

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

Suélen Silva Figueiredo

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA DURABILIDADE DE
BLOCOS SOLO-CAL**

CAMPINA GRANDE - PB

2015

SUÉLEN SILVA FIGUEIREDO

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA DURABILIDADE DE BLOCOS SOLO-CAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, como exigência parcial para a obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. GELMIREN DE ARAÚJO NEVES

Orientador: Prof. Dr. HEBER CARLOS FERREIRA

Agência Financiadora: CAPES

CAMPINA GRANDE - PB

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- F475i Figueiredo, Suélen Silva.
Influência da adição de resíduos industriais na durabilidade de blocos solo-cal / Suélen Silva Figueiredo. – Campina Grande, 2015.
124 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
- "Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira."
- Referências.
1. Durabilidade. 2. Solo-Cal. 3. Resíduos Industriais.
I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Ferreira, Heber Carlos. III. Título.

CDU 628.4.034(043)

SUÉLEN SILVA FIGUEIREDO

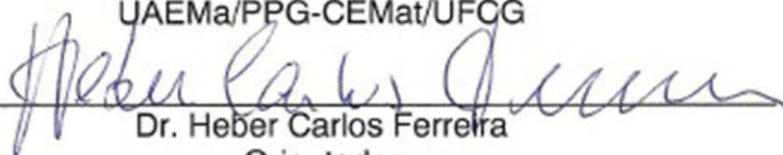
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA DURABILIDADE DE
BLOCO SOLO – CAL

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

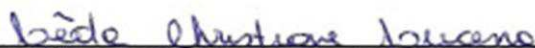
Aprovado em: 26/08/2015



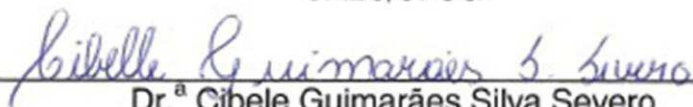
Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
UAEMa/PPG-CEMat/UFCG



Dr. Heber Carlos Ferreira
Orientador
UAEMa/PPG-CEMat/UFCG



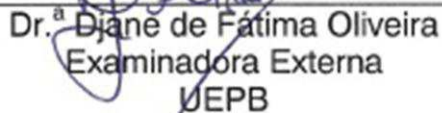
Dr.ª Leda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Examinadora Externa
UAEC/UFCG



Dr.ª Cibele Guimarães Silva Severo
Examinador Externo
UACTA/ UFCG



Dr. Heber Sivini Ferreira
Examinador Externo
DEMat/UFPB



Dr.ª Djane de Fátima Oliveira
Examinadora Externa
UEPB

VITAE

- Engenheira Civil pela UFCG (2008).
- Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela UFCG (2011)

*"Jamais considere seus estudos como uma
obrigação, mas como uma oportunidade
invejável para aprender a conhecer a
influência libertadora da beleza do reino do
espírito, para seu próprio prazer pessoal e
para proveito da comunidade à qual seu
futuro trabalho pertencer."*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Nilza, por me proporcionarem a oportunidade de chegar até aqui, sempre com seu apoio e orações.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves e Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, por terem acreditado em mim e me dado apoio em um momento tão importante da minha vida.

A Solange e João Emanuell mais que colaboradores, verdadeiros amigos sempre dispostos a ajudar em todos os momentos para conclusão dessa etapa.

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Tecnologia de Materiais e do Laboratório de Engenharia Civil, por terem me acolhido e auxiliado sempre que necessário.

A Juliana Melo por ter sempre se disponibilizado a me ajudar.

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

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais –PPGCMat da UFCG pela oportunidade de realizar este trabalho.

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

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

RESUMO

As indústrias do beneficiamento de rochas ornamentais, da cerâmica vermelha e do caulim, geram grande volume de resíduos, que geralmente são dispostos no meio ambiente de forma inadequada, causando graves impactos ambientais. A reinserção de resíduos industriais na cadeia produtiva como matéria prima, no desenvolvimento de insumos da construção, vem sendo uma alternativa avaliada por diversos pesquisadores. Os resultados de pesquisas apontam que estes resíduos, quando beneficiados podem apresentar propriedades aglomerantes que viabilizam sua incorporação em substituição parcial à cal na confecção de blocos solo-cal. Dentre os materiais alternativos, o bloco solo-cal possui vantagens como simplicidade de produção, resistência à compressão semelhante aos blocos convencionais, não passam pelo processo de cozimento e possibilitam a incorporação de resíduos com potencial aglomerante à sua matriz. Porém para assegurar confiabilidade nas aplicações desses novos materiais, é fundamental a avaliação da durabilidade. Este trabalho de pesquisa teve como objetivo avaliar a durabilidade de blocos solo-cal incorporados com resíduos industriais provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, da fabricação da cerâmica vermelha e do beneficiamento do caulim. Confeccionaram-se blocos no traço 1:10 em proporção de cal:solo, e utilizando os resíduos em substituição parcial a cal, nas proporções de 15%, 30% e 50% para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias. Os materiais utilizados foram submetidos aos ensaios de caracterização físico-mineralógica, tais como: 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 envelhecimento natural, o envelhecimento acelerado pela técnica de molhagem e secagem, simulação da chuva dirigida e resistência ao ataque de sulfatos, tomando-se como parâmetro de degradação a resistência à compressão simples dos blocos. Os resultados evidenciaram que a incorporação de 15% de resíduo cerâmico e de caulim ao bloco solo-cal não compromete sua durabilidade.

Palavras-chave: Durabilidade, Solo-cal, Resíduos industriais.

ABSTRACT

The industries of beneficiation of ornamental rocks, red ceramic and kaolin, generate large volume of waste, which are mostly discharged into the environment irregularly, thus causing serious environmental impacts. The reintegration of industrial waste in the productive chain, as raw material in the development for building materials, are being an alternative evaluated by several researchers. Among the alternative materials, soil-lime blocks has advantages such as simplicity of production, compression resistance similar to conventional blocks, are not submitted to the cooking process and enable the incorporation of waste with potential binder to matrix. Research results indicate that these residues when finely ground may submit caking properties that enable its incorporation in partial substitution of lime in soil-lime blocks manufacture. But to ensure reliability to alternative materials is essential evaluating their durability. This research aimed to evaluate the durability of soil-lime blocks incorporated with industrial waste arising from the processing of ornamental rocks, manufacturing of red ceramic and kaolin. Specimens were made at the dash 1:10 in ratio of lime: soil, and using waste to partially replace lime in the proportions 15%, 30% and 50% for curing periods of 28, 60 and 90 days. The materials were subjected to physical and mineralogical characterization tests, such as: granulometry by sieving and laser diffraction, chemical analysis, thermo differential analysis, thermo gravimetric analysis, and X-ray diffraction. The study of the durability was performed using the natural aging, accelerated aging by the technique of wetting and drying, driving rain simulation and resistance to attack sulfates , taking as parameter degradation the unconfined compressive strength of the blocks. The results showed that the incorporation of 15% ceramic waste and kaolin in soil-lime block does not compromise its durability.

Keywords: Durability, Soil-lime, Industrial waste.

PUBLICAÇÕES

FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; NEVES, G. A. **Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil.** Rem: Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.64, n.3, p.277-283, 2011.

FIGUEIREDO, S. F.; SILVA, C. G.; BEZERRA, I. M. T.; DIAS, S. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L. **Soil-Lime blocks using construction residues – Durability Study.** Materials Science Forum. Vols. 727-728, pp. 1422-1427, aug. 2012.

PATRICIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil.** Cerâmica. Vol. 59. Nº 349. São Paulo – SP. Jan/Mar, 2013.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa	45
Figura 2 - Cura dos blocos: (a) Envolvidos em sacos plásticos; (b) Cobertos com areia úmida.....	49
Figura 3 - Blocos solo-cal com e sem incorporação de resíduos submetidos às condições climáticas	51
Figura 4 - Ciclo de molhagem e secagem.....	52
Figura 5 - Localização das linhas de referência para medições dos blocos.....	54
Figura 6 - Distribuição de tamanho de partículas do solo	57
Figura 7 - Distribuição de tamanho de partículas da cal Carbomil	57
Figura 8 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de rochas ornamentais	58
Figura 9 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo cerâmico.....	59
Figura 10 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de caulim grosso	59
Figura 11 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de caulim fino	60
Figura 12 - Difração de raios X do solo	63
Figura 13 - Difração de raios X da cal	64
Figura 14 - Difração de raios X do resíduo de rochas ornamentais	64
Figura 15 - Difração de raios X do resíduo cerâmico	65
Figura 16 - Difração de raios X do resíduo de caulim fino.....	66
Figura 17 - Difração de raios X do resíduo de caulim grosso.....	66
Figura 18 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do solo	67
Figura 19 - Análises termogravimétrica e termodiferencial da cal.....	68
Figura 20 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de rochas ornamentais.....	69
Figura 21 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo cerâmico	70
Figura 22 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de caulim fino	71
Figura 23 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de caulim grosso	71
Figura 24 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 28 dias de cura	74
Figura 25 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 60 dias de cura	75
Figura 26 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 90 dias de cura	75
Figura 27 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de rochas ornamentais.....	76
Figura 28 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de rochas ornamentais	77
Figura 29 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 28 dias de cura	78
Figura 30 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 60 dias de cura	79
Figura 31 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 90 dias de cura.....	79
Figura 32 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo cerâmico	80

Figura 33 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo cerâmico.....	81
Figura 34 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 28 dias de cura.....	82
Figura 35 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 60 dias de cura.....	83
Figura 36 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 90 dias de cura.....	83
Figura 37 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de caulim.....	84
Figura 38 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de caulim.....	86
Figura 39 - Difração de raios X dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.....	87
Figura 40 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.....	88
Figura 41 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.....	88
Figura 42 - Resistência à compressão simples dos blocos padrão e dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.....	89
Figura 43 - Blocos solo-cal com incorporação de resíduo de rochas ornamentais submetidos ao envelhecimento natural.....	90
Figura 44 - Difração de raios X dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado.....	92
Figura 45 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RO submetidos ao envelhecimento acelerado.....	92
Figura 46 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RCER submetidos ao envelhecimento acelerado.....	93
Figura 47 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RC submetidos ao envelhecimento acelerado.....	93
Figura 48 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado.....	94
Figura 49 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RO submetidos ao envelhecimento acelerado.....	94
Figura 50 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RCER submetidos ao envelhecimento acelerado.....	95
Figura 51 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RC submetidos ao envelhecimento acelerado.....	95
Figura 52 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado.....	96
Figura 53 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RO submetidos ao envelhecimento acelerado.....	97
Figura 54 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos ao envelhecimento acelerado.....	97
Figura 55 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RC submetidos ao envelhecimento acelerado.....	98
Figura 56 - Resistência à compressão simples após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos de molhagem e secagem.....	99
Figura 57 - Difração de raios X dos blocos solo-cal submetidos à chuva dirigida.....	101
Figura 58 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RO submetidos à chuva dirigida.....	102

Figura 59 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos à chuva dirigida.....	102
Figura 60 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RC submetidos à chuva dirigida.....	103
Figura 61 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal submetida à chuva dirigida.....	104
Figura 62 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RO submetida à chuva dirigida.....	104
Figura 63 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RCER submetida à chuva dirigida	105
Figura 64 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RC submetida à chuva dirigida.....	105
Figura 65 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal submetidos à chuva dirigida	106
Figura 66 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RO submetidos à chuva dirigida	106
Figura 67 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos à chuva dirigida	107
Figura 68 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RC submetidos à chuva dirigida	107
Figura 69 – Resistência à compressão simples após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos da simulação da chuva dirigida	108
Figura 70 - Perda de massa após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos da simulação da chuva dirigida	111
Figura 71 - Blocos imersos em solução de sulfato por 24h, respectivamente: referência, 15%RCER, 15%RC e RO	113
Figura 72 - Blocos imersos em solução de sulfato por 48h, respectivamente: RO, 15%RC, 15% RCER e referência.....	113
Figura 73 - Blocos imersos em solução de sulfato por 96h, respectivamente: RO, 15%RC, 15% RCER e referência.....	113
Figura 74 - Blocos imersos em solução de sulfato por 1 semana: (a) visão lateral; (b) visão de topo	114
Figura 75 - Blocos de referência imerso em solução de sulfato por 96h: (a) visão lateral; (b) visão de topo	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria por peneiramento do solo	56
Tabela 2 - Limites de Atterberg e atividade coloidal do solo	60
Tabela 3 - Composição química dos materiais estudados	61
Tabela 4 – Resistência à compressão simples dos blocos de referência	72
Tabela 5 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo de rochas ornamentais	72
Tabela 6 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo cerâmico.....	73
Tabela 7 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo de caulim	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAGEPA- Companhia de Água e Esgoto da Paraíba
CE – Ceará
dp – desvio padrão
DRX – Difração de raios X
DTA – Análise termodiferencial
IP – Índice de Plasticidade
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
NBR – Norma Brasileira
PB - Paraíba
RC – Resíduo de caulim
RCER – Resíduo cerâmico
RCF – Resíduo de caulim fino
RCG – Resíduo de caulim grosso
RCS – Resistência à compressão simples
RO – Resíduo de rochas ornamentais
RPM – revolução por minuto
TG - Termogravimetria
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo Geral	19
1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Resíduo de rochas ornamentais	21
2.2	Resíduo cerâmico	24
2.3	Resíduo de caulim	26
2.4	Blocos solo-cal	29
2.5	Atividade pozolânica	31
2.6	Durabilidade	32
3	ANÁLISE CRÍTICA	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	Materiais	43
4.2	Métodos	45
4.2.1	Beneficiamento das matérias primas	46
4.2.2	Caracterização física	46
4.2.3	Caracterização química mineralógica	47
4.2.4	Moldagem dos blocos solo-cal	48
4.2.5	Ensaio tecnológicos	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Caracterização Físico-Mineralógica	56
5.1.1	Granulometria	56
5.1.2	Limites de Atterberg, atividade coloidal e classificação do solo	60
5.1.3	Composição química	61
5.1.4	Difração de raios X	63
5.1.5	Análise térmica diferencial e termogravimétrica	67
5.2	Avaliação da atividade pozolânica	72
5.3	Ensaio Mecânicos	74
5.3.1	Resíduo de rochas ornamentais	74
5.3.2	Resíduo cerâmico	78
5.3.3	Resíduo de caulim	82
5.4	Durabilidade	86
5.4.1	Envelhecimento natural	86
5.4.2	Envelhecimento acelerado	91
5.4.3	Simulação da chuva dirigida	100

	5.4.4 Resistência ao ataque por sulfatos	112
6	CONCLUSÕES	116
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	118

1 INTRODUÇÃO

Existe uma preocupação mundial com o grande volume de resíduos sólidos gerados pelas indústrias, principalmente as empresas mineradoras. Estudos sobre reciclagem de resíduos para uso como pozolanas tem sido intensificados nos últimos anos, podendo-se destacar os resíduos de construções e demolições, cerâmicos, de rochas ornamentais, de caulim, resíduos de escórias granulada de fundição, cinza de casca de arroz, etc. (CASTRO, 2008).

Dentre estes resíduos os de rochas ornamentais, da cerâmica vermelha e do caulim despertam interesse por parte de pesquisadores, como Vijayalakshmi *et al.* (2013), Fotes *et al.* (2012) e Lotfy *et al.* (2015), além da sua importância econômica também pelas particularidades dessas indústrias. A indústria do beneficiamento de rochas ornamentais tem apresentado significativo aumento nos últimos anos e produz resíduos que, quando não descartados de forma correta, contaminam o ar, terra, água e podem provocar sérios problemas de saúde ao homem e danos ao meio ambiente. Quanto à indústria da cerâmica vermelha a preocupação deve-se ao fato de ser este um setor ainda pouco desenvolvido tecnologicamente e a redução de resíduos por meio da modernização em seu processo de fabricação pode demandar anos. A indústria de beneficiamento do caulim destaca-se pela sua grande importância econômica, uma vez que o caulim é utilizado em diversos setores industriais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº. 12.305, de 02.08.2010, como um marco regulatório para a problemática dos resíduos sólidos, traz novas alternativas para a destinação adequada dos insumos, considerando o bem estar social e, ao mesmo tempo, a sustentabilidade sob os pontos de vista ambiental, social e econômico (BELTRÃO, 2014).

Nesse sentido, a reciclagem de resíduos pode tornar não só a construção civil um setor mais sustentável, como também proporcionar a redução dos custos com o desenvolvimento de materiais de construção diversificados. Tendo em vista que esses resíduos podem apresentar propriedades cimentícias, quando finamente moídos e em presença de água, que viabilizam sua utilização como substitutos aos aglomerantes tradicionais utilizados em materiais de construção, uma alternativa é a incorporação de resíduos industriais, como o resíduo de rochas ornamentais, da indústria cerâmica e do caulim, aos blocos solo-cal.

Os blocos solo-cal além de possuírem vantagens ecológicas quando comparados aos blocos cerâmicos convencionais, são de simples fabricação e utilizam como matéria prima principal o solo, que é encontrado em abundância na natureza. A incorporação de resíduos industriais com um potencial aglomerante a esses blocos em substituição parcial da cal, tem grande importância econômica, associada à redução de matérias primas não renováveis, energia, custos de produção e/ou diversificação de matérias primas, contribuindo não só para o desenvolvimento de um material mais acessível, bem como solucionando parte dos problemas ambientais causados por esses resíduos (MENEZES *et al.*, 2007).

Porém para que se tenha um material alternativo de qualidade, e que possa ser aceito pelo mercado e utilizado com segurança, é necessário avaliar sua durabilidade. Visto que, os materiais utilizados na construção civil possuem uma prolongada vida útil, torna-se indispensável que se assegurem além de suas características iniciais, que estas se comportem de maneira satisfatória ao longo do tempo.

Segundo Oliveira *et al.*, (2006), 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 um dos principais aspectos no desenvolvimento de materiais alternativos. Essa pesquisa tem a proposta de colaborar com esses estudos, investigando a evolução das características tecnológicas dos materiais propostos, ao longo da sua vida útil.

