

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

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

**Estudo da durabilidade de tijolos solo-cimento
incorporados com resíduos de demolição
da construção civil**

Suélen Silva Figueiredo

Campina Grande
Data: Fevereiro 2011



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

**Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal
incorporados com resíduos de demolição
da construção civil**

Suélen Silva Figueiredo

Campina Grande – PB
Fevereiro/ 2011

Suélen Silva Figueiredo

**Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal
incorporados com resíduos de demolição
da construção civil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

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

Campina Grande – PB

Fevereiro/ 2011





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

F475e Figueiredo, Suélen Silva.

Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil / Suélen Silva Figueiredo. — Campina Grande, 2011.

106 f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – 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. Tijolo Solo-cal. 3. Resíduo de Demolição. 4. Durabilidade. I. Título.

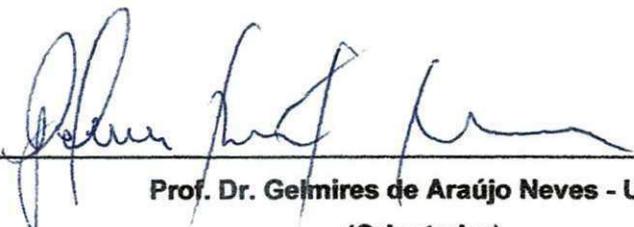
CDU – 624.13(043)

Suélen Silva Figueiredo

**Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de
demolição da construção civil**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL.**

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho - UFCG
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Heber Sivini Ferreira - UFPB
(Examinador Externo)

Campina Grande – PB
Fevereiro/ 2011

Ao Amor que esteve presente em todos os momentos, através do incentivo, apoio e compreensão que foram fundamentais para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda inspiração, tantas oportunidades e bênçãos colocadas em meu caminho.

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Nilza, por me proporcionarem a oportunidade de chegar até aqui.

A quem tanto me apoiou, incentivou e compreendeu, sempre confiando na minha capacidade, indiscutivelmente o pilar central dessa conquista, com todo o amor.

Aos meus orientadores Prof. Gelmires de Araújo Neves e Prof. João Batista Queiroz de Carvalho, por terem acreditado em mim e me dado apoio em um momento tão importante da minha vida.

A Solange uma amiga que ganhei e sem dúvida grande colaboradora para conclusão dessa etapa.

A todos do Laboratório de Engenharia de Materiais e Laboratórios de Engenharia Civil por terem me acolhido e auxiliado sempre que necessário.

A Suellen e Juliana por terem se disponibilizado a me ajudar.

A minhas amigas de sempre Izabelle e Cibelle, que mais uma vez estiveram presente ouvindo meus desabafos, aconselhando e motivando.

A CAPES, pelo apoio financeiro viabilizando a realização desta pesquisa.

A amiga que tive o prazer de encontrar no curso de Mestrado de Engenharia Civil, Sarah, e a todos os outros com os quais compartilhei momentos de descontração e aprendizado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que mais essa etapa fosse concluída.

RESUMO

A indústria da construção civil, além de ser a responsável por mais da metade dos resíduos sólidos urbanos gerados, ainda é considerada o maior consumidor individual de recursos naturais. Os impactos causados por essa indústria têm motivado pesquisas que objetivam desenvolver novas técnicas de reutilização e reciclagem dos resíduos da construção civil para fabricação de materiais alternativos e incentivar o desenvolvimento sustentável. Dentre os materiais alternativos, o tijolo solo-cal possui vantagens como simplicidade de produção, resistência à compressão semelhante aos tijolos convencionais, além de não passar pelo processo de cozimento. A incorporação do entulho da construção civil aos tijolos solo-cal torna-se viável devido à possibilidade desses resíduos, quando finamente moídos, apresentarem propriedades cimentantes, podendo substituir parte da cal utilizada no material. Porém para assegurar confiabilidade nas aplicações desses novos materiais, é fundamental que se avalie sua durabilidade. Essa pesquisa teve como objetivo avaliar a durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. Foram confeccionados corpos-de-prova utilizando o traço 1:10 em proporção de cal:solo, e utilizado o resíduo em substituição parcial a cal, nas proporções de 25%, 50% e 75% para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias. Os materiais utilizados foram submetidos a uma caracterização físico-mineralógica através dos seguintes ensaios: granulometria por peneiramento e difração a laser, análise química, análise termodiferencial, análise termogravimétrica e difração de raios X. O estudo da durabilidade foi realizado utilizando-se o método do envelhecimento acelerado através da avaliação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova, ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. Os resultados obtidos evidenciaram que o aumento do teor de resíduo incorporado ao solo-cal afeta a durabilidade, e em percentuais superiores a 50% compromete o comportamento mecânico. Também ficou evidenciado que em percentuais moderados poderão ser viáveis a incorporação dos resíduos de demolição em tijolos solo-cal para aplicação na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: tijolo solo-cal, resíduo de demolição e durabilidade.

ABSTRACT

Besides being responsible for more than half of the generated urban solid residues, the construction industry is also considered the greatest natural resources consumer. The impacts caused by this industry have motivated researches that aim on developing new techniques for reuse and recycling of the construction residues for the production of alternative materials and promote sustainable development. Among the alternative materials, soil-lime brick has advantages such as simplicity of production, compression resistance similar to the conventional bricks, and not going over the cooking process. The introduction of construction debris to the soil-lime brick becomes feasible because of the possibility that such residues, when finely ground, exhibit cementing properties, which may replace part of the lime used in the material. Despite that, to assure confidence in the applications of these new materials it is crucial to assess its durability. This study aimed to evaluate the durability of soil-lime bricks embedded with demolition residues. Test specimens were prepared using mixes in a 1:10 ratio of lime:soil, and the residue used in partial replacement of lime in the proportions of 25%, 50% and 75% for curing periods of 28, 60 and 90 days. The materials were then applied to physical and mineralogical characterization through the following tests: particle size distribution by sieving, laser diffraction, chemical analysis, thermogravimetric analysis, thermal analysis and X-ray diffraction. The durability study was performed using the accelerated aging method by evaluating the compression strength of the tests specimens used, over the cycles of wetting and drying. The results showed that increasing the amount of residues in the soil-lime affect the durability, and percentages over 50% compromises the mechanical behavior. It was also found that the usage of moderate percentages may make possible to introduce the demolition residues into method of for construction purpose.

KEYWORDS: soil-lime bricks, demolition residues and durability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	20
2.1.1 Origem e composição	21
2.1.2 Impactos ambientais	24
2.1.3 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição	29
2.2 TIJOLOS INCORPORADOS COM RESÍDUOS.....	34
2.3 SOLO-CAL.....	37
2.3.1 Uso e aplicação do solo-cal	38
2.3.2 Composição do solo-cal.....	39
2.3.3 Fabricação do solo-cal.....	42
2.3.4 Tijolos de solo-cal	43
2.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA	44
2.5 DURABILIDADE.....	46
2.5.1 Ensaios de durabilidade.....	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 MATERIAIS.....	52
3.1.1 Resíduo de demolição da construção civil.....	52
3.1.2 Solo.....	52
3.1.3 Cal	52
3.1.4 Água	53
3.2 MÉTODOS	54
3.2.1 Beneficiamento das matérias primas	55
3.2.2 Caracterização dos materiais.....	55
3.2.3 Moldagem dos corpos-de-prova solo-cal incorporados com resíduos de demolição	60
3.2.4 Ensaios Tecnológicos	61

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-MINERALÓGICA.....	65
4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS	75
5. CONCLUSÕES.....	91
6. POSSÍVEIS LINHAS DE PESQUISA.....	94
7. REFERÊNCIAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais presentes nos entulhos	23
Figura 2 – Resíduos de construção (a) e (b); resíduos de demolição (c) e (d) .	24
Figura 3 – Deposição irregular em áreas de proteção permanente	26
Figura 4 – Deposição de resíduos próximos a mananciais.....	27
Figura 5 – Deposição irregular em logradouros públicos	27
Figura 6 – Deposição irregular prejudicando a paisagem.....	28
Figura 7 – Emprego de agregados reciclados de RCD.....	33
Figura 8 – Solo utilizado na pesquisa	52
Figura 9 – Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa.....	54
Figura 10 – Equipamento modelo 1064 da CILAS.....	56
Figura 11 – Ensaio de compactação.....	57
Figura 12 – Difrátômetro de raios – X SHIMADZU XRD-6000.....	59
Figura 13 – Cura dos corpos-de-prova	61
Figura 14 – Ciclo de molhagem e secagem.....	63
Figura 15 – Corpos-de-prova submetidos aos ciclos de molhagem e secagem	63
Figura 16 – Corpo-de-prova submetido ao ensaio de RCS	64
Figura 17 – Distribuição de tamanho de partículas do solo	65
Figura 18 – Distribuição de tamanho de partículas da cal Carbomil.....	66
Figura 19 – Distribuição de tamanho de partículas do resíduo.....	67
Figura 20 – Difração de raios X do solo	70
Figura 21 – Difração de raios X da cal.....	71
Figura 22 – Difração de raios X do RD	72
Figura 23 – Análises termogravimétrica e termodiferencial do solo.....	73
Figura 24 – Análises termogravimétrica e termodiferencial da cal	74
Figura 25 – Análises termogravimétrica e termodiferencial do RD	75
Figura 26 – Difração de raios X da composição solo-cal, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	80
Figura 27 – Difração de raios X da composição solo-cal+25% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	81

Figura 28 – Difração de raios X da composição solo-cal+50% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	82
Figura 29 – Difração de raios X da composição solo-cal+75% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	83
Figura 30 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 28 dias.....	84
Figura 31 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 60 dias.....	86
Figura 32 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 90 dias.....	87
Figura 33 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova solo-cal incorporados com 25% de RD.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração de entulho em alguns municípios brasileiros.....	22
Tabela 2 – Média da geração de resíduo das diferentes fases das construções	23
Tabela 3 – Composições estudadas.....	60
Tabela 4 – Índices de Atterberg e atividade coloidal do solo	68
Tabela 5 – Composição química dos materiais estudados.....	69
Tabela 6 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 28 dias..	76
Tabela 7 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 60 dias..	77
Tabela 8 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 90 dias..	79

ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Albita

AASHOTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ASTM – American Society for Testing and Materials

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

ATD – Análise termodiferencial

ATG – Análise termogravimétrica

BA – Bahia

BR – Brasil

C – Calcita ($CaCO_3$)

CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba

CaO – Óxido de cálcio (cal livre)

CE – Ceará

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

CO_2 – Dióxido de carbono

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DRX – Difração de raios X

EUA – Estados Unidos da América

EVA – Etilene Vinil Acetate

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

IP – Índice de plasticidade

K - Caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

K_2O – Óxido de potássio

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

M – Mica ($KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$)

MG – Minas Gerais

MgO – Óxido de magnésio
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NBR – Norma Brasileira Registrada
NUTEC – Núcleo de Tecnologia Industrial
P – Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
PB – Paraíba
PIB – Produto Interno Bruto
Q – Quartzo (SiO_2)
RCD – Resíduo de construção e demolição
RCS – Resistência a compressão simples
RD – Resíduo de demolição
RPM – revolução por minuto
RS – Rio Grande do Sul
SC – Santa Catarina
SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção
 SiO_2 – Dióxido de silício (sílica)
SP – São Paulo
THABA – Programa Tecnologias da Habitação
 Ti_2O – Óxido de titânio
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USBR – United States Bureau of Reclamation
USCS – The Unified Soil Classification System

SÍMBOLOS

% – porcentagem

° – grau

°C – grau Celsius

Å - Ångstrom

D - diâmetro

D₁₀ – 10% do volume com partículas de diâmetro

D₅₀ – 50% do volume com partículas de diâmetro

D₉₀ – 90% do volume com partículas de diâmetro

hab – habitante

hrs - horas

kg – quilograma

kV – quilo volts

mA – miliamperes

min – minuto

ml – mililitros

mm – milímetro

MPa – megapascal

n° – número

ton – tonelada

µm – micrômetro

θ – ângulo teta

1. INTRODUÇÃO

A industrialização e o desenvolvimento dos centros urbanos têm feito a produção de resíduos aumentar de forma significativa gerando graves impactos ambientais, causados pelo seu volume acumulado, além de deposições inadequadas.

Os resíduos de construção representam cerca de 60% de todos os resíduos sólidos urbanos. Além disso, segundo JOHN (2000), a indústria da construção civil consome entre 15% a 50% de todos os recursos extraídos da natureza, essa quantidade coloca esse setor como o maior consumidor individual de recursos naturais. Alguns impactos são plenamente visíveis e revelam um extenso comprometimento da qualidade do ambiente e da paisagem local, daí a importância de desenvolver novas técnicas de reutilização e reciclagem do entulho e motivar os geradores a diminuir este desperdício.

Esses resíduos quando finamente moídos poderão apresentar propriedades cimentantes e serem reutilizados na construção civil, viabilizando a redução de preços com o desenvolvimento de materiais de construção diversificados. Uma alternativa é a incorporação do resíduo da construção e demolição (RCD) ao tijolo solo-cal.

A utilização do solo como material de construção é observada desde os primórdios da história humana. Além de ser um material abundante na natureza seu emprego é estimulado por possuir baixo custo (LIMA, 2010). Costuma-se incorporar alguns aditivos ao solo, a exemplo da cal, a fim de modificar suas características visando acelerar processos construtivos ou melhorar suas propriedades mecânicas, tornando-o adequado a diversas aplicações na construção civil.

O tijolo solo-cal é um material de construção composto de solo, cal e água. Possui diversas vantagens como a simplicidade de produção, que pode ser feita utilizando-se equipamentos simples e de baixo custo, não necessita mão de obra especializada e tem sua resistência à compressão, semelhante à do tijolo convencional. Além disso, esse tipo de tijolo não passa pelo processo de cozimento dos tijolos convencionais, o que também evita os impactos causados por esse processo de fabricação.

Sabe-se, no entanto, que para se ter um tijolo solo-cal com baixo consumo de cal e de boa qualidade necessita-se de um solo com características adequadas. A incorporação do entulho da construção civil em sua fabricação torna-se viável devido à possibilidade desses resíduos serem processados de modo que se obtenham propriedades cimentantes. Entretanto para que a incorporação do resíduo seja utilizada em tijolos solo-cal para uso em construção civil é necessário, entre outros, o estudo da durabilidade.

Segundo Oliveira (2006) apud Lima (2010), considerando a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil dos produtos da construção civil e os elevados custos das obras civis, torna-se fundamental a estimativa do comportamento do novo produto dentro dos princípios de avaliação de desempenho. Assim, a avaliação da durabilidade certamente é o aspecto mais importante do desenvolvimento de um novo material (LIMA, 2010).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo estudar a durabilidade de tijolos solo-cal, incorporados com resíduos de demolição para uso em construção civil. O estudo da durabilidade foi realizado utilizando-se o método do envelhecimento acelerado (molhagem e secagem), através das propriedades mecânicas, sendo estes parâmetros comparados com os valores de referência e normas da ABNT.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias-primas convencionais (solo, cal) e alternativa (resíduo de demolição da construção civil);

- Caracterizar tecnologicamente através das propriedades físico-mecânicas os tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição;
- Comparar os resultados obtidos, solo-cal incorporados com resíduos, com os tijolos convencionais e normas da ABNT;
- Estudar a durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil, através da técnica de secagem e molhagem.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A construção civil no Brasil, atualmente é responsável por cerca de 15% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, segundo Lima (2010), e com a economia em alta esse crescimento reflete-se diretamente no aquecimento da indústria da construção. No entanto, paralelamente a esse desenvolvimento, os resíduos das construções e demolições que chegam a mais de 50% do total de resíduos gerados no Brasil como menciona Santos (2009) também crescem, e despertam a busca dos pesquisadores por alternativas que diminuam os impactos gerados pela deposição desses resíduos no meio ambiente. Segundo dados da ABRELPE, no ano de 2009, foram coletados 28,5 milhões de toneladas de RCD no Brasil, o que significa um aumento de 14% em relação ao ano de 2008.

Outro problema que se têm enfrentado devido o aumento das construções é o consumo cada vez maior das matérias primas necessárias nessas obras. Tendo em vista a escassez de recursos naturais uma alternativa à geração de resíduos da construção e demolição (RCD) encontra-se em sua utilização dentro da própria construção civil.

Com o objetivo de minimizar os custos das habitações e solucionar parte dos problemas gerados pela produção de RCD, o emprego desses resíduos na composição de tijolos alternativos vem sendo estudado a fim de imprimir confiabilidade e atestar a qualidade desse novo material. De acordo com Akasaki (1999) apud Milani (2005) o solo-cal mostra-se como uma alternativa viável aos tijolos maciços crus, e com teores de cal de até 10% incorporados a mistura há um aumento nos valores da resistência à compressão simples e tração na compressão diametral. Visto que pesquisas recentes apontam para um aumento no desempenho tecnológico dos tijolos solo-cimento incorporados com resíduos da construção civil, a aplicação desses resíduos também aos tijolos solo-cal vem acrescentar alternativas de emprego de tecnologias sustentáveis à indústria da construção civil.

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Resíduo pode ser definido como tudo aquilo que sobra de qualquer substância e segundo Marques (2005) apud Grubba (2009), esse vocábulo passou a ser utilizado a partir de 1960 pelos engenheiros sanitaristas em substituição ao termo lixo.

Os resíduos sólidos são os resíduos no estado sólido ou semi sólido resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. A norma ABNT NBR 10004 (2004), classifica esses resíduos em dois grupos, de acordo com os riscos que estes oferecem ao meio ambiente e à saúde, os de classe I são os perigosos, e os de classe II, são os não perigosos, havendo ainda nos de classe II a divisão entre os não inertes e os inertes.

Na literatura, diversos autores utilizam o termo resíduos da construção e demolição (RCD), outros preferem chamá-los apenas de entulho, não há um consenso na terminologia para o material estudado. Quanto à definição, há discordância não só quanto à abrangência das frações presente como também quanto às atividades geradoras dessas frações (OLIVEIRA, 2004).

O CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, que integra o Ministério do Meio Ambiente (MMA) em sua resolução 307 de 2002, define os resíduos da construção e demolição (RCD) como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terreno, comumente chamados de entulho ou caliça. Os RCD podem ser constituídos de diversos tipos de materiais, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, telhas, concreto em geral, argamassa, solos, rochas, metais, entre outros. Esses resíduos são geralmente considerados como inertes e pertencentes à classe de resíduos sólidos urbanos (GRUBBA, 2009).

Essa resolução, ainda classifica os RCD em quatro classes, de acordo com a possibilidade de estes resíduos serem reciclados ou reutilizados. À classe A, pertencem os resíduos que podem ser reutilizáveis como agregados, tais como tijolos, blocos, telhas, etc. Na classe B, se enquadram os resíduos recicláveis para outras destinações, por exemplo, plásticos, metais e vidros. Os

resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para o seu reaproveitamento, se enquadram na classe C, como é o caso dos resíduos provenientes do gesso. Já os resíduos de classe D são os resíduos perigosos da construção civil, a exemplo de tintas, solventes, óleos, etc.

2.1.1 Origem e composição

Os resíduos da construção civil têm sua origem não só nas demolições e reformas, mas também em deficiências no processo construtivo, como erros ou indefinições na elaboração dos projetos e na sua execução, qualidade dos materiais empregados, perdas na estocagem e no transporte (OLIVEIRA, 2004). De acordo com dados do ano de 2005 do SINDUSCON, estima-se que no Brasil, mais de 50% dos RCD gerados sejam provenientes de canteiros de obras e construções informais.

Apesar de a geração de entulho nas construções ser inevitável, de acordo com Altheman (2002), essa problemática vem sendo combatida, através de medidas como qualificação da mão de obra, maior controle na utilização dos materiais, projetos técnicos e executivos mais coesos, etc.

Há alguns anos não havia quaisquer indicadores para a ocorrência de perdas na construção civil e quase nada se sabia sobre a geração de resíduos de construção e demolição, exceto pela formação de imensas pilhas de entulho depositadas nos ambientes urbanos. No Brasil, atualmente, já é possível, confirmar as significativas perdas e quantificar a geração desses resíduos fazendo uso de uma série de indicadores sobre a geração desses materiais (VIEIRA, 2003). A Tabela 1 apresenta valores relativos à geração de entulho em algumas cidades brasileiras.

