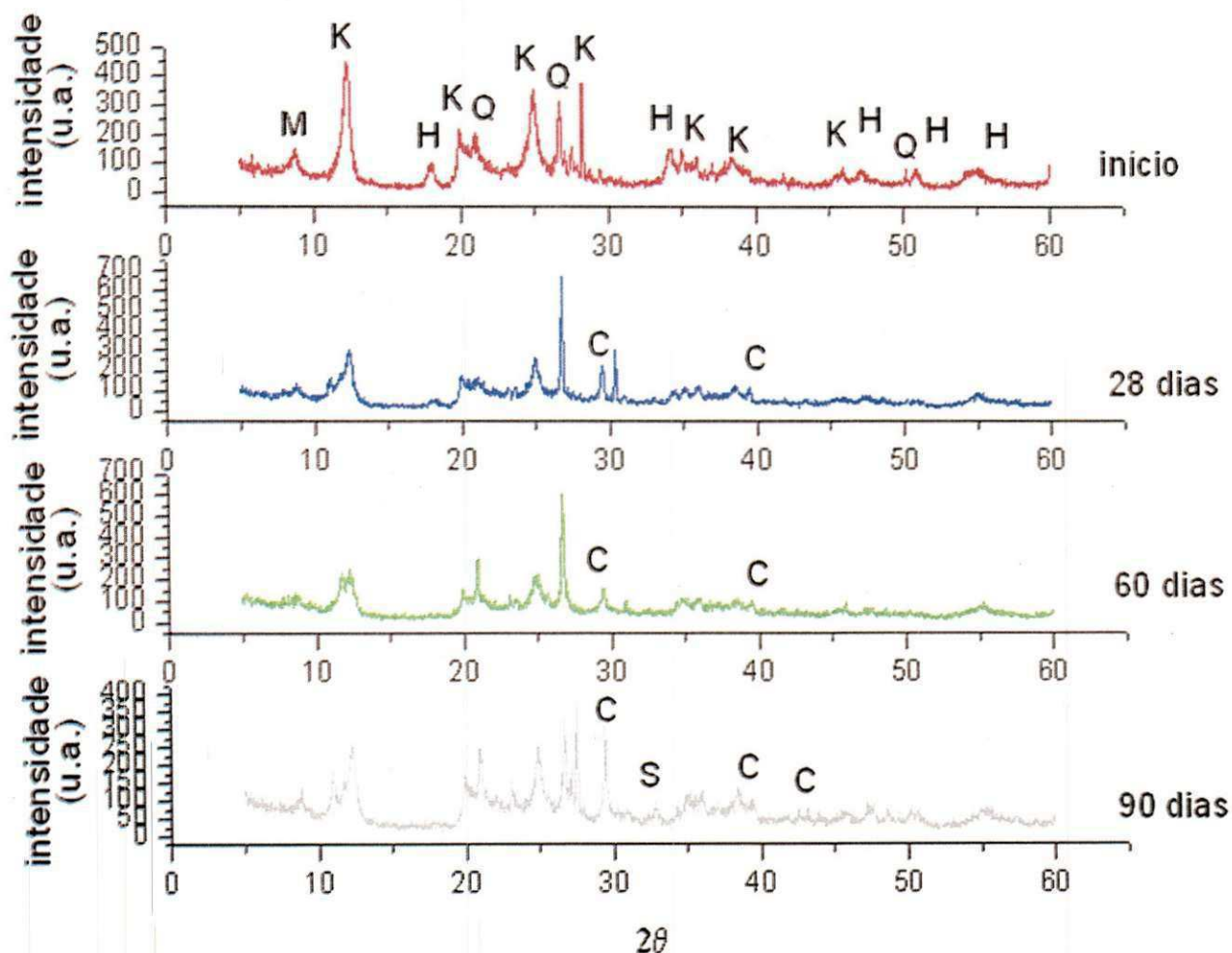


Figura 4.11 – Difrátogramas dos corpos-de-prova de solo-cal sem incorporação de resíduo com cura de 28, 60 e 90 dias

Para que o mecanismo de reação fosse mais bem visualizado, apenas as fases mineralógicas que sofreram modificações aos 28, 60 e 90 dias foram identificadas. Portanto, os demais picos sem legenda indicam a presença do mesmo mineral da(s) fase(s) anterior(es).

Analisando a Figura 4.11, verificam-se para os corpos-de-prova sem cura as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, hidróxido de cálcio, quartzo. Para 28 dias de cura, verificam-se uma diminuição no hidróxido de cálcio e a presença de calcita. Para 90 dias de cura, verifica-se um aumento de calcita e a formação do silicato de cálcio responsável pelo aumento da resistência mecânica.

A Figura 4.12 apresenta o difratograma da composição de solo-cal com incorporação de 10% de resíduo para os corpos-de-prova.

- M - Mica
- K - Caulinita
- H - Hidróxido de Cálcio
- Q - Quartzo
- C - Calcita
- S - Silicato de Cálcio Hidratado