1.1 Objetivo Geral

Estudar a durabilidade de blocos solo-cal, incorporados com resíduos de rochas ornamentais, cerâmica vermelha e de caulim para uso em habitações de interesse social.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as matérias-primas convencionais e alternativas, quanto aos aspectos físicos, químicos e mineralógicos.

- Avaliar a atividade pozolânica dos resíduos quando incorporados ao solo-cal.
- Caracterizar tecnologicamente as propriedades físico-mecânicas do solo-cal incorporado com os resíduos.
- Comparar os resultados obtidos, solo-cal incorporados com resíduos, com os convencionais e normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).
- Estudar a durabilidade do solo-cal incorporado com resíduos de rochas ornamentais, de cerâmica vermelha e de caulim, utilizando o envelhecimento natural, o envelhecimento acelerado pela técnica de molhagem e secagem, simulação da chuva dirigida e avaliação da resistência ao ataque por sulfatos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduo de rochas ornamentais

Manhães *et al.* (2009) afirmam que a indústria de rochas ornamentais mundial tem apresentado uma taxa de crescimento anual da ordem de 6% ao ano. O Brasil está inserido nesse contexto detendo uma forte atividade de extração e beneficiamento de rochas ornamentais diversas, tais como: granito, mármore, ardósia, diorito, gnaiss, entre outras. Os principais produtores nacionais são os estados do Espírito Santo, Paraíba, Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro.

No processo de beneficiamento de rochas ornamentais é gerado grande volume de resíduos. O resíduo gerado pode ser oriundo da extração do bloco, da serragem para enquadrá-los nas dimensões padronizadas, do processo de corte e de polimento, além dos finos da lavra e do beneficiamento. Na serragem, cerca de 20% a 30% do bloco é transformado em pó, que é colocado nos pátios das empresas (MOURA e LEITE, 2011).

De acordo com Neves (2002) o corte dos blocos no beneficiamento, ação dos teares transformando-os em chapas, é a etapa de maior geração do resíduo. Esta fase é conhecida como desdobramento ou serragem do bloco de granito. O sistema de desdobramento de blocos de rochas para a produção de chapas gera uma quantidade significativa de resíduos na forma de lama (polpa abrasiva). Este material é composto pela polpa utilizada nos teares e pelo material serrado das placas e blocos.

Embora essa lama seja considerada inerte e atóxica de acordo com a norma ABNT NBR 10004/04, resíduo classe III, ela não é biodegradável. Para Reis (2008), apesar desses resíduos serem considerados como “não-perigosos”, podem, com a deposição sem controle, gerar acidentes e ocasionar impactos ambientais graves. Dentre os quais se destacam: alteração das condições de drenagem do solo, poluição do ar, poluição visual, modificação e destruição da paisagem natural e danos à saúde humana, quando seca, a lama forma um pó que, se inalada, pode causar silicose (LIMA, 2010).

Além disso, lagos rios e córregos são utilizados para deposição desses resíduos podendo contaminar não só as águas superficiais como também o lençol

freático. No entanto, de acordo com Silva *et al.* (2011), lançar resíduos no ambiente têm se tornado uma alternativa pouco atraente, já que as regulamentações ambientais em todo o mundo estão se tornando mais restritivas.

Os municípios onde se localizam mineradoras sofrem com os graves impactos ambientais gerados por esta atividade, porém a situação econômica da maioria destas regiões está intimamente relacionada ao desenvolvimento proporcionado por essa indústria. Portanto, é de extrema importância que se busquem alternativas viáveis para adequar a atividade mineral de maneira a minimizar os riscos ao meio ambiente.

Segundo Manhães *et al.* (2009), algumas características dos resíduos de rochas ornamentais, os tornam atrativos como matéria prima de baixo custo para a fabricação de materiais de construção, especialmente os cerâmicos. Do ponto de vista químico, os resíduos de rochas ornamentais em geral podem apresentar conteúdos apreciáveis de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O). Além disso, podem conter quantidades significantes de óxido de ferro (Fe_2O_3), devido ao processo de serragem dos blocos. Do ponto de vista mineralógico, dependendo do tipo de rocha ornamental podem ser constituídos de quartzo, feldspatos, mica e calcita. Estes resíduos apresentam também do ponto de vista da mecânica de solos comportamento não plástico, quando submetidos a ensaios de plasticidade (limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade) (MENEZES, *et al.*, 2002).

Reis (2008) verificou várias aplicações para o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente na indústria cerâmica e na construção civil. Porém, apesar do grande número de pesquisas, poucos estudos acadêmicos se tornaram inovações tecnológicas, isto é, a utilização do resíduo ainda é incipiente.

Torres *et al.* (2009) estudaram a incorporação de resíduos de corte e polimento do granito, para produção de telhas cerâmicas. As matérias primas foram caracterizadas utilizando-se os ensaios para determinação do tamanho de partículas, densidade, difração de raios X, análises térmicas e de perda ao fogo. As composições estudadas foram submetidas à ensaios de absorção de água e resistência à flexão. Os resultados obtidos demonstraram a possibilidade de incorporação de até 10% de resíduo de granito, como substituto da matéria prima não plástica natural em formulações cerâmicas tradicionais.

Lima *et al.* (2010) estudaram a durabilidade de blocos ecológicos de solo-cimento incorporados com resíduo granítico utilizando o traço 1:9 incorporados com 30%, 40% e 50% de resíduo. Seus resultados indicaram que com o aumento da incorporação do resíduo há um decréscimo na resistência à compressão simples e um aumento considerável na perda de massa. Ao final do estudo do envelhecimento, as amostras com 50% de resíduo foram as que apresentaram a maior diminuição na resistência mecânica, 36% de redução em relação as amostras que não sofreram envelhecimento.

Moura e Leite (2011) avaliaram a viabilidade da utilização do resíduo de serragem de rochas ornamentais na produção de blocos pré-moldados para alvenaria de vedação, utilizando o traço 1:8 (cimento:agregados, em massa). O resíduo foi incorporado em substituição parcial do cimento, nos teores de 5%, 10% e 15%, em massa. Os blocos produzidos foram avaliados quanto à resistência à compressão e à absorção. A absorção média dos blocos com até 15% de resíduo foi menor do que a absorção média dos blocos de referência (sem incorporação de resíduo) e a resistência à compressão média com utilização de 5% e 10% de resíduo de rochas ornamentais foi superior à resistência de referência.

Vijayalakshmi *et al.* (2013) investigaram experimentalmente a utilização de resíduos de granito em forma de pó substituindo os agregados finos naturais na produção de concreto. Foram preparadas composições utilizando o resíduo com teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. As composições foram avaliadas quanto à resistência à compressão, resistência à tração e à flexão. Para assegurar a confiabilidade de seu uso em ambientes agressivos, as propriedades de durabilidade, como a permeabilidade à água, penetração de cloretos, profundidade de carbonatação, resistência ao ataque de sulfatos e resistividade elétrica também foram determinadas. Os resultados obtidos indicaram que a substituição do agregado fino natural (areia) pelo pó de granito em percentuais de até 15%, é favorável para a fabricação do concreto, sem comprometer os critérios de resistência e durabilidade.

A disposição dos resíduos industriais provenientes das empresas mineradoras é um dos grandes desafios deste século. Nesta direção pesquisas ainda precisam ser realizadas objetivando viabilizar e disseminar a reinserção destes resíduos na cadeia produtiva.

2.2 Resíduo cerâmico

A argila ativada termicamente (argila calcinada) é um material pozolânico. Uma das maneiras de se obter a argila calcinada é por meio dos resíduos produzidos pela indústria cerâmica, que utiliza essa argila como matéria-prima para produção de blocos e telhas.

Os resíduos da indústria cerâmica podem simplificarmente ser separados em duas categorias, em função da sua origem. Na primeira incluem-se os resíduos da indústria que produz peças cerâmicas ditas estruturais, que usam massas vermelhas e escuras para produzir blocos e telhas. Na segunda categoria, temos as indústrias que usam massas brancas na fabricação de revestimentos e peças sanitárias (TORGAL e JALALI, 2011).

O índice de perdas do setor de cerâmica vermelha pode variar de 3% a 30%. Esse índice depende do nível tecnológico de cada região, do tipo de matéria-prima utilizada, da qualidade e escolaridade da mão de obra, entre outros itens. O volume de resíduo gerado é significativo, ocasionando problemas de transporte, de estocagem, de manutenção dos depósitos e ambientais (GONÇALVES, 2007).

Para Torgal e Jalali (2011) apesar de existir algum nível de reaproveitamento dos resíduos cerâmicos, trata-se apenas de pequenos volumes residuais que não conseguem afirmar-se como uma solução para este problema. Ainda segundo o autor a reatividade pozolânica do resíduo já foi confirmada por alguns pesquisadores, porém novas pesquisas devem ser realizadas com o objetivo de ampliar os conhecimentos acerca do comportamento destes novos materiais, bem como sua aplicação em outras indústrias.

A utilização de resíduos da indústria cerâmica como matéria-prima substituta parcial da cal em materiais de construção apresenta-se como uma alternativa promissora devido a grande disponibilidade destes e aos benefícios ambientais que podem promover. Além disso, de acordo com Gonçalves (2007) pesquisas recentes realizadas com argamassas e concretos incorporados com resíduos de blocos cerâmicos em substituição parcial ao cimento Portland tem demonstrado que este resíduo também pode promover benefícios técnicos ao material.

Dallacort *et al.* (2002) estudaram a resistência à compressão do solo-cimento, com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído, os três níveis de estudo do material ligante adicionado, foram 6, 8 e 10%. Os resultados

obtidos indicaram que os resíduos apresentaram ação pozolânica, e ainda que substituições de até 57% do teor de cimento por resíduo cerâmico moído pode produzir blocos de solo-cimento com resistências superiores a 2MPa, para um teor de material ligante (cimento + resíduo cerâmico) de 8%.

Pinheiro (2008) apresentou em seu estudo sobre o beneficiamento e caracterização do resíduo de cerâmica vermelha objetivando sua aplicação como adição pozolânica às argamassas, cimentos e concretos. Para tanto, foram utilizadas duas amostras diferentes: blocos cerâmicos de vedação e estruturais. Os resultados obtidos foram promissores quanto à utilização dos resíduos como adições pozolânicas, os índices de atividade pozolânica com cimento Portland atingiram 78,7% e 79,5%, respectivamente para as amostras de bloco de vedação e estrutural. Estes valores são superiores ao exigido pela norma ABNT NBR (Norma Brasileira) 5752/14, que é de 75%.

Wanda (2010) estudou o reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto, em substituição em massa ao agregado miúdo (areia), visando a sua utilização em estacas do tipo moldadas *in loco*. Confeccionaram-se concretos com substituição de 20%, 40%, 60% e 80% de areia natural, em massa, pelo resíduo. Ensaio de compressão simples e de módulo de elasticidade foram realizados em todos os traços no estado endurecido e, no estado fresco, ensaios de incorporação de ar e de massa específica. Concluiu-se que o reaproveitamento do resíduo da cerâmica vermelha em teores de até 40% é viável e melhorou as características físicas e mecânicas do concreto, possibilitando a sua aplicação nas estacas de fundação em estudo.

Torgal e Jalali (2011) estudaram o comportamento mecânico de concretos contendo resíduos da indústria cerâmica. Os resultados obtidos indicaram que a substituição de 20% de cimento pelo resíduo cerâmico com dimensões granulométricas abaixo de 70 μ m resultou em perda da resistência mecânica. A substituição do agregado convencional pelo agregado cerâmico, na mesma granulometria, não reduziu a resistência do material, nas composições analisadas. Quanto à resistência antes e após o envelhecimento acelerado observou-se que a substituição do cimento pelo resíduo cerâmico melhorou o desempenho dos concretos, ocorrendo efeito inverso para a substituição dos agregados.

Fontes *et al.* (2012) apresentaram um estudo realizado com argamassas incorporadas com resíduo de cerâmica vermelha. Para confecção dos corpos de

prova composições de argamassas foram utilizadas, variando as porcentagens de resíduo empregados em substituição de massa equivalente da cal hidráulica natural nos teores de 5% e 10%. Os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem e porosidade. Verificou-se que, com a substituição de massa de cal por resíduo cerâmico, as características mecânicas e o comportamento em relação à água são semelhantes quando comparados com as argamassas de referência. Considerando-se assim, a adoção do referido resíduo bastante favorável.

2.3 Resíduo de caulim

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha que contém a caulinita e também o produto resultante de seu beneficiamento. Este produto possui uma ampla área de aplicações industriais. O uso desse insumo mineral nos diferentes ramos industriais está relacionado às suas propriedades ópticas, mineralógicas e químicas (CABRAL *et al.*, 2009).

No processo de beneficiamento do caulim são gerados dois tipos de resíduos, o primeiro (resíduo grosso), é constituído basicamente por quartzo e é proveniente da lavagem do caulim bruto; o segundo (resíduo fino) é originado na etapa de purificação do caulim através de separação em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm), onde o rejeito fica retido.

Segundo Rocha (2005) durante o processamento do caulim, ocorre a produção de rejeitos dispersos (que são lançados nos rios) e sólidos (geralmente utilizados em aterros) esses rejeitos podem conter, além de outros contaminantes, concentração de metais como o ferro, alumínio, zinco e cádmio, acima do permitido pela legislação. Os reflexos dessa contaminação extravasam, frequentemente, os limites das áreas de trabalho, atingindo também a topografia, flora, fauna, sistema hídrico e morfofisiológico do solo (CASTRO, 2008).

Segundo Castro (2008) os resíduos de caulim constituem um problema para os municípios produtores devido ao volume de resíduos gerados por essa indústria, pois se precisa de grandes áreas para seu depósito. Além dos problemas causados para a população local, ainda há a possibilidade das populações vizinhas serem afetadas pelos finos que são transportados a grandes distâncias pelo vento.

Meneses *et al.* (2009) analisaram a viabilidade técnica e a atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para a produção de argamassas. Argamassas de cimento:cal:areia foram preparadas nos traços de 1:4:28 (cimento:cal:areia), para assentamento de blocos e de 1:2:9 (cimento:cal:areia), para revestimentos argamassados. O resíduo na condição natural e após queima, substituiu parcialmente o cimento nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa. Corpos de prova foram moldados e determinadas sua resistência à compressão simples. Baseado nos resultados concluiu-se que a utilização do resíduo calcinado em substituição a 15% do cimento, aumenta a resistência das argamassas após 28 dias de cura em até 150%.

Fusari (2009) estudou a incorporação dos resíduos de caulim e de granito, ambos com sílica cristalina para fabricação de microconcreto que apresentasse boas características de combate ao fenômeno de regressão de resistência. Os traços para confecção do microconcreto foram divididos em quatro grupos: cimento e areia; cimento, areia e resíduo de granito; cimento, areia e resíduo de caulim; cimento, areia, resíduo de granito e resíduo de caulim. A substituição da areia pelos resíduos foi na ordem de 50%. Após a cura de 24 horas, os corpos de prova moldados para o estudo, foram colocados por 7 dias no forno com temperaturas que variaram de 30°C à 400°C. Concluiu-se que o emprego dos resíduos dependerá em que temperatura será empregado o microconcreto, para temperaturas de 180°C e 230°C é viável a utilização do resíduo de caulim e para temperaturas de 300°C a utilização do resíduo do granito apresentou-se mais viável. Para temperaturas abaixo de 120°C a utilização dos resíduos não apresentou resultados satisfatórios.

Dias (2010) avaliou a atividade pozolânica do resíduo do beneficiamento do caulim e a sua incorporação em argamassas de assentamento e revestimento para uso na construção civil, utilizando o resíduo “grosso” e o resíduo “fino”. Os resíduos sofreram calcinação à 600°C, 700°C e 800°C e logo após foram determinados os índices de atividade pozolânica. Argamassas foram confeccionadas contendo proporções de 80%/20%, 70%/30%, 60%/40% e 50%/50% de resíduos “grosso/fino”. Os resultados evidenciaram que os resíduos de caulim quando calcinado em temperaturas superiores a 700°C apresentam elevada atividade pozolânica e que as argamassas alternativas quando incorporadas com resíduos de caulim calcinados, em teores de até 20% em substituição à cal, apresentam desempenho mecânico superior ao exigido pelas normas ABNT e ASTM (American Society for Testing and

Materials). Os melhores resultados obtidos foram para as composições de 50% resíduo grosso + 50% resíduo fino e 70% resíduo grosso + 30% resíduo fino para todas as temperaturas de calcinação.

Anjos (2011) estudou a incorporação de resíduos do beneficiamento do caulim em blocos de solo-cal. Os resíduos de caulim foram calcinados a uma temperatura de 800° C para verificação da atividade pozolânica. Corpos de prova convencionais (solo-cal) e incorporados com 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo de caulim em substituição da cal foram moldados no traço 1:10. As propriedades físico-mecânicas de resistência à compressão simples e absorção de água foram verificadas, concluiu-se que os resíduos de caulim apresentaram baixa atividade pozolânica e suas propriedades não estiveram dentro dos padrões estabelecidos pelas normas da ABNT para uso em blocos solo-cal.

Barata e Angélica (2012) investigaram as características físicas químicas e mineralógicas dos resíduos caulínicos processados da Região do Jari e do Capim, objetivando avaliar se atendem aos requisitos para serem utilizados como matéria prima para a produção de uma pozolana de alta reatividade, o metacaulim. Os resíduos foram caracterizados por difração de raios X, análise térmica, espectroscopia de infravermelho, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência de raios X e difração a laser. Os resultados das análises foram convergentes e apontam ambos os resíduos estudados como excelentes matérias primas para a produção do metacaulim de alta reatividade, tendo em vista serem constituídos essencialmente por caulinita de baixa granulometria.