Tabela 1 – Geração de entulho em alguns municípios brasileiros

Município	População	Entulho (ton./dia)	Entulho (kg/hab.dia)
Santo André - SP	625.564	1.013	1,61
São José do Rio Preto - SP	323.627	687	2,12
São José dos Campos - SP	486.467	733	1,51
São Paulo - SP	15.000.000	5.000	0,333
Ribeirão Preto - SP	456.252	1.043	2,29
Jundiaí - SP	293.373	712	2,43
Vitória da Conquista - BA	242.155	310	1,28
Salvador - BA	2.200.000	1.700	0,773
Campinas - SP	850.000	1.258	1,48
Florianópolis - SC	285.281	636	2,23
Belo Horizonte - MG	2.010.000	1.200	0,597

Fonte: FERRAZ, (2004)

Oliveira (2004) destaca que a composição do entulho está diretamente ligada à sua fonte geradora, isto é, construções, reformas, manutenção e demolições, bem como da fase da obra na qual foram obtidas as amostras. Também se encontram variações na participação das diferentes origens de entulho de acordo com a região e o país que se está estudando. No Brasil, em que as atividades de construção são intensas, essa relação pode chegar a 1:1 em comparação com os resíduos de demolição (PINTO, 1999 apud OLIVEIRA, 2004). Na Tabela 2, encontra-se a média de geração de RCD na cidade de Campina Grande – PB, de acordo com a fase da obra.

Tabela 2 – Média da geração de resíduo das diferentes fases das construções

Fase da Construção	Média de geração de resíduo (ton/mês)
Concretagem + alvenaria	5,1
Alvenaria + revestimento	33,1
Revestimento	36,2

Fonte: NOBREGA, (2002) apud FARIAS FILHO, (2007)

No Brasil a maior parte do entulho da construção civil, é composto de material inerte e reciclável, como mostra a Figura 1.

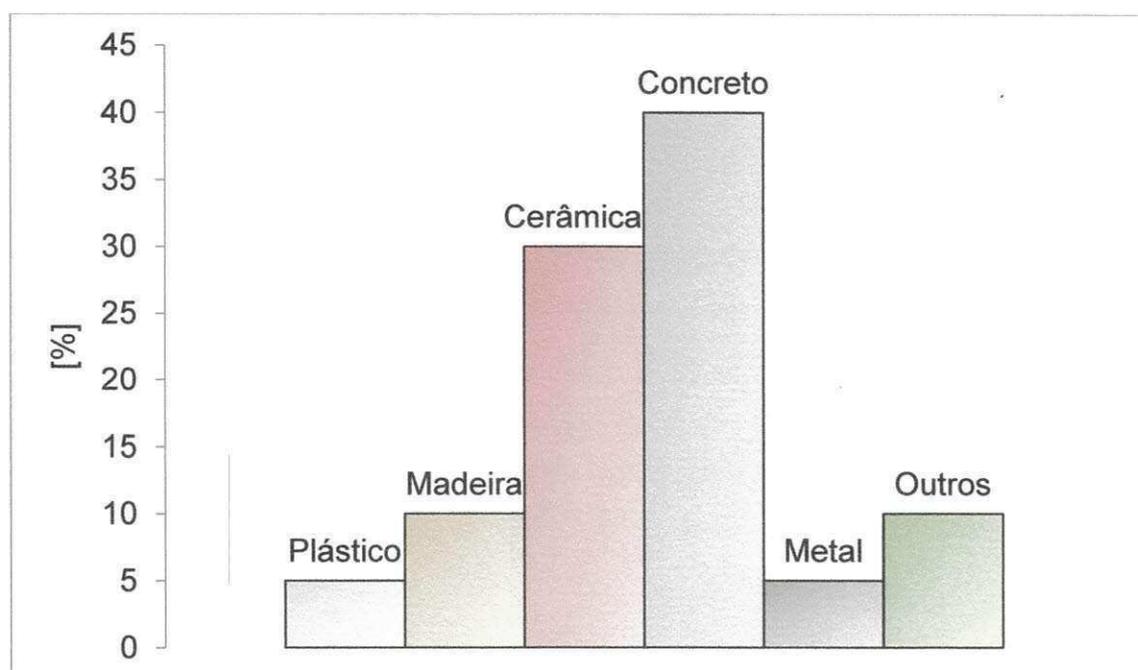


Figura 1 – Materiais presentes nos entulhos

Fonte: NIK, (2005) apud FARIAS FILHO, (2007)

De acordo com Oliveira (2004), o entulho proveniente de demolições é composto predominantemente por materiais cerâmicos e concreto, já o proveniente de canteiros de obra, além desses, também se encontram outros como gesso e madeira. Daí a importância de se ter atenção à escolha do tipo de entulho que se irá utilizar, para que possíveis transtornos possam ser

evitados. Tendo em vista que a presença de materiais como o gesso, por exemplo, pode comprometer o aproveitamento do entulho devido a sua interação com o cimento, bem como a presença de materiais diversos que acabam por contaminar os resíduos provenientes de demolição, quando expostos ao ambiente. A Figura 2 apresenta resíduos de construção e demolição.



Figura 2 – Resíduos de construção (a) e (b); resíduos de demolição (c) e (d)

Fonte: FARIAS FILHO, (2007)

2.1.2 Impactos ambientais

O avanço econômico e o desenvolvimento industrial trouxeram consigo problemas ambientais gravíssimos que vêm se tornando cada vez mais preocupantes, já que o mundo durante anos visou unicamente a questão do capital, negligenciando a poluição resultante dos processos industriais.

As atividades industriais possuem como subproduto os resíduos, que se descartados no meio ambiente sem qualquer cuidado trazem como

consequência problemas graves, sejam eles ambientais ou de saúde pública. Por isso atualmente tenta-se implantar em todas as áreas do desenvolvimento a sustentabilidade. O desenvolvimento sustentável promove a harmonia entre desenvolvimento e meio ambiente, através do adequado manejo dos recursos naturais, da preservação ambiental, do tratamento dos resíduos gerados, além de preocupar-se com a manutenção das boas condições de vida para o futuro.

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, e, por outro lado, comporta-se, ainda, como grande geradora de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos. O setor tem um grande desafio, de descobrir como conciliar uma atividade produtiva desta magnitude com condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente, menos agressivo ao meio ambiente (PINTO et al., 2005 apud VEDRONI, 2007).

Vedroni (2007) menciona o fato de que a indústria da construção civil gera impactos ao meio ambiente ao longo de toda a sua cadeia produtiva. Estes impactos afetam o ar, solo, lençol freático, paisagem, animais, plantas e o habitat humano. Além destes, para Huete et al., (1998) apud Xavier (2001), essa problemática se caracteriza também por um descontrole da quantidade e características dos resíduos gerados, falta de colaboração e indiferença dos agentes que intervêm no processo, sobre as consequências da produção ilimitada de resíduos, além de uma infra estrutura administrativa e física insuficiente para uma adequada gestão dos RCD, que possa permitir que a construção civil seja um processo econômico, respeitando e sendo compatível com o meio ambiente.

Grande parte do consumo dos recursos naturais, que se tornam cada vez mais escassos, deve-se às obras de construção civil. Fiscalizações e punições insuficientes e ineficazes tornam esse problema ainda mais grave, principalmente quando se tem aliado a isso deposições irregulares dos RCD, causando um impacto maior e tendo como consequência o esgotamento de áreas para transbordo.

Para Vedroni (2007), a inexistência de políticas públicas que disciplinem e ordenem os fluxos da destinação dos resíduos da construção civil nas

idades, associada ao descompromisso dos geradores no manejo desses resíduos, tem como consequência a deposição irregular em áreas de proteção permanente (Fig. 3), deposição de resíduos próximos a mananciais (Fig. 4), deposição irregular em logradouros públicos (Fig. 5), deposição irregular prejudicando a paisagem (Fig. 6) e deposição irregular em “bota foras”, causando grandes impactos ambientais.



Figura 3 – Deposição irregular em áreas de proteção permanente

Fonte: VEDRONI, (2007)

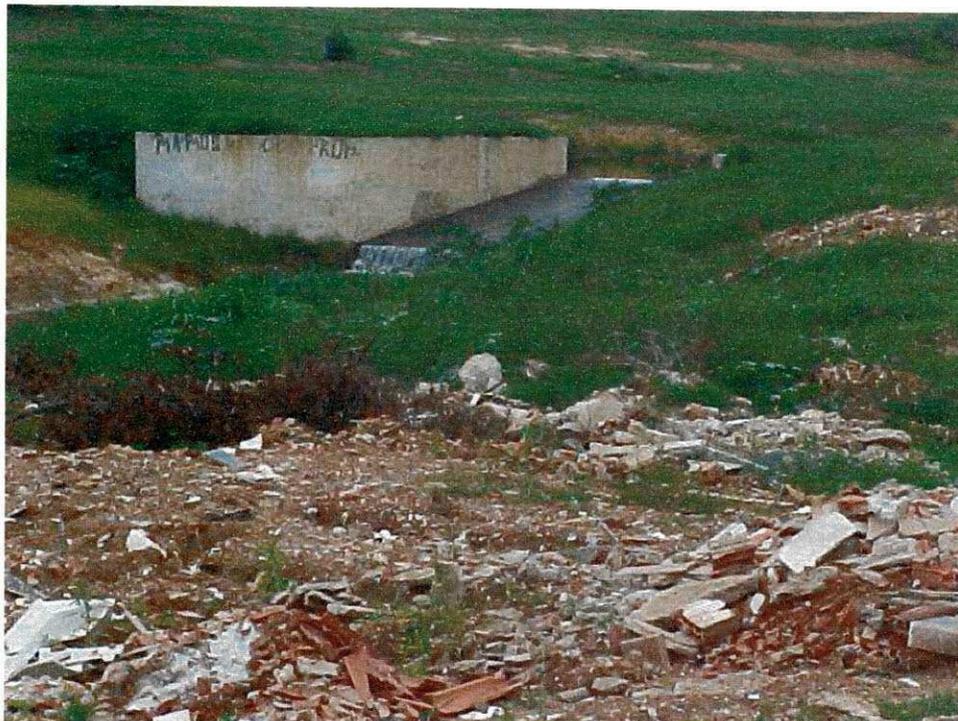


Figura 4 – Deposição de resíduos próximos a mananciais

Fonte: VEDRONI, (2007)



Figura 5 – Deposição irregular em logradouros públicos

Fonte: VEDRONI, (2007)



Figura 6 – Deposição irregular prejudicando a paisagem

Fonte: VEDRONI, (2007)

Além dos impactos sociais e urbanos causados pelos resíduos da construção civil, há ainda a questão econômica, já que os recursos naturais necessários às construções bem como as áreas para a deposição dos resíduos se tornam cada vez mais escassos e conseqüentemente mais onerosos. Os produtos tóxicos presentes nos RCD, como é o caso das tintas, também representam uma ameaça de contaminação aos lençóis freáticos e mananciais próximos.

Diante do grande volume de resíduos gerados pela indústria, a chamada política dos três R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) se coloca como uma alternativa não apenas viável, mas também necessária para a consolidação de uma comunidade sustentável. Como a redução da geração de resíduos implica quase sempre em adequações de processos construtivos, é muitas vezes inviável, técnica e economicamente, para a maioria das pequenas e médias indústrias (LIMA, 2010).

Portanto a reciclagem aparece como um elemento fundamental nessa busca pelo desenvolvimento sustentável, trazendo diversos benefícios, como a

preservação dos recursos naturais, redução no volume de resíduos descartados, redução no consumo de energia e ainda geração de empregos.

Para Capra (2005) apud Lima (2010) a construção da sustentabilidade deve considerar que a própria natureza possui mecanismos para garantir a sustentação da vida. Nela, o que é rejeito para uma espécie, torna-se alimento para outra, da mesma forma deve-se comportar a espécie humana, tendo que os resíduos de uma indústria pode tornar-se matéria prima para outra.

Para que a reciclagem de resíduos proporcione todas as vantagens que lhe podem ser atribuídas é necessário primeiramente que se faça a classificação do resíduo que se deseja utilizar. Em seguida que sejam feitos estudos quanto à viabilidade técnica, econômica e ambiental dessa reciclagem. Sem um diagnóstico preciso que envolva todas essas variáveis corre-se o risco de se causar mais prejuízos que benefícios ao meio ambiente, o que vai de encontro ao propósito do emprego da reciclagem como forma de promover o desenvolvimento sustentável.

Para Farias Filho (2007), os resíduos domiciliares juntamente com o entulho da construção civil são verdadeiras jazidas de matérias primas, que não são aproveitadas. Ficando evidenciada a necessidade da adoção de uma política que incentive o reaproveitamento de resíduos, como o da construção civil, para que se reduzam os impactos ambientais através de sua reutilização e reciclagem.

John (1996) apud Xavier (2001) aborda que a reciclagem de resíduos também pode ser uma fonte de materiais de construção, tornando possível a redução de preços em habitações, com o emprego de produtos reciclados de desempenho comprovado.

2.1.3 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição

A primeira aplicação significativa de entulho reciclado, foi registrada após a segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades europeias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombro ou entulho resultante, foi britado para produção de agregados visando atender a demanda na época (WEDLER e HUMMEL, 1946 apud LEVY, 1997 apud OLIVEIRA

2004). Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem do entulho de construção civil (OLIVEIRA, 2004).

Na reciclagem, o RCD é submetido a um processo que modifica suas propriedades físicas ou físico-químicas, conferindo-lhes características que permitem sua reinserção na cadeia produtiva, como matéria prima.

Para que os resíduos de construção e demolição deixem de ser um problema e passem a ser uma solução, a reciclagem desses materiais constitui-se na técnica mais simples e rentável em termos econômicos e sociais. Além de diminuir os volumosos montantes de entulho depositados nos diversos tipos de ambientes urbanos, a reciclagem ainda pode reduzir o custo na construção civil. A reciclagem do resíduo de construção e demolição transforma um material aparentemente sem uso, em uma fonte de matéria prima que serve tanto para obras prediais e residenciais, como também soluciona os problemas que as municipalidades enfrentam com o gerenciamento desses resíduos (VIEIRA, 2003).

Na construção civil, onde o consumo de matéria prima é altamente impactante na natureza, a reciclagem se insere nesse contexto para a minimização dos impactos ambientais causados pela extração dos recursos naturais não renováveis, uma vez que a construção civil pode reaproveitar grande percentual de materiais de construção que foram descartados (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001 apud VIEIRA, 2003).

Diversos países já reconheceram a necessidade de se procurar alternativas para a utilização dos materiais reciclados provenientes da construção civil. Pesquisas vêm sendo realizadas visando incentivar a utilização desses materiais e padroniza-los, para que se garanta a qualidade e viabilidade da sua reutilização como matéria prima.

Nos EUA, Japão, França, Itália, Inglaterra, Alemanha e outros países a reciclagem de entulho já se consolidou, com centenas de unidades instaladas. Os governos locais dispõem de leis exigindo o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos (OLIVEIRA, 2004).

No Brasil, um estudo sistemático de reciclagem de entulho da construção e demolição teve início com PINTO (1986). Sua pesquisa consistia em estudar o uso do reciclado para produção de argamassas. Segundo PINTO

(1986) & LEVY (1997), as primeiras usinas de reciclagem começaram a produzir, em larga escala, somente no final de 1995 na cidade de São Paulo. A aplicação de agregados reciclados como material para sub-base de uma rodovia também ocorreu em São Paulo em 1991 (CORBIOLI, 1996 apud OLIVEIRA, 2004).

A vantagem ambiental de um processo de reciclagem, somente pode ser dada como certa, após a análise específica. Conforme Cincotto (1988), para que um resíduo possa ser usado na construção civil, ele não deve ser potencialmente nocivo durante a construção e uso da edificação. Neste sentido, Ângulo (2000) indica que a reciclagem também pode causar impacto ambiental, principalmente em atividades de transporte, reprocessamento e resíduos. Ângulo et al., (2001) destacam a necessidade de avaliar-se o risco ambiental da reciclagem de RCD para produção de argamassas e concretos, mesmo apresentando viabilidade do ponto de vista tecnológico e econômico (JADOVSKI, 2005).

Tendo-se que não só o estudo da viabilidade técnica e econômica, mas também a viabilidade socioambiental são imprescindíveis na avaliação do emprego dos materiais reciclados para cada uso específico, o processo de reciclagem dos resíduos de construção e demolição trazem inúmeras vantagens econômicas, sociais e ambientais.

Indiscutivelmente o principal benefício é ambiental, pois além de evitar extrações de matérias primas, evita-se com a reciclagem que mais áreas sejam destinadas para deposição desses resíduos e ainda minimizam-se as consequências das deposições irregulares feitas em locais públicos.

Custos com o descarte do RCD, que são bastante significativos, também são diminuídos quando se opta pela reciclagem trazendo benefícios econômicos consideráveis. Além de se ter nesses resíduos uma fonte de matérias primas que podem ser empregadas em programas para a construção de habitações populares, já que o emprego do material reciclado pode reduzir os custos de construção das unidades habitacionais.

Os materiais provenientes da reciclagem dos resíduos da construção civil devem estar de acordo com os padrões técnicos exigidos pela ABNT, além

de satisfazerem aos requisitos e desempenho esperados quando de sua utilização.

O entulho da construção civil pode ser utilizado na produção de diversos itens para a construção civil e infraestrutura urbana, se faz necessário apenas analisar os efeitos da composição do reciclado e da sua alta taxa de absorção na durabilidade dos componentes. As principais utilizações para o entulho de construção civil são: a aplicação sem nenhum tipo de beneficiamento em aterros ou bota foras ou a aplicação de um processo de reciclagem para obtenção de agregados graúdos e miúdos (OLIVEIRA, 2004).

O RCD reciclado tem sido utilizado como agregado em diversas áreas da construção civil, como argamassas, blocos de vedação, pavimentação e até mesmo na produção de concreto estrutural. A Figura 7 apresenta algumas dessas aplicações.



Calçada

Fonte: PINTO, (1999)



Pré moldados

Fonte: PINTO, (1999)



Aterro

Fonte: PINTO, (1999)



Pavimentação

Fonte: FERNANDES, (2004)

Figura 7 – Emprego de agregados reciclados de RCD

Mesmo com a prática da reciclagem, sempre haverá entulho proveniente do desperdício dos processos construtivos atualmente em vigor. Portanto, a construção civil deve aprimorar a sua forma de trabalho, ao mesmo tempo em que os órgãos públicos deverão adotar medida de incentivo aos construtores para reciclar, no próprio canteiro, todo o entulho mineral gerado. Somente dessa forma poderá ser amenizado um dos maiores problemas do terceiro milênio, que será gerar espaço físico para deposição de volumes crescentes de material descartado (OLIVEIRA, 2004).

2.2 TIJOLOS INCORPORADOS COM RESÍDUOS

Devido a grande quantidade de resíduos de construção e demolição gerados diariamente e o alto potencial de se reutilizar os RCD como matéria prima, na própria cadeia produtiva da construção civil. Diversos estudos e pesquisas vêm sendo realizados com o objetivo de verificar a qualidade e a viabilidade em se empregar essa matéria prima na produção de novos materiais de construção, visando tornar o setor da construção civil mais sustentável e solucionar graves problemas ambientais causados pela deposição desses resíduos na natureza.

Uma aplicação bastante comum do RCD é seu reaproveitamento em aterros, onde neste caso, não se faz necessário nenhum processo de beneficiamento ou seleção prévia. Já na reciclagem após a seleção prévia do material, ele passa por processos de britagem e moagem para que adquira as características adequadas de acordo com o emprego que lhe será dado.

O entulho quando gerado, cria simultaneamente duas porções de entulho: não recicláveis e recicláveis. A parte reciclável (se não for utilizada para aterro) deve sofrer um tratamento, constituído por uma operação de britagem ou de moagem, que permita obter um material cuja granulometria esteja dentro de limites especificados e assim possibilitar seu uso como agregado em argamassa, concreto ou atividade correlata (OLIVEIRA, 2004).

Vedroni (2007) cita a pesquisa de Carneiro et al., (2001) sobre a aplicabilidade de agregados reciclados de RCD em pavimentação. Como conclusão desse estudo os autores afirmam que de acordo com os resultados obtidos, o material estudado apresentou-se adequado para a execução de bases e sub-bases de pavimento.

Miranda (2000) estudou a influência do entulho incorporado em argamassas para revestimento, principalmente com relação à incidência de fissuração. Os resultados obtidos indicaram que o entulho de construção reciclado pode ser utilizado para a produção de revestimentos, em argamassas simples de cimento Portland, obtendo-se bom acabamento superficial e boa resistência de aderência à tração (SOUSA, 2001).

Rosa et al., (2006), constatou com o resultado de suas pesquisas, a viabilidade técnica na aplicação de resíduos da construção como base de fundações superficiais.

O estudo de novas aplicações para os RCD na fabricação de materiais de construção, bem como um aprofundamento das pesquisas já iniciadas são indispensáveis para que se possa assegurar a qualidade desses produtos e difundir-los no mercado da construção civil.

Por outro lado o déficit habitacional existente no Brasil desperta para a necessidade de se construírem habitações populares de baixo custo que favoreçam essa população carente de recursos.