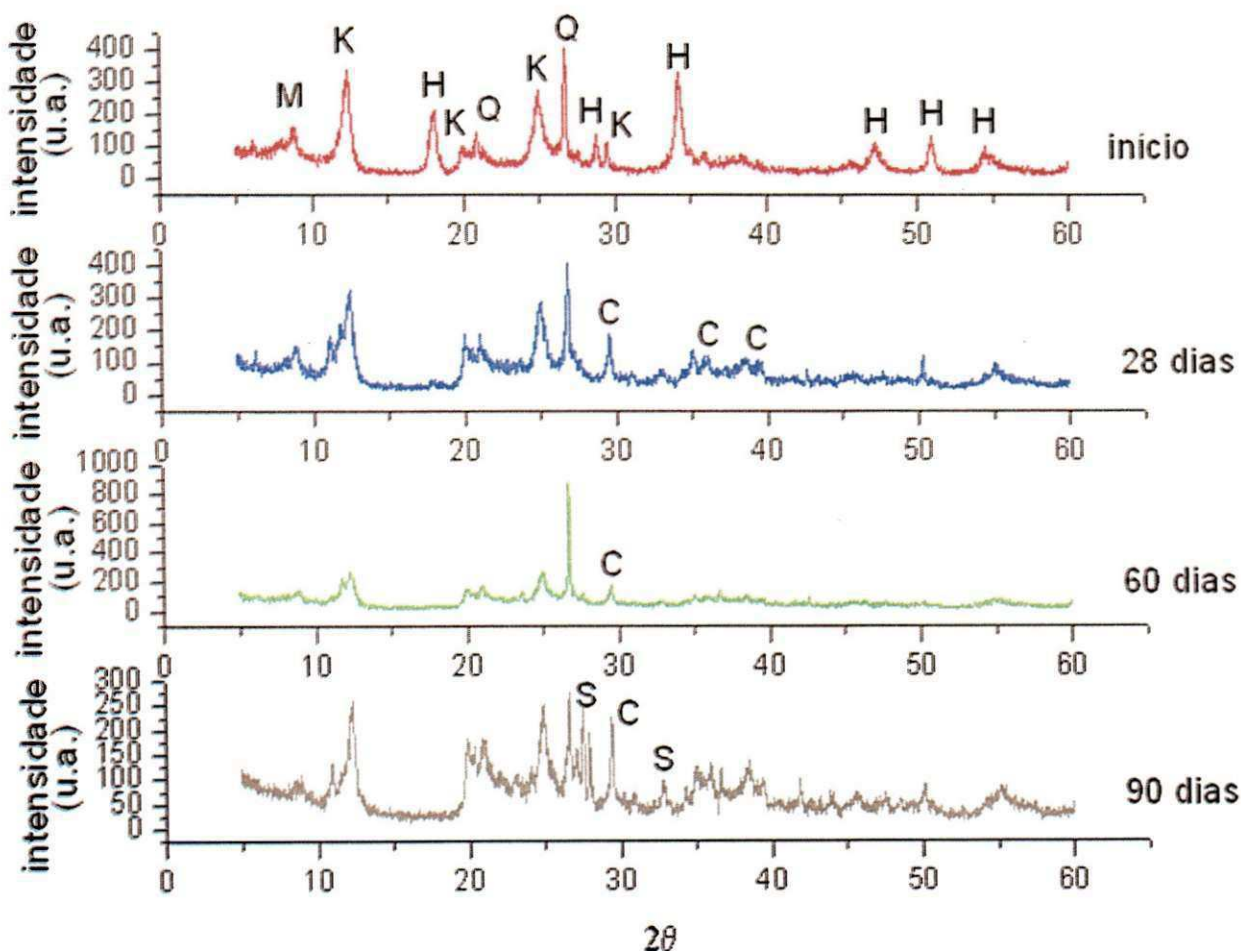


Figura 4.12 – Difratogramas dos corpos-de-prova de solo-cal com incorporação de resíduo de 10% com cura de 28, 60 e 90 dias

Analisando a Figura 4.12, verificam-se para os corpos-de-prova sem cura as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, hidróxido de cálcio, quartzo. Para 28 dias de cura, verificam-se uma diminuição no hidróxido de cálcio e a presença de calcita. Para 90 dias de cura, verifica-se um aumento de calcita e a formação do silicato de cálcio responsável pelo aumento da resistência mecânica.

A Figura 4.13 apresenta o difratograma da composição de solo-cal com incorporação de 20% de resíduo para os corpos-de-prova.

- M - Mica
- K - Caulinita
- H - Hidróxido de Cálcio
- Q - Quartzo
- C - Calcita
- S - Silicato de Cálcio Hidratado
- A - Albita

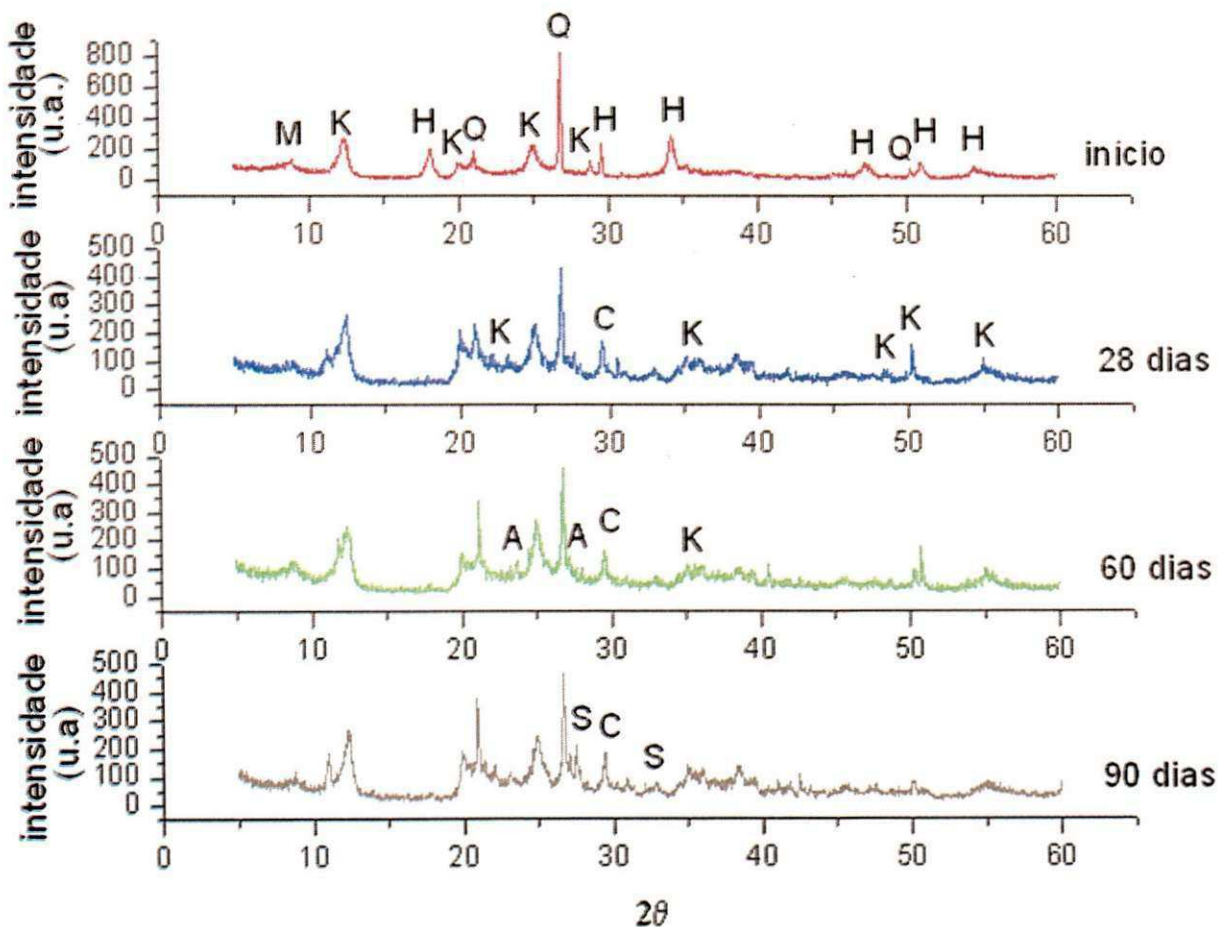


Figura 4.13 – Difratogramas dos corpos-de-prova de solo-cal com incorporação de resíduo de 20% com cura de 28, 60 e 90 dias

Analisando a Figura 4.13, verificam-se para os corpos-de-prova sem cura as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, hidróxido de cálcio, quartzo. Para 28 dias de cura, verificam-se uma diminuição no hidróxido de cálcio e a presença de calcita. Para 90 dias de cura, verifica-se um aumento de calcita e a formação do silicato de cálcio responsável pelo aumento da resistência mecânica.