Lotfy *et al.* (2015) estudaram as propriedades mecânicas de concretos incorporados com resíduos de caulim. Seis diferentes composições foram avaliadas, com teores de substituição de cimento Portland por resíduo, em peso, de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. As composições de concreto foram submetidas à estudos em seu estado fresco e endurecido, avaliando-se a trabalhabilidade, resistência à compressão e à tração, absorção de água e porosidade. Considerando os resultados obtidos, concluiu-se que o uso do resíduo de caulim melhorou a trabalhabilidade do concreto em todas as composições estudadas. A resistência à compressão apresentou melhores resultados nas incorporações com teores de 10% e 15% para períodos de cura superiores à 28 dias e a composição com incorporação de 15% de resíduo de caulim apresentou valores de porosidade e absorção de água semelhantes ao concreto de referência.

2.4 Blocos solo-cal

A preocupação com o volume crescente de resíduos gerados tem incentivado que pesquisas sejam iniciadas e aprofundadas com o objetivo de estudar novas aplicações para diversos tipos de resíduos na fabricação de materiais de construção alternativos.

Os blocos ecológicos ganham espaço nessa temática por não agredirem o ambiente em seu processo de fabricação, ao contrário dos blocos convencionais largamente empregados nas construções. Além disso, ainda permitem a incorporação à sua matriz de resíduos, que podem melhorar suas propriedades.

No Brasil, Oliveira *et al.* (1988) iniciaram um estudo sobre blocos solo-cal e reuniram em seu trabalho dados comparativos acerca das características destes blocos, produzidos com solos de regiões típicas do país em condições de cura diferentes. Recentemente novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas dando ênfase à utilização da cal como alternativa ao cimento nos blocos ecológicos, porém no que se refere a estudos sobre a incorporação de resíduos ao solo-cal, existem na literatura poucas referências. O que torna ainda mais importante as pesquisas que visem identificar o comportamento desses resíduos incorporados também a esse material.

Milani (2005) estudou os efeitos da adição de combinações de cimento-casca de arroz e de cal-casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de um solo predominantemente arenoso e outro solo predominantemente argiloso, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da confecção de blocos de solo-cimento-casca de arroz e solo-cal-casca de arroz. Para esse estudo foram confeccionados corpos de prova e blocos incorporados com até 50% de casca de arroz em substituição à parte do aglomerante. Após o período de cura de 7, 28 e 60 dias os corpos de prova e blocos foram submetidos aos ensaios de compressão simples, absorção de água e de ultra-som. Quando se utilizou a cal como aglomerante, os resultados obtidos foram insatisfatórios. Quando da utilização do cimento como aglomerante a incorporação de até 18% de casca de arroz apresentou-se satisfatória.

Anjos *et al.* (2011) avaliaram o comportamento de blocos de solo-cal incorporados com resíduos do beneficiamento do caulim. Os resíduos de caulim foram calcinados a uma temperatura de 800°C, posteriormente foram

confeccionados os blocos, sem incorporação de resíduo e com proporções de 10%, 20%, 30% e 40% de resíduos incorporados em substituição à cal. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados permaneceram dentro das especificações da ABNT e os blocos submetidos a 90 dias de cura e com incorporação de 20% de resíduo apresentaram melhor desempenho.

Figueiredo *et al.* (2011) em sua pesquisa avaliaram a viabilidade da utilização de resíduos de demolição da construção civil, em substituição a parte do aglomerante nos blocos solo-cal sem função estrutural. Corpos de prova foram confeccionados utilizando o traço 1:10 em proporção de cal:solo e incorporando resíduo em substituição parcial à cal, nas proporções de 25%, 50% e 75%. Os corpos de prova foram submetidos a períodos de cura de 28 e 52 dias, em seguida foram determinadas as resistências à compressão simples. Os resultados obtidos demonstraram que a resistência dos corpos de prova diminuiu proporcionalmente ao aumento do teor de resíduo incorporado, sendo a composição com incorporação de 25% de resíduo a que apresentou melhores resultados com relação ao comportamento mecânico.

Alcantara *et al.* (2011) apresentaram um estudo de caso utilizando cinzas de casca de arroz como aditivo auxiliar à cal na produção de blocos de solo-cal. Os teores de cal e de cinzas com relação ao peso seco do solo adotados foram 8% e 0%, 5% e 10% respectivamente. Os blocos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água aos 28, 60 e 90 dias de cura. Os resultados obtidos mostraram que os blocos atenderam às normas requeridas para componentes de alvenaria, dos pontos de vista da resistência média à compressão, resistência individual e absorção.

Patricio *et al.* (2013) avaliaram a utilização de resíduos da construção civil, oriundos de demolição, como agente pozolânico na fabricação de blocos solo-cal. As matérias primas convencionais e alternativas (resíduos) foram caracterizados por meio dos seguintes ensaios: massa específica real, área específica, análise granulométrica por peneiramento e por difração à laser, limites de liquidez e plasticidade, análise química e difração de raios X. Para os ensaios tecnológicos foram confeccionados corpos de prova solo-cal no traço 1:10 em peso, com substituição da cal por resíduo nas seguintes proporções: 0, 10, 20, 25, 30, 40, 50 e 75%. Os corpos de prova foram curados por períodos de 28, 60 e 90 dias, em câmara úmida com 100% de umidade relativa, em seguida determinada sua

resistência à compressão simples e absorção de água. Com os melhores resultados de resistência à compressão simples, foram moldados blocos solo-cal e solo-cal-resíduo. Os resultados obtidos com os blocos incorporados com até 25% de resíduos, evidenciaram valores superiores aos convencionais de acordo com as especificações da ABNT.

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 blocos solo-cal no Brasil, torna o emprego desse material de construção bastante promissor.

Os blocos solo-cal dentre outras vantagens também possibilitam 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, os blocos ecológicos podem ser moídos e prensados novamente, evitando desperdício (SOUZA, 2006).

2.5 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).

A reação pozolânica se caracteriza pelo consumo lento do hidróxido de cálcio livre (CH), após hidratação do cimento anidro, pelo material pozolânico que gera C-S-H (silicato de cálcio hidratado) adicional (LIMA e ROSSIGNOLO, 2010).

Pode-se definir pozolanas também como um material a base de silício e alumínio que reage 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 que define uma estrutura sólida (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Freire (2003), a pozolanicidade de um material pode ser avaliada por métodos químicos, físicos e mecânicos. A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (DE PAULA *et al.*, 2009).

De acordo com 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.

Além da ação química, as pozolanas finamente pulverizadas possuem ação física (tal como vários resíduos), uma vez que atuam nos concretos e argamassas como material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (*filler effect*) (MENEZES *et al.*, 2009).

As propriedades exigidas das pozolanas para um determinado propósito são prescritas pela ASTM 618/91 e ABNT 12653/15. 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).

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 um beneficiamento para serem utilizadas. As pozolanas artificiais são obtidas de processos industriais ou como subprodutos.

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

2.6 Durabilidade

Para que os materiais alternativos sejam aceitos e inseridos no mercado é preciso que possuam características tecnológicas comprovadas, isso compreende fundamentalmente apresentarem desempenho satisfatório conservando suas plenas

condições de uso ao longo de toda sua vida útil, ou seja, que se tenha uma durabilidade adequada à utilização requerida.

Segundo Oliveira *et al.* (2006) 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.

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 sua vida útil, a segurança, a estabilidade e a aptidão em serviços requeridos inicialmente.

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.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar-se a durabilidade dos materiais alternativos sob diferentes formas de avaliação e utilização. 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).

Oliveira *et al.* (2006) avaliaram o envelhecimento acelerado de amostras de concreto confeccionados com adição de entulho, com base em ensaios de molhagem e secagem, tendo a variação da resistência à compressão como indicador de degradação. Os ensaios foram realizados em amostras de concreto convencional (sem entulho) e de concreto alternativo, com incorporação de 30%,

60% e 100% de entulho em relação à massa total dos agregados naturais (areia e pedrisco). A proporção entre os dois agregados naturais (areia e pedrisco) sempre permaneceu na relação de 50%, determinada experimentalmente como a mistura mais compacta entre os agregados secos. A composição com 60% de entulho destacou-se por ter apresentado uma menor degradação.

Rojas *et al.* (2008) estudaram a durabilidade de um solo contaminado e tratado com cimento Portland utilizando a metodologia do envelhecimento acelerado com seis ciclos de molhagem e secagem, avaliando-se a variação volumétrica das composições propostas. Corpos de prova foram moldados com combinações contendo 10% e 20% de cimento e 0%, 2%, 4% e 6% de resíduo oleoso. 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, analisaram o comportamento de cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. Os corpos de prova foram moldados adicionando-se 0%, 5% e 10% de rejeito, em peso, e submetidos à secagem e queima a 500 °C, 700 °C e 900 °C. Para o estudo da durabilidade as amostras foram levadas ao equipamento de degradação e a ciclos de umidade para promover a alteração do material. Consideradas até 1500 h de lixiviação contínua no equipamento, e 50 e 150 ciclos de umidade. Com os resultados obtidos concluiu-se que as características de durabilidade do material estudado não foram determinadas satisfatoriamente por meio das variações da absorção com o tempo de degradação ou tipo de ensaio de degradação. Porém, considerando a resistência à flexão, para temperaturas de queima de até 700°C, a incorporação de rejeito de granito reduziu as perdas de resistência com o tempo de degradação, melhorando as características de durabilidade.

Cruz e Jalali (2010) investigaram a utilização de ativadores com o objetivo de tornar mais efetivo o desempenho do cimento Portland nas características do solo-cimento, quer ao nível mecânico, quer ao nível da durabilidade. Os ativadores selecionados foram o bicarbonato de sódio, o silicato de sódio e uma mistura de silicato com hidróxido de sódio. Para avaliar o efeito do cimento e dos ativadores foram moldados corpos de prova adotando 8 composições de misturas, variando o teor de cimento em 0%, 6% e 10% e de ativadores em 0%, 2%, 3% e 4%. Registraram-se a resistência à compressão simples e à tração por compressão

diametral, para avaliação das características mecânicas, enquanto que a durabilidade foi analisada por meio da absorção de água por capilaridade e do efeito da saturação na resistência à compressão simples, utilizando-se 12 ciclos de molhagem-secagem e 12 ciclos de gelo-degelo. Os resultados obtidos indicaram que alguns dos produtos analisados conferiram melhorias significativas em algumas propriedades do solo-cimento.

Farias Filho *et al.* (2010) estudaram o efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. Procurou-se consumir, no estudo, o CH (hidróxido de cálcio) livre utilizando-se resíduo de tijolo moído e metacaulinita em substituição parcial, de 20 e 40% em peso, do cimento portland. Compósitos com fibras de sisal e matrizes cimento-pozolana foram submetidos a ensaios de resistência à flexão, após 28 dias de cura em água, 135 e 180 dias de envelhecimento natural e após 94 ciclos de molhagem e secagem. Os resultados indicaram que é possível consumir todo o hidróxido de cálcio da matriz, o que resultou na manutenção da tenacidade inicial do compósito e no aumento da sua resistência à flexão após exposição natural ou ciclos de molhagem e secagem.

Torgal e Jalali (2010) avaliaram o comportamento mecânico de concretos contendo resíduos da indústria cerâmica. Foram moldados corpos de prova em diferentes composições, utilizando-se o resíduo cerâmico em pó para substituição parcial do cimento e o resíduo cerâmico britado substituindo o agregado convencional. Após o período de cura úmida, os corpos de prova foram submetidos a 12 ciclos de envelhecimento, cada um com 24 h de duração, sendo cada ciclo composto por uma fase principal constituída por 4 subfases que intercalaram períodos de calor e de temperaturas negativas e posteriormente uma fase secundária de acondicionamento. Relativamente à resistência antes e após o envelhecimento acelerado, constataram que a substituição de cimento por resíduo cerâmico aumentou o desempenho dos concretos, ocorrendo efeito inverso para a substituição dos agregados.

Torgal e Jalali (2010), em seu trabalho, abordaram os diversos ensaios que vêm sendo desenvolvidos e utilizados por pesquisadores, ao longo dos últimos 50 anos, para previsão da durabilidade de construções em terra. Os autores afirmam que a avaliação da durabilidade das construções em terra, pode ser efetuada de forma indireta por meio da análise da resistência à compressão ou da sua permeabilidade, também com ensaios de desgaste ou de impacto mecânico ou

mesmo de queda de água gota a gota. Outro conjunto de ensaios, ainda, permite uma simulação da erosão de maneira acelerada, utilizando jatos de água. Os autores concluíram que a energia cinética do impacto das chuvas nas paredes feitas com aquele material é o principal mecanismo responsável pela degradação das paredes de terra.

Vasconcelos e Akasaki (2010) avaliaram o comportamento da durabilidade do concreto de alto desempenho, substituindo parte de cimento e agregados, presentes no concreto, pela cinza da casca de arroz e borracha de pneu respectivamente. Ensaio de durabilidade foram realizados, submetendo o concreto a diversos processos de degradação, como a ação da água, temperatura, sais e solução salina. O estudo indicou que a durabilidade não foi comprometida com essas adições.

Farias Filho *et al.* (2011) em seu trabalho estudaram a durabilidade das argamassas alternativas incorporadas com resíduos de construção civil e da serragem do granito. Para quantificar a durabilidade dos materiais estudados foram realizados ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem, visando simular condições de utilização e avaliar sua degradação. Nos estudos da durabilidade foram utilizados traços de argamassas para alvenaria de elevação, preparadas no traço 1:4:28 (cimento, cal, areia), em massa, com porcentagens de substituição, em peso, da cal por resíduo de 30% e 50%. Os resultados para o envelhecimento natural evidenciaram o comprometimento da durabilidade do material após 60 dias com redução no comportamento mecânico, sendo os melhores resultados para os corpos de prova com 30% e 50% de resíduo de construção. No envelhecimento acelerado, para os tratamentos adotados, os resultados evidenciaram a ação da formação de silicoaluminatos de cálcio e potássio que favoreceram um aumento do comportamento mecânico e, além disso, não foi observado o comprometimento da sua durabilidade.

Figueiredo *et al.* (2011) avaliaram a durabilidade de blocos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. Para o estudo foram confeccionados corpos de prova utilizando o traço 1:10 em massa, em proporção de cal:solo e incorporados com resíduo em substituição parcial à cal, nas proporções de 25%, 50% e 75%, para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias. Posteriormente, submeteram os corpos de prova à avaliação da durabilidade através do método do envelhecimento acelerado, utilizando 12 ciclos de molhagem e secagem, e

considerando como parâmetro de degradação a resistência a compressão simples média dos corpos de prova ao longo dos ciclos. Desta forma, concluíram que os blocos incorporados com até 50% de resíduo apresentaram comportamento satisfatório.

Souza (2011) estudou a durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz. Os ensaios foram realizados com o auxílio de ciclos de molhagem e secagem, para avaliar a durabilidade dos blocos convencionais e alternativos incorporados com casca de arroz. Os resultados obtidos indicam que o aumento do teor de casca de arroz, eleva o valor de absorção de água, diminui a resistência à compressão simples, aumenta a perda de massa e a variação de volume, devido ao grande volume de vazios apresentados pela casca de arroz e a falta de interação entre o sistema solo-cimento e casca de arroz. Os ensaios realizados com os blocos alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz indicaram a composição de 10% de cimento mais a combinação de 86% solo e 4% de casca de arroz, ideal para a fabricação de blocos de alvenaria para construção civil.

Camões e Costeira (2012) analisaram e compararam os resultados de ensaios de durabilidade em corpos de prova de concreto reforçados com fibras de aço e em corpos de prova de concreto sem fibras. Nove ensaios diferentes foram realizados com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e comportamento à tração por flexão; e avaliar parâmetros indicadores de durabilidade: absorção de água por imersão e capilaridade, profundidade de penetração de água sob pressão, resistividade elétrica e difusão por migração de cloretos em regime não estacionário. O estudo realizado permitiu concluir, que em condições extremas de agressividade, a corrosão das fibras de aço, pode prejudicar as propriedades do concreto.

Rezende (2013) avaliou a influência do uso do resíduo de caulim como material pozolânico nas propriedades físicas e mecânicas de concretos secos, avaliando também a durabilidade por meio de ensaios de degradação por exposição a sulfatos e simulação de chuva dirigida. Os traços estudados foram 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,83, com substituição parcial da massa de cimento pelo resíduo calcinado nos teores de 10%, 15%, 20% e 25%. A substituição de 10% e 15% promoveu respectivamente acréscimos de 12% e 6% na resistência à compressão de concretos de referência, sem adição mineral. Com relação aos dados da expansão

diametral, a composição com substituição de 10% apresentou redução, porém a absorção de água apresentou aumento com relação aos valores de referência, para todos os traços e todos os teores de substituição. Após os ensaios de simulação por chuva dirigida, os corpos de prova nos quais foram utilizados o resíduo apresentaram maiores valores de perda de massa proporcionais ao aumento de resíduo na composição e os resultados da análise química do lixiviado indicaram que a decomposição ocorrida nos concretos está relacionada com a baixa reatividade pozolânica do resíduo.

Bezerra (2014) pesquisou a reciclagem dos resíduos da produção de telhas e blocos cerâmicos para produção de corpos cerâmicos por meio do processo de ativação alcalina. Além da caracterização química, física e mecânica, foi avaliada a durabilidade e envelhecimento por meio da simulação de chuva dirigida, envelhecimento natural, exposição a meios ácidos (ácido clorídrico e sulfúrico) e névoa salina. Para isso, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 2,5 x 5,0 cm (diâmetro x altura), com as proporções do Si:Al:Ativador de 3:1:1 e 2:1:1. Diante dos resultados observou-se que nos estudos de durabilidade houve diminuição da resistência mecânica com o aumento de ciclos de exposição a condições agressivas e para condições em meio ambiente a resistência mecânica aumentou com o decorrer do tempo de exposição.