Os tijolos ecológicos ganham espaço nessa temática por não agredirem o ambiente em seu processo construtivo, ao contrário dos tijolos convencionais, largamente empregados nas construções. Além disso, ainda permitem a incorporação à sua matriz de resíduos, que podem melhorar suas propriedades e ainda evitam que esses resíduos sejam descartados no meio ambiente.

Objetivando determinar o teor ideal de resíduos que se pode incorporar aos tijolos ecológicos de modo que suas propriedades mecânicas estejam em conformidade com a normatização para seu uso como blocos de vedação, pesquisas são realizadas avaliando-se o desempenho desses materiais em testes feitos em laboratório. Tem-se mais amplamente estudadas as incorporações de resíduos à matriz solo-cimento, e os resultados obtidos indicam essa alternativa como bastante promissora.

Ferreira (2003) cita pesquisas feitas por Da Fonseca (1993), que estudou a incorporação de cinzas de carvão mineral e cinzas de casca de arroz a tijolos solo-cimento. Obtendo-se para as composições mais satisfatórias que foram de 50% de cinza de carvão mineral + 40% de solo + 10% de cimento e 25% de cinza de carvão mineral + 25% de cinza de casca de arroz + 40% de solo + 10% de cimento, resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura, da ordem de 8,5 MPa e 5,3 MPa, respectivamente, superiores a resistência obtida com tijolos de solo-cimento apenas (3,1 MPa). A absorção de água com a adição desses resíduos também ficou dentro das exigências, ou seja, abaixo de 20%.

A adição dos resíduos de EVA (Etilene Vinil Acetate) provenientes da indústria calçadista, foram estudados por Silva et al., (2008). Foram analisadas várias composições variando de zero a 50% de volume de resíduos incorporado, em relação ao volume de solo. E a composição de 10% de cimento e 10% de resíduos de EVA se mostrou satisfatória, dentro das especificações (NBR 10836/94), para sua utilização em blocos sem função estrutural.

Souza (2006) aprofundou os estudos de adição de resíduos da construção e demolição (RCD) a tijolos solo-cimento, a fim de propor soluções técnicas para reduzir o custo de produção dos tijolos ecológicos de solo-cimento e melhorar sua qualidade técnica, além de propiciar condições para o aproveitamento deste resíduo. Os resultados obtidos mostraram que a adição do resíduo de concreto ao solo melhorou as propriedades mecânicas do solo-cimento, possibilitando redução de custos e produção de tijolos prensados de melhor qualidade, constituindo-se, portanto, numa excelente alternativa para o aproveitamento deste material (LIMA, 2010).

Lima (2010) estudou a durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. Concluiu que existe grande possibilidade de utilização dos resíduos de serragem de granito em solo-cimento, obtendo melhores resultados nos ensaios feitos com corpos-de-prova incorporados com 30% de resíduo.

No que se refere a estudos sobre a incorporação de resíduos ao solo-cal, existe na literatura poucas referências. O que torna ainda mais importante as pesquisas que visem identificar o comportamento desses resíduos incorporados também a esse material.

Silva et al., (2003) desenvolveu um estudo de composições solo + cal + estabilizante + resíduos agroindustriais, objetivando identificar qual o teor máximo desses resíduos que podem ser utilizados na fabricação de tijolos solo-cal sem que fossem comprometidas as propriedades mecânicas do material. Os resíduos agroindustriais utilizados foram bagaço de cana de açúcar, pó de serra e casca de arroz. Porém apenas a composição com o teor de 5% de casca de arroz incorporada ao solo-cal apresentou resultados promissores.

2.3 SOLO-CAL

De acordo com USBR (1998) apud Lopes Junior (2007), a utilização da cal como aditivo no tratamento de solos para as mais variadas aplicações é o mais antigo método de estabilização conhecida. Definem ainda solo-cal como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo, cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Por ser de fácil manuseio e encontrado abundantemente na natureza, o solo há muito já vem sendo utilizado de forma eficiente como material de construção em diversas aplicações.

Há mais de 3.000 anos, solos melhorados já eram usados na construção de templos na Babilônia, esse é, provavelmente, o mais antigo método popular de construção. O uso de solo em edificações foi visto desde grandes construções, como a muralha da China, com aproximadamente três mil quilômetros de extensão até habitações simples, como a Taos Pueblo no novo México, apontada pela UNESCO como uma das favelas mais antigas do mundo e patrimônio mundial (LIMA, 2010).

A taipa é um exemplo do emprego do solo como material de construção, que é utilizada ainda hoje. Cidades brasileiras, como Ouro Preto, ainda possuem exemplos dessas construções que resistem ao tempo e demonstram a eficiência deste material. Até o surgimento do cimento Portland, em 1845, o principal material de construção era o solo.

Segundo Guimarães (1998) apud Bento (2006), a utilização da cal também remota aos primórdios da existência humana. Porém, seu emprego como material de construção só teve início a partir da civilização egípcia.

A utilização expressiva do solo-cal teve seu início de acordo com Guimarães (1971) apud Lopes Junior (2007), em rodovias na década de 50. A partir de então a utilização e as pesquisas com o solo-cal vem se destacando em várias áreas.

O sistema solo-cal, apesar de suas antigas aplicações e intensivas pesquisas, ainda não possui uma normatização. No entanto, centros de tecnologias e pesquisas e até mesmo setores industriais da construção, lançaram cartilhas para a difusão deste sistema, a exemplo da Fundação

Núcleo de Tecnologia Industrial – NUTEC (1985) com o “Manual de Fabricação de Tijolos de Solo-Cal” (MILANI, 2005).

2.3.1 Uso e aplicação do solo-cal

O solo-cal apresenta diversas vantagens quando comparado a materiais convencionais, por ser constituído basicamente de solo, não requerer mão de obra especializada para sua confecção e no caso dos tijolos, não necessita de queima como os tijolos convencionais. Além desses benefícios, do ponto de vista econômico seu uso também se mostra vantajoso, por diminuir desperdícios, possuir como seu principal constituinte o solo, que é um material de baixo custo, além de ser facilmente produzido.

Utiliza-se solo-cal ou solo-cimento quando não se dispõem de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas ao projeto. A estabilização com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizado como base ou sub base de pavimentos (INGLES & METCALFT, 1972 apud LOPES JUNIOR, 2007).

A utilização de solo-cal na construção civil tem sido estudada e aplicada de diversas maneiras, em vários países, inclusive no Brasil:

- Em pistas experimentais de rodovias: Aeroporto de Congonhas (São Paulo), Rodovia Brasília/Fortaleza (Distrito Federal), Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-377/RS), entre outras;
- Proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas: canal de irrigação de Friant-Kern na Califórnia;
- Fundações de edificações de pequeno porte: segundo Thomé et al., 2005 apud Lopes Junior, 2007, estudos recentes realizados no sul do Brasil tem demonstrado a eficiência do solo-cal em casos onde existem camadas de solo de baixa resistência e o nível de carga das edificações seja baixo.

Além das aplicações destacadas anteriormente, outras utilizações para solo-cal também são relatadas na literatura como, por exemplo, para execução

de fundações profundas, na construção de caminhos de serviço, para reforço em aterros, para contenção em escavações, na confecção de blocos para alvenaria ou ainda no fechamento de trincheiras abertas para passagem de canalizações (GUIMARÃES, 1997 apud LOPES JUNIOR, 2007).

2.3.2 Composição do solo-cal

Segundo Lima (2010) é a quantidade de materiais (no caso solo, cal e água), a serem misturados e que pode ser expresso em unidade de massa. A relação entre essas quantidades deverá produzir tijolos de qualidade satisfatória.

Já que ainda não se tem normas para a fabricação do solo-cal, os parâmetros adotados são os mesmos que para a dosagem do solo-cimento. Portanto, essa dosagem deverá fixar a quantidade de cal e água em relação ao solo que serão avaliados através de ensaios em laboratório, análises e interpretação dos dados obtidos tendo em vista critérios estabelecidos de acordo com o emprego que se dará ao material.

Solo

Algumas das principais propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos (ATTOH-OKINE, 1995 apud LOVATO, 2004).

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. É mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (INGLES & METCALFT, 1972 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Por ser o solo o material presente em maior quantidade na mistura solo-cal, deve-se proceder a sua escolha de forma que se tenha o menor consumo possível de cal. Considerando-se a falta de normatização que defina as características necessárias ao solo para a confecção dos tijolos solo-cal e tendo em vista que a cal exercerá no tijolo a mesma função que o cimento, pode-se ter como satisfatório o solo que possua as mesmas características exigidas para a confecção dos tijolos solo-cimento.

De acordo com a NBR 10832 (1989), os solos recomendados para essa utilização devem possuir as seguintes características:

- Passante na peneira ABNT 4,8 mm: 100%;
- Passante na peneira ABNT 0,075 mm: 10% a 50%;
- Limite de liquidez: \leq a 45%;
- Índice de plasticidade: \leq a 18%.

Para determinação de tais características se faz necessário a realização de ensaios de caracterização do solo, tais como, análise granulométrica e ensaio de determinação dos limites de Atterberg. Além disso, o solo a ser utilizado não deve conter material orgânico, já que a presença deste interfere na reação de hidratação da cal.

Os limites de liquidez e de plasticidade (limites de Atterberg) são valores que representam a trabalhabilidade dos materiais cerâmicos, ou seja, representam a transição entre o estado líquido – plástico – semissólido – sólido (CARVALHO, 2004 apud LIMA, 2010). O limite de liquidez (LL) caracteriza a quantidade de água que adicionada ao solo é capaz de causar perda de coesão de suas partículas; e o limite de plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirado progressivamente a umidade do solo, este passa do estado plástico para o estado semi sólido; a razão entre o LL e o LP denomina-se índice de plasticidade (IP). Os limites de Atterberg descrevem o estado físico do solo e estão diretamente ligados as variações de volume por absorção de água (LIMA, 2010).

De acordo com CEPED-THABA (1984) apud Santos (2009), podem-se adotar critérios baseados no teor de areia, tendo em vista a simplificação dos procedimentos de escolha do solo mais adequado à confecção desses tijolos. Assim, recomendam que a especificação do solo com fração passante na peneira de 4,8 mm da ABNT, deve seguir a seguinte composição:

- 45% a 90% de teor de areia;
- 10% a 55% de teor de silte + argila;
- <20% teor de argila;
- <45% limite de liquidez.

Caso o solo disponível não satisfaça a esses parâmetros, tem-se a possibilidade de se fazer sua correção adicionando-se areia ou outro solo. Desde que para tanto se avalie sempre a viabilidade técnica e econômica.

Cal

De acordo com Lovato (2004), a cal é um aglomerante que resulta da calcinação de rochas carbonatadas constituídas por carbonato de cálcio, e/ou carbonato de cálcio e magnésio. Citando Guimarães (1997), o autor afirma que os resultados da calcinação desses carbonatos são respectivamente óxido de cálcio e cálcio magnésio conhecidos como cal virgem ou cal viva.

Deve-se buscar obter os melhores desempenhos do sistema solo-cal utilizando-se composições que possuam menor quantidade possível de cal. Que além de melhorar as características técnicas do material também o torne mais viável economicamente.

Diversos estudos vêm sendo realizados visando à obtenção de dados técnicos que atestem a viabilidade do emprego do solo-cal como material de construção. Na fabricação de tijolos, o solo-cal tem se mostrado promissor com resultados satisfatórios, quando da escolha adequada de seus componentes, bem como os teores de cal.

Castro (1995), apud Lovato (2004), afirma que quando se adiciona cal a um solo fino na presença de água, ocorrem reações químicas em duas etapas distintas: uma etapa rápida durando de horas a dias e outra etapa lenta durando de meses a anos. A etapa rápida se caracteriza por reações químicas

de interação da cal, como trocas catiônicas e floculação-aglomeração. Na etapa lenta é onde se tem o aumento na resistência do material, com as reações pozolânicas, que são responsáveis pela formação de produtos cimentantes. Porém diferentemente destas, as reações de carbonatação que são prejudiciais à composição solo-cal, também são características da fase lenta.

A carbonatação além de formar compostos cimentantes fracos, ainda leva a cal a perder reatividade, já que na forma de carbonato a cal torna-se inerte, prejudicando seu processo de estabilização.

Já as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes (CAMPELLO et al., 2000 apud LOVATO, 2004).

2.3.3 Fabricação do solo-cal

Na preparação do solo-cal, deve-se fazer primeiramente a dosagem, que consiste na escolha do traço, ou seja, da quantidade de solo, cal e água que irá compor o solo-cal.

A NBR 10836/94 especifica os valores mínimo e máximo para a resistência a compressão simples aos 28 dias e absorção de água, considerados satisfatórios e que possibilitam ao solo-cimento ser empregado na fabricação de tijolos. Por falta de norma semelhante que estabeleça esses valores no caso da utilização do solo-cal, adotam-se os mesmos valores limites, que são:

- Resistência a compressão simples aos 28 dias $\geq 2,0$ MPa;
- Absorção de água $\leq 20\%$.

A fabricação do solo-cal compreende a preparação do solo, a mistura e homogeneização dos materiais, a compactação e cura. Na etapa de preparação do solo, deve-se secar o solo ao ar, destorroa-lo e passa-lo na peneira ABNT nº4 (4,8mm).

No misturador devem ser colocados inicialmente os componentes secos que são misturados até serem completamente homogêneos, ou seja, apresentar coloração uniforme. A água deve ser adicionada em forma de chuva (com um regador, por exemplo) garantindo boa distribuição sobre a massa até que atinja umidade ideal, essa verificação pode ser feita manualmente no local da obra com relativa precisão através do teste da mão – que consiste em formar com as mãos um “bolo” que mantenha sua forma inalterada ao abrir a mão (LIMA, 2010).

Após a homogeneização, se dá a forma através de prensagem, à mistura solo-cal, de acordo com a aplicação que se fará do material. Essa fase da fabricação do solo-cal tem grande importância, pois a mistura bem compactada proporciona maior estabilidade ao material, melhorando sua resistência à compressão e diminuindo sua absorção de água. Para que essa compactação seja feita na energia adequada, que conferirá melhores características mecânicas à composição deve-se ter uma correta caracterização do solo que será utilizado, tendo em vista que cada solo possui uma curva de compactação própria que o representa.

A cura da composição solo-cal é a última etapa no processo de fabricação, e bem como a compactação também é determinante nas características mecânicas do material. Existem diversos tipos de cura que podem ser utilizados, porém no caso do solo-cal a temperatura e o teor de umidade exercem grande influência em sua resistência à compressão. Oliveira et al., (1988), afirmou que os resultados de suas pesquisas com tijolos solo-cal, levaram a concluir que existe um tipo de cura mais adequado para determinado teor de cal. E que esse efeito do tipo de cura no resultado da resistência à compressão para diferentes teores de cal, é mais acentuado aos 28 dias, atenuando-se aos 63 dias de cura.

2.3.4 Tijolos de solo-cal

Os tijolos solo-cal dentre outras vantagens também possibilita a redução do uso de argamassas de assentamento e revestimento já que a qualidade e o

aspecto final das peças são notadamente superiores, com maior regularidade dimensional e planicidade de suas faces, podendo até ser utilizado em alvenaria aparente, necessitando apenas de uma cobertura impermeabilizante como acabamento. Além disso, ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram não podem ser reaproveitados, os tijolos ecológicos podem ser moídos e prensados novamente, evitando desperdício (SOUZA, 2006 apud LIMA, 2010).

Apesar de ser um material com grandes potencialidades de utilização, ainda existe um grande preconceito quanto ao seu emprego. Para Grande (2003), esse preconceito se justifica pelo fato de o processo de estabilização envolver variáveis bastante complexas, e por isso para que se obtenha um produto de qualidade se faz necessário o conhecimento de técnicas e um controle tecnológico eficiente.

No Brasil pesquisas começam a ser desenvolvidas com mais frequência dando ênfase à utilização da cal como alternativa ao cimento nos tijolos ecológicos. Essas pesquisas são fundamentais já que o desenvolvimento de produtos mais econômicos pode proporcionar um avanço na construção de habitações de interesse social. Aliado ao déficit habitacional existente, a facilidade em se encontrar solos propícios para a confecção de tijolos solo-cal no Brasil, torna o emprego desse material de construção bastante promissor.

2.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, não possui poder aglomerante hidráulico, mas que, em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos (de cálcio, magnésio e outros), em temperaturas próximas à ambiente, para formar compostos que possuem poder aglomerante (CASTRO, 2008).

Pode-se definir pozolanas também como um material a base de silício e alumínio que reagem com a cal e formam sólidos não porosos, quando misturados com água em proporções corretas. Essas reações são chamadas de reações pozolânicas e ocorrem quando a cal e materiais pozolânicos se

combinam para formar a ligação permanente, covalente, que define uma estrutura sólida.

Para Farias Filho (2007), a aptidão dos materiais pozolânicos de reagirem com a cal e formarem compostos de propriedades aglomerantes, deve-se ao fato de que o silício e o alumínio presentes na sua composição se encontram em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

As propriedades exigidas das pozolanas para um determinado propósito são prescritas pela ASTM 618 (1991) e ABNT 12653 (1992). Para pozolanas são necessárias as seguintes propriedades: um conteúdo mínimo de 70% de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , um máximo conteúdo de 5% de SO_3 , uma máxima perda ao fogo de 12%, e um conteúdo máximo de álcalis (expresso como Na_2O) de 15% (CASTRO, 2008).

O RCD reciclado, composto principalmente de argamassas endurecidas e materiais cerâmicos, quando moído e transformado em material pulverulento, torna-se capaz de reagir com cal na presença da água e, assim, dá origem a um novo aglomerante hidráulico com propriedades semelhante as das cais pozolânicas (FARIAS FILHO, 2007).

Os materiais pozolânicos podem ser classificados como naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são provenientes de rochas, de origem vulcânica ou sedimentar, e que em geral necessitam apenas de uma moagem para serem utilizadas. As pozolanas artificiais são obtidas de processos industriais ou como subprodutos.

Leite e Molin (2002) avaliaram a atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado do RCD. Foi determinado o índice de atividade pozolânica do material cerâmico com a cal e o cimento de acordo com as normas brasileiras. Os resultados obtidos da resistência apontam que há atividade pozolânica do material cerâmico tanto com cimento quanto com a cal (FARIAS FILHO, 2007).

Para Farias Filho (2007), a determinação da atividade pozolânica de um material é bastante difícil devido a inexistência de um critério absoluto. Portanto se faz necessário para utilizar de maneira satisfatória o RCD reciclado como substituição parcial do aglomerante, efetuar ensaios baseados em diferentes aspectos, como: manifestação da resistência mecânica e atividade química.

2.5 DURABILIDADE

Para se ter um material confiável e de qualidade, é necessário não só que se assegurem suas características técnicas iniciais, mas também que essas características se comportem de maneira satisfatória ao longo da vida útil do material, ou seja, que se tenha uma durabilidade adequada à utilização requerida.

Segundo Oliveira et al., (2006) apud Lima (2010), a presença de compostos agressivos misturados aos resíduos sólidos pode não afetar o comportamento mecânico do material à longo prazo, porém eventualmente poderá oferecer riscos à saúde dos usuários, como também prejuízos devido à baixa qualidade do produto alternativo proposto. Por esta razão é fundamental a estimativa do comportamento do novo produto dentro dos princípios de avaliação de desempenho. Considerando a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil dos produtos da construção civil e o elevado custo das obras civis, a avaliação da durabilidade é certamente o aspecto mais importante do desenvolvimento de um novo material (OLIVEIRA et al., 2006 apud LIMA, 2010).

A norma ABNT NBR 6118/2003 classifica a agressividade ambiental, ou seja, sua capacidade de deteriorar as estruturas, em: fraca, moderada, forte e muito forte, onde o risco de deterioração pode ser de insignificante a elevado dependendo do meio ambiente onde esteja inserida a estrutura.

Lima (2010), afirma que uma das exigências para a durabilidade é que, quando utilizada e sob as condições ambientais previstas em projeto, determinada estrutura conserve durante toda sua vida útil, a segurança, a estabilidade e a aptidão em serviços requeridos inicialmente.

John (1987) apud Mesa Valenciano (2004) conceitua alguns termos relacionados à durabilidade:

- Vida Útil – período de tempo que um material, componente construtivo ou edificação, mantém seu desempenho acima dos níveis aceitáveis;

- Degradação – processo no qual um material sofre transformações irreversíveis que implicam perda de qualidade ou valor;
- Agentes ou fatores de degradação – ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causam degradação do material;
- Mecanismos de degradação – formas como os agentes causam uma sequência de mudanças físicas e/ou químicas que levam a perdas nas propriedades esperadas do material;
- Indicadores de degradação – indicativos utilizados para quantificar os mecanismos de degradação que são propriedades mensuráveis e expressam a variação do desempenho de um produto durante seu uso.