A Figura 4.14 apresenta o difratograma da composição de solo-cal com incorporação de 30% de resíduo para os corpos de prova.

M - Mica
K - Caulinita
H - Hidróxido de Cálcio
Q - Quartzo
C - Calcita
S - Silicato de Cálcio Hidratado

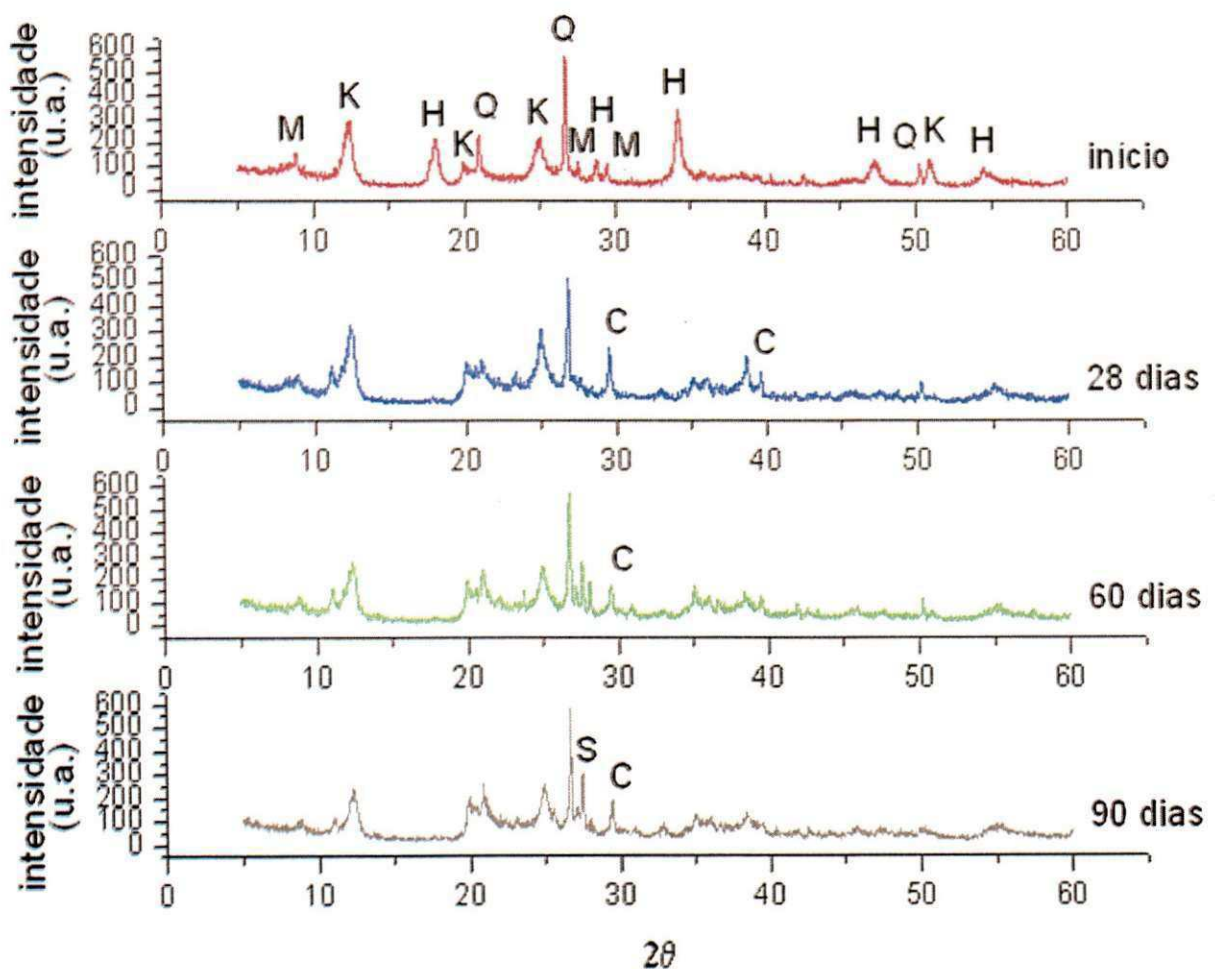


Figura 4.14 – Difratogramas dos corpos-de-prova de solo-cal com incorporação de resíduo de 30% com cura de 28, 60 e 90 dias

Analisando a Figura 4.14, verificam-se para os corpos-de-prova sem cura as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, hidróxido de cálcio, quartzo. Para 28 dias de cura, verificam-se uma diminuição no hidróxido de cálcio e a presença de calcita. Para 90 dias de cura, verifica-se um aumento de calcita e a formação do silicato de cálcio responsável pelo aumento da resistência mecânica.

A Figura 4.15 apresenta o difratograma da composição de solo-cal com incorporação de 40% de resíduo para os corpos de prova.