Severo (2014) em seu trabalho teve como objetivo desenvolver sistemas geopoliméricos para a composição de blocos utilizando resíduos das indústrias do beneficiamento do caulim e do granito. Inicialmente foi realizada a caracterização química, física e mecânica dos materiais e composições estudadas. A última etapa envolveu a análise do comportamento de durabilidade e envelhecimento dos corpos de prova produzidos, utilizando a exposição ao meio ambiente e à névoa salina, ensaios de molhagem e secagem e imersão em HCl e H₂SO₄. Com relação à durabilidade dos materiais verificou-se que os corpos de prova expostos ao meio ambiente ativados com NaOH apresentaram um aumento de cerca de 3% em sua resistência mecânica aos 60 dias de exposição, enquanto que os corpos de prova ativados com KOH apresentaram uma redução de cerca de 6% nos 7 primeiros dias permanecendo estáveis durante os 60 dias analisados. Nos testes de molhagem e secagem o comportamento mecânico com KOH apresentou um decréscimo até o 12º ciclo, aumentando em seguida, enquanto que o KOH perdeu resistência durante todos os ciclos.

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 envelhecimento 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 *et al.*, 1997).

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).

Apesar dos estudos que vêm sendo realizados no desenvolvimento de materiais alternativos, a expansão do conhecimento sobre o comportamento desses materiais ainda é necessário à segurança e confiabilidade. Diante disso a durabilidade é um parâmetro indispensável para assegurar a qualidade e a eficiência desses materiais.

3 ANÁLISE CRÍTICA

A utilização de resíduos como matéria prima para confecção de materiais diversos tem se disseminado entre os pesquisadores, tendo em vista a problemática que envolve a geração indiscriminada de resíduos, especificamente os industriais. O volume gerado e a dificuldade em se dar uma destinação adequada aos resíduos, tem como consequência a poluição ambiental, assoreamento de rios, alteração das condições do solo, etc. Apesar de serem necessárias leis rígidas para combater a deposição aleatória destes resíduos no ambiente, também é extremamente importante que se busquem alternativas viáveis para a destinação destes materiais.

Mesmo com um número significativo de pesquisas envolvendo a temática dos resíduos industriais, poucas efetivamente possuem viabilidade técnica e econômica, evidenciando portanto a necessidade de uma maior investigação. O que se observa é a dificuldade em avaliar o comportamento destes materiais, já que um mesmo tipo de resíduo pode apresentar constituições diferentes dependendo da região de origem do material. Além disso, poucas pesquisas avaliam o mesmo resíduo sendo utilizado em um único tipo de material, a grande maioria investiga diferentes aplicações, impossibilitando, desta maneira, uma avaliação global mais abrangente. Provavelmente, se fossem realizadas pesquisas complementares tratando-se de uma mesma aplicação para um dado resíduo ter-se-ia uma avaliação mais aprofundada sobre o comportamento do resíduo para uma determinada aplicação, assegurando assim que a alternativa proposta apresentaria viabilidade técnica.

A possibilidade de estes resíduos serem reutilizados na confecção de novos materiais, principalmente na área da construção civil, surge da característica aglomerante que muitos possuem quando são devidamente beneficiados. Porém este potencial, pozolânico, é de difícil determinação e não possui critérios absolutos para avaliação. Todavia, para que os resíduos industriais possam ser utilizados em substituição aos aglomerantes tradicionais necessita-se que estes possuam atividade pozolânica satisfatória.

Os trabalhos de pesquisa referentes especificamente à reutilização dos resíduos de rochas ornamentais, da cerâmica vermelha e do caulim, abordam em sua grande maioria o estudo referente à utilização destes resíduos para produção de argamassas e concretos. Sendo ainda estes estudos, limitados em suas avaliações quanto à possibilidade de se atestar a viabilidade da utilização, apesar da maioria

dos resultados estarem dentro das prescrições normativas, o número de ensaios realizados ainda é insuficiente para este diagnóstico.

Outro fator relevante para se levar em consideração, é que as atuais abordagens ambientais propõe a substituição da argamassa, principalmente de revestimento, utilizada na construção civil por produtos mais eficientes. Até mesmo, procura-se propor a utilização de produtos para vedação das habitações que não necessitem de uma regularização utilizando argamassas, evitando assim o grande desperdício que é gerado por esta etapa da obra. Coerente seria, portanto que os pesquisadores buscassem não só propor uma utilização para o resíduo, mas sim que acompanhando a proposta de um desenvolvimento sustentável, aliassem também esta reutilização a produtos mais eficientes.

Os blocos ecológicos, a exemplo do solo-cal, apresenta-se como um produto bastante promissor para contribuir com o desenvolvimento sustentável da construção civil. Esses blocos não necessitam de revestimento, apenas de um tratamento impermeabilizante, podem ser reciclados e as pesquisas iniciais com a inserção de resíduos industriais em substituição à parte do aglomerante na sua fabricação, apontaram resultados satisfatórios. Mas são poucas as pesquisas nesta área, principalmente tratando-se do bloco solo-cal, que ainda não possui uma normatização como o bloco solo-cimento.

A utilização de resíduos para produção de materiais de construção ainda não pode ser considerada uma inovação tecnológica, pela falta de uma investigação mais ampla, principalmente no que se refere à durabilidade, ou seja, ao seu desempenho ao longo do tempo. Porém, não há uma metodologia padrão, tão pouco parâmetros definidos para a avaliação da durabilidade dos materiais. As pesquisas tem tentado nortear esta avaliação elegendo alguns fatores, aos quais o material estaria submetido em uso, como parâmetros que poderiam ser utilizados para detectar uma queda de desempenho do material.

Muitos destes trabalhos de pesquisa submetem os materiais à exposição excessiva de apenas um fator de degradação, tentando acelerar o envelhecimento do material para que desta maneira se possa estimar seu desempenho real. Porém sabe-se que na realidade os materiais estão submetidos a vários fatores de degradação, além disto, o próprio ensaio serve apenas para estimativa do desempenho futuro. O ideal seria o estudo da durabilidade em uso, avaliando a interação do material proposto com o meio e os demais materiais com os quais ele

possa interagir ao longo do tempo, porém esta avaliação é pouco viável para um trabalho de pesquisa. Ressalta-se, portanto que ainda assim o estudo da durabilidade utilizando envelhecimento acelerado é extremamente válido para se chegar à proposta de um material inovador e seguro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

- **Solo**

A escolha do solo para confecção dos blocos solo-cal, dado que este está presente em maior quantidade na mistura, deve ocorrer de forma que se tenha o menor consumo possível de cal. De acordo com a ABNT NBR 10833/13 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: < ou = a 45%;
- ✓ Índice de plasticidade: < ou = a 18%.

Portanto, foi utilizado um solo argiloso proveniente de uma jazida próxima ao Condomínio Atmosfera, BR-104 na saída da cidade de Campina Grande – PB para a cidade de Lagoa Seca – PB.

- **Cal**

A cal utilizada nesta pesquisa foi uma cal calcítica hidratada conhecida comercialmente como Carbomil, fabricada no Município de Limoeiro do Norte – CE (Ceará). 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. No laboratório foi acondicionada em sacos plásticos, lacrada e etiquetada para evitar a hidratação.

- **Resíduo de rochas ornamentais (RO)**

O resíduo de rochas ornamentais utilizado, em forma de lama abrasiva, foi proveniente da indústria de beneficiamento GRANFUJI situada no distrito industrial de Campina Grande - PB.

- **Resíduo cerâmico (RC)**

O resíduo cerâmico utilizado foi decorrente de quebra e falhas de processamento de peças de cerâmica vermelha, proveniente da Cerâmica Quipaua Indústria e Comércio Ltda., situada no município de Santa Luzia - PB.

- **Resíduo de caulim**

O resíduo de caulim foi proveniente do beneficiamento do caulim, extraído das minerações da Planície Pegmatítica da Borborema, cedido pela indústria Caulisa SA, Município de Juazeirinho – PB.

Os resíduos do beneficiamento de caulim utilizados foram provenientes de duas etapas: o resíduo da primeira etapa, denominado grosso ou fração grossa (RCG) e o resíduo mais fino (RCF), oriundo do descarte das tortas durante o processo de purificação do caulim, denominado terceiro resíduo ou fração fina.

- **Água**

A porcentagem de água a ser acrescentada à mistura solo-cal-resíduo deve ser adequadamente determinada, já que a compactação realizada com mais ou menos água que o necessário acarretará em perda de resistência, trincamento ou dificuldade na compactação.

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

4.2 Métodos

As etapas que foram realizadas neste trabalho de pesquisa estão apresentadas no Fluxograma da Figura 1.

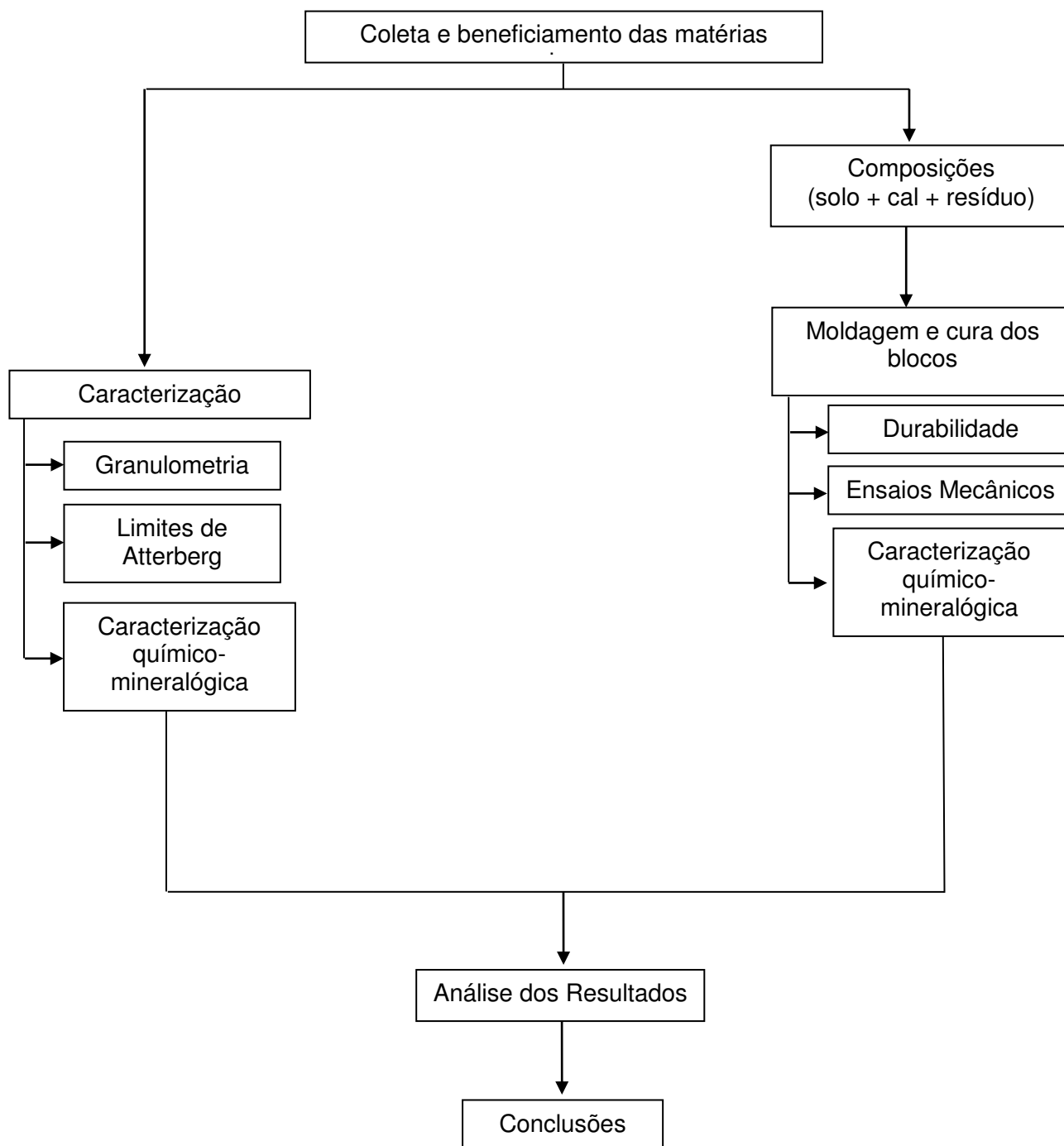


Figura 1- Fluxograma do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa

4.2.1 Beneficiamento das matérias primas

4.2.1.1 Solo

O solo foi seco ao ar, em temperatura ambiente, desagregado e peneirado em peneira ABNT nº 4 (4,8mm).

4.2.1.2 Resíduos

O RO foi beneficiado em um moinho de bolas, enquanto que os RCER, RCG e RCF foram beneficiados em um moinho de galga e passados em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), para a obtenção de uma granulometria equivalente a cal. O RC foi calcinado à temperatura de 705°C, utilizando uma razão de aquecimento de 5º/min, a temperatura de calcinação foi determinada após análise dos resultados encontrados na literatura para estudos com os resíduos utilizados. Uma vez preparados foram acondicionados em sacos, etiquetados e lacrados.

4.2.2 Caracterização física

4.2.2.1 Análise granulométrica por peneiramento

De acordo com a norma ABNT NBR 10833/13 o solo para ser empregado na fabricação de blocos solo-cimento deve 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 7181/88.

4.2.2.2 Análise granulométrica por difração à laser

As análises granulométricas das matérias primas por difração à laser, baseiam-se na dispersão das partículas do material em fase líquida utilizando-se um processo de medida ótica utilizando 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 beneficiadas em 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 (revoluções por minuto) por 10 min, utilizando como defloculante o hexametáfosfato de sódio. Após agitação a amostra foi colocada em um equipamento modelo 1064 da CILAS, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

4.2.2.3 Limites de Atterberg e atividade coloidal

Os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, chamados de limites de Atterberg, 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 7180/88.

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 limites de Atterberg devem ser comparados com a fração argila presente. Isto é o que indica o índice de atividade coloidal, que é obtido através da relação entre o IP (índice de plasticidade) e a fração argila do solo (porcentagem inferior a 2 μ m). A argila presente em um solo pode ser considerada ativa, quando seu índice de atividade coloidal apresenta-se maior que 1,25.

4.2.3 Caracterização química mineralógica

4.2.3.1 Análise química

Para a determinação da composição química dos materiais, as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). A técnica utilizada nesta análise foi a espectrometria de fluorescência de raios X, em equipamento EDX 700 da marca Shimadzu.

4.2.3.2 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 beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi o Difratômetro SHIMADZU XRD-6000. A radiação utilizada foi $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30mA, modo “continuous scan”, com passo de 0,02º/grad/min.

4.2.3.3 Análise térmica diferencial e termogravimétrica

As amostras foram beneficiadas em peneira ABNT N°200 (0,074 mm). Para a realização deste ensaio, foram utilizados equipamentos da BP Engenharia e da SHIMADZU, 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.

4.2.4 Moldagem dos blocos solo-cal

Os blocos foram moldados utilizando-se moldes cilíndricos, com dimensões básicas de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, tomando-se como referência a norma ABNT NBR 12024/12, que determina os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova solo-cimento. O traço utilizado para a confecção desses blocos foi de 1:10 (cal + resíduo:solo), de acordo com a literatura citada na revisão (Figueiredo *et al.*, 2011), este traço apresentou melhor desempenho mecânico em estudos já realizados.

O fator água/aglomerante foi de $1,98 \pm 2\%$ (variação de acordo com o tipo e a quantidade de resíduo incorporado), determinado por meio da umidade ótima de compactação. O ensaio de compactação do solo foi realizado conforme proposto pela norma da ABNT NBR 7182/88, utilizando-se a energia Proctor normal. Os resultados obtidos neste ensaio fornecem a relação entre o peso específico seco máximo do solo e sua umidade ótima de compactação.

Confeccionaram-se blocos solo-cal de referência, sem adição de resíduo e com incorporação de 15%, 30% e 50% de RO, RCER e RC (50% RCF + 50% RCG) em substituição a parte do aglomerante (cal), as composições e a temperatura de calcinação foram determinadas após análise dos resultados encontrados na literatura para estudos com os resíduos utilizados. O RC foi calcinado à temperatura de 705°C, utilizando uma razão de aquecimento de 5º/min.

Após a desmoldagem os blocos foram acondicionados em sacos plásticos e etiquetados. Utilizou-se o processo de cura úmida, onde os blocos ensacados foram colocados em tanques, cobertos com areia úmida e submetidos a períodos de cura de 28, 60 e 90 dias (Figura 2).



Figura 2 - Cura dos blocos: (a) Envolvidos em sacos plásticos; (b) Cobertos com areia úmida

4.2.5 Ensaios tecnológicos

4.2.5.1 Avaliação da atividade Pozolânica

A atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporadas com os resíduos foi determinada segundo a norma da ABNT NBR 5751/12 modificada, seguindo a metodologia utilizada por Nuran Ay (2000). A avaliação foi realizada tomando-se como parâmetro os resultados da resistência à compressão simples (RCS), ou seja, o índice de atividade pozolânica foi determinado pela diferença de RCS dos traços incorporados com os resíduos e o traço de referência solo-cal.

4.2.5.2 Absorção de água

A determinação da absorção de água foi realizada conforme a metodologia recomendada pela norma ABNT NBR 8492/12, modificada. Os blocos foram colocados por 24h em estufa a 110°C e pesadas (M_1) em balança digital de precisão de 0,1g com capacidade para 2.000g para a determinação de sua massa seca.

Para a determinação massa saturada os blocos foram submersos em água por um período de 24h, após este período foram retirados do tanque e pesados (M_2). A diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca corresponde ao valor de sua capacidade total de absorção de água, calculada em base seca.

Os valores individuais de absorção de água (A), expressos em porcentagem (%), foram obtidos pela equação (1), enquanto que a absorção média foi determinada pela média aritmética de cinco repetições.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

M_1 = massa do corpo de prova seco em estufa (g)

M_2 = massa do corpo de prova saturado (g)

A = absorção de água (%)

4.2.5.3 Durabilidade

A análise da durabilidade foi realizada para os blocos solo-cal com e sem incorporações de resíduos em idade de cura que apresentaram melhor desempenho mecânico, nos ensaios de RCS e absorção de água. Na análise foram utilizados os métodos do envelhecimento natural, envelhecimento acelerado pela técnica de molhagem e secagem, simulação da chuva dirigida e avaliação da resistência ao ataque por sulfatos.