Para que os materiais alternativos sejam aceitos e inseridos no mercado é preciso que possuam características tecnológicas comprovadas, isso compreende fundamentalmente conservarem suas plenas condições de uso durante toda sua vida útil. Rojas et al., (2008) apud Lima (2010), destaca que com relação aos solos estabilizados os principais fatores que afetam a integridade estrutural desses materiais, são as condições ambientais, como variações de temperatura, umidade, além das solicitações as quais lhes são impostas.

A durabilidade pode ser avaliada analisando-se alguns parâmetros como perda de massa, variação de volume ou expansão, ao longo do tempo, no qual se submete o material a ciclos de repetição periódica de determinado evento, molhagem/secagem por exemplo. Para isso pode-se recorrer a três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado, ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso. (OLIVEIRA, 2004).

Farias Filho (2007) enfatiza também que no estudo da durabilidade, a resistência à compressão é uma das propriedades que pode servir como parâmetro para quantificação e observação de possíveis variações quando se observa a vida útil de um material inserida em determinado meio ambiente. A variação da resistência à compressão pelo ensaio padrão aos 28 dias é vantajosa por ser um parâmetro aceito universalmente, uma vez que existe relação direta entre a variação da resistência e durabilidade (LIMA, 2010).

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar-se a durabilidade dos materiais alternativos sob diferentes formas de avaliação e utilização. Os resíduos da construção civil e o resíduo de granito reciclado têm sido estudados como argamassas, agregados ou aglomerantes alternativos, e na produção de materiais compósitos. No estudo da durabilidade, esses materiais foram submetidos a diferentes tratamentos e avaliados com relação a diversas condições de exposição. Como não existe um modelo ou metodologia padrão para realização de estudo da durabilidade, os resultados dos trabalhos desenvolvidos até o momento tendem a apontar diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas, por isso justifica-se as diferentes técnicas para avaliação da durabilidade adotada, bem como os resultados obtidos pelos pesquisadores (FARIAS FILHO, 2007).

Em Lima (2010), podem-se encontrar elencadas algumas dessas pesquisas:

- Farias Filho (1999) – utilizou ciclos de molhagem e secagem para estudar o envelhecimento do compósito argamassa – fibra de sisal feito com a adição de metacaulim e tijolo comum queimado;
- Levy (2001) – estudou a durabilidade de concretos produzidos com resíduo de alvenaria e de concreto endurecido, concluindo que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam comportamento equivalente ou superior ao do concreto de referência nos ensaios de carbonatação;
- Silva (2002) – avaliou o comportamento de um compósito produzido com cimento de escória de alto forno reforçado com fibra de celulose empregando a metodologia do envelhecimento acelerado;
- Oliveira (2006) – através do método do envelhecimento acelerado avaliou a durabilidade de compósitos de concreto de cimento Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil, em seus resultados observou que o compósito alternativo com 60% de entulho apresentou uma menor degradação;
- Rojas (2008) – estudou a durabilidade de um solo contaminado e tratado com cimento Portland utilizando a metodologia do

envelhecimento acelerado com seis ciclos de molhagem e secagem, os resultados demonstraram que a variação volumétrica do solo contaminado com crescentes quantidades de resíduos oleoso e encapsulados com 20% de cimento se mostraram estáveis, independentemente da quantidade de resíduos oleosos;

- Xavier et al., (2009) – utilizando o envelhecimento acelerado, analisou o comportamento de cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito, observando-se que para temperaturas de queima de até 700°C o material reduziu as perdas de resistência com o tempo de degradação melhorando suas características de durabilidade.

2.5.1 Ensaios de durabilidade

Como já mencionado, os métodos mais utilizados para se avaliar a durabilidade dos materiais, são: ensaios de durabilidade acelerada, ensaios de durabilidade natural e estudos de durabilidade em uso. Todos com a finalidade de simular a utilização real do material durante sua vida útil. Esses ensaios objetivam obter parâmetros que indiquem como se processa o desgaste e degradação destes materiais.

O ensaio mais eficiente para avaliar a durabilidade é o “ensaio de durabilidade em uso”, uma vez que submete o material às condições reais de exposição e uso. A principal vantagem deste ensaio é a utilização do material em suas condições reais de aplicação, considerando, por exemplo, a fixação, interação com outros sistemas, etc., entretanto requer um longo período de tempo para obtenção dos resultados (LIMA, 2010).

Nos ensaios de durabilidade natural corpos-de-prova são submetidos aos agentes de degradação do ambiente ao qual estariam expostos em condições reais. Este ensaio apesar de apresentar parâmetros bem próximos da realidade é bastante lento e também requer um longo tempo de exposição dos materiais ao meio.

Os ensaios de durabilidade acelerada envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a taxa de reação química. Como na maioria das vezes a correlação destes resultados com os de durabilidade natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa. Não é possível projetar um método de envelhecimento acelerado sem o conhecimento prévio e preciso dos fatores de degradação relevantes (JOHN, AGOPYAN & PRADO, 1997 apud OLIVEIRA, 2004).

Os indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da queda de desempenho do produto em uso. A seleção desse indicador é etapa importante do estudo, pois deve ser de fácil mensuração e preferencialmente correlacionado com o desempenho. Após cada período de degradação deveriam ser repetidos todos os ensaios e avaliações de desempenho relativo às demais necessidades dos usuários, mas este procedimento é dispendioso e desnecessário, porque na maioria das vezes a degradação afeta apenas o desempenho relativo a algumas necessidades (OLIVEIRA, 2004).

No que diz respeito aos solos estabilizados, está normatizado no Brasil, apenas o ensaio de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem para o solo-cimento, através da norma ABNT NBR 13554/96. Esta norma descreve a metodologia utilizada para avaliação do comportamento de corpos-de-prova solo-cimento, submetidos a ciclos de molhagem e secagem, por meio da perda de massa, variação de umidade e volume.

A escolha do critério para medida da durabilidade envolve certa complexidade. Segundo CEPED (1984), a comparação do solo-cimento com materiais convencionais tais como, blocos e tijolos maciços cerâmicos, mostrou que, mesmo os melhores resultados de durabilidade das misturas de solo-cimento ensaiadas foram inferiores aos valores medidos para os materiais tradicionais. Esse fato, em verdade, apenas realçou as qualidades excelentes de durabilidade dos materiais convencionais, mas, de modo algum serviu para inviabilizar o uso do solo estabilizado (ANTUNES, 2008).

Diversos pesquisadores vêm estudando novos materiais que venham a diminuir os impactos ambientais causados pela construção civil, bem como a

incorporação de resíduos a estes. Porém a expansão do conhecimento sobre o comportamento dos materiais alternativos ainda é necessário à segurança e confiabilidade. A durabilidade é um parâmetro indispensável para assegurar a qualidade e a eficiência destes materiais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Resíduo de demolição da construção civil

O resíduo utilizado foi proveniente de demolições ocorridas durante a reforma do Laboratório de Solos I da UFCG/ Campus I, Campina Grande.

3.1.2 Solo

Foi utilizado um solo argiloso proveniente do Município de Lagoa Seca – PB (Fig.8).

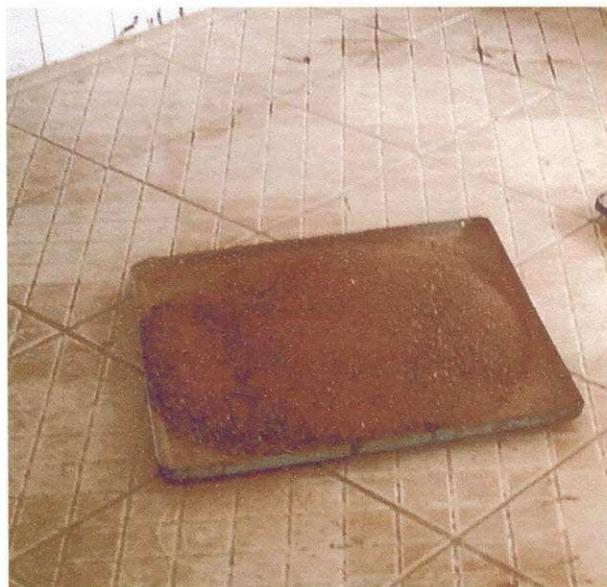


Figura 8 – Solo utilizado na pesquisa

3.1.3 Cal

Foi utilizada uma cal calcítica hidratada conhecida comercialmente como Carbomil, fabricada no Município de Limoeiro do Norte – CE. Segundo Farias

Filho (2007), esta cal é a que possui maior teor de hidróxido de cálcio dentre as cals encontradas no nordeste do Brasil.

A cal Carbomil é comercializada em sacos de papel "Kraft", 3 camadas, de 20 Kg e ao chegar ao laboratório ela foi retirada desta embalagem e colocada em sacos plásticos, lacrada e etiquetada para evitar sua hidratação.

3.1.4 Água

Foi utilizada água potável, fornecida pela concessionária local, CAGEPA (Companhia de Água e Esgoto da Paraíba), para o sistema de abastecimento de Campina Grande – PB.

3.2 MÉTODOS

As etapas realizadas nesta pesquisa estão apresentadas no Fluxograma da Figura 9.

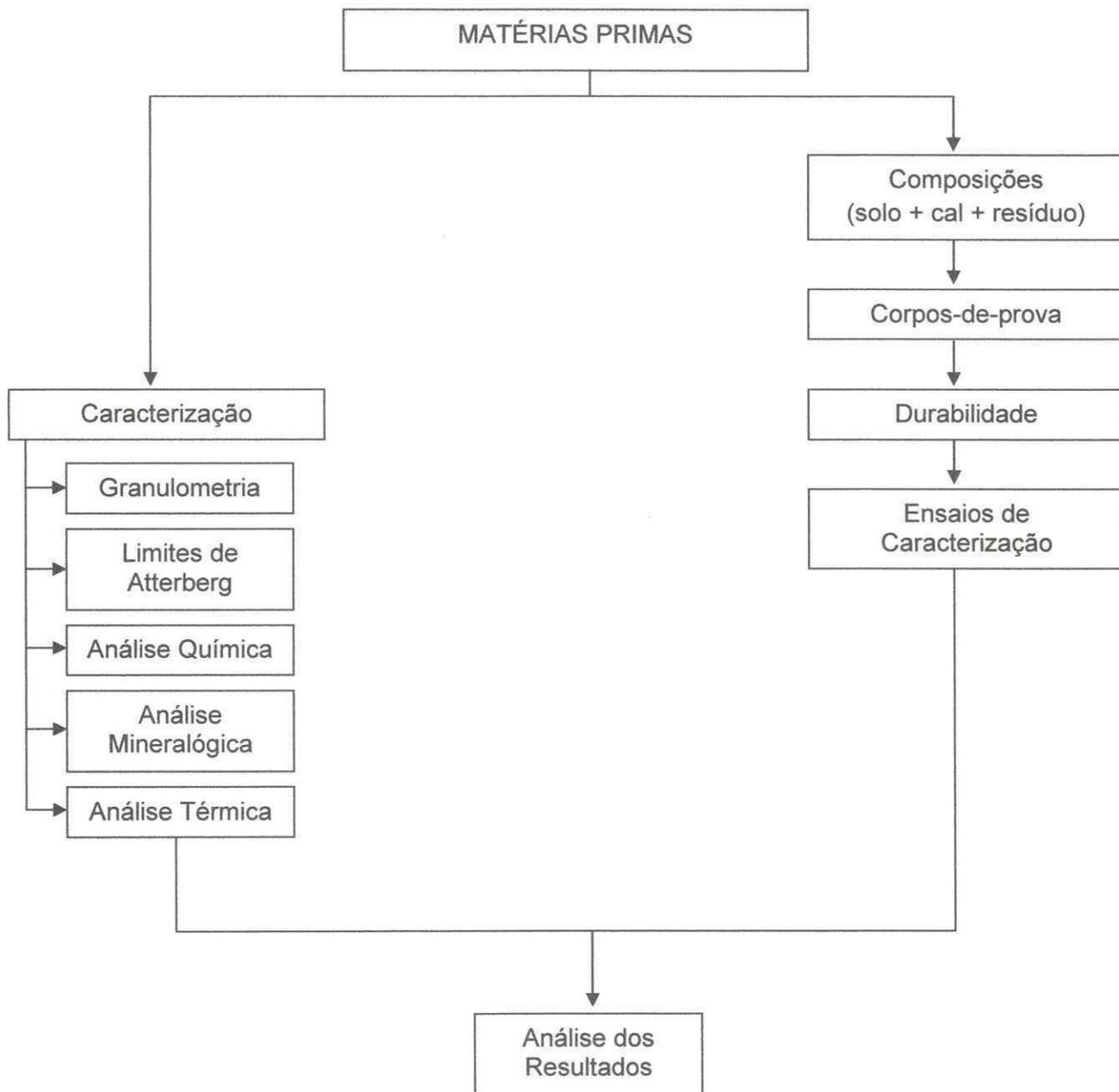


Figura 9 – Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa

3.2.1 Beneficiamento das matérias primas

- **Resíduo de demolição da construção civil**

Inicialmente o resíduo coletado passou por um processo de separação dos materiais indesejáveis, como madeira, plásticos, ferro, etc. Posteriormente o material foi beneficiado através do britador de mandíbula, moinho de galga, e peneirado em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), para obter-se granulometria equivalente a cal. Uma vez preparado, o resíduo foi colocado em sacos, etiquetado e lacrado.

- **Solo**

Após coletado o solo foi seco ao ar, desagregado e peneirado em peneira ABNT nº 4 (4,8mm).

3.2.2 Caracterização dos materiais

O resíduo de demolição, solo e a cal utilizados nesta pesquisa, foram caracterizados através dos seguintes métodos: análise granulométrica por peneiramento e difração a laser, limites de Atterberg, determinação da composição química, difração de raios X, análise termogravimétrica e termodiferencial.

- **Análise granulométrica por peneiramento**

De acordo com a norma ABNT NBR 10832/89, o solo para ser empregado na fabricação de tijolos solo-cimento devem apresentar algumas características granulométricas, que proporcionem um melhor desempenho com menor consumo de aglomerante. Nesta pesquisa a distribuição granulométrica do solo, em estado bruto, foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 7181/84.

As análises foram realizadas no Laboratório de Solos I do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

- **Análise granulométrica por difração a laser**

Neste ensaio, foram realizadas as análises granulométricas do solo, da cal, do resíduo da construção civil e da mistura das composições (solo + cal + resíduo). Esta análise baseia-se na dispersão das partículas do material em fase líquida utilizando-se um processo de medida ótica através de difração de laser, fazendo-se uma relação entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas.

Inicialmente as amostras dos materiais foram passadas por peneira ABNT nº 200 (0,074mm), e em seguida dispersas em 250 ml de água destilada em agitador Hamilton Beach N5000a com velocidade de 17.000 RPM por 10 min. Após agitação a amostra foi colocada em um equipamento modelo 1064 da CILAS (Fig. 10), em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.



Figura 10 – Equipamento modelo 1064 da CILAS

- **Limites de Atterberg**

Os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, chamados de limites de Atterberg, nos fornecem informações sobre o material, quanto à sua trabalhabilidade, variação de volume e absorção de água. Nesta pesquisa os limites de Atterberg do solo, foram determinados de acordo com as metodologias propostas pelas normas ABNT NBR 6459/88 e NBR 7180/84.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos I do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

- **Compactação**

O ensaio de compactação do solo foi realizado conforme proposto pela norma ABNT NBR 7182/86, utilizando-se a energia Proctor normal (Fig. 11). Os resultados obtidos neste ensaio nos dão uma relação entre o peso específico seco máximo do solo e sua umidade ótima de compactação. O objetivo deste ensaio foi determinar o fator água-aglomerante para moldagem dos corpos-de-prova.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Solos I do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

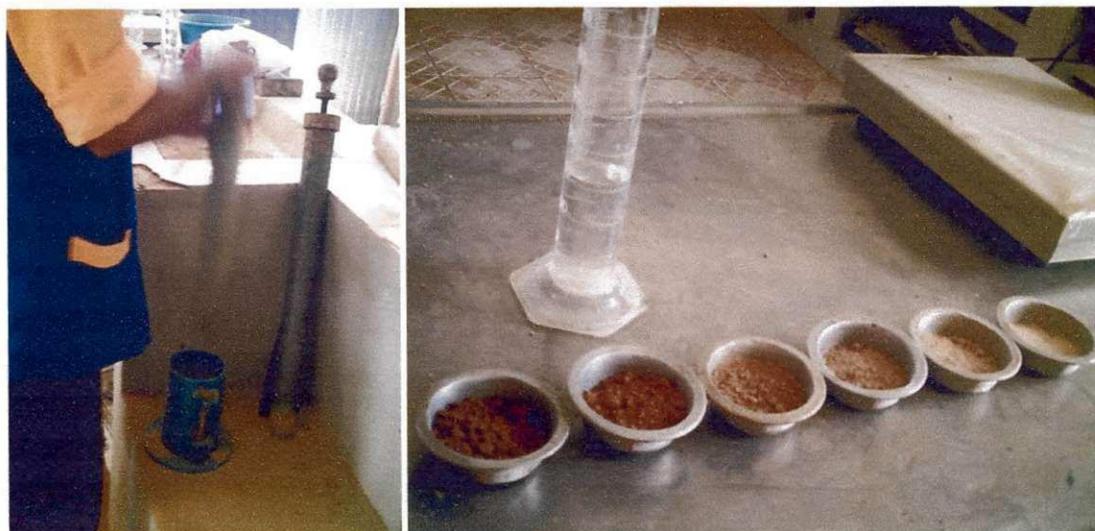


Figura 11 – Ensaio de compactação

- **Análise química**

Para a determinação da composição química dos materiais, as amostras de solo, cal e resíduo de demolição foram inicialmente beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). A técnica utilizada nesta análise foi a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), em equipamento EDX 700 da marca Shimadzu. Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Nesta análise são obtidos os óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Ti_2O , entre outros) (BEZERRA, 2010).

As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

- **Difração de raios X**

A difração de raios X (DRX) consiste em uma análise qualitativa que tem por objetivo identificar as fases mineralógicas presentes na amostra.

As amostras da cal, solo e resíduo foram passadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o Difratorômetro SHIMADZU XRD-6000 (Fig. 12). A radiação utilizada foi $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30 mA, modo fixe time, com passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 1,0 segundo.

As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

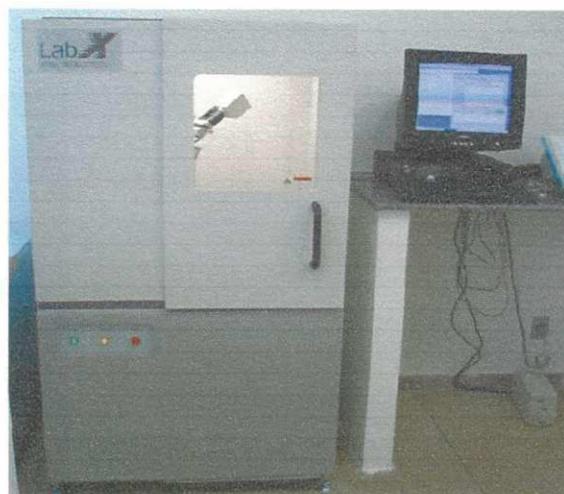


Figura 12 – Difratorômetro de raios – X SHIMADZU XRD-6000

- **Análise térmica diferencial e termogravimétrica**

As amostras da cal, solo e resíduo como também os corpos-de-prova moídos, após o ensaio de durabilidade foram passados em peneira ABNT N°200 (0,074 mm). Para a realização do ensaio, utilizou-se um equipamento da BP Engenharia, com razão de aquecimento de 12,5°C/min. A temperatura máxima nas análises foi de 1000°C e o padrão utilizado na análise termodiferencial (ATD) foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

O ensaio de ATD consiste no aquecimento simultâneo da amostra a ser analisada e uma substância termicamente inerte. Continuamente são medidas as temperaturas da amostra e do material inerte, e a diferença entre as temperaturas dos materiais indicam as reações ocorridas na amostra em consequência do aumento na temperatura. As reações endotérmicas e exotérmicas ocorridas durante o ensaio aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial resultante.

Para a análise termogravimétrica, seguindo-se os mesmos parâmetros da ATD, mede-se periodicamente o peso das amostras que estão sendo ensaiadas e obtêm-se a relação entre a variação da massa das amostras em função da temperatura. Essa variação ocorre devido à perda de água ou CO_2 ou ganho de oxigênio, durante as reações ocorridas.