M - Mica

K - Caulinita

H - Hidróxido de Cálcio

Q - Quartzo

C - Calcita

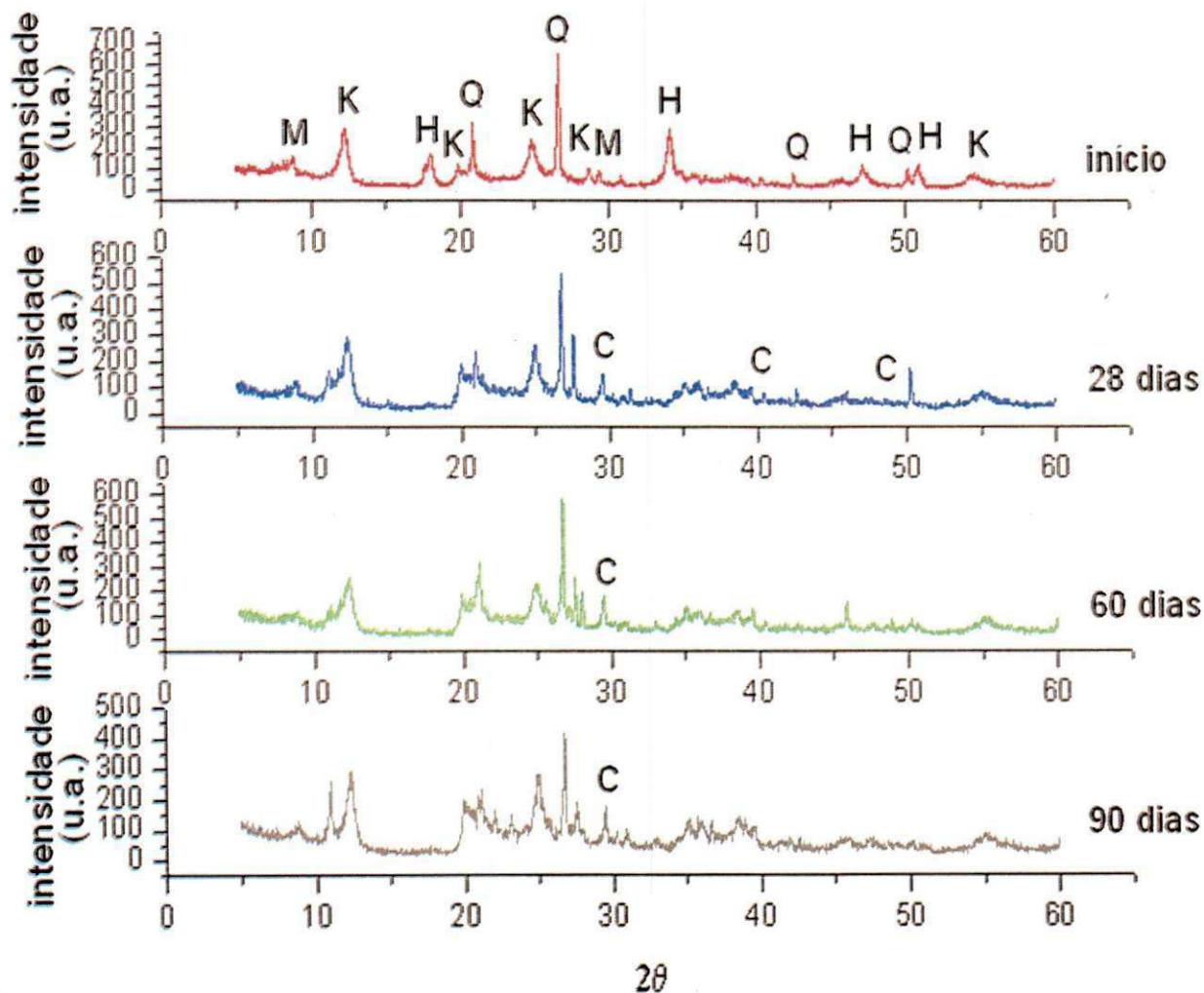


Figura 4.15 – Difratogramas dos corpos-de-prova de solo-cal com incorporação de resíduo de 40% com cura de 28, 60 e 90 dias

Analisando a Figura 4.15, verificam-se para os corpos-de-prova sem cura as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, hidróxido de cálcio, quartzo. Para 28 dias de cura, verificam-se uma diminuição no hidróxido de cálcio e a presença de calcita. Para 90 dias de cura, verifica-se um aumento de calcita, mas não foi observada a formação do silicato de cálcio, justificando o fato de a resistência mecânica ter sido inferior a do corpo-de-prova convencional (Tabela 4.5).

4.2.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Tabela 4.7 e a Figura 4.16 apresentam resultados da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova com e sem incorporação de resíduo curados por períodos de 28, 60 e 90 dias.

Tabela 4.7. Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.

RCS corpos de prova (MPa)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
0	(1,10 ± 0,03)	(1,30 ± 0,06)	(4,35 ± 0,30)
10	(1,27 ± 0,04)	(1,54 ± 0,24)	(5,05 ± 0,74)
20	(1,62 ± 0,03)	(1,90 ± 0,06)	(5,56 ± 0,58)
30	(1,46 ± 0,03)	(2,04 ± 0,13)	(4,50 ± 0,16)
40	(1,29 ± 0,06)	(1,65 ± 0,16)	(4,28 ± 0,20)

Analisando a Tabela 4.18, verifica-se que os corpos-de-prova apresentaram um acréscimo de resistência com a cura em função da incorporação de resíduo. Os valores aos 28 e 60 dias, com exceção do resultado a 30% em 60 dias, foram inferiores ao limite mínimo de 2,0 MPa estabelecido pela norma ABNT NBR 8492/1984. Todavia, observou-se nesses períodos um aumento da resistência em função do aumento do resíduo de

caulim incorporado até os 20%, seguido de uma diminuição nesse valor para maior percentual incorporado.

O maior valor observado foi aos 90 dias de cura com a incorporação de 20% de resíduo (5,56 MPa), com uma grande faixa de dispersão dos valores em torno da média (desvio padrão de 0,58 MPa, correspondente a 14,6% da média). Portanto, observando não apenas a média, mas também a diferença entre os limites superior e inferior das amostras, os resultados aos 10% (5,05 ± 0,74) MPa e 20% (5,56 ± 0,58) MPa em 90 dias apresentaram-se bastante próximos, gerando incerteza quanto ao resultado mais eficiente. Por essa razão, os tijolos vazados foram moldados nessas duas porcentagens para verificação da resistência.

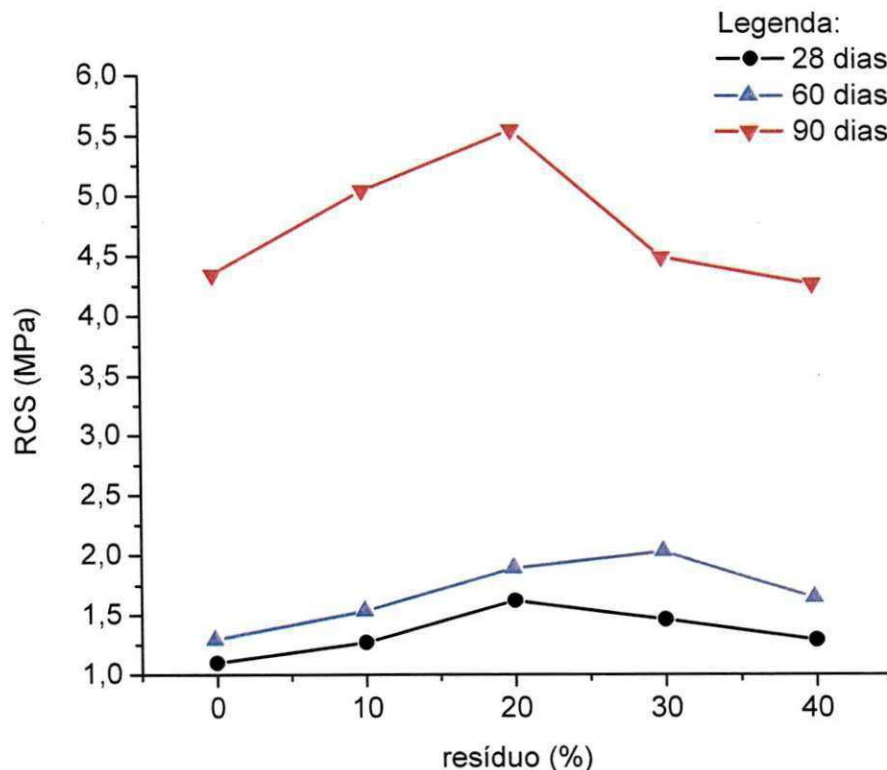


Figura 4.16 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.