4.2.5.3.1 Envelhecimento natural

Após o período de cura, 5 blocos de cada composição foram expostos às condições climáticas em tanques abertos e com grades no Laboratório de Solos da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) (Figura 3), Campina Grande – PB, por um período médio de 365 dias, entre os anos de 2014 e 2015. Durante o período em que os blocos foram expostos ao ambiente natural, as temperaturas médias variaram de 20°C a 32°C e a umidade do ar apresentou valores em torno de 75%. As temperatura mínimas ocorreram no mês de agosto de 2014. As máximas foram observadas nos meses de fevereiro e abril de 2015. As maiores precipitações mensais foram observadas nos meses de março (97mm) e maio de 2015 (100mm). A menor precipitação acumulada verificou-se em janeiro de 2015.



Figura 3 - Blocos solo-cal com e sem incorporação de resíduos submetidos às condições climáticas

4.2.5.3.2 Envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem

Para a avaliação da durabilidade utilizando o envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem foram moldados 52 blocos por composição, para cada idade de cura.

Adaptações/modificações na norma que estabelece os procedimentos do ensaio de durabilidade para solo-cimento, norma ABNT NBR 13554/96, foram realizadas tendo como referência a literatura. Com esse ensaio objetiva-se avaliar a durabilidade de blocos convencionais e alternativos, utilizando-se como indicador de degradação a resistência à compressão simples.

Após o período de cura, os blocos foram submetidos à análise da durabilidade de acordo com as seguintes etapas:

1. uma amostragem de 4 blocos de cada composição foi retirada do tanque, secado em estufa por aproximadamente 5h a uma temperatura de 60°C e determinada a resistência média à compressão simples padrão;
2. os blocos restantes foram submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem, ao fim de cada ciclo uma amostra de 4 blocos foi retirada e

submetida ao ensaio de compressão simples, representando a resistência média à compressão simples do ciclo.

Dessa forma, dentre os 52 blocos representantes de cada composição no período de cura estabelecido, 4 representaram o comportamento do material quando não submetido ao fator de degradação (padrão) e os outros 48 foram submetidos ao ensaio de durabilidade, correspondente a 12 ciclos de molhagem e secagem, conforme apresentado na Figura 4. A definição do ciclo foi baseada nos planejamentos utilizados por Oliveira (2004) e Farias Filho (2007).

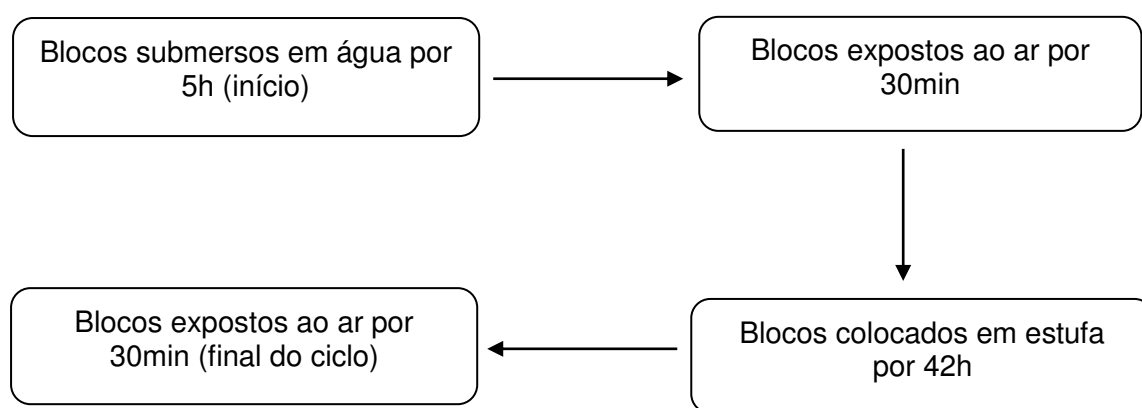


Figura 4 - Ciclo de molhagem e secagem

O método modificado de molhagem e secagem utilizado constituiu-se de 12 ciclos, onde cada ciclo correspondeu a: 5h de submersão dos blocos em água; 30min de exposição ao ar; 42h de secagem em estufa à temperatura de 60°C e 30min de exposição ao ar dos blocos.

O ensaio para determinar a resistência à compressão simples foi realizado nos blocos, seguindo as prescrições indicadas pela ABNT NBR 12025/12. A prensa utilizada foi a SHIMADZU AG-IS com célula de 100KN.

4.2.5.3.3 Envelhecimento acelerado por simulação da chuva dirigida

O ensaio de envelhecimento acelerado por simulação da chuva dirigida foi realizado utilizando ciclos de molhagem (chuva) durante o período de duas horas e secagem em estufa com temperatura de 60°C em 48h, para permitir a completa secagem dos corpos de prova. Vinte e quatro ciclo foram realizados no total. As propriedades mecânicas para este estudo foram avaliadas ao término do 2º, 6º, 12º,

18º e 24º ciclos, com a resistência à compressão simples. A perda de massa foi determinada ao término de cada ciclo. A definição do ciclo foi baseada nos planejamentos utilizados por Rezende (2013), Bezerra (2014) e Severo (2014).

A variação de massa, calculada segundo a equação 2, foi utilizada como parâmetro para avaliar a resistência à erosão causada pela chuva, sendo os resultados comparados aos encontrados para os corpos de prova de referência (sem adição de resíduos).

$$V_{ms} = \frac{(m_{si} - m_{sc})}{m_{si}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

V_{ms} = variação de massa seca (%)

m_{si} = massa seca inicial (g)

m_{sc} = massa seca no ciclo avaliado (g)

4.2.5.3.4 Avaliação da resistência ao ataque por sulfatos

O ensaio para avaliação da variação dimensional decorrente da exposição à solução de sulfatos foi adaptado da NBR 13583/14, que prescreve o método para avaliação em barras de argamassa de cimento Portland. As recomendações quanto ao período de exposição e teor da solução de sulfato de sódio (10%) foram mantidas, porém, foram moldados blocos cilíndricos (50 mm x 100 mm) de solo-cal com e sem incorporação de resíduos, sendo feitas três medições (mm) de altura para cada corpo de prova, utilizando-se paquímetro, sendo utilizados 3 blocos para cada composição. A localização das alturas e dos diâmetros foi marcada com tinta permanente no início do ensaio, para que as medições fossem efetuadas sempre nos mesmos pontos conforme ilustrado na Figura 5, sendo também registrados os quantitativos de massa úmida dos blocos a cada leitura de dimensões.

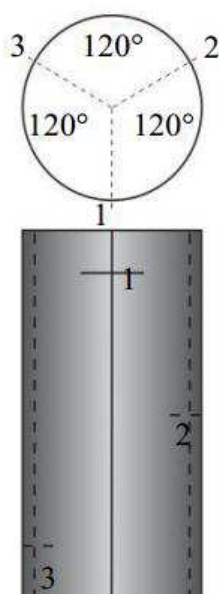


Figura 5 - Localização das linhas de referência para medições dos blocos

Fonte: Rezende (2013)

Os blocos, após o período de cura e devidamente identificados, foram imersos em água por 48h sendo então retirados e, após secagem da água superficial com um pano úmido, feita a leitura inicial das dimensões em milímetros, com duas casas decimais, nas linhas previamente marcadas. Os blocos foram então divididos em dois grupos: um grupo foi imerso em solução de sulfato de sódio (10%) e outro em água (23 ± 2)°C, em recipientes plásticos devidamente vedados, com o objetivo de evitar a evaporação.

As medições foram efetuadas no início do ensaio e a cada sete dias durante seis semanas, ou seja, até 42d após a imersão, sendo a expansão individual calculada por meio da equação 3:

$$E_{id} = \frac{(M_{idade} - M_{inicial})}{M_{inicial}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

E_{id} = expansão individual (%)

$M_{inicial}$ = média das medições iniciais em cada bloco (mm)

M_{idade} = média das medições efetuadas na idade correspondente em cada bloco (mm)

A expansão resultante é a diferença entre a expansão dos blocos imersos em solução de sulfato de sódio e a dos blocos imersos em água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados e as discussões do trabalho desenvolvido. Inicialmente, será apresentada a caracterização das matérias-primas utilizadas, em seguida um estudo sobre a determinação das melhores incorporações com resíduos industriais, por fim a durabilidade utilizando o envelhecimento natural, o envelhecimento acelerado pela técnica de molhagem e secagem, simulação da chuva dirigida e avaliação da resistência ao ataque por sulfatos.

5.1 Caracterização Físico-Mineralógica

5.1.1 Granulometria

A Tabela 1 apresenta a granulometria por peneiramento para o solo utilizado neste trabalho de pesquisa.

Tabela 1 – Granulometria por peneiramento do solo

Solo		NBR 10833/2013
Massa acumulada passante na peneira ABNT nº4 (4,8mm)	100,00%	100,00%
Pedregulho (Partículas > 2,0mm)	6,43%	Não normalizado
Areia grossa (2,00mm < Partículas < 0,42mm)	27,49%	Não normalizado
Areia fina (0,42mm < Partículas < 0,075mm)	30,77%	Não normalizado
Silte e argila (Partículas < 0,075mm)	35,31%	Não normalizado
Massa acumulada passante na peneira ABNT nº200 (0,075mm)	35,31%	10,00% a 50,00%

Em relação à distribuição granulométrica por peneiramento o solo apresentou valores de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 10833/13, que estabelece para solos à serem utilizados na fabricação de blocos solo cimento porcentagem passante na peneira ABNT Nº 4 (4,8mm) de 100% e na peneira ABNT Nº 200 (0,075mm) de 10% a 50%. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Patricio *et al.* (2013) em seus trabalhos de pesquisa.

Nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 estão ilustradas as curvas de distribuição granulométrica acumulada do solo, cal, resíduo de rochas ornamentais, resíduo de cerâmica vermelha e dos resíduos de caulim, grosso e fino utilizados nesta pesquisa.

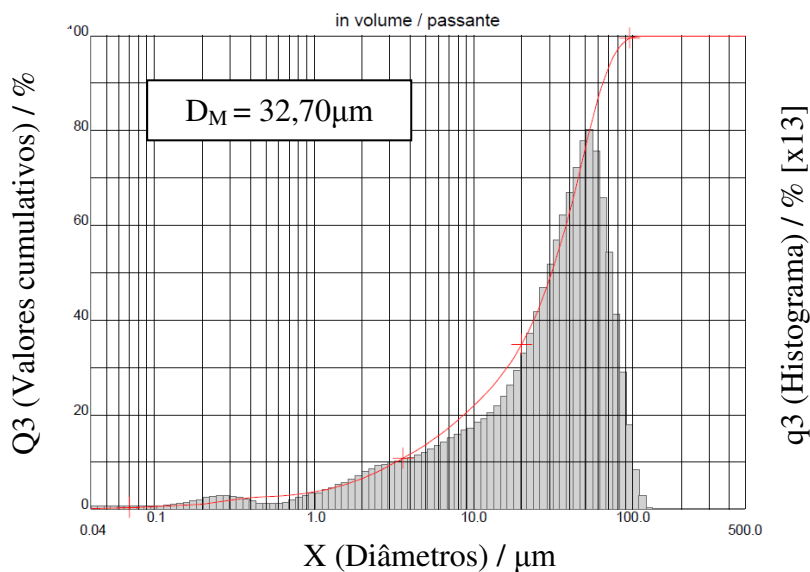


Figura 6 - Distribuição de tamanho de partículas do solo

De acordo com a Figura 6 observa-se que a curva apresentou comportamento monomodal com ampla distribuição de partículas, entre $0,04\mu\text{m}$ – $112\mu\text{m}$, com diâmetro médio de $32,70\mu\text{m}$ com D_{10} de $3,27\mu\text{m}$, D_{50} de $30,83\mu\text{m}$ e D_{90} de $64,45\mu\text{m}$. A massa acumulada equivalente a fração argila do solo ($< 2\mu\text{m}$) foi de 6,51%, a fração silte ($2\mu\text{m} < X < 60\mu\text{m}$) foi 80,12% e a fração areia ($60\mu\text{m} < X < 2000\mu\text{m}$) de 13,37%.

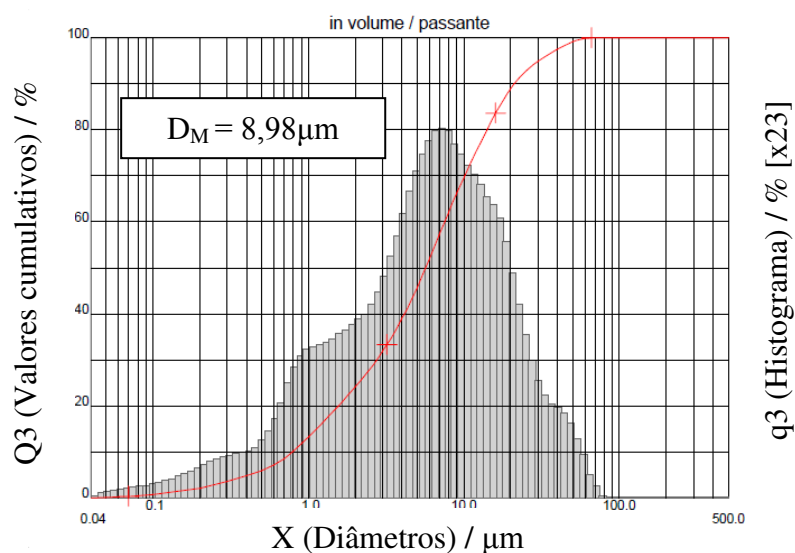


Figura 7 - Distribuição de tamanho de partículas da cal Carbomil

Analisando-se a Figura 7 observa-se que a curva apresentou comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,04\mu\text{m}$ – $90\mu\text{m}$, com diâmetro médio de $8,98\mu\text{m}$ e D_{10} de $0,79\mu\text{m}$, D_{50} de $5,66\mu\text{m}$ e D_{90} de $21,12\mu\text{m}$. A cal apresentou uma grande concentração de partículas na faixa entre $2\mu\text{m}$ - $60\mu\text{m}$, estes resultados são semelhantes aos encontrados nos estudos realizados por PATRICIO (2011).

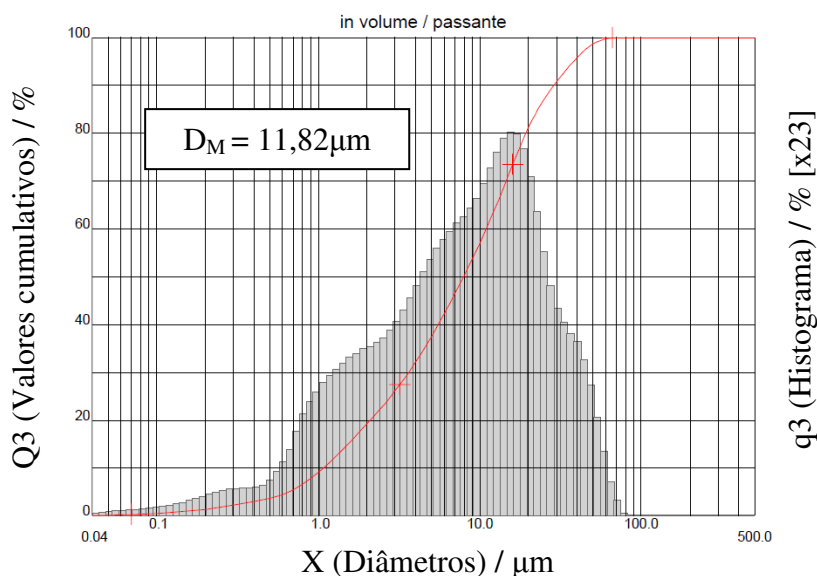


Figura 8 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de rochas ornamentais

Analisando a Figura 8 observa-se que a curva apresentou comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas na faixa entre $0,04\mu\text{m}$ – $71\mu\text{m}$, com diâmetro médio de $11,82\mu\text{m}$, e D_{10} $1,07\mu\text{m}$, D_{50} $7,93\mu\text{m}$ e D_{90} $28,66\mu\text{m}$. O RO apresentou uma grande concentração de partículas na faixa entre $2\mu\text{m}$ - $60\mu\text{m}$, estes resultados confirmam os valores obtidos por LIMA *et al.* (2014).

Analisando a Figura 9 observa-se que a curva apresentou comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,04\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$, com diâmetro médio de $21,59\mu\text{m}$, e D_{10} $1,54\mu\text{m}$, D_{50} $16,28\mu\text{m}$ e D_{90} $49,54\mu\text{m}$. O RCER apresentou uma grande concentração de partículas na faixa entre $2\mu\text{m}$ - $60\mu\text{m}$, estes resultados são semelhantes aos obtidos por FONTES (2013) em seu trabalho de pesquisa.