As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

3.2.3 Moldagem dos corpos-de-prova solo-cal incorporados com resíduos de demolição

Os corpos-de-prova foram moldados utilizando-se moldes cilíndricos, com dimensões básicas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, tomando-se como referência a norma ABNT NBR 12024/92. O traço utilizado para a confecção desses corpos-de-prova foi de 1:10 (cal + resíduo:solo). O fator água/aglomerante foi de 1,98 e determinado através da umidade ótima de compactação. Foram confeccionados corpos-de-prova de referência, sem adição de resíduo e com incorporação de 25%, 50% e 75% de resíduo de demolição (RD) em substituição a parte do aglomerante (cal), como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Composições estudadas

Traço	Composição
1:10	cal + solo
	75% de cal + 25% de RD + solo
	50% de cal + 50% de RD + solo
	25% de cal + 75% de RD + solo

Após desmoldagem os corpos-de-prova foram colocados em sacos plásticos e etiquetados. Foi utilizado o processo de cura úmida, onde os corpos-de-prova ensacados foram colocados em tanques, cobertos por areia úmida e submetidos a períodos de cura de 28, 60 e 90 dias (Fig. 13).



Figura 13 – Cura dos corpos-de-prova

3.2.4 Ensaio Tecnológicos

- **Ensaio de durabilidade**

O estudo da durabilidade foi feito através do método de molhagem e secagem. Os corpos-de-prova moldados com solo-cal (referência) e os incorporados com 25%, 50% e 75% de resíduo em substituição ao aglomerante (cal) foram submetidos à análise.

Para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias, foram moldados 56 corpos-de-prova por composição, representando 224 corpos-de-prova ensaiados por composição, num total de 672 para os três períodos de cura.

Adaptações/modificações na norma que estabelece os procedimentos do ensaio de durabilidade para solo-cimento, norma ABNT NBR 13554/96, foram realizadas baseadas no procedimento utilizado por Oliveira (2004) e Farias Filho (2007). Com esse ensaio objetiva-se avaliar a durabilidade de

tijolos convencionais e alternativos, utilizando-se como indicador de degradação a resistência à compressão simples.

A análise da durabilidade foi realizada nas seguintes etapas:

1. Esperou-se o período de cura dos corpos-de-prova;
2. Uma amostragem de 4 corpos-de-prova de cada composição foi retirada do tanque, secado em estufa por aproximadamente 5 horas a uma temperatura de 60°C e determinada a resistência média à compressão simples inicial. Outra amostragem com a mesma quantidade de corpos-de-prova foi deixada no tanque para realização do ensaio mecânico no final de todos os ciclos, representando a resistência média à compressão simples final;
3. Os corpos-de-prova restantes foram submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem, ao fim de cada ciclo uma amostra de 4 corpos-de-prova foi retirada e submetida ao ensaio de compressão simples, representando a resistência média à compressão simples do ciclo;
4. Por fim, os corpos-de-prova que estavam no tanque e não foram submetidos ao envelhecimento foram submetidos ao ensaio mecânico.

Dessa forma, dentre os 56 corpos-de-prova representantes de cada composição nos períodos de cura estabelecidos, 8 representaram o comportamento do material quando não submetido ao fator de degradação (início e final) e os outros 48 foram submetidos ao ensaio de durabilidade, correspondente a 12 ciclos de molhagem e secagem, conforme apresentado na Figura 14.

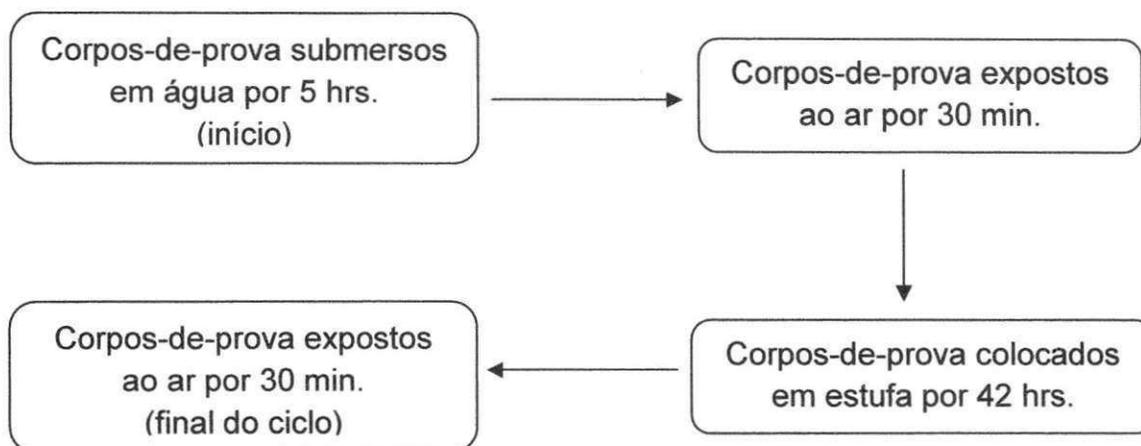


Figura 14 – Ciclo de molhagem e secagem

O método modificado de molhagem e secagem utilizado constituiu-se de 12 ciclos, onde cada ciclo correspondeu a: 5 horas de submersão dos corpos-de-prova em água; 30 minutos de exposição ao ar; 42 horas de secagem em estufa à temperatura de 60°C e 30 minutos de exposição ao ar dos corpos-de-prova (Fig.15);

As Figuras 15 e 16 mostram os corpos-de-prova sendo submetidos ao processo de envelhecimento (molhagem e secagem) e ao ensaio de resistência a compressão simples (RCS).



Figura 15 – Corpos-de-prova submetidos aos ciclos de molhagem e secagem



Figura 16 – Corpo-de-prova submetido ao ensaio de RCS

O ensaio para determinar a resistência à compressão simples foi realizado nos corpos-de-prova, seguindo as prescrições indicadas pela NBR 12025 (ABNT, 1990). A prensa utilizada foi a SHIMADZU AG-IS com célula de 100 KN.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-MINERALÓGICA

Nas Figuras 17, 18 e 19 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica acumulada do solo, da cal e do resíduo utilizados nesta pesquisa.

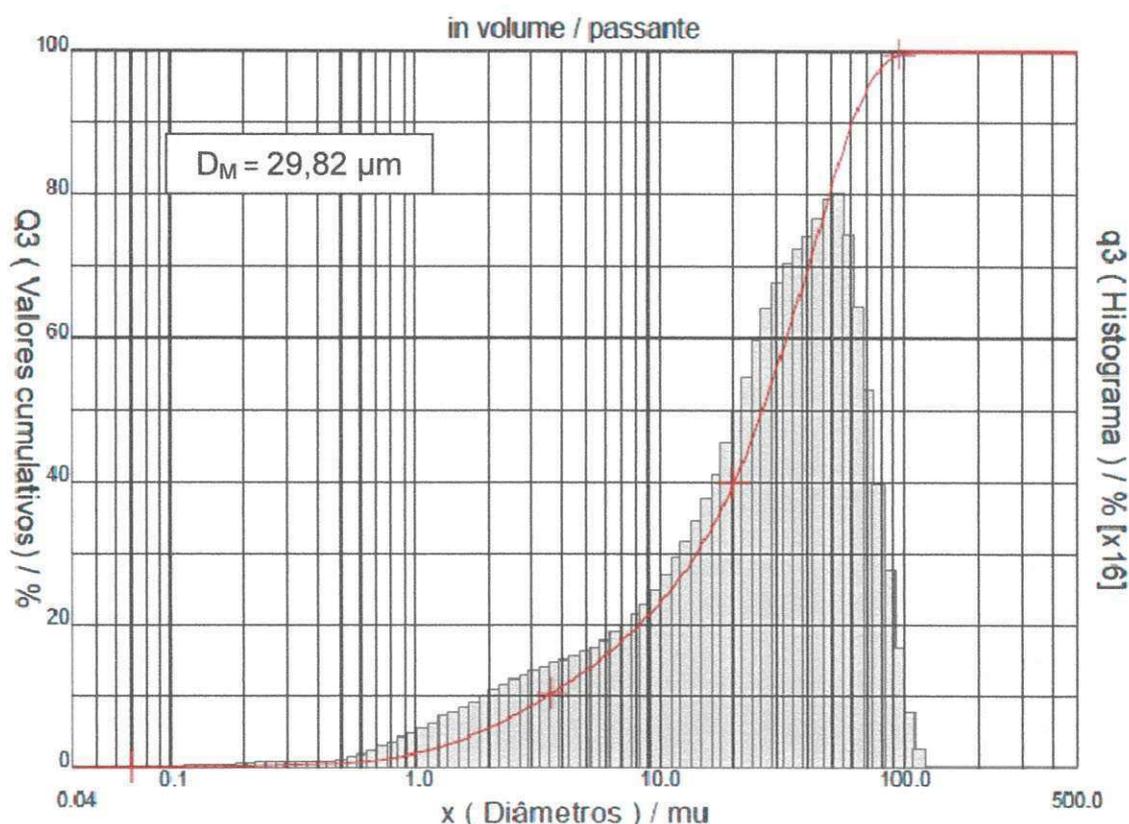


Figura 17 – Distribuição de tamanho de partículas do solo

De acordo com a Figura 17, observa-se que a curva apresenta comportamento modal com ampla distribuição de partículas, entre 0,2 μm – 110 μm , com diâmetro médio de 29,82 μm com D_{10} de 3,45 μm , D_{50} de 26,21 μm e D_{90} de 61,05 μm . A massa acumulada equivalente a fração argila do solo (< 2 μm) foi de 5,55%, a fração silte (2 μm < X < 60 μm) foi 83,77% e a fração areia (60 μm < X < 2000 μm) de 10,68%.

Em relação a distribuição granulométrica por peneiramento o solo, teve como resultado 35,31% de massa acumulada passante na peneira ABNT N° 200 (0,075 mm) e 100% na peneira ABNT N° 4 (4,8 mm). Estes valores estão de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 10832/89.

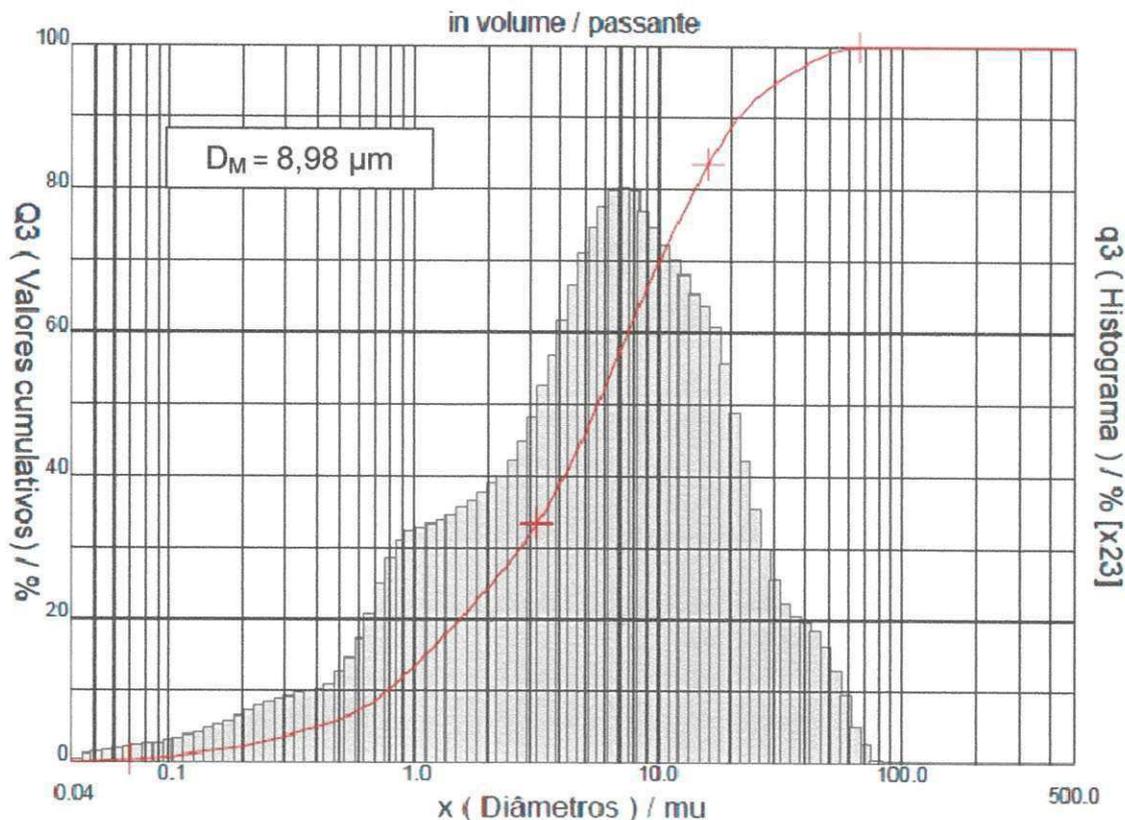


Figura 18 – Distribuição de tamanho de partículas da cal Carbomil

Analisando a Figura 18, observa-se que a curva apresenta comportamento na faixa modal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre 0,04 μm – 90 μm , com diâmetro médio de 8,98 μm com D_{10} de 0,79 μm , D_{50} de 5,66 μm e D_{90} de 21,12 μm . A cal apresentou massa acumulada equivalente a fração argila (< 2 μm) de 24,14%, a fração silte (2 μm < X < 60 μm) de 75,66% e a fração areia (60 μm < X < 2000 μm) de 0,2%.

O resíduo estudado apresentou na sua composição teores aproximadamente de 80% de resíduos cerâmicos (alvenaria + revestimento) e 20% de resíduos de concreto e argamassa.

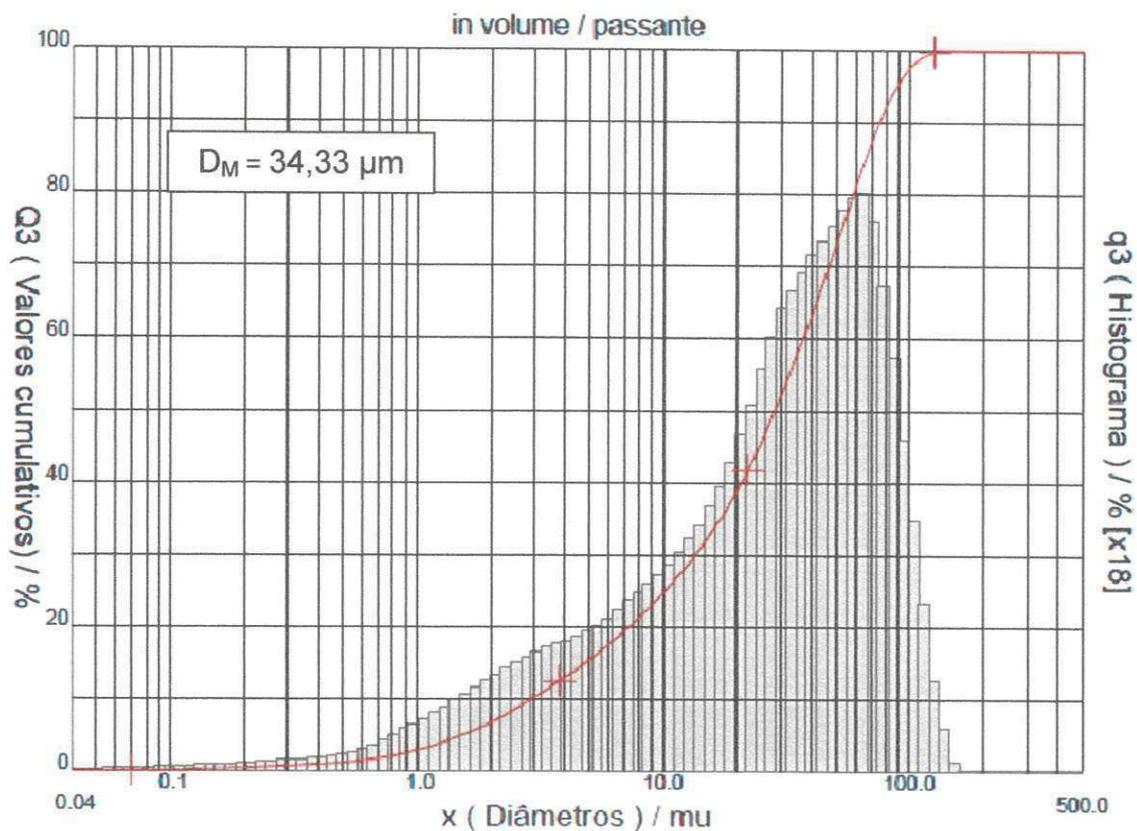


Figura 19 – Distribuição de tamanho de partículas do resíduo

Analisando a Figura 19, verifica-se que a curva apresenta comportamento modal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,05 \mu\text{m}$ – $150 \mu\text{m}$, com diâmetro médio de $34,33 \mu\text{m}$ com D_{10} de $2,92 \mu\text{m}$, D_{50} de $28,33 \mu\text{m}$ e D_{90} de $74,84 \mu\text{m}$. A cal apresentou massa acumulada equivalente a fração argila ($< 2 \mu\text{m}$) de $6,84\%$, a fração silte ($2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$) de $74,03\%$ e a fração areia ($60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$) de $19,13\%$. Farias Filho (2007) obteve resultado semelhante na curva de distribuição granulométrica em estudo realizado com resíduos de construção originados nas fases de alvenaria e revestimento.

A Tabela 4 apresenta os índices de Atterberg e atividade coloidal, obtidos para o solo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 4 – Índices de Atterberg e atividade coloidal do solo

Material	Solo
Limite de Liquidez (%)	33,3
Limite de Plasticidade (%)	22,4
Índice de Plasticidade (%)	10,9
Índice de Atividade Coloidal	1,96

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que o solo apresentou limite de liquidez (LL) de 33,3%, limite de plasticidade (LP) de 22,4% e índice de plasticidade (IP) de 10,9%. Estes valores estão de acordo com o que estabelece a norma ABNT NBR 10832/89, que recomenda utilizar-se na confecção de tijolos solo-cimento, um solo que possua limite de liquidez máximo de 45% e índice de plasticidade máximo de 18%.

Segundo Pinto (2006), quando se deseja ter uma ideia sobre a atividade da fração argila do solo, ou seja, o potencial da argila em conferir plasticidade e coesão ao solo, os índices de Atterberg devem ser comparados com a fração argila presente. É o que mostra o índice de atividade coloidal, que é obtido através da relação entre o IP e a fração argila do solo (porcentagem inferior a 2 μm). A argila presente em um solo pode ser considerada ativa, quando seu índice de atividade coloidal apresenta-se maior que 1,25. O solo utilizado nesta pesquisa pode então ter sua fração argila considerada ativa, com um índice de atividade coloidal de 1,96.

De acordo com os resultados da análise granulométrica e limites de Atterberg o solo teve sua classificação segundo a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) como A-4: solo siltooso e como SC: areia argilosa e mistura de areia e argila mal graduada, de acordo com a Classificação Unificada dos Solos (*The Unified Soil Classification System – USCS*).

A Tabela 5 apresenta as composições químicas do solo, cal e do resíduo.

Tabela 5 – Composição química dos materiais estudados

Determinações (%)	Solo	Cal	RD
SiO ₂	51,43	0,92	52,45
Al ₂ O ₃	37,08	0,48	20,96
K ₂ O	2,06	0,37	2,85
MgO	1,09	2,27	2,35
Fe ₂ O ₃	6,51	0,23	6,51
CaO	1,03	95,53	12,68
SO ₃	0,13	0,11	0,65
TiO ₂	0,56	-	1,00
Outros Óxidos	0,11	0,09	0,55

Analisando os resultados contidos na Tabela 5, observa-se que o solo apresenta elevados teores de sílica e alumina correspondendo a 51,43% e 37,08% respectivamente, provenientes da fração argilosa, feldspato e sílica livre. Observa-se também a presença do óxido de ferro correspondendo a 6,51%, esse óxido é o responsável por conferir cor avermelhada ao solo. Em percentuais menores 2,06% e 1,03%, o K₂O e o CaO, provenientes da mica e do carbonato de cálcio. O óxido de magnésio representou 1,09% e os demais óxidos valores abaixo de 1%.

Analisando a composição química da cal, verifica-se um elevado teor de óxido de cálcio (CaO) de 95,53% e baixo teor de óxido de magnésio (MgO) de 2,27%. Os demais componentes representam 2,2% na composição da cal, equivalente às impurezas. De acordo com essa composição, a cal utilizada nessa pesquisa classifica-se como cal calcítica, já que nesse tipo de cal encontram-se um teor de CaO entre 95% e 98% e de MgO de no máximo 2% a 3%.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5 para a composição química do resíduo de demolição (RD), verifica-se que este apresenta elevado teor de dióxido de silício (SiO₂) de 52,45%, óxido de alumínio (Al₂O₃) de 20,96% e o óxido de ferro (Fe₂O₃) de 6,51% proveniente dos materiais cerâmicos e argamassas. Tendo em vista que esses óxidos representam mais

de 70% da composição química do resíduo e este ainda apresenta teor de SO_3 de 0,65% que é inferior a 7%, de acordo com a norma ABNT NBR 12653/92 e ASTM C 618 (1991), esse material possui composição química favorável à atividade pozolânica.