Analisando os valores apresentados na Figura 4.16, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova foi crescendo com o aumento

do período de cura, sendo os melhores resultados para 90 dias de cura. Esses resultados estão de acordo com o índice de atividade pozolânica apresentado na Tabela 4.5 e nas Figuras 4.11 a 4.15, com o consumo de portlandita (hidróxido de cálcio) e a presença da nova fase de silicato de cálcio, que favorece o comportamento mecânico do material. Castro (2008) observou que o aumento das resistências de argamassas que continham resíduos de caulim calcinados devia-se a um arranjo eficiente na interface agregado-pasta como também à ação química dos resíduos, já que apresentavam elevada atividade pozolânica.

Encontram-se na Tabela 4.8 e na Figura 4.17 os valores das resistências à compressão simples para os tijolos solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, no traço 1:10, para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Tabela 4.8. Resistências à compressão simples (RCS) dos tijolos de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.

RCS tijolos (MPa)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
0	(0,84 ± 0,01)	(0,97 ± 0,01)	(1,13 ± 0,04)
10	(0,89 ± 0,09)	(1,04 ± 0,11)	(1,22 ± 0,07)
20	(0,92 ± 0,16)	(1,07 ± 0,05)	(1,26 ± 0,01)

Analisando os resultados da Tabela 4.8, verifica-se que os melhores resultados foram para os tijolos com incorporação de 20% aos 90 dias de cura (1,26 ± 0,04) MPa, sendo um valor inferior a 2,0 MPa estabelecido pela norma ABNT NBR 8492. Os resultados dos tijolos solo-cal foram inferiores aos dos corpos-de-prova.

Um fator que deve ser considerado é a energia para compactar os tijolos. Visto que houve a colaboração de mais de um funcionário do laboratório em dias diferentes, o tijolo pode adquirir maior ou menor resistência à compressão.

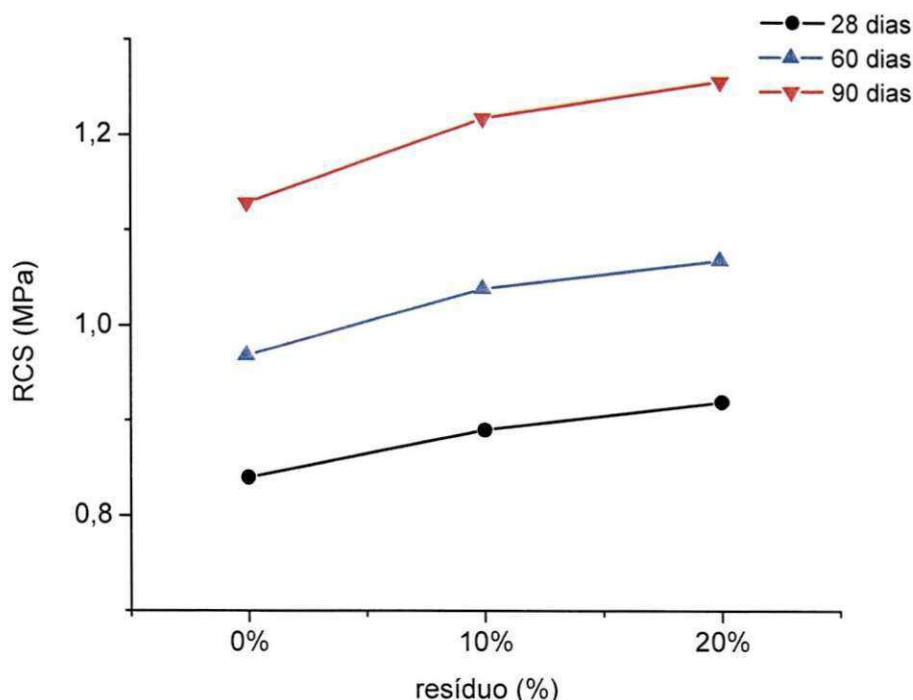


Figura 4.17 – Resistências à compressão simples (RCS) dos tijolos de solo-cal e incorporados com resíduo de caulim, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.

Deve-se analisar na Figura 4.17 que eram esperados os maiores valores a 90 dias de cura de acordo com os resultados dos corpos de prova. Para cada cura, verifica-se que as resistências foram bastante próximas, além de sempre crescentes com o aumento do percentual de resíduo.

Dias (2010) sugere que ao se utilizar e analisar mistura de resíduos deve-se considerar a evolução ou diminuição do empacotamento do sistema, e não apenas o seu efeito pozolânico. Além da ação química, as pozolanas possuem ação física, uma vez que atuam nos concretos e argamassas como material de preenchimento (efeito filler), melhorando o empacotamento do sistema (FARIA FILHO et al, 2000 apud DIAS, 2010). Dessa forma, embora com maior tempo de cura e percentual de incorporação de resíduo, o efeito pozolânico parece ser comprometido por não ser essa a melhor interação física entre as partículas do sistema.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados das resistências dos corpos-de-prova e dos tijolos de solo-cal.

Tabela 4.9. Comparação das resistências à compressão simples dos corpos de prova com os tijolos, para traço 1:10 e com cura de 28, 60 e 90 dias.

RCS corpos-de-prova (CP) e tijolos (T) (MPa)						
Incorporação de resíduo (%)	28 dias		60 dias		90 dias	
	médias	perda (%)	médias	perda (%)	médias	perda (%)
0	CP: 1,10 / T: 0,84	23,63	CP: 1,30 / T: 0,97	25,38	CP: 4,35 / T: 1,13	74,02
10	CP: 1,27 / T: 0,89	30,92	CP: 1,54 / T: 1,04	32,47	CP: 5,05 / T: 1,22	75,84
20	CP: 1,62 / T: 0,92	43,20	CP: 1,90 / T: 1,07	43,68	CP: 5,56 / T: 1,26	77,34

Analisando os resultados da Tabela 4.9, observa-se que houve uma diminuição da resistência dos tijolos nos três tempos de cura, quando comparados aos dos corpos de prova.