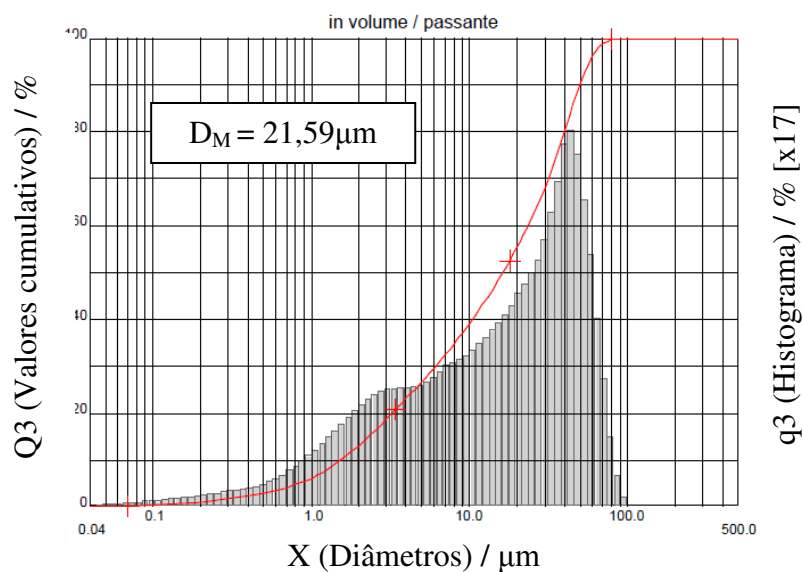


Figura 9 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo cerâmico

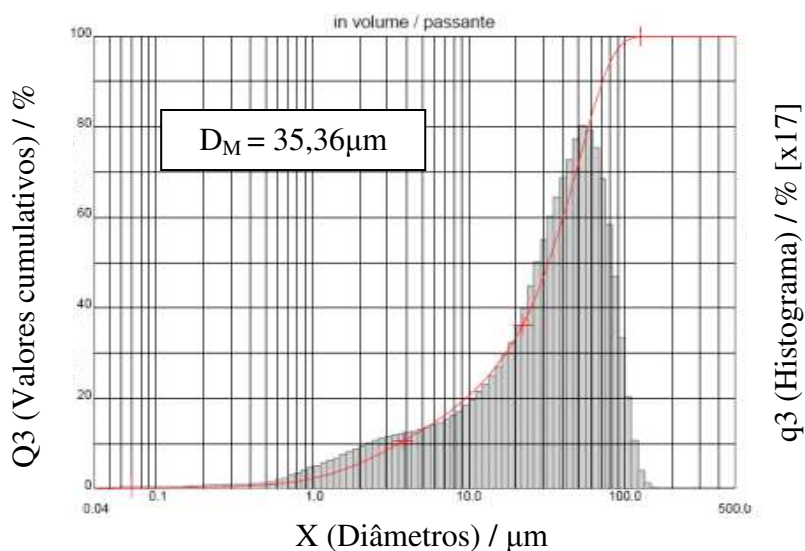


Figura 10 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de caulim grosso

Analisando as Figuras 10 e 11 observa-se que as curvas apresentaram comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,04\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$, o RCG com diâmetro médio de $35,36\mu\text{m}$, D_{10} $3,54\mu\text{m}$, D_{50} $32,26\mu\text{m}$ e D_{90} $71,29\mu\text{m}$ e o RCF com diâmetro médio de $31,71\mu\text{m}$, e D_{10} $2,43\mu\text{m}$, D_{50} $28,21\mu\text{m}$ e D_{90} $67,47\mu\text{m}$. O RCG e RCF apresentaram uma grande concentração das partículas na faixa entre $50\mu\text{m}$ - $60\mu\text{m}$, estes valores são semelhantes já que os resíduos antes de serem submetidos à análise foram

beneficiados e passados na peneira ABNT N^o200 e estão coerentes com os obtidos por Anjos e Neves (2011) em seu trabalho de pesquisa.

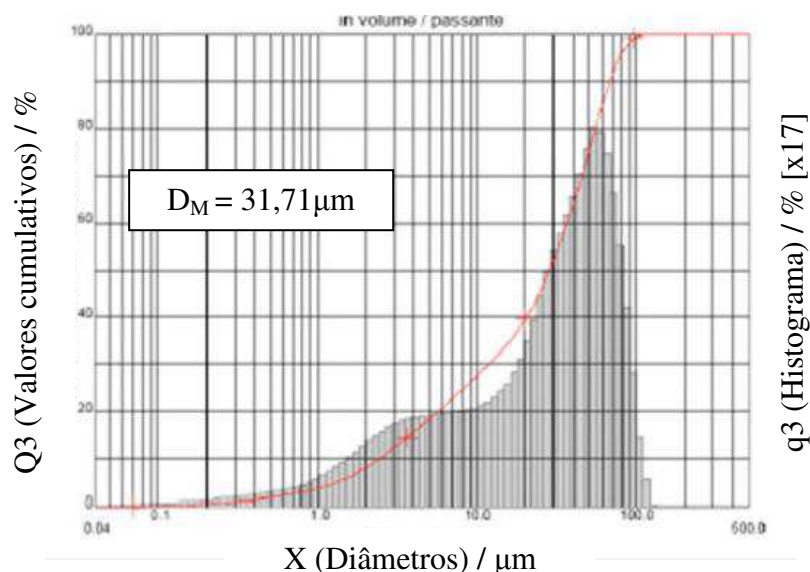


Figura 11 - Distribuição de tamanho de partículas do resíduo de caulim fino

5.1.2 Limites de Atterberg, atividade coloidal e classificação do solo

A Tabela 2 apresenta os limites de Atterberg e atividade coloidal, obtidos para o solo utilizado neste trabalho de pesquisa.

Tabela 2 - Limites de Atterberg e atividade coloidal do solo

Material	Solo
LL (%)	26,6
LP (%)	18,5
IP (%)	8,1
Índice de atividade coloidal	1,45

Analisando os valores contidos na Tabela 2, verifica-se que estão de acordo com o que estabelece a norma ABNT NBR 10833/13, que recomenda na confecção de tijolos solo-cimento, o uso de um solo que possua limite de liquidez máximo de 45% e índice de plasticidade máximo de 18%, estes resultados são semelhantes aos obtidos por Segantini e Wanda (2011) em seu trabalho de pesquisa.

O solo utilizado neste trabalho de pesquisa pode ter sua fração argila considerada ativa, com um índice de atividade coloidal de 1,45.

De acordo com os resultados da análise granulométrica e limites de Atterberg o solo foi classificado 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).

5.1.3 Composição química

A Tabela 3 apresenta as composições químicas do solo, cal, do RO, do RCER, do RCF e do RCG.

Tabela 3 - Composição química dos materiais estudados

Determinações (%)	Solo	Cal	RO	RCER	RCF	RCG
SiO₂	45,19	1,57	49,03	51,24	45,29	46,90
Al₂O₃	31,24	0,87	18,38	26,09	38,82	38,05
K₂O	3,71	0,32	3,38	3,76	0,69	1,23
MgO	0,73	1,81	4,08	3,17	0,95	0,88
Fe₂O₃	5,88	0,27	12,38	9,67	0,34	0,43
CaO	0,32	69,79	6,28	1,72	Ausente	Ausente
SO₃	0,09	Ausente	0,37	Ausente	Ausente	Ausente
TiO₂	0,44	Ausente	1,95	0,97	Ausente	0,09
Na₂O	Ausente	Ausente	2,58	0,97	Ausente	Ausente
Outros Óxidos	0,36	0,04	0,84	0,97	0,17	0,09
Perda ao Fogo	12,04	25,33	0,73	1,44	13,74	12,33

Observa-se na Tabela 3 que o solo apresentou elevados teores de sílica e alumina correspondendo a 45,19% e 31,24% respectivamente, provenientes da fração argilosa, feldspato e sílica livre. Observa-se também a presença do óxido de ferro correspondendo a 5,88%, esse óxido é o responsável por conferir cor avermelhada ao solo. Em percentuais menores 3,71% e 0,32%, o K₂O e o CaO, provenientes da mica e do carbonato de cálcio. O óxido de magnésio representou 0,73% e os demais óxidos valores abaixo de 1%.

Quanto à perda ao fogo, o solo apresentou uma porcentagem de 12,04%, estando estes resultados de acordo com os obtidos por PATRICIO *et al.* (2013).

Analisando a composição química da cal verifica-se um elevado teor de óxido de cálcio (CaO) de 69,79% e baixo teor de óxido de magnésio (MgO) de 1,81%. Os demais componentes representam 3,07% na composição da cal, equivalente às

impurezas. De acordo com essa composição, a cal utilizada nessa pesquisa classifica-se como cal calcítica.

Quanto à perda ao fogo, a cal apresentou uma porcentagem de 25,33%, estes resultados são coerentes aos valores obtidos por PATRICIO *et al.* (2013).

Nos resultados apresentados para a composição química do RO verificou-se elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) de 49,03%, óxido de alumínio (Al_2O_3) de 18,38% e o óxido de ferro (Fe_2O_3) de 12,38%. Tendo em vista que esses óxidos representam mais de 50% da composição química do resíduo, que este também apresenta teor de SO_3 de 0,37%, inferior a 5%, e tem uma perda ao fogo de 0,73% que é inferior a 6%, de acordo com a norma ABNT NBR 12653/15 e ASTM C 618/08, esse material possui requisitos químicos favoráveis à atividade pozolânica, estes resultados confirmam os valores obtidos por LIMA *et al.* (2014).

Para a composição química do RCER (Tabela 2) verificou-se elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) de 51,24%, óxido de alumínio (Al_2O_3) de 26,09% e o óxido de ferro (Fe_2O_3) de 9,67%. Assim, como esses óxidos representam mais de 50% da composição química do resíduo, e este também não apresenta SO_3 , sendo, portanto inferior a 5%, apresentando uma perda ao fogo de 1,44% que é inferior a 6%, de acordo com a norma ABNT NBR 12653/15 e ASTM C 618/08, esse material possui requisitos químicos favoráveis à atividade pozolânica estes resultados são semelhantes aos valores obtidos por SILVA *et al.* (2014).

Nos resultados apresentados para a composição química do RCF verificou-se elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) de 45,29%, óxido de alumínio (Al_2O_3) de 38,82% e o óxido de ferro (Fe_2O_3) de 0,34%. Tendo em vista que esses óxidos representam mais de 50% da composição química do resíduo e que este também não apresenta SO_3 , ou seja, SO_3 inferior a 5%, de acordo com a norma ABNT NBR 12653/15 e ASTM C 618/08, esse material possui requisitos químicos favoráveis à atividade pozolânica. De acordo com as normas o material deve ainda possuir uma perda ao fogo máxima de 6%, no RCF a perda ao fogo encontrada foi de 13,74%, porém este resíduo será submetido à calcinação, para que haja a perda de hidroxilas da caulinita favorecendo assim novas ligações (reações pozolânicas). Após esse processo a perda ao fogo irá diminuir e à atividade pozolânica será favorecida.

Para a composição química do RCG (Tabela 2) verificou-se elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) de 46,90%, óxido de alumínio (Al_2O_3) de 38,05% e o óxido

de ferro (Fe_2O_3) de 0,43%. Tendo em vista que esses óxidos representam mais de 50% da composição química do resíduo e que este também não apresenta SO_3 , ou seja, SO_3 inferior a 5%, de acordo com a norma ABNT NBR 12653/15 e ASTM C 618/08, esse material possui requisitos químicos favoráveis à atividade pozolânica. De acordo com as normas o material deve ainda possuir uma perda ao fogo máxima de 6%, no RCG a perda ao fogo encontrada foi de 12,33%, porém este resíduo será submetido à calcinação, para que haja a perda de hidroxilas da caulinita favorecendo assim novas ligações (reações pozolânicas). Após esse processo a perda ao fogo irá diminuir e a atividade pozolânica será favorecida. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Severo (2014) em seu trabalho de pesquisa.

5.1.4 Difração de raios X

As Figuras 12, 13, 14, 15, 16 e 17 ilustram respectivamente os difratogramas do solo, da cal, do RO, do RCER, do RCF e do RCG utilizados neste trabalho de pesquisa.

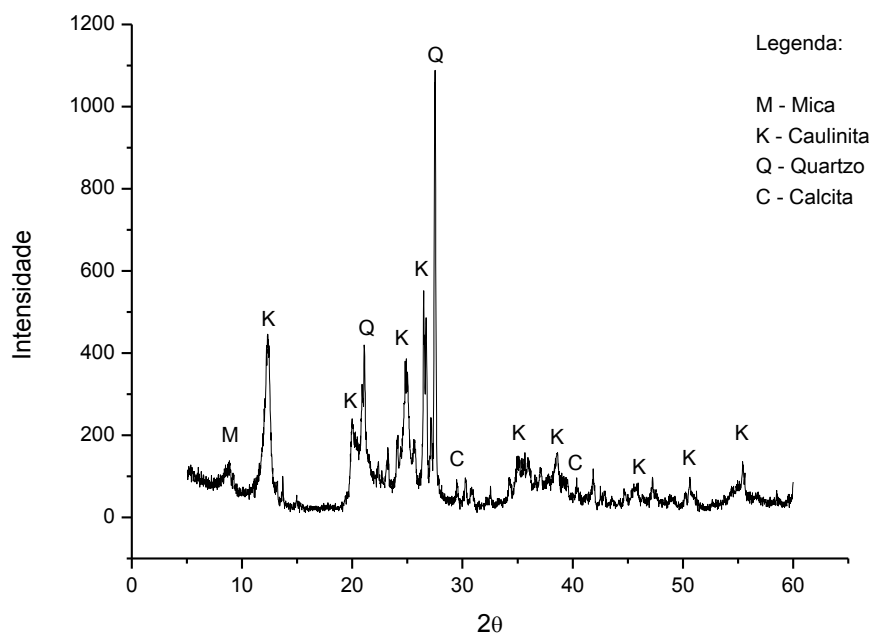


Figura 12 - Difração de raios X do solo

Observando o difratograma do solo da Figura 12 verifica-se que o solo apresentou as seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo

(SiO₂), calcita (CaCO₃) e menor quantidade de mica (KMg₃(Si₃Al)O₁₀(OH)₂). Esses resultados estão de acordo com a composição química da Tabela 3 e com os valores obtidos por PATRICIO *et al.* (2013).

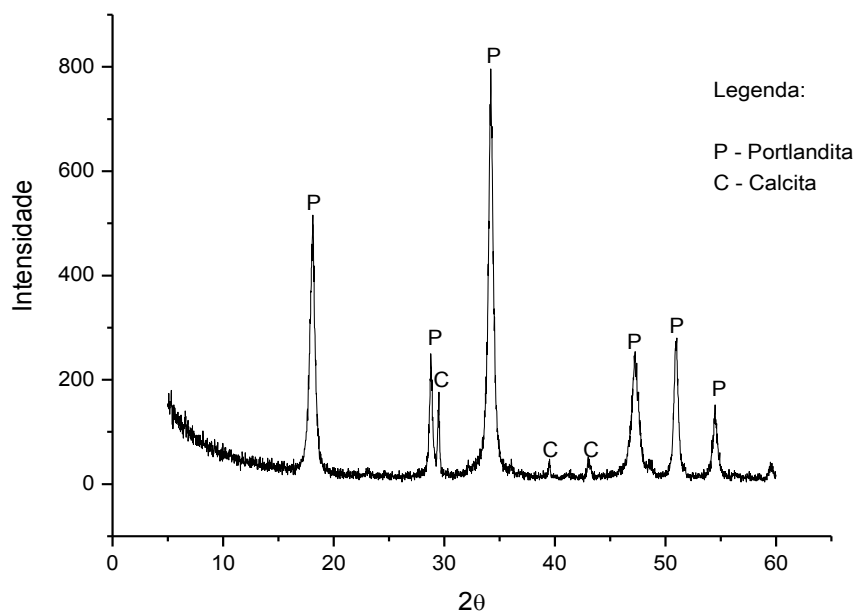


Figura 13 - Difração de raios X da cal

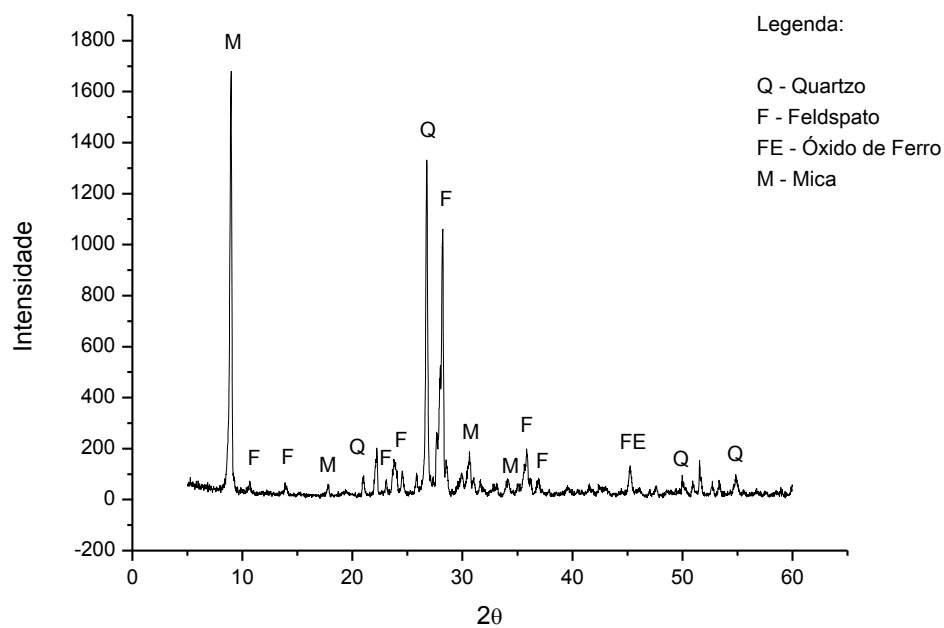


Figura 14 - Difração de raios X do resíduo de rochas ornamentais

Analisando o difratograma da Figura 13 verifica-se que a cal apresentou as seguintes fases mineralógicas: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e calcita (CaCO_3). Esses resultados estão de acordo com a composição química apresentada na Tabela 3 e com os resultados encontrados por PATRICIO *et al.* (2013).

Analisando o difratograma do RO (Figura 14) verifica-se a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8), feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), e quartzo (SiO_2). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) proveniente da granalha de ferro na serragem das rochas. Esses resultados estão de acordo com a composição química apresentada na Tabela 3 e com os resultados encontrados por LIMA *et al.* (2010).