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam respectivamente os difratogramas do solo, da cal e do resíduo utilizados na pesquisa.

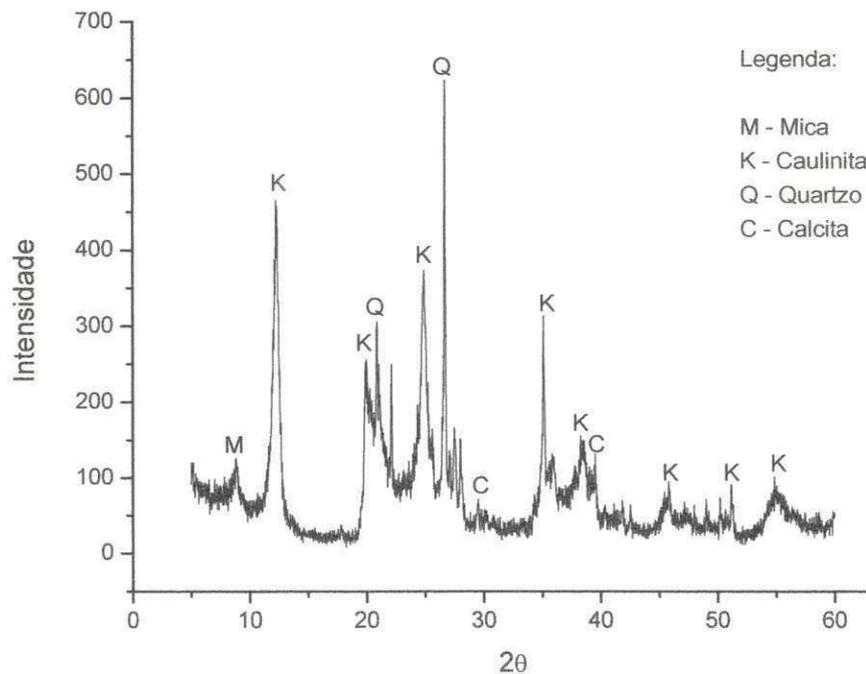


Figura 20 – Difração de raios X do solo

Observando o difratograma do solo da Figura 20, verifica-se que o solo apresentou as seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å; calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å e menor quantidade de mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada por 10,04 Å. Esses resultados estão de acordo com a composição química da Tabela 5.

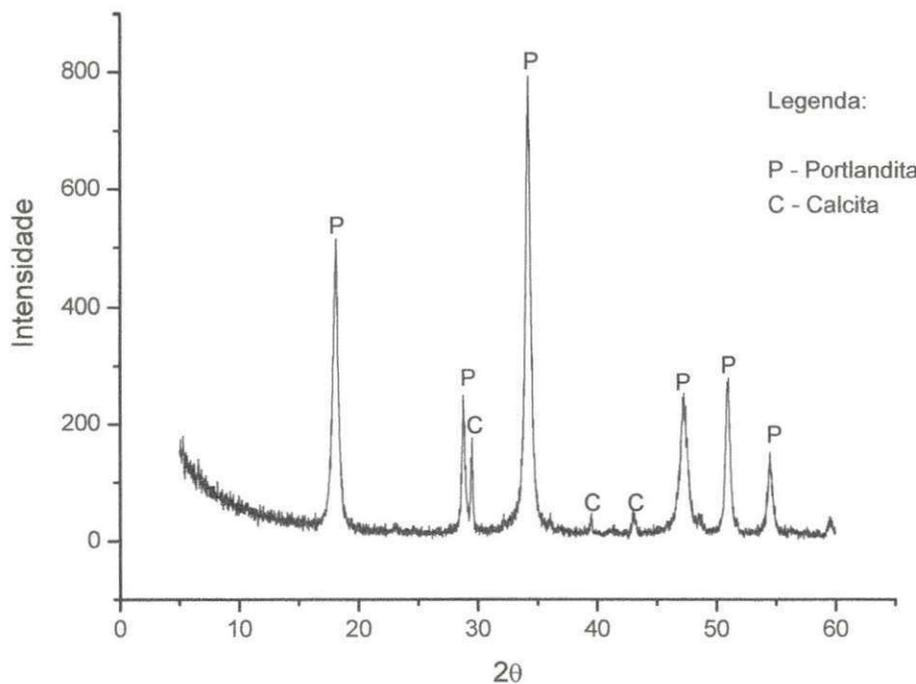


Figura 21 – Difração de raios X da cal

Analisando o difratograma da cal (Figura 21), verifica-se que a cal apresentou as seguintes fases mineralógicas: portlandita (Ca(OH)_2), caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å e calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å. Esses resultados estão de acordo com a composição química apresentada na Tabela 5.

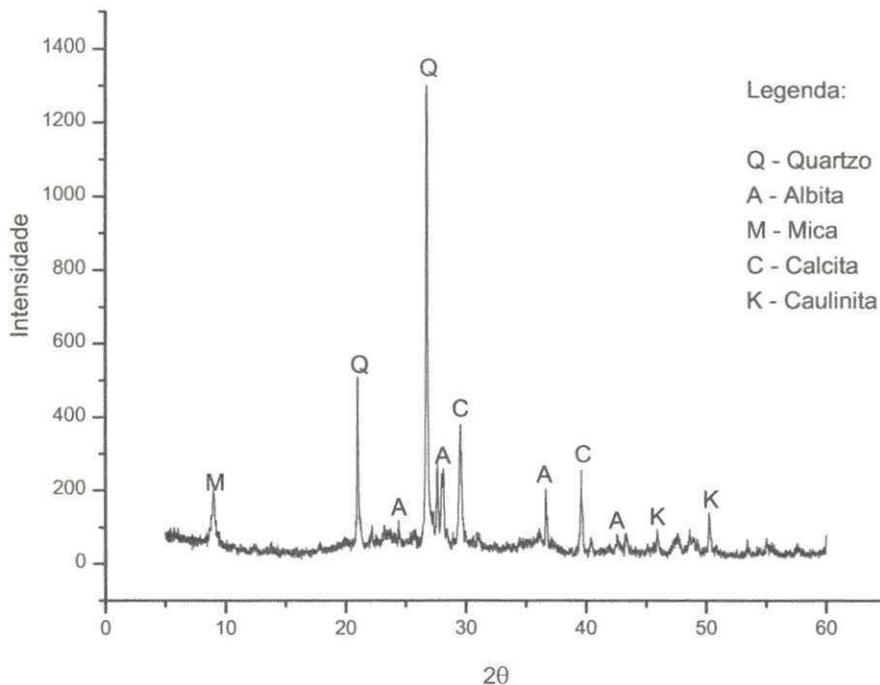


Figura 22 – Difração de raios X do RD

Observando o difratograma do resíduo de demolição da Figura 22, verifica-se que o resíduo apresentou as seguintes fases mineralógicas: albita ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), caracterizada pela distância interplanar de 3,24 Å; caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,33 Å e menor quantidade de calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å e mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada por 10,04 Å.

Nas Figuras 23, 24 e 25 estão apresentadas as curvas das análises termodiferenciais e termogravimétricas do solo, da cal e do resíduo estudados.

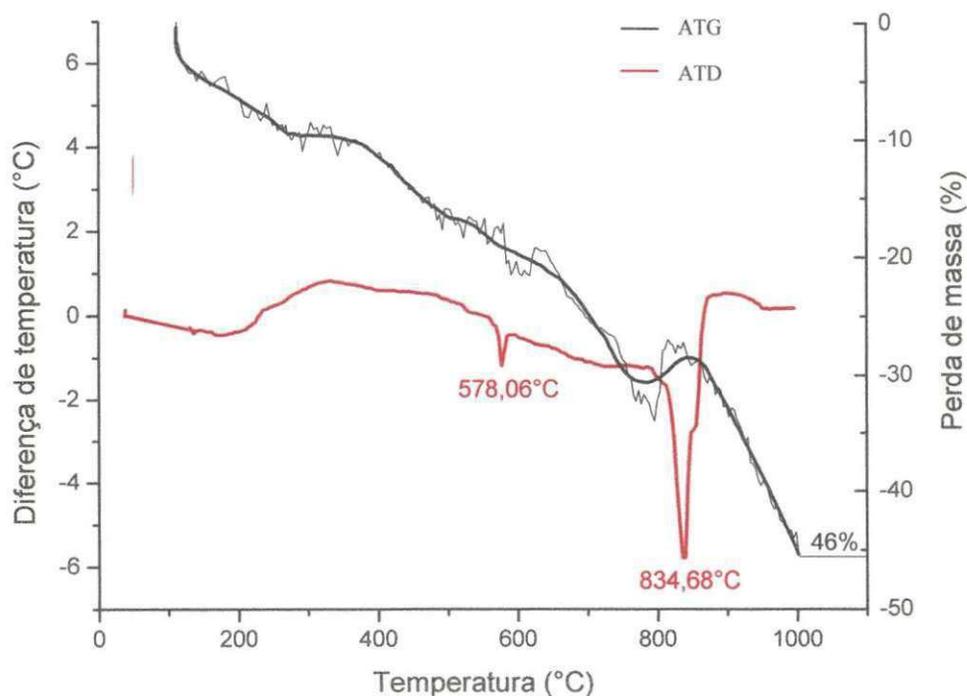


Figura 23 – Análises termogravimétrica e termodiferencial do solo

Analisando as curvas da Figura 23, verifica-se que a amostra apresentou pico endotérmico de pequena intensidade a 578,06 °C correspondente a presença de hidroxila da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e de grande intensidade a 834,68 °C correspondente a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3 , calcita). Para análise termogravimétrica tem-se uma perda de massa de 46% correspondendo as perdas de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e calcita (CaCO_3).

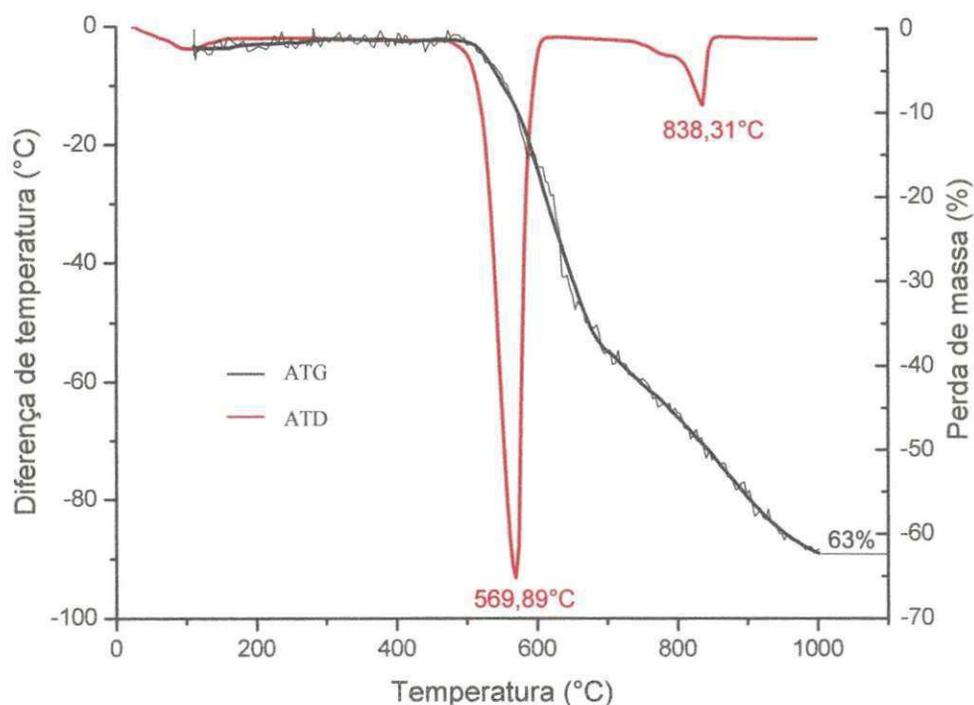


Figura 24 – Análises termogravimétrica e termodiferencial da cal

Analisando as curvas da Figura 24, verifica-se que a análise térmica diferencial apresentou pico endotérmico de grande intensidade a 569,89 °C correspondente a presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e de pequena intensidade a 838,31 °C correspondente a presença do carbonato de cálcio (CaCO_3 , calcita). Na curva da análise termogravimétrica observa-se que houve perda de massa total de 63% correspondendo as perdas de massa do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e da calcita (CaCO_3).

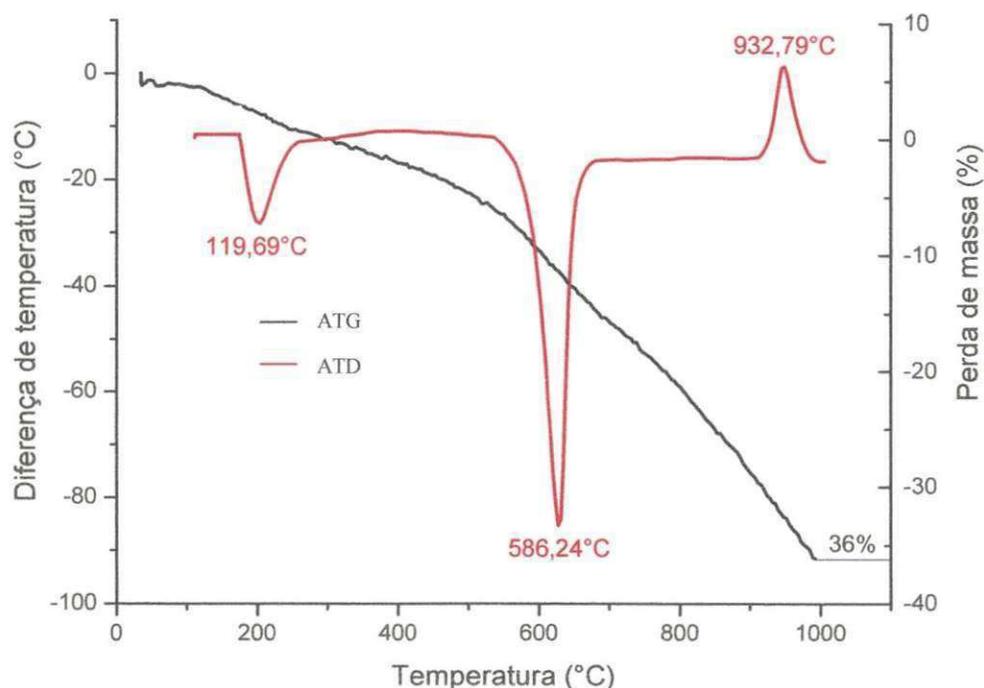


Figura 25 – Análises termogravimétrica e termodiferencial do RD

Analisando as curvas da Figura 25, verifica-se que a amostra apresentou pico endotérmico de pequena intensidade a 119,69 °C caracterizando a presença de água livre e adsorvida, pico endotérmico de grande intensidade a 586,24 °C correspondente a presença de hidroxila ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), transformando em metacaulinita, a partir de 620°C até 900°C, e pico exotérmico de pequena intensidade a 932,79 °C provavelmente relacionado a nucleação de mulita. Para análise termogravimétrica tem-se uma perda de massa total de 36% correspondendo a perda de água livre e adsorvida e a perda de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Nas Tabelas 6, 7 e 8, estão apresentados os valores de Resistência à Compressão Simples das composições estudadas ao longo dos ciclos de molhagem e secagem, para 28, 60 e 90 dias de cura.

Tabela 6 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 28 dias

Ciclo	Resistência à Compressão Simples (MPa)			
	Composições			
	Solo-Cal	Solo-Cal + 25% de RD	Solo-Cal + 50% de RD	Solo-Cal + 75% de RD
Início	1,53	3,43	1,88	1,24
1º	1,77	2,35	2,30	1,27
2º	1,92	2,67	2,53	0,98
3º	2,55	2,93	2,58	0,70
4º	2,69	3,59	2,39	0,86
5º	2,80	3,39	2,28	0,86
6º	3,12	3,33	1,89	-
7º	3,26	3,21	1,91	-
8º	3,96	2,94	2,18	-
9º	2,99	2,65	2,01	-
10º	2,38	2,82	2,00	-
11º	2,26	3,42	1,85	-
12º	2,21	3,74	1,93	-
Final	2,43	2,37	2,35	0,89
NBR 10836/94.....				≥ 2,0 MPa

Analisando os dados da Tabela 6, pode-se verificar que para os corpos-de-prova que iniciaram os ciclos de envelhecimento aos 28 dias de cura, as composições solo-cal incorporadas com 25% e 50% de resíduo de demolição, permaneceu ao longo dos ciclos com a resistência dentro do limite especificado pela norma ABNT NBR 10836/94, sendo os melhores resultados para os corpos-de-prova incorporados com 25% de RD. Observa-se também que a composição solo-cal incorporada com 75% obteve valores bem abaixo do

exigido pela norma, além de não resistirem aos 12 ciclos de molhagem e secagem. Os resultados iniciais para os corpos-de-prova aos 28 dias de cura apresentaram valores superiores aos obtidos por Silva et al., (2003) em estudo realizado com resíduos agroindustriais incorporados aos tijolos solo-cal.

Tabela 7 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 60 dias

Ciclo	Resistência à Compressão Simples (MPa)			
	Composições			
	Solo-Cal	Solo-Cal + 25% de RD	Solo-Cal + 50% de RD	Solo-Cal + 75% de RD
Início	3,91	3,03	2,19	1,09
1º	3,55	2,94	2,34	1,16
2º	4,71	3,05	2,47	0,98
3º	5,47	3,17	2,53	0,72
4º	4,64	3,70	2,70	0,74
5º	4,61	3,84	2,71	0,77
6º	4,19	3,85	2,87	-
7º	4,46	3,94	2,67	-
8º	4,30	3,34	2,40	-
9º	4,04	3,77	2,25	-
10º	3,90	3,83	2,23	-
11º	3,83	4,53	1,87	-
12º	3,27	3,50	2,04	-
Final	4,44	3,07	2,07	1,02
NBR 10836/94.....				≥ 2,0 MPa

Analisando os dados da Tabela 7, pode-se verificar que os corpos-de-prova de referência, solo-cal, e aqueles com incorporação de 25% de resíduo

de demolição apresentaram RCS superior à especificada pela norma ABNT NBR 10836/94 durante todo o ensaio de envelhecimento acelerado, o que evidencia que mesmo expostos a condições desfavoráveis eles ainda mantiveram suas condições de aplicabilidade como tijolos sem função estrutural. Os corpos-de-prova solo-cal incorporados com 50% de RD apresentaram resistência bem próxima à exigida pela norma ABNT NBR 10836/94, enquanto que os incorporados com 75% de resíduo além de não resistirem aos 12 ciclos de molhagem e secagem, ainda apresentaram resistência à compressão simples inferior à especificada. Os resultados iniciais para os corpos-de-prova aos 60 dias de cura apresentaram valores superiores aos obtidos por Silva et al., (2003) em estudo realizado com resíduos agroindustriais incorporados aos tijolos solo-cal.

Tabela 8 – Resistência à Compressão Simples (RCS) ao longo dos ciclos de envelhecimento para os corpos-de-prova após o período de cura de 90 dias

Ciclo	Resistência à Compressão Simples (MPa)			
	Composições			
	Solo-Cal	Solo-Cal + 25% de RD	Solo-Cal + 50% de RD	Solo-Cal + 75% de RD
Início	3,95	4,91	3,11	0,72
1º	3,93	4,31	3,45	0,88
2º	4,02	4,67	3,58	0,97
3º	4,24	5,42	3,69	1,06
4º	4,06	5,62	3,93	1,27
5º	4,13	5,80	3,99	1,30
6º	4,50	6,11	3,97	1,09
7º	4,67	6,25	4,10	0,98
8º	4,84	6,59	4,35	0,94
9º	5,20	6,42	4,10	0,87
10º	5,37	6,30	3,31	0,83
11º	5,52	6,11	3,45	0,77
12º	5,92	5,90	3,29	-
Final	4,85	5,60	3,43	0,87
NBR 10836/94.....				≥ 2,0 MPa

Analisando os dados da Tabela 8, pode-se verificar que os corpos-de-prova solo-cal e solo-cal com incorporação de 25% e 50% de RD apresentaram valores da RCS bem superiores ao exigido pela norma, que é de 2,0 MPa, em especial a composição com 25% que chegou a valores de resistência superiores a 6,0 MPa. Porém para os corpos-de-prova solo-cal com incorporação de 75% de resíduo da construção civil, apesar de terem resistido

a 11 dos 12 ciclos de molhagem e secagem, apresentaram resistência à compressão simples inferior à especificada pela norma NBR ABNT 10836/94.