As perdas da resistência variaram de 23,63% até 77,34%. As maiores perdas foram referentes aos 90 dias de cura: sem resíduo a resistência diminuiu de 4,35 MPa nos corpos-de-prova para 1,13 MPa nos tijolos, aos 10% de incorporação a resistência diminuiu de 5,05 MPa nos corpos-de-prova para 1,22 MPa nos tijolos, enquanto que para 20% de resíduo de caulim a diminuição foi de 5,56 MPa para 1,26 MPa nos tijolos.

Verifica-se que houve um considerável decréscimo no valor da resistência à compressão simples quando comparados os corpos de prova (valor máximo de 5,56 MPa) com os tijolos (máximo de 1,26 MPa). Segundo Lima (2010), “a geometria do tijolo vazado favorece a concentração de tensão nas bordas do tijolo, onde a área perpendicular à força é cerca de 70% menor que a área líquida do tijolo.” Dessa forma, o corpo de prova é beneficiado quanto à resistência pela ausência de furos na área comprimida (Figuras 4.18 e 4.19). Portanto, embora o tijolo furado proporcione menor peso por unidade de volume de alvenaria, dificulte a propagação da umidade e seja um melhor isolante térmico e acústico, o seu uso estará condicionado a uma menor resistência requerida em projeto.

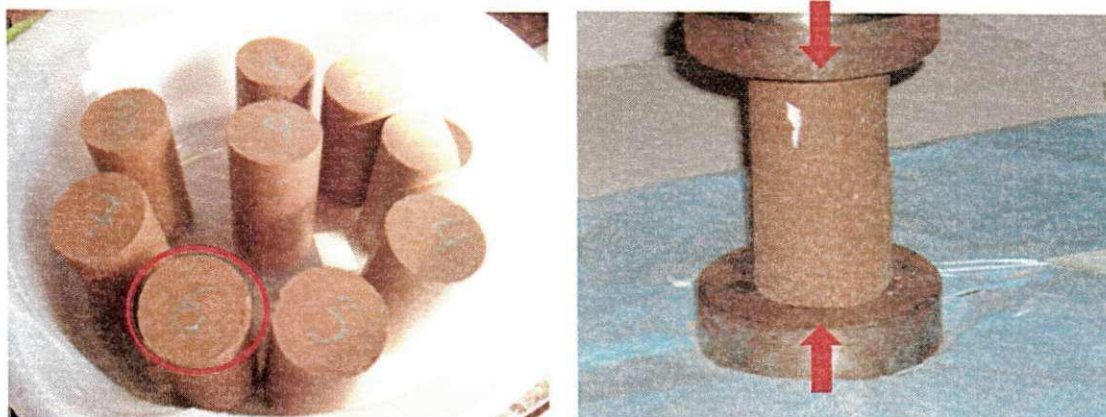


Figura 4.18 – Área de concentração de tensões dos corpos de prova quando submetidos ao ensaio de compressão simples

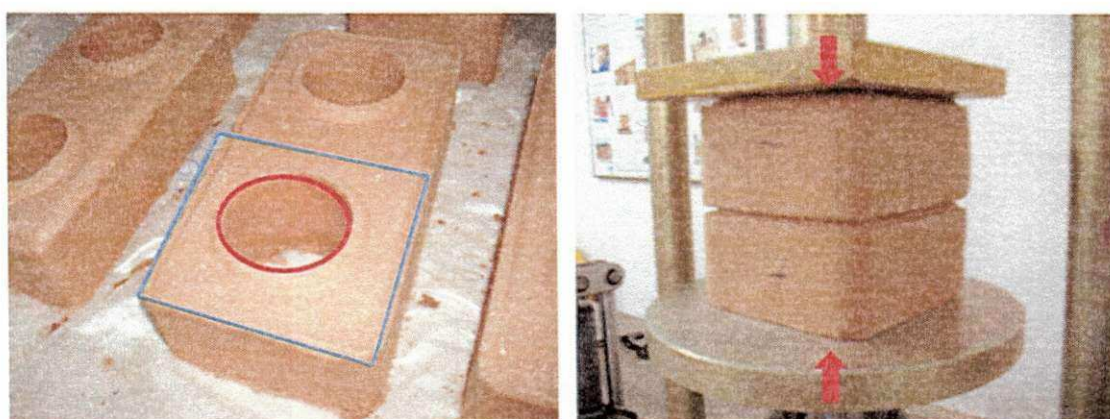


Figura 4.19 – Área de concentração de tensões dos tijolos quando submetidos ao ensaio de compressão simples

4.2.2 – ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 4.10 apresenta os valores obtidos por meio do ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova.

Tabela 4.10. Absorção de água dos corpos-de-prova aos 28, 60 e 90 dias de cura

Absorção dos corpos-de-prova (%)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
0	(16,83 ± 1,10)	(15,01 ± 0,14)	(14,46 ± 2,83)
10	(16,73 ± 0,39)	(14,31 ± 0,46)	(12,07 ± 0,69)
20	(15,44 ± 0,20)	(14,11 ± 0,79)	(12,37 ± 0,71)
30	(16,44 ± 0,48)	(13,39 ± 0,47)	(15,20 ± 2,40)
40	(16,24 ± 0,80)	(15,71 ± 0,64)	(13,60 ± 0,23)

Analisando a Tabela 4.10, verifica-se que os valores de absorção de água foram decrescendo em relação ao tempo de cura. Aos 28 dias, observa-se que os resultados variaram entre 15,44% e 16,83%, aos 60 dias, a variação foi de 13,39% a 15,71% e aos 90 dias foi de 12,07% a 15,20%. Os resultados apresentados são inferiores a 20%, valor máximo estabelecido pela ABNT NBR 8491/84.

A Tabela 4.11 apresenta os valores obtidos para a absorção de água dos tijolos.

Tabela 4.11. Absorção de água dos tijolos aos 28, 60 e 90 dias de cura

Absorção dos tijolos (%)			
Incorporação de resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
0	(20,73 ± 0,12)	(20,37 ± 0,12)	(20,10 ± 0,06)
10	(21,85 ± 0,19)	(19,48 ± 2,94)	(15,93 ± 1,84)
20	(22,48 ± 1,09)	(19,25 ± 1,14)	(16,83 ± 0,79)

Analisando a Tabela 4.11, observa-se que os valores de absorção de água dos tijolos também diminuíram em relação ao tempo de cura para cada composição, embora os resultados tenham sido superiores aos da absorção dos corpos-de-prova. Aos 28 dias nenhum resultado ficou dentro das especificações, assim como nos tijolos convencionais aos 60 e aos 90 dias. Os

menores valores observados foram aos 90 dias de cura, com incorporação de 10% e 20% de resíduo (absorção de 15,93% e 16,83%, respectivamente).