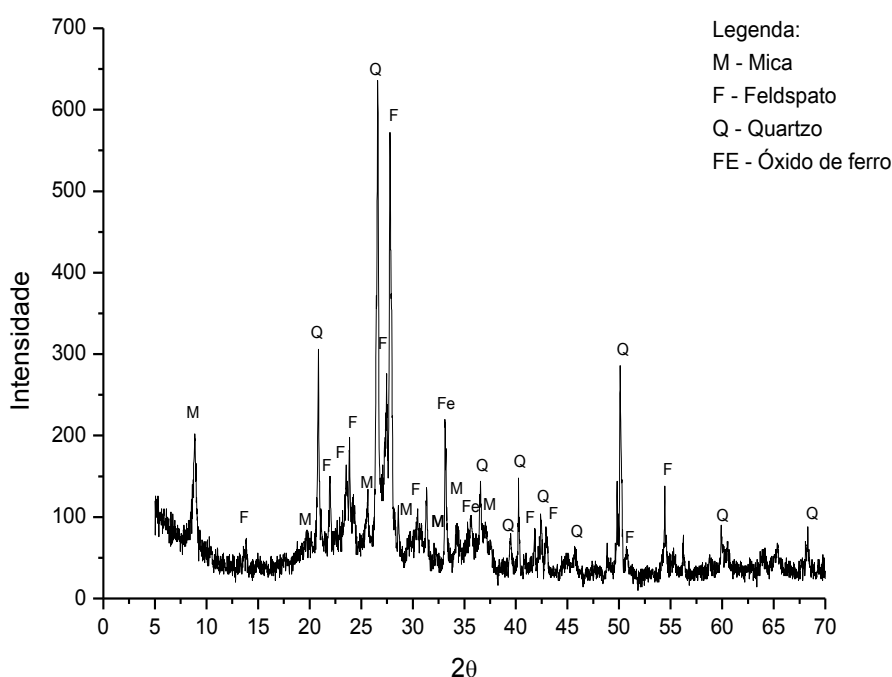


Figura 15 - Difração de raios X do resíduo cerâmico

Analisando o difratograma do RCER (Figura 15) verifica-se a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8), feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e quartzo (SiO_2). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3). Esses resultados estão de acordo com a

composição química apresentada no Tabela 3 e com os resultados encontrados por BEZERRA (2014).

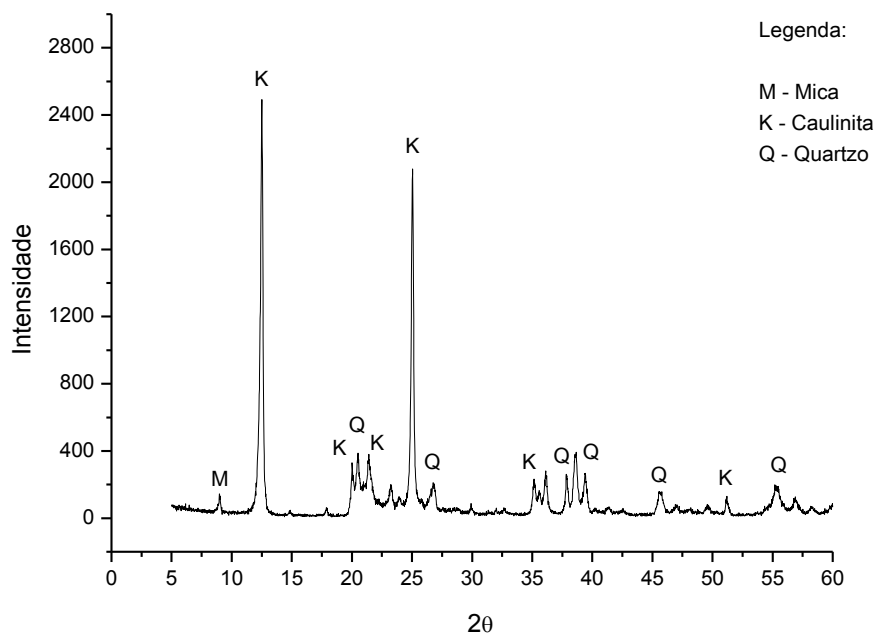


Figura 16 - Difração de raios X do resíduo de caulim fino

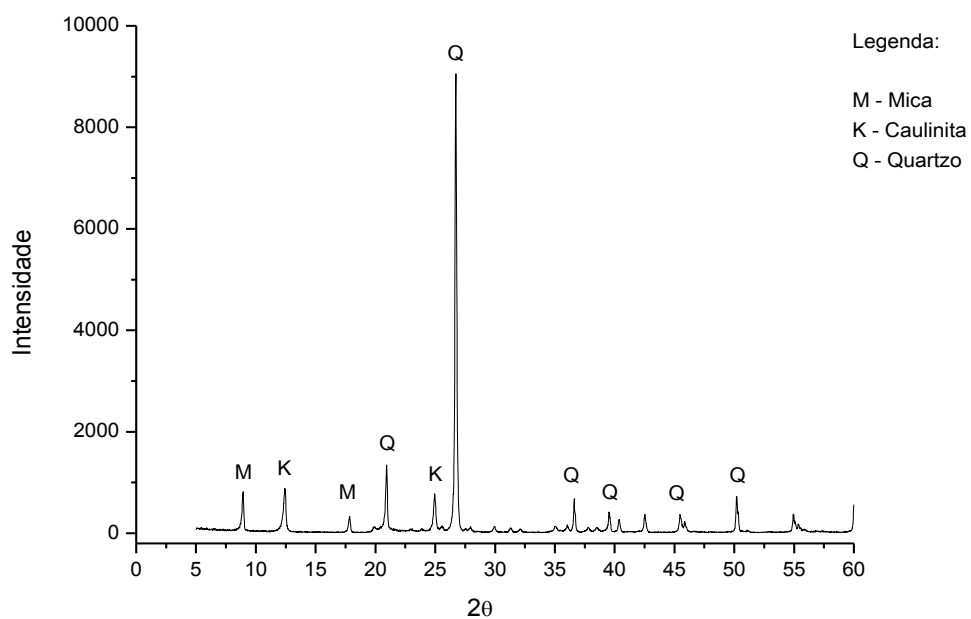


Figura 17 - Difração de raios X do resíduo de caulim grosso

Analisando os difratogramas do RCF (Figura 16) e RCG (Figura 17) verifica-se a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,21Å e quartzo (SiO_2). O RCG resíduo grosso é constituído basicamente por quartzo, por ser proveniente da lavagem do caulim bruto, já o RCF apresenta grande quantidade de caulinita por ser originado na etapa de purificação do caulim através de separação em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm), onde o rejeito fica retido. Esses resultados estão de acordo com a composição química apresentada no Tabela 4 e com os resultados encontrados por SEVERO (2014).

5.1.5 Análise térmica diferencial e termogravimétrica

As Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23 ilustram as curvas das análises termodiferenciais e termogravimétricas do solo, da cal, do RO, do RCER, do RCF e do RCG estudados.

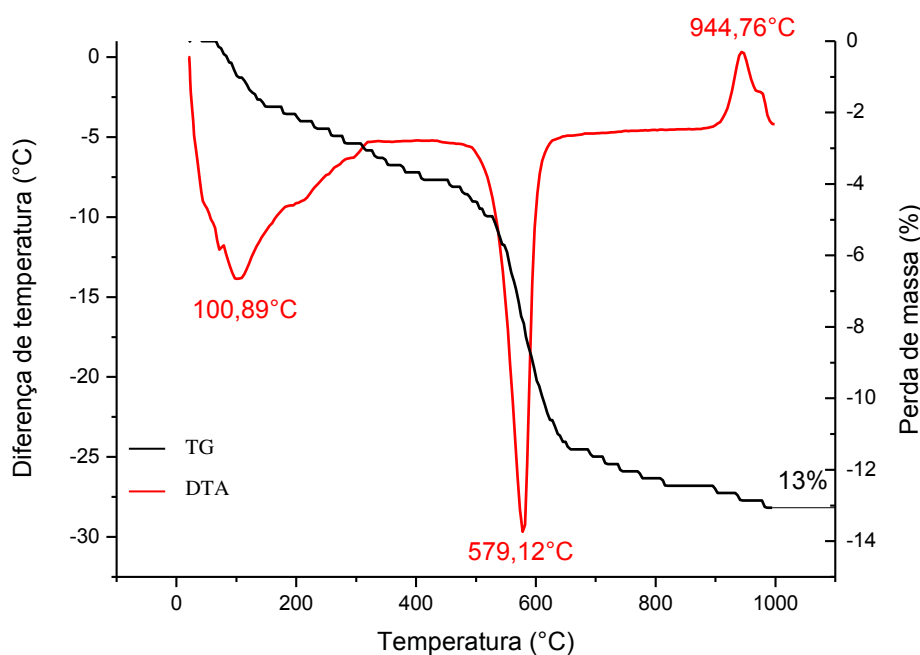


Figura 18 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do solo

Analisando a curva da análise termodiferencial do solo (Figura 18) verifica-se que a amostra apresentou pico endotérmico a 100,89°C caracterizando a presença de água livre e adsorvida, pico endotérmico de grande intensidade a 579,12°C correspondente possivelmente à presença de hidroxila formando a metacaulinita, a

partir de 620°C até 900°C, e pico exotérmico de pequena intensidade a 944,76°C provavelmente relacionado a nucleação de mulita. Para análise termogravimétrica tem-se uma perda de massa total de 13% correspondendo a perda de água livre e adsorvida e a perda de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). O solo estudado apresenta comportamento térmico similar aos encontrados por PATRICIO (2011).

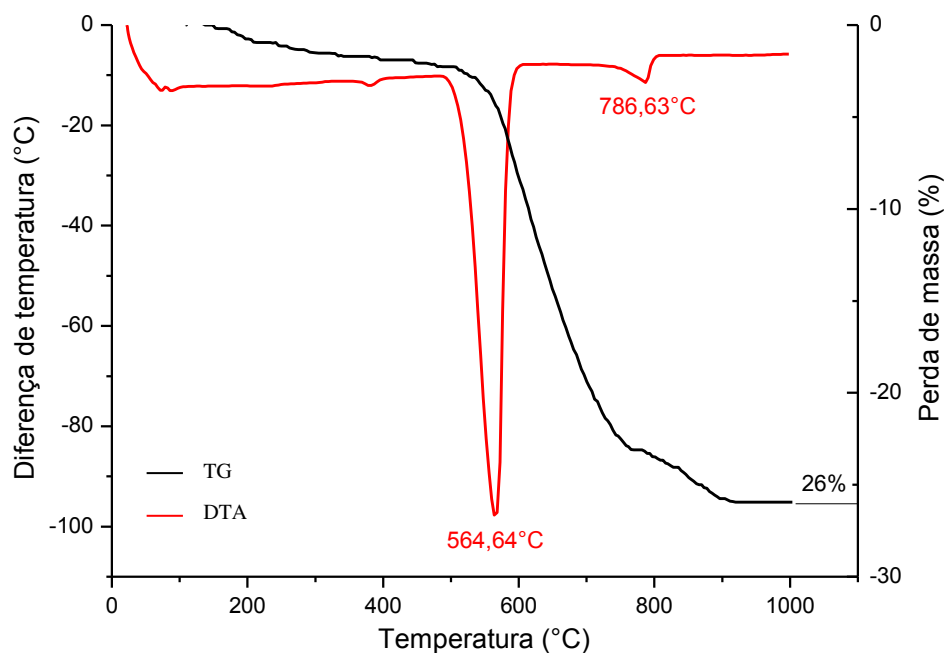


Figura 19 - Análises termogravimétrica e termodiferencial da cal

Analisando a curva da análise termodiferencial da cal (Figura 19) verifica-se que a análise térmica diferencial apresentou pico endotérmico de grande intensidade a 564,64°C correspondente a presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e de pequena intensidade a 786,63°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 26% correspondendo as perdas de massa do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e da calcita (CaCO_3). Esses resultados são semelhantes ao encontrado por PATRICIO (2011).

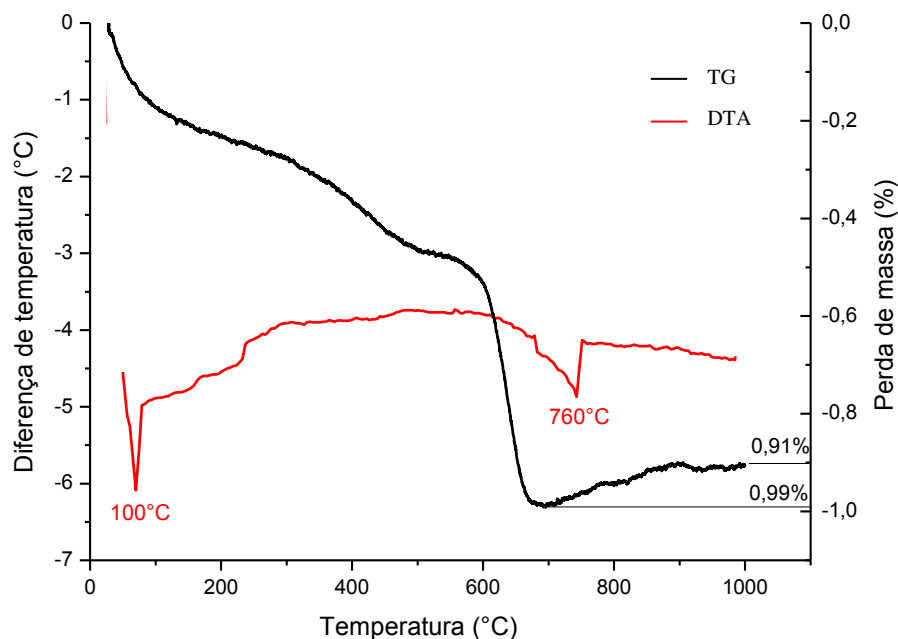


Figura 20 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de rochas ornamentais

Analisando a curva da análise termodiferencial do RO (Figura 20) verifica-se que a amostra apresentou pico endotérmico a 100°C caracterizando a presença de água livre e pico endotérmico presente em 760°C corresponde provavelmente à perda de hidroxilas da mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Para análise termogravimétrica tem-se uma perda de massa de 0,99% e posteriormente observa-se que houve um pequeno ganho de massa de 0,08%, provavelmente devido à reações ocorridas entre o material e o ar circundante. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por SEVERO (2014).

Analisando a curva da análise termodiferencial do RCER (Figura 21) verifica-se que a amostra apresentou pico endotérmico a 60°C caracterizando a presença de água livre, pico endotérmico presente em 285°C corresponde provavelmente ao hidróxido de alumínio, e pico endotérmico na temperatura de 660°C correspondente possivelmente a quebra da estrutura cristalina da mica residual. Para análise termogravimétrica observa-se uma perda de massa de 2,56% correspondente à perda de água livre e decomposição de algum elemento presente no material em pequena quantidade. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por BEZERRA (2014).

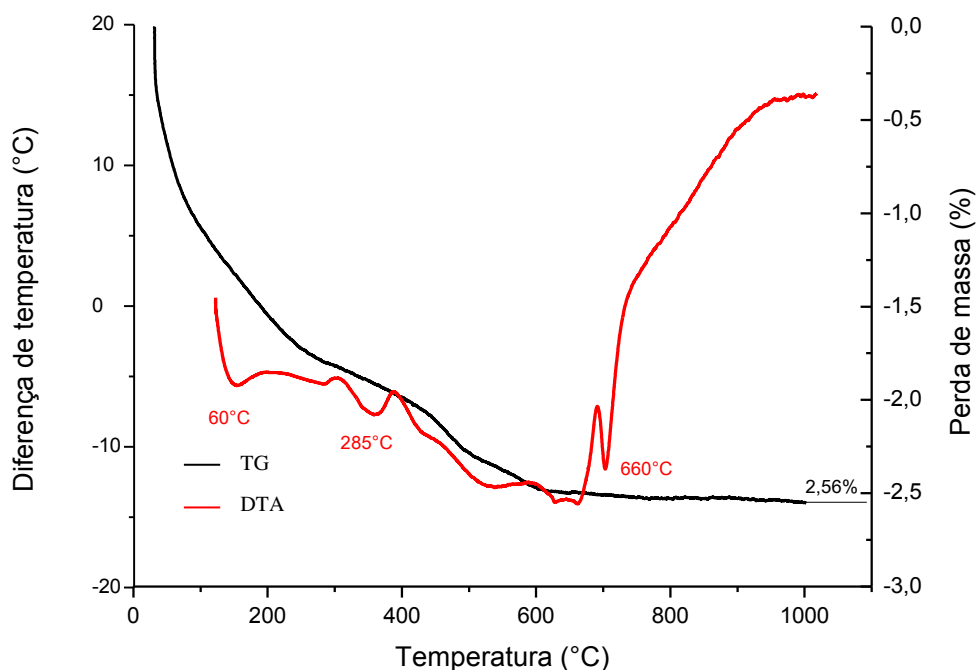


Figura 21 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo cerâmico

Analisando as curvas das análises termodiferenciais do RCF (Figura 22) e RCG (Figura 23) verifica-se que as amostras apresentaram picos semelhantes: pico endotérmico a 83°C e 85°C caracterizando a presença de água livre; pico endotérmico presente em 495°C e 500°C corresponde provavelmente a perda das hidroxilas presente na caulinita; e pico exotérmico na temperatura de 988°C e 990°C, respectivamente, correspondente possivelmente a formação da mulita. Para as análises termogravimétricas observa-se também comportamento semelhante nas duas amostras, o RCF apresentou uma perda de massa de 14,7% e o RCG uma perda de 13%, correspondente à perda de água livre e decomposição de algum elemento presente nos materiais em pequena quantidade. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por MENEZES *et al.* (2009).