A Figura 26 apresenta os difratogramas dos corpos-de-prova solo-cal (referência) para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

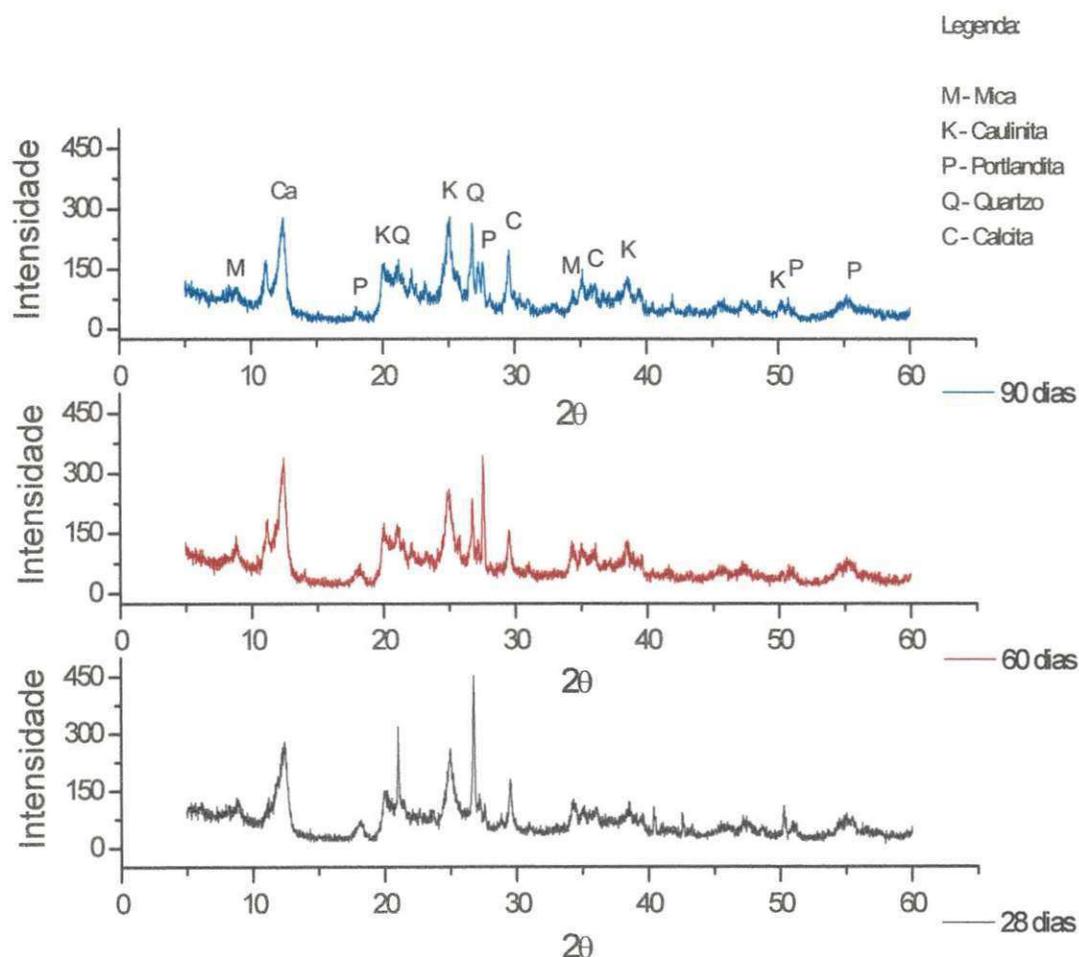


Figura 26 – Difração de raios X da composição solo-cal para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias

Analisando a Figura 26, observa-se a presença das seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å; mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada por 10,04 Å; calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å e menor quantidade de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de

3,34 Å. Verifica-se também que com o aumento do período de cura dos corpos-de-prova, houve um aumento na intensidade dos picos de calcita, e uma diminuição na intensidade dos picos de portlandita, evidenciando a reação pozolânica.

A Figura 27 apresenta os difratogramas dos corpos-de-prova solo-cal com a incorporação de 25% de resíduo de demolição para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

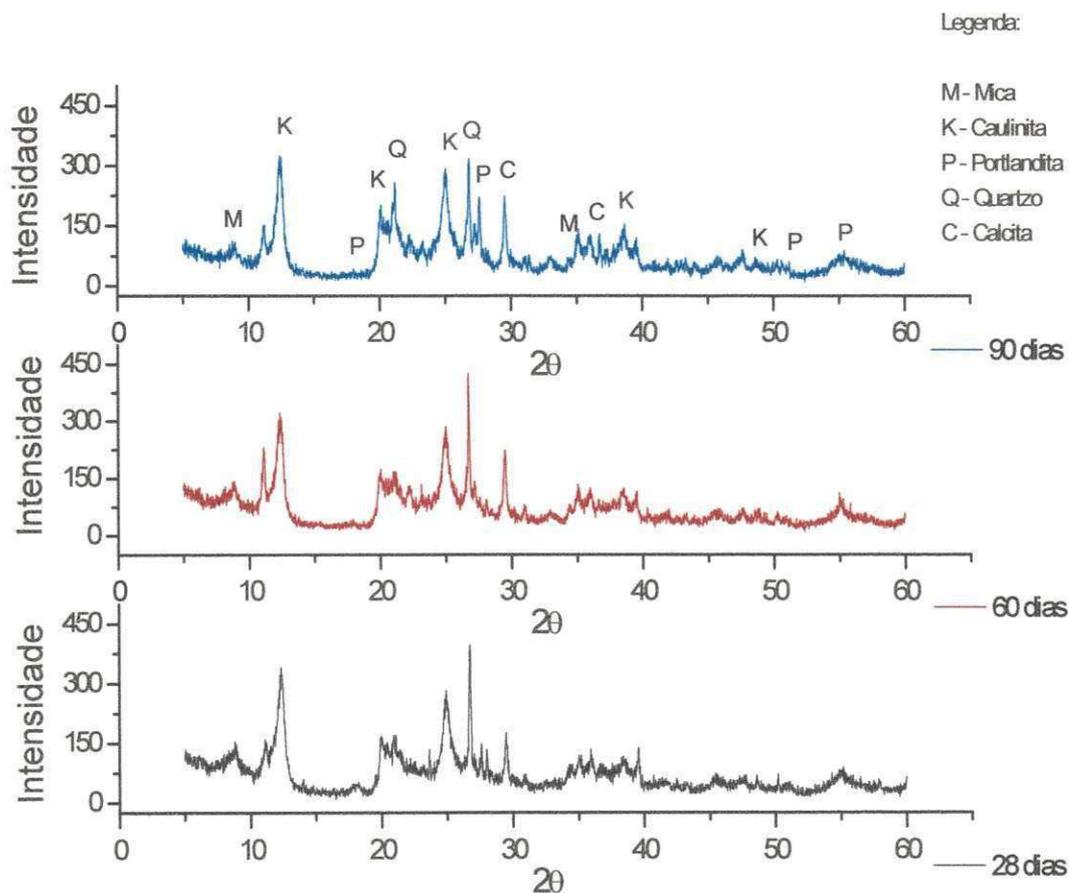


Figura 27 – Difração de raios X da composição solo-cal+25% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias

Observa-se na Figura 27, a presença das seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å; mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada por 10,04 Å;

calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å e quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å. Verifica-se que com o aumento do período de cura dos corpos-de-prova, houve um aumento na intensidade dos picos de calcita e uma diminuição da portlandita, evidenciando a reação pozolânica.

A Figura 28 apresenta os difratogramas dos corpos-de-prova solo-cal com a incorporação de 50% de resíduo de demolição para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

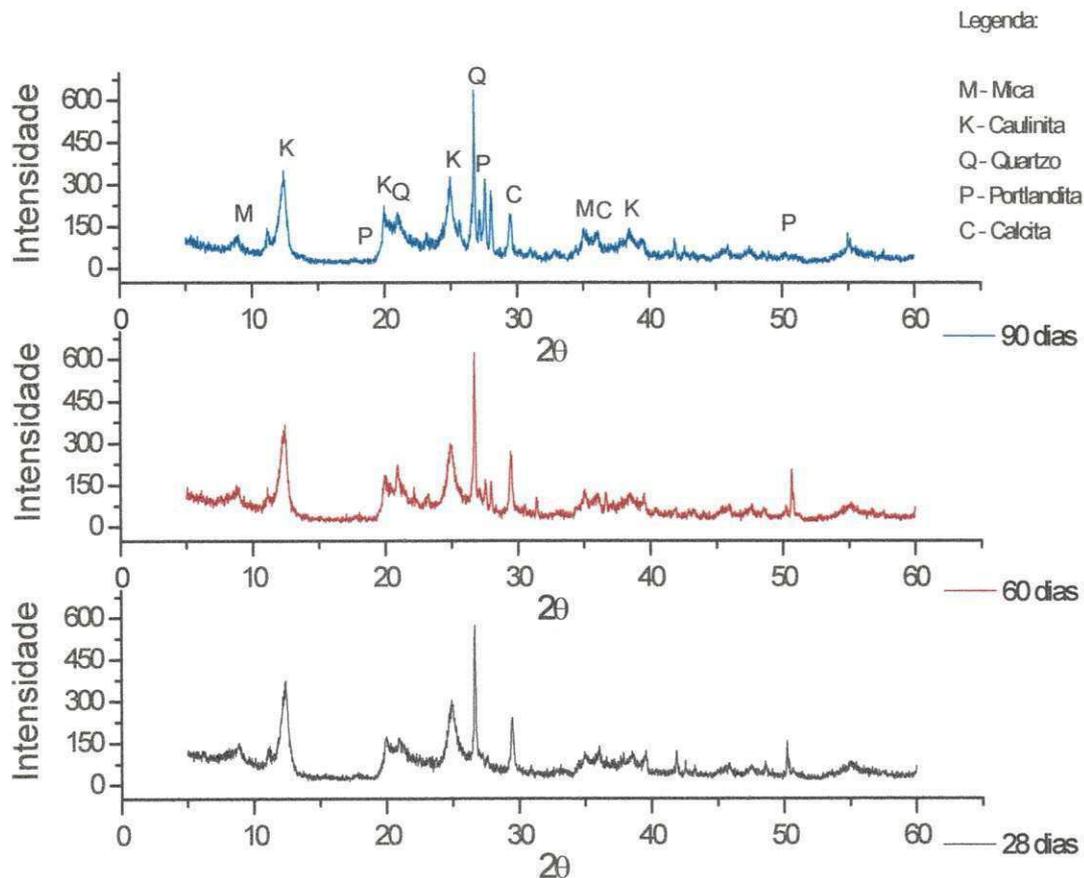


Figura 28 – Difração de raios X da composição solo-cal+50% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias

Observa-se na Figura 28, a presença das seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), caracterizada pelas distâncias interplanares de

2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å; calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e menor quantidade de mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada por 10,04 Å e quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å. Verifica-se que com o aumento do período de cura dos corpos-de-prova, houve um pequeno aumento na intensidade dos picos de calcita e uma diminuição da portlandita, evidenciando a reação pozolânica.

A Figura 29 apresenta os difratogramas dos corpos-de-prova solo-cal com a incorporação de 75% de resíduo de demolição para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

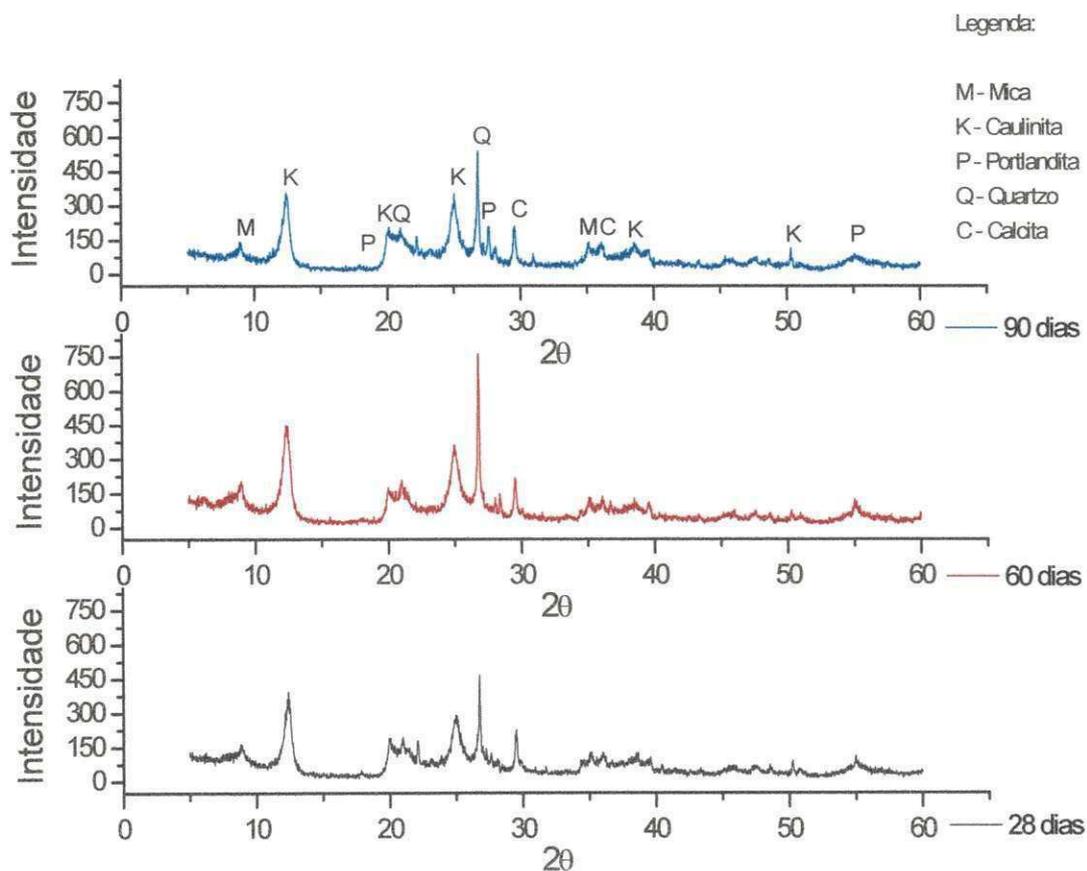


Figura 29 – Difração de raios X da composição solo-cal+75% de RD, para os períodos de cura de 28, 60 e 90 dias

Observa-se na Figura 29, a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) caracterizada pela distância interplanar de 10,04 Å;

caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21 Å e 3,19 Å; portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å; calcita (CaCO_3) caracterizada por 3,03 Å e quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å. Verifica-se que com o aumento do período de cura dos corpos-de-prova, houve um aumento na intensidade dos picos de calcita e uma diminuição da portlandita, evidenciando a reação pozolânica.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os resultados de durabilidade através da resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova ao longo dos ciclos de molhagem e secagem, para a composição de referência (solo-cal) e para as composições com incorporação de 25%, 50% e 75% de resíduos de demolição, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias respectivamente.

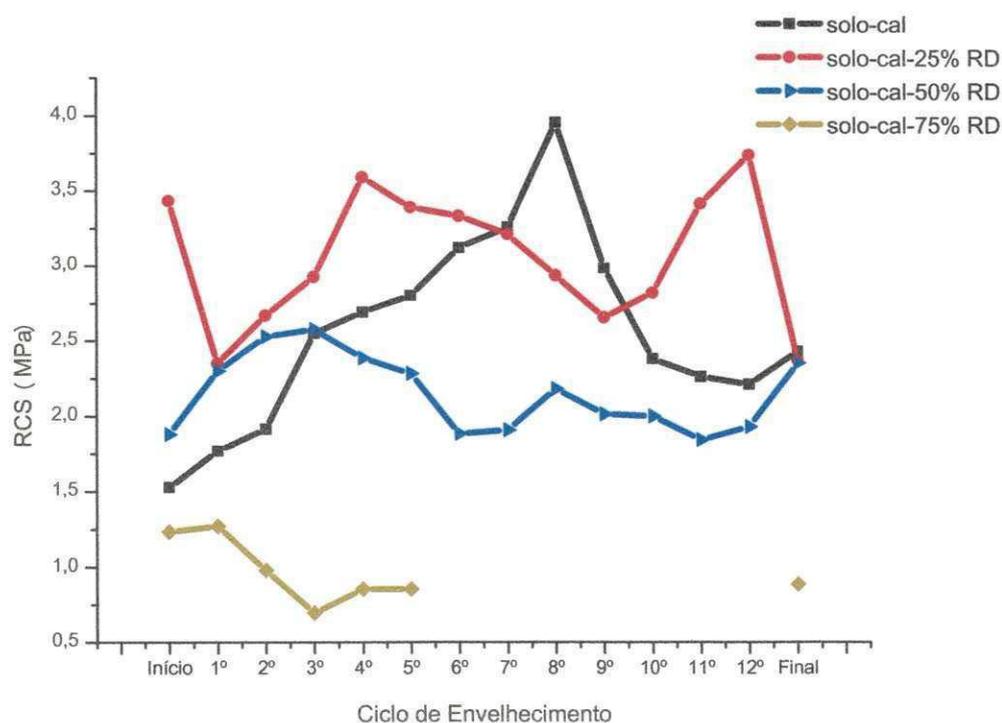


Figura 30 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 28 dias

Analisando a Figura 30 observa-se que as curvas referentes ao ensaio de envelhecimento acelerado iniciado após os 28 dias de cura dos corpos-de-prova apresentaram comportamento ascendente para um determinado número de ciclos, em seguida um decréscimo, evidenciando o envelhecimento.

Na curva referente ao solo-cal houve um ganho de resistência até o 8º ciclo, sendo esse acréscimo de 123,73%, a partir do 8º ciclo ocorreu um decréscimo na RCS equivalente a 44,19%. Na curva referente aos resultados de solo-cal com incorporação de 25% de RD observou-se um aumento na resistência até o 4º ciclo de 52,77%, logo após um decréscimo de 26,18% até o 9º ciclo, voltando a apresentar um ganho de resistência de 41,29%.

Para os corpos-de-prova com incorporação de 50% de resíduo de demolição, houve um ganho de RCS até o 3º ciclo de 12,17%, em seguida um decréscimo de 25,19% em sua resistência à compressão simples, representando uma diminuição total de 16,09% em sua resistência, evidenciando o envelhecimento. A curva referente ao solo-cal com 75% de resíduo apresentou apenas cinco ciclos, com decréscimo de 32,28% na resistência, esse comportamento demonstrou o acelerado envelhecimento dos corpos-de-prova incorporados com grande porcentagem de resíduo, tendo em vista não terem resistido aos 12 ciclos do ensaio.

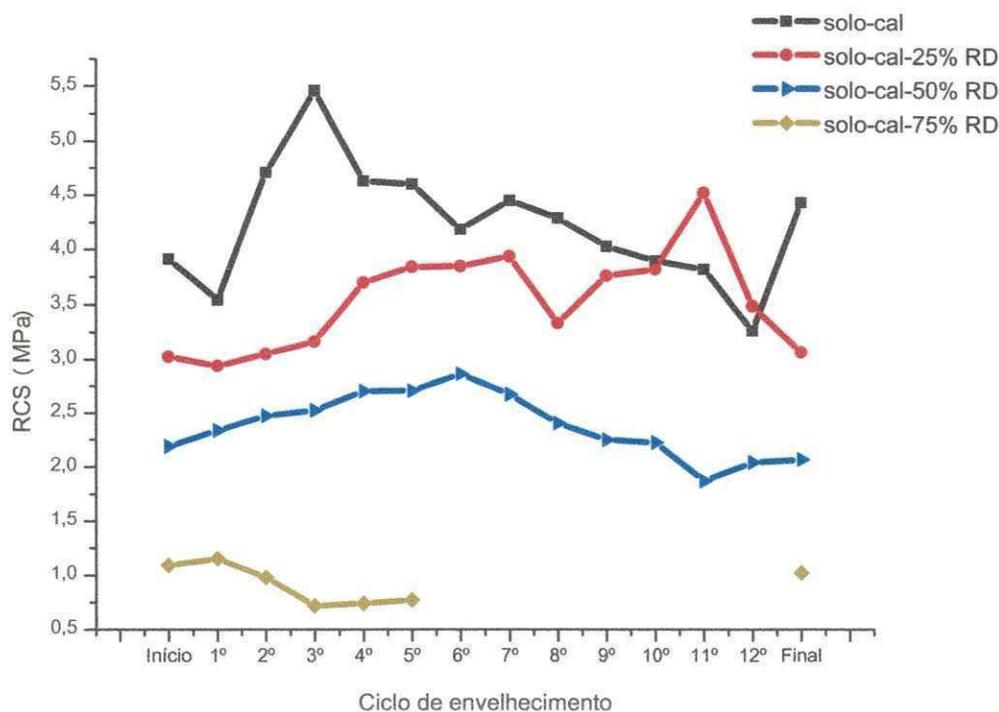


Figura 31 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 60 dias

Analisando a Figura 31 observa-se que as curvas referentes ao ensaio de envelhecimento acelerado iniciado após os 60 dias de cura dos corpos-de-prova apresentaram comportamento ascendente para um determinado número de ciclos, em seguida um decréscimo devido ao envelhecimento.