A Figura 4.20 apresenta os valores de absorção de água dos corpos-de-prova de solo-cal convencionais e com incorporação de resíduos.

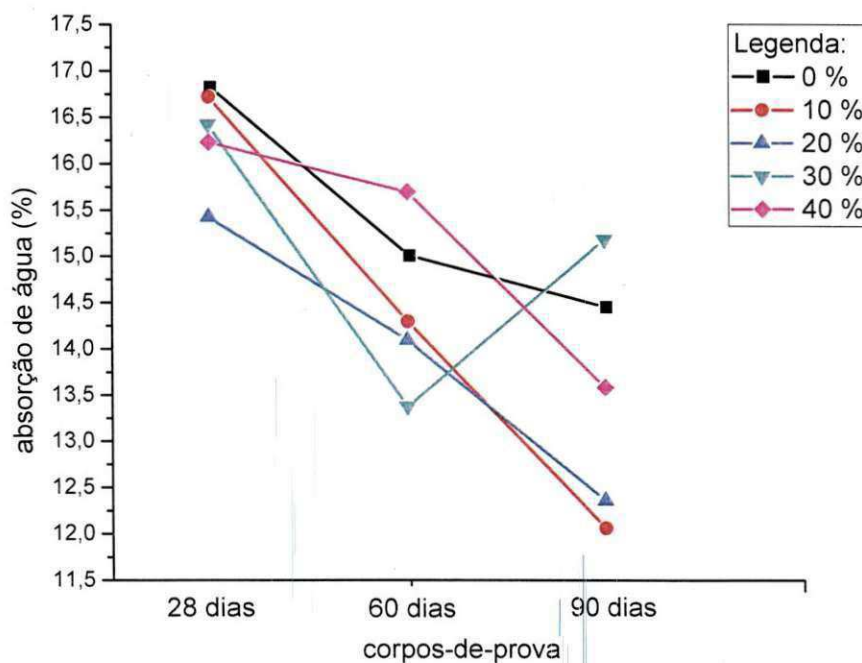


Figura 4.20 – Gráfico comparativo dos valores de absorção de água para os corpos-de-prova de solo-cal e solo-cal-resíduo aos 28, 60 e 90 dias.

Analisando a Figura 4.20, observa-se que apenas para os corpos de prova com 30% de resíduo houve um aumento da absorção no intervalo de 60 a 90 dias (de 13,39% a 15,20%, além do maior desvio em torno da média, da ordem de 2,4%). Verifica-se também que as composições com menores valores de absorção aos 90 dias foram as que obtiveram maiores resultados quanto à resistência mecânica: aos 10% de resíduo, a resistência foi de 5,05 MPa e aos 20% de resíduo a resistência foi de 5,56 MPa (Tabela 4.7). Relacionando o parâmetro da absorção com a resistência, verificou-se que os resultados estão coerentes, uma vez que a absorção de água está vinculada à porosidade do material, no qual quanto menor for o valor desta, maior será sua resistência.

A Figura 4.21 apresenta os valores da absorção de água dos tijolos de solo-cal convencionais e com incorporação de resíduos.

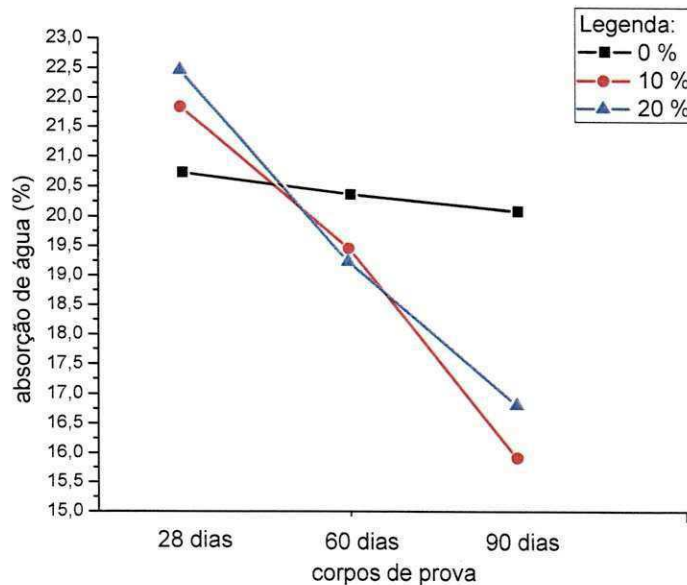


Figura 4.21 – Gráfico comparativo dos valores de absorção de água para os tijolos de solo-cal e solo-cal-resíduo aos 28, 60 e 90 dias.

Analisando a Figura 4.21, verifica-se que a absorção diminuiu para cada percentual de incorporação de resíduo. Aos 90 dias, observa-se que a maior absorção foi do tijolo convencional, corroborando com a menor resistência mecânica para esse período de cura, de 1,13 MPa (Tabela 4.7). Há uma pequena variação nos valores de absorção das outras composições na cura de 90 dias, assim como são pequenas as variações entre as resistências: 1,22 MPa aos 10% e 1,26 MPa aos 20% (Tabela 4.7).

Segundo Silva e Akasaki (2004), a elevação dos valores da absorção dos tijolos quando comparados aos dos corpos-de-prova pode ser analisada sob o parâmetro de condições de compactação. O estudo propõe que os corpos-de-prova de um modo geral apresentam-se mais densos que os tijolos e conseqüentemente com menos vazios internos, o que pode levar à diminuição da absorção de água, pois há menos vazios a serem preenchidos.

A Tabela 4.12 apresenta, para cada período de cura de corpos de prova e tijolos, os maiores valores de resistência à compressão e menores de absorção de água e em que percentuais esses são verificados.

Tabela 4.12. Percentual de resíduo incorporado para maior resistência e menor absorção dos corpos de prova e tijolos.

Amostra	Cura (dias)	RCS (MPa)		Absorção (%)	
		maior valor	incorporação de resíduo	menor valor	incorporação de resíduo
CP	28	1,62	20%	15,44	20%
	60	2,04	30%	13,39	30%
	90	5,56	20%	12,07	10%
tijolos	28	0,92	20%	20,73	0%
	60	1,07	20%	19,25	20%
	90	1,26	20%	15,93	10%

Nos corpos de prova, o maior valor de resistência aos 28 dias de cura ocorreu na composição de 20% de resíduo de caulim; para 60 dias, com 30% e para 90 dias, com 20%. Tais composições também promoveram os menores índices de absorção de água, com exceção dos 90 dias. Nos tijolos, no entanto, dois dos três pontos não coincidiram: aos 28 e aos 90 dias. Deve-se observar que embora exista a relação inversamente proporcional entre resistência mecânica e absorção, alguns valores não coincidiram pelo fato das variações entre as médias serem bastante pequenas de uma composição para outra.