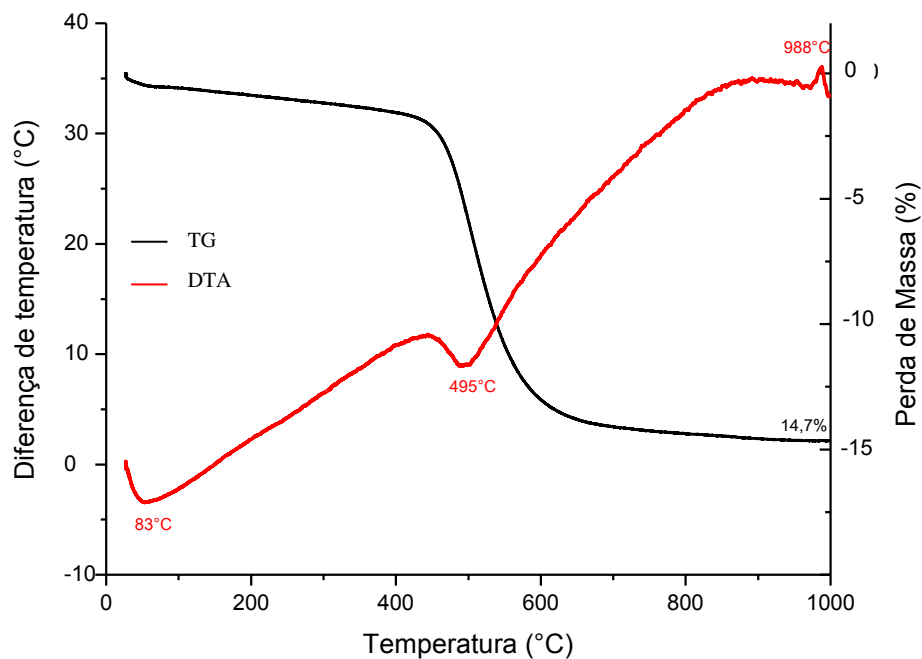


Figura 22 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de caulim fino

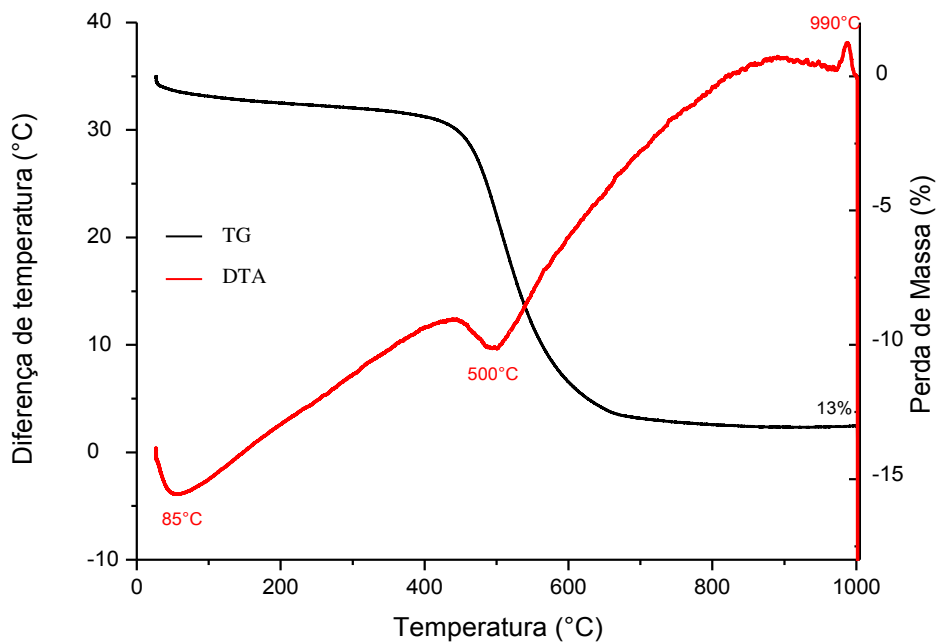


Figura 23 - Análises termogravimétrica e termodiferencial do resíduo de caulim grosso

5.2 Avaliação da atividade pozolânica

Na Tabela 4 estão contidos os valores de referência (blocos sem incorporação de resíduo) para avaliação do índices de atividade pozolânica dos blocos com incorporação de RO, RCER e RC.

Tabela 4 – Resistência à compressão simples dos blocos de referência

Cura (dias)	Resistência à compressão simples de referência (Mpa)
28	5,07
60	4,28
90	5,10

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão contidos os índices de atividade pozolânica dos corpos de prova com incorporação de RO, RCER e RC.

Tabela 5 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo de rochas ornamentais

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (MPa)			
Incorporação de Resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
15	-2,03*	1,16	0,84
30	-2,52*	-1,15*	-1,86*
50	-2,58*	-1,89*	-2,93*

*valores inferiores aos de referência

Analisando os resultados da Tabela 5 verifica-se que apenas os blocos com incorporação de 15% de RO apresentam algum grau de pozolanicidade para os períodos de cura de 60 e 90 dias. Não foi constatado índice de atividade pozolânica para os percentuais de 30% e 50% de incorporação de RO em nenhum período de cura.

Tabela 6 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo cerâmico

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (MPa)			
Incorporação de Resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
15	-0,07*	-0,72*	0,38
30	-1,03*	0,99	-0,37*
50	-1,77*	-0,61*	-0,65*

*valores inferiores aos de referência

Analisando os resultados da Tabela 6 verifica-se que apenas os blocos com incorporação de 15% de RCER aos 90 dias de cura e com incorporação de 30% aos 60 dias de cura apresentam algum grau de pozolanicidade. Não foi constatado índice de atividade pozolânica para as incorporações de 15% de RCER aos 28 e 60 dias de cura, de 30% aos 28 e 90 dias de cura, e 50% aos 28, 60 e 90 dias de cura.

Tabela 7 - Atividade pozolânica dos blocos solo-cal incorporados com resíduo de caulim

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (MPa)			
Incorporação de Resíduo (%)	Cura (dias)		
	28	60	90
15	1,90	2,47	2,37
30	0,38	1,44	1,51
50	-1,05*	-0,16*	-2,07*

*valores inferiores aos de referência

Analisando os resultados da Tabela 7 verifica-se que os blocos com incorporação de 15% de RC e com incorporação de 30% apresentaram algum grau de pozolanicidade para todas as idades de cura. Não foi constatado índice de atividade pozolânica para as incorporações de 50% de RC em nenhuma idade de cura.

5.3 Ensaios Mecânicos

A análise da durabilidade foi realizada para as incorporações e idade de cura que apresentaram melhor desempenho mecânico, nos ensaios de RCS e absorção de água.

5.3.1 Resíduo de rochas ornamentais

A avaliação mecânica das incorporações com resíduos de rochas ornamentais foram coerentes com o que se observou em sua composição mineralógica, nos ensaios de difrações de raios X.

A Figura 24, 25 e 26 ilustram os difratogramas dos blocos de referência e com incorporação de RO avaliadas, respectivamente, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Analisando as Figuras 24, 25 e 26 observa-se nos difratogramas referentes a todos os blocos com e sem incorporação de resíduos e idades de cura, a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8), feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

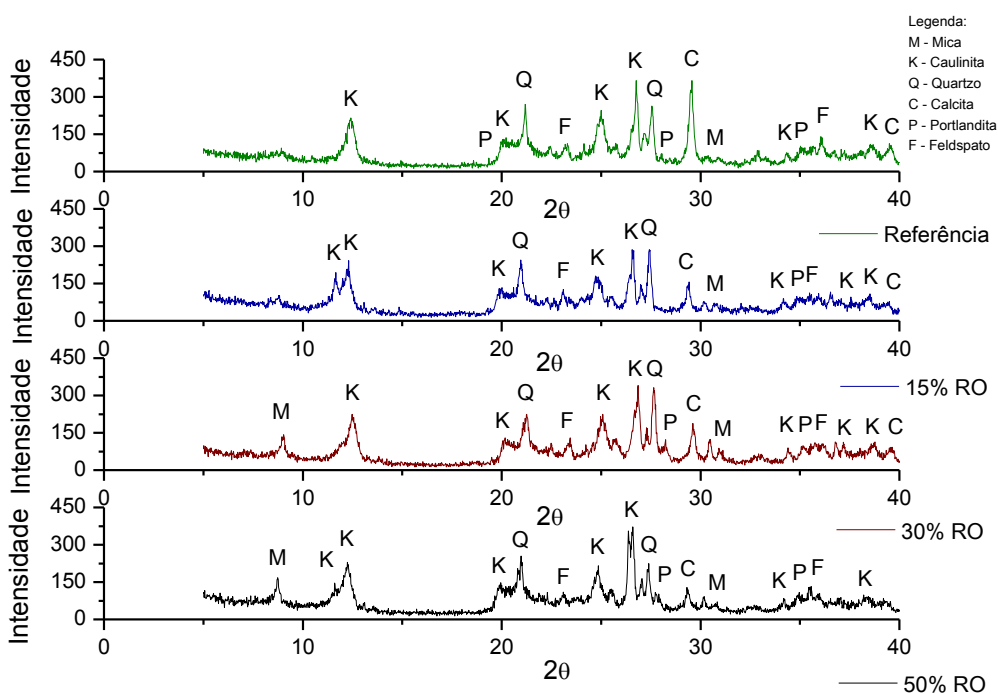


Figura 24 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 28 dias de cura

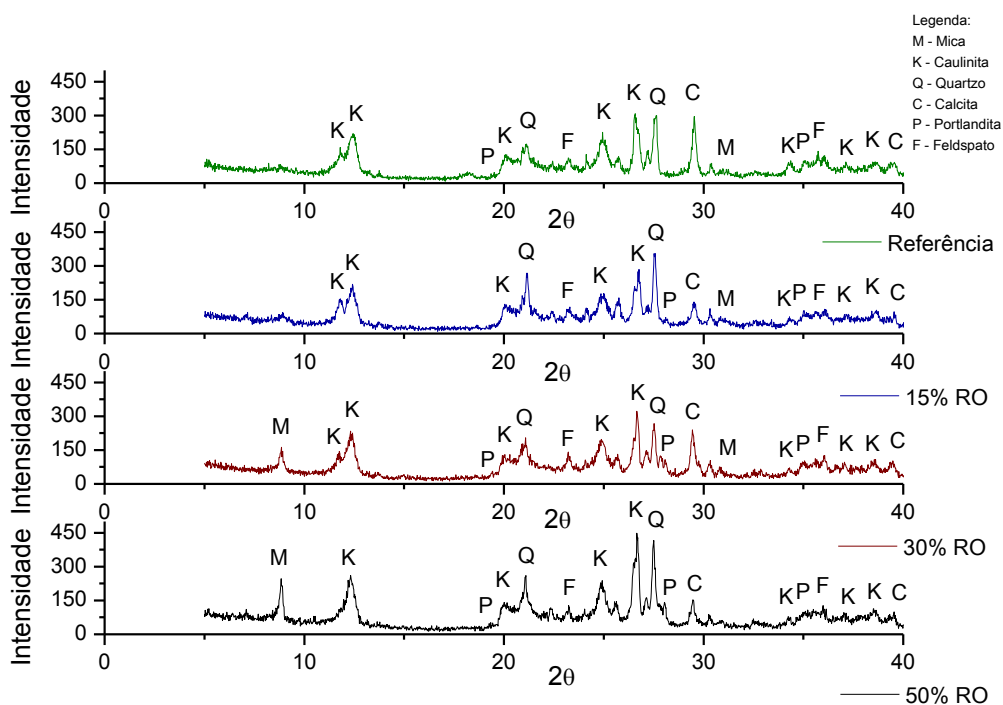


Figura 25 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 60 dias de cura

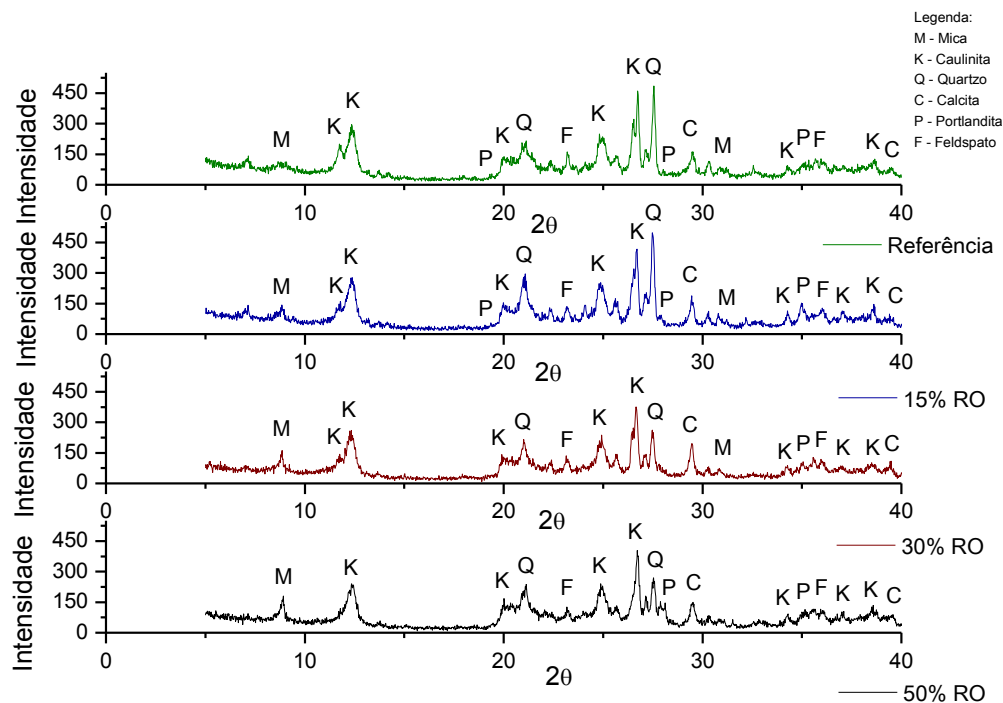
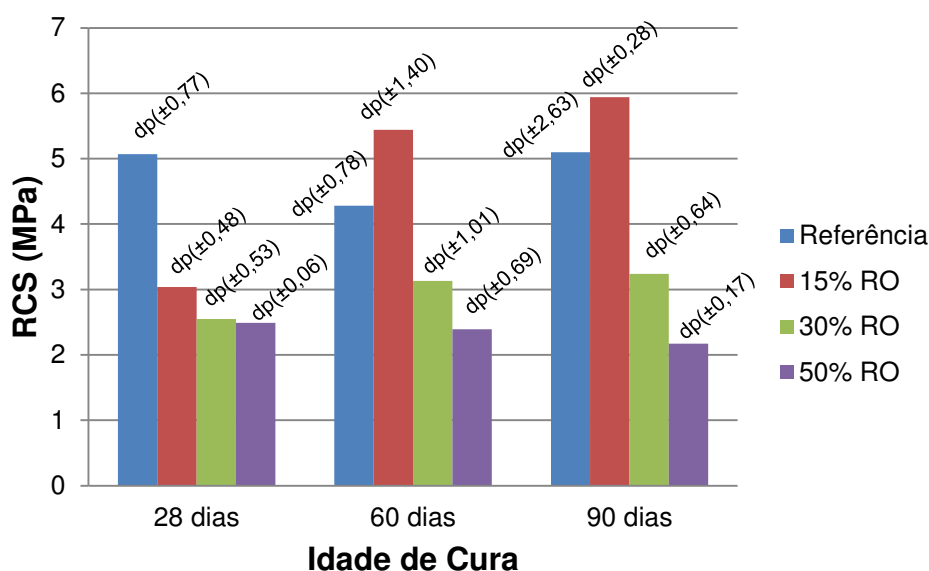


Figura 26 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de rochas ornamentais avaliados aos 90 dias de cura

Em relação a portlandita observa-se picos mais intensos para os blocos incorporados com 15% de RO aos 60 e 90 dias de cura, e picos referentes à calcita menos intensos em relação aos blocos de referência.

A Figura 27 ilustra os resultados da RCS, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RO, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Analisando a Figura 27 pode-se verificar que a RCS decresceu com a incorporação de resíduo e cresceu, de maneira geral, com a idade de cura. Observa-se ainda que a composição com incorporação de 15% de RO apresentou um desempenho melhor que a composição de referência aos 60 e 90 dias de cura. Aos 60 dias de cura a composição 15% RO apresentou uma RCS 27,11% maior que a composição de referência e aos 90 dias de cura a composição 15% RO apresentou uma RCS 16,47% maior que a composição de referência. Estes resultados estão coerentes com as fases mineralógicas observadas (Figuras 24, 25 e 26) e com os índices de atividade pozolânica (Tabela 5) os blocos que apresentaram picos mais intensos da portlandita e picos menos intensos da calcita (indicando a carbonatação) apresentaram melhor desempenho mecânico.



dp: desvio padrão

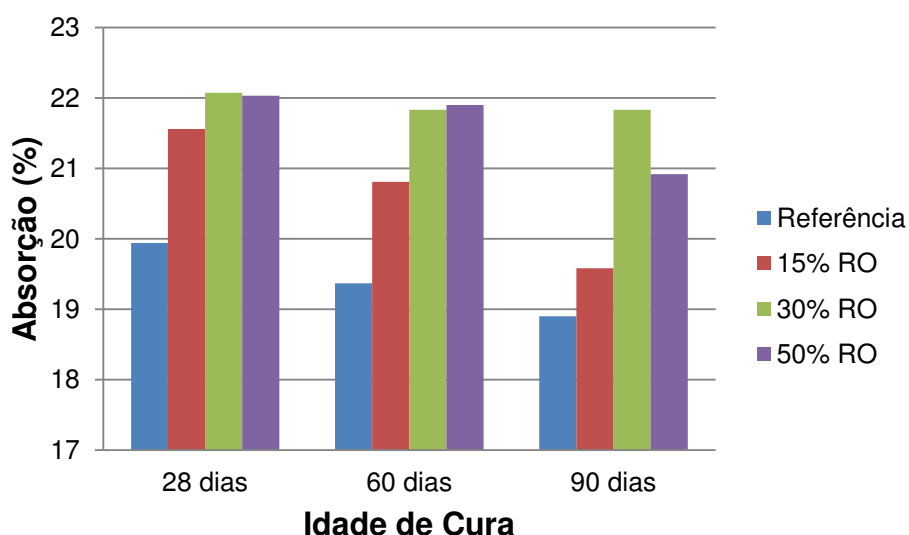
RO: resíduo de rochas ornamentais

Figura 27 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de rochas ornamentais

Os valores da RCS foram superiores ao especificado pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa, para todos os blocos avaliados com incorporação de RO e períodos de cura. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Moura e Leite (2011) em seu trabalho de pesquisa com blocos pré-moldados