Na curva referente ao solo-cal houve um ganho de resistência até o 3º ciclo de 54,08%, a partir do 3º ciclo ocorreu um decréscimo na RCS equivalente a 40,22%, representando uma diminuição total de 7,89%. Na curva referente aos resultados de solo-cal com incorporação de 25% de RD observou-se um acréscimo na resistência até o 11º ciclo de 54,08%, logo após um decréscimo de 22,74%.

Para os corpos-de-prova com incorporação de 50% de resíduo de demolição, houve um acréscimo de RCS até o 6º ciclo de 22,65%, em seguida um decréscimo de 28,92%, apresentando uma diminuição total de 12,82% em sua resistência à compressão simples, devido ao envelhecimento. A curva referente ao solo-cal com 75% de resíduo apresentou apenas cinco ciclos, com

decréscimo de 33,62% na resistência, comportamento semelhante ao observado no ensaio realizado após os 28 dias de cura e que evidenciou o acelerado envelhecimento dos corpos-de-prova incorporados com grande porcentagem de resíduo.

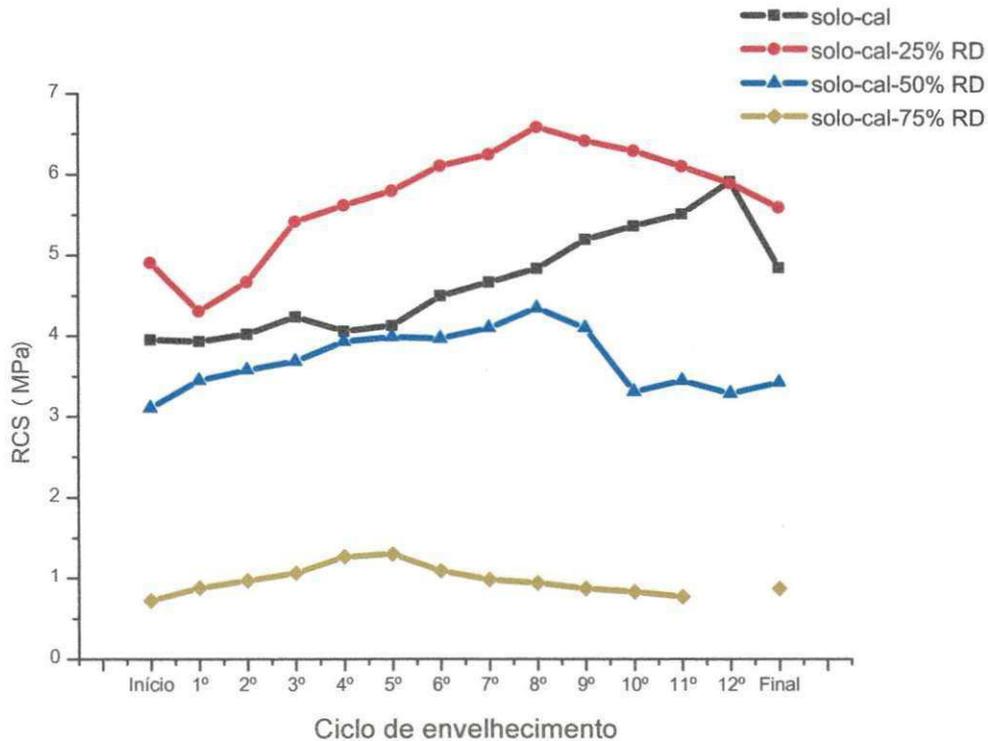


Figura 32 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova após o período de cura de 90 dias

Analisando a Figura 32 observa-se que as curvas referentes ao ensaio de envelhecimento acelerado iniciado após os 90 dias de cura dos corpos-de-prova apresentaram comportamento ascendente para um determinado número de ciclos, em seguida um decréscimo, evidenciando o envelhecimento. Sendo os melhores resultados para a composição com incorporação de 25% de resíduo de demolição.

Na curva referente ao solo-cal houve um ganho de resistência até o 12º ciclo equivalente a 50,64%, não sendo observado assim o envelhecimento na composição de referência. Para a curva referente aos resultados de solo-cal com incorporação de 25% de RD houve um acréscimo até o 8º ciclo de 52,90%

em sua resistência à compressão simples e a partir do 8º ciclo ocorreu uma diminuição de 10,47%.

Para os corpos-de-prova com incorporação de 50% de resíduo de demolição, houve um acréscimo de RCS até o 8º ciclo de 26,07%, em seguida um decréscimo de 24,37%, representando uma diminuição total de 4,64% em sua resistência à compressão simples, evidenciando o envelhecimento. A curva referente ao solo-cal com 75% de resíduo apresentou apenas onze ciclos, com acréscimo de 47,73% na resistência até o 5º ciclo e em seguida um decréscimo de 40,77%, apesar de terem resistido a um maior número de ciclos ainda fica demonstrado por este comportamento, que grandes porcentagens de resíduo de demolição incorporadas aos tijolos solo-cal aceleram o processo de envelhecimento.

Os resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado realizado após os 90 dias de cura foram mais satisfatórios em relação aos outros períodos de cura. Esse comportamento pode ser atribuído provavelmente à reação pozolânica, ou seja, ao consumo de portlandita (Ca(OH)_2), observado nas Figuras 26, 27, 28 e 29. Já o decréscimo da RCS deve-se provavelmente a formação do carbonato de cálcio, ou seja, a carbonatação.

A Figura 33 apresenta os resultados de durabilidade através da resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova da composição que apresentou o melhor desempenho ao longo do tempo, solo-cal com incorporação de 25% de resíduo de demolição, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

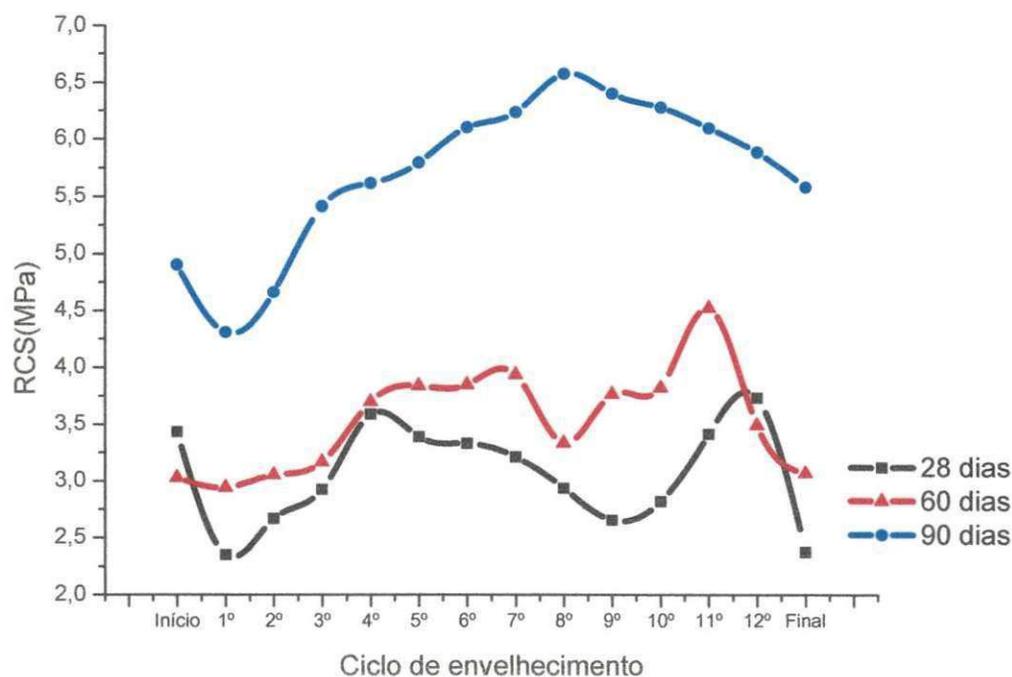


Figura 33 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova solo-cal incorporados com 25% de RD

Analisando a Figura 33 observa-se que os corpos-de-prova solo-cal incorporados com 25% de resíduo de demolição, em todas as idades de cura apresentaram uma RCS no 12º ciclo de molhagem e secagem, maior que a resistência final, referente aos corpos-de-prova que não passaram pelo processo de envelhecimento acelerado, o que pode evidenciar que para esta composição o processo de envelhecimento a que foram submetidos favoreceu a ocorrência das reações pozolânicas do material.

Na curva referente aos 28 dias de cura o envelhecimento passou a ser percebido após o 5º ciclo de molhagem e secagem e os resultados da RCS esteve inferior aos obtidos nas idades de cura de 60 e 90 dias. Para 60 dias de cura após o 7º ciclo pôde-se observar os efeitos do envelhecimento, porém houve um aumento na resistência à compressão simples dos corpos-de-prova, em relação aos 28 dias de cura.

Os resultados de resistência à compressão simples obtidos para os corpos-de-prova com incorporação de 25% de resíduo de demolição após os

90 dias de cura foram superiores à composição de referência ao longo dos ciclos de envelhecimento. Porém a durabilidade dos tijolos com incorporação de RD mostrou-se inferior aos tijolos solo-cal, já que a partir do 8º ciclo perceberam-se os efeitos do envelhecimento na composição com 25% de RD e na composição de referência esses efeitos não foram percebidos durante o ensaio.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição, pôde-se concluir que:

- **Caracterização física-mineralógica**

- a) O RD e o solo utilizados na pesquisa apresentaram distribuição de tamanho das partículas adequado para utilização em solo-cal;
- b) O solo utilizado foi classificado de acordo com a Classificação Unificada dos Solos (*The Unified Soil Classification System – USCS*), como SC;
- c) O solo apresentou em sua composição química teores de sílica e alumina superiores a 88%, sendo adequado para uso em solo-cal;
- d) A cal utilizada foi classificada através da sua composição química como sendo calcítica, sendo adequada para uso em solo-cal;
- e) O resíduo de demolição apresentou teores de óxido de silício, alumínio e ferro superior a 70% o que, segundo a norma ABNT NBR 12653/92 e ASTM C 618 (1981), é favorável à atividade pozolânica;
- f) O solo apresentou as seguintes fases mineralógicas: caulinita, quartzo, calcita e em menor quantidade mica;
- g) A cal apresentou as seguintes fases mineralógicas: hidróxido de cálcio e calcita;
- h) O resíduo de demolição apresentou as seguintes fases mineralógicas: albita, caulinita, quartzo e menor quantidade de calcita e mica.

- **Ensaio Tecnológicos**

- a) Os corpos-de-prova solo-cal e incorporados com até 50% de resíduos de demolição apresentaram valores de RCS dentro das especificações da norma ABNT NBR 10836/94;

- b) Os corpos-de-prova solo-cal incorporados com até 25% de resíduos de demolição apresentaram valores superiores aos de referência;
- c) Quanto maior o teor de resíduo incorporado ao tijolo solo-cal, mais rápido pôde-se perceber a ação do envelhecimento;
- d) Os corpos-de-prova com a incorporação de 25% de RD, mesmo sendo afetados pelo envelhecimento, apresentaram melhor desempenho quanto a sua resistência à compressão simples, ao longo do tempo;
- e) O estudo do envelhecimento iniciado aos 90 dias de cura apresentaram os melhores resultados, provavelmente devido às reações pozolânicas com a cal serem lentas.

- **Conclusão final**

Durante a pesquisa ficou evidenciado a importância e a dificuldade em se estudar a durabilidade, em especial o método do envelhecimento acelerado, que em alguns casos favoreceu as reações pozolânicas e conferiu ganho de resistência à compressão simples aos corpos-de-prova.

A incorporação de resíduos de demolição da construção civil em tijolos solo-cal sem função estrutural mostrou-se satisfatória de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, em especial quando incorporados teores inferiores a 50% de resíduo, estando os resultados enquadrados nas exigências da norma ABNT NBR 10836/94. O estudo também mostrou a necessidade de um maior período de cura para este material, tendo em vista que as reações pozolânicas ocorridas com a cal são lentas. Assim, aos 90 de cura foram obtidos melhores resultados durante o envelhecimento, já que nesse período as reações já estavam mais consolidadas. Neste caso, a composição com incorporação de 25% de RD ao solo-cal apresentou resistência à compressão simples superior a composição de referência, solo-cal.

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que pode ser viável a utilização de resíduos da construção civil em tijolos solo-cal sem função estrutural. Porém é de suma importância que se aprofundem as pesquisas, no

sentido de se conhecer o comportamento físico, mineralógico e mecânico desses materiais, como forma de se atestar suas qualidades tecnológicas e juntamente com outros dados técnicos, contribuir para que se estabeleçam quantidades, formas e utilização desses materiais. Também se faz necessário uma normatização que estabeleça critérios para fabricação e utilização de tijolos solo-cal, bem como sobre a reciclagem de resíduos para utilização em materiais de construção.

6. POSSÍVEIS LINHAS DE PESQUISA

- Estudar a durabilidade de tijolos solo-cal com incorporação de resíduos da construção civil através de câmara climatizada em diversas temperaturas e umidade relativa;
- Avaliar o envelhecimento acelerado com maior número de ciclos e variação na duração dos ciclos;
- Avaliar o envelhecimento natural de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil.

7. REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio.**

ABCP, São Paulo, SP, ET-35, 1956, 51p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____. **NBR 6118:** Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6459:** Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181:** Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182:** Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1984.

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

_____. **NBR 10832:** Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização da prensa manual. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 10836:** Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 12024:** Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12025: Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Exigências químicas e físicas.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13554: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.** Rio de Janeiro, 1996.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2009.** São Paulo, 2009.

AKASAKI, J. L. **O tijolo cru como elemento construtivo de baixo impacto ambiental.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 322p.

ALTHEMAN, D. **Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil.** Relatório (Iniciação Científica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002. 102p.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 155p.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 4., 2001, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, CT 206. P. 43-56, 2001.

ANTUNES, I. S. **Aplicação de solo-cimento em habitações populares.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2008. 31p.

ASTM – American Society for Testing and Materials Standard Specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolans for use as mineral admixtures in concrete, **C-618**. 1998.

ATTOH-OKINE, N. O. Lime treatment of laterite soils and gravels – revisited. **Construction and Building Materials**. v.9, nº5. 1995.

BENTO, P. F. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estrutura de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília, 2006. 116p.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010. 108p.

CAMPELLO, C. S.; MOURÃO, P. V.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R. **Estabilização com cal da mistura solo-revestimento asfáltico fresado**. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília. Anais v.1.

CAPRA, F, et al. **Alfabetização ecológica. O desafio para a educação no século 21**. In: TRIGUEIRO, André (Cord.). Meio Ambiente no século 21. 4 ed. Campnas: Autores Associados, 2005.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção. Projeto entulho bom** _Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 312p.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o Hidróxido de Cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1995.

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

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, THABA – Programa Tecnologias da Habitação. **Manual de construção com solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1984.

CINCOTTO, M. A. **Utilização de Subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. Tecnologia das Edificações, Ed. PINI, São Paulo, 1988.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos da construção. Brasília: MMA/CONAMA. 2002.

CORBIOLI, N. **Reciclagem de entulho do caos à solução**. Construção, nº 2505, Editora Pini, São Paulo, Fevereiro 1996.

DA FONSECA, M. G. **Tijolos de cinzas. Cinza de carvão mineral e cinza de casca de arroz. Alternativas tecnológicas na fabricação de novos elementos construtivos para alvenarias**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construtivo, 1993, São Paulo.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007. 118p.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 109p.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI. **Estudo do aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de tijolos de solo-cimento.** In: I Workshop Concreto, Qualidade e Novas Tecnologias, 2004, Ilha Solteira. 1 CD-ROM.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003. 204p.

FUNDAÇÃO NÚCLEO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL – NUTEC. **Manual de Fabricação de Tijolo Solo-Cal.** [S.1.: s.n.], 1985. 26p.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. 165p.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens.** Boletim Nº1. São Paulo: ABCP, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Editora Pini, São Paulo, 1998, 285p.

HUETE, R.; LLATAS, C.; LÓPES, J. A.; PONCE, M. **Gestión del medio ambiente urbano. Residuos que se generan em la actividad de la construcción. Cuantificación e minimización.** In: Congresso Latino-Americano. Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios. Soluções para o

Terceiro Milênio. 1998, São Paulo. Anais...São Paulo: PCC-USP, 1998. p. 309-321.

INGLES, O. G.; METCALFT, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissional). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 178p.

JOHN, V. M. **Durabilidade de materiais, componentes e edifícios**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1987. 157p.

JOHN, V. M. **Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos**. In: Seminário sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. 1996. São Paulo. Anais ... São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1996. p. 21-30.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. A. **Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais**. In: III Seminário Internacional Durabilidade de materiais, componentes e estruturas. São Paulo. Julho, 1997.

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

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 270p.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** Sitientibus, Feirde Santana, n. 26. jan./jun./2002. 111-130p.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho na construção civil, para utilização como agregado de argamassa e concreto.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001. 194p.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010. 107p.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007. 147p.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. 144p.

MARQUES, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil / José da Costa Marques Neto.** 1ª ed. São Carlos: RIMA, 2005 152p.

MESA VALENCIANO, M. del C. **Durabilidade de compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004. 169p.

MILANI, A. P. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influenciam na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 172p.

NIK, D. O. **Recycled concrete aggregates.** Cemente & Concrete Composite. n. 27. 2005. 315-318p.

NOBREGA, A. R. SÁ. **Contribuição ao diagnóstico da geração de entulho da construção civil no município de Campina Grande, PB.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2002. 96p.

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

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulhos da construção civil.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2004. 218p.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; LIRA, H. L.; MELO, A. B.; NEVES, G. A. **Durabilidade de compósitos de concreto Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.1, 2 (2006). Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br/revista Acesso em: junho/2010.

PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004. 122p.

PINTO, C. de S. **A Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1986.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

PINTO, T. P. et al., **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: A experiência do SindusCon - SP.** São Paulo, 2005. 48p. Publicação SindusCon – SP.

RAMÍREZ SARMIENTO, C. **Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1996. 105p.

RODRIGUES, M. S. **Caracterização de cinza residual da queima de casca de arroz para a produção de argamassa.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008. 115p.

ROJAS, J. W. J.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. **Durabilidad de um suelo contaminado y tratado com cemento portland.** In: Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 Nº 3, Dez/2008. Disponível em: www.ing.puc.cl/ric > acesso em: Junho/2010.

ROQUE, J. A. **O desempenho quanto à durabilidade de alvenarias de blocos cerâmicos de vedação com função auto-portante: o caso da Habitação de Interesse Social.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009. 223p.

ROSA, A. D.; VENDRUSCOLO, M. A. **Aplicação de resíduos da construção em fundações superficiais.** In: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006, Rio Grande do Sul.

SANTOS, M. P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009. 108p.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibra de celulose.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2002.

SILVA, A. P.; AKASAKI, J. L. **Produção de tijolos de solo-cal + resíduos agroindustriais.** Engenharia Estudo e Pesquisa, Rio de Janeiro, v. 6, Nº 02, p. 81-88, 2003.

SILVA, E. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; BARBOSA, N. P.; LEAL, A. F. **Avaliação de painéis de tijolos prensados de solo-cimento incorporados com resíduos de calçados (EVA).** In: Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.2 (2008) 44-49. Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br/revista
Acesso em: junho/2010.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP.** PINTO, T. P. et. al., São Paulo: Obra Limpa/I&T/SINDUSCON-SP, 2005. 48p.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília, 2001. 124p.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de São Paulo. Ilha Solteira, 2006.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. **Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil.** Canadian Geotechnical Journal, 2005.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. **Desing and Construction of Levees.** Engineer Manual N° 1110 – 2 – 1913, Appendix G: Use of Soil cement for Levee Protection. Washington D. C., 2000. p. 146-162.

VEDRONI, J. W. **Estudo de caso sobre a utilização do RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos Piracicaba SP.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007. 181p.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. 150p.

WEDLER, B.; HUMMEL, A. **Trümmerverwertung und ausbau Von brandruinen.** Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946.

XAVIER, G. C.; SABOYA, F.; MAIA, P. C. A.; ALEXANDRE, J. **Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da**

durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. In: Revista Cerâmica. Vol. 55. Nº 333. São Paulo – SP. Jan/Mar, 2009.

XAVIER, L. L. **Subsídios para tomada de decisão visando melhoria do gerenciamento do resíduo urbano em Florianópolis/SC: enfoque no resíduo da construção civil.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. 156p.