Capítulo 5 – CONCLUSÃO

Após a realização do estudo da resistência de tijolos de solo-cal incorporados com resíduo de caulim nas porcentagens de 10%, 20%, 30% e 40%, foi possível concluir:

- O solo utilizado foi do tipo SM (areia siltosa e misturas de areia e argila mal graduadas) e atendeu às especificações da norma quanto à utilização em blocos de sol-cal;
- A cal apresentou um teor de 95,53% de óxido de cálcio, classificando-se como cal calcítica;
- O resíduo de caulim atendeu aos requisitos da normalização em relação à composição química dos materiais pozolânicos. O resíduo foi composto de caulinita, quartzo e mica e com larga distribuição granulométrica;
- Houve um aumento da resistência à compressão simples dos corpos de prova em todas as composições em relação à cura de 28, 60 até 90 dias;
- A maior resistência observada para os corpos de prova foi aos 90 dias de cura com a incorporação de 20% de resíduo (5,56 MPa). Tal resultado apresentou um grande desvio padrão em relação à média, aproximando do segundo valor mais alto: resistência de 5,05 MPa, verificada aos 90 dias de cura e 10% de resíduo;
- Os valores aos 28 e 60 dias, com exceção do resultado a 30% em 60 dias, foram inferiores ao limite mínimo de 2,0 MPa estabelecido pela norma;
- Nos tijolos, nenhuma resistência atendeu ao mínimo de 2,0 MPa, sendo o maior resultado o do tijolo aos 90 dias de cura com incorporação de 20% de resíduo ($1,26 \pm 0,04$) MPa;
- Verificou-se uma diminuição no valor da resistência dos tijolos quando comparados os corpos de prova. Parece ter sido ocasionada devido à geometria do tijolo que, por ser vazado, favorece a concentração de tensão nas bordas e compromete a resistência da peça;

- O índice de atividade pozolânica foi inferior ao requerido pela norma, tanto para os corpos de prova como para os tijolos. Observou-se nos difratogramas a presença residual de carbonato de cálcio, além da formação de silicato de cálcio;
- A absorção de todos os corpos de prova atendeu às especificações da norma, enquanto que alguns valores nos tijolos foram superiores ao permitido;
- Confirmou-se a relação inversamente proporcional entre resistência e absorção, dado que a diminuição da porosidade promove o preenchimento de vazios e o aumento da resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1985. 8p. BT-111

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica, 1989.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12023 – Solo cimento – ensaio de compactação, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12653 – Materiais pozolânicos, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7182 – Solo – ensaio de compactação, 1986.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8492 – Tijolo maciço de solo-cimento – determinação da resistência à compressão e da absorção d'água.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: ASTM C 618, 3p. In Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1991.

CASTRO, W. A. M. Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CORDEIRO, G.C.; DÉsir, J.M. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. *Cerâmica* 56, 71-76 (2010).

CORDEIRO, G. C. et al. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. *Quím. Nova* vol.32 no.1 São Paulo, 2009.

COUTINHO, A. S. Fabrico e propriedades do betão. Vol. 1, LNEC, 1988.

DIAS, S. L. Incorporação de resíduos de caulim em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil – Avaliação da atividade pozolânica. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

ETAPAS DE OBRAS COM TIJOLO ECOLÓGICO, 2009. Disponível em: <
<http://www.vimagprensas.com.br/etapas-de-obras-com-tijolo-ecologico/> >.
Acesso em: 20 jan. 2011.

FARIAS FILHO, J. Estudo de durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

FARIAS FILHO, J.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaulinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.3, p.437-444, 2000.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION (IS). Specification for burnt clay pozzolan. IS 1344, New Delhi, 1968.

LIMA M.S. et al. Utilização de resíduo de caulim para uso em blocos de concreto sem função estrutural. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2006. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau, SC, pp. 1-12, 2006.

LIMA, R. C. O. Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H.C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. Cerâmica vol.53 no.326 São Paulo Apr./June 2007

MENEZES, R. R. et al. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. Revista Matéria, v. 12, n. 1, p. 226-236, 2007a.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.1-10, jan./abr. 2006

NETO, P. N. de S.; RODRIGUES, J. K. G.; SILVA JUNIOR, F. A. DA; GUIMARAES, L. C. Utilização do resíduo com origem no processamento do caulim como filler em misturas asfálticas. In 35a Reunião Anual de Pavimentação, 2004, Rio de Janeiro. Anais...2004, CD-ROM.

NEVILLE, A. M. Properties of concrete, Fourth Edt, Longmann, 1995.

NÓBREGA, A. F. Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2006.

REZENDE, M. L. de S.; ARAUJO, I. F. de; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, W. R da. Gerência de resíduos de caulim: estudo de viabilidade na produção industrial de blocos de concreto. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 2006, Bauru, SP. Anais. 2006, CD-ROM.

REZENDE, M. L. S. et al. Utilização de resíduo de caulim em blocos de vedação. Rem: Rev. Esc. Minas vol.61 no.3 Ouro Preto July/Sept. 2008

ROCHA, A.K.A. Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria. Campina Grande – PB, Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

ROCHA, A. K. A. et al. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. Rem: Rev. Esc. Minas vol.61 no.4 Ouro Preto Oct./Dec. 2008.

SENA, G. L. S.; MÁRTIRES, R. A. C. Caulim. 2008. Disponível em:<
<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/caulim.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2011.

SILVA, F. A. N. G. da. Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó (RN). Dissertação de Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 70p, 2007.

SILVA, A. P.; AKASAKI, J. L. Produção de tijolos de solo-cal + resíduos agroindustriais. Universidade Estadual Paulista, Ilha Soleira – SP.

SILVA, A. C.; VIDAL, M.; PEREIRA, M. G. Impactos ambientais causados pela mineração e beneficiamento de caulim. Rem: Rev. Esc. Minas vol.54 no.2 Ouro Preto Apr./June 2001

SOROKA, I. Concrete in hot environments. E&FN Spon, National Building Research, Faculty of Civil Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1993.

USCS (The Unified Soil Classification System) – Classificação Unificada dos Solos.

THOMPSON, M.R. Lime Reactivity of Illinois Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. Vol. 92, No. 5, September/October 1966, pp. 67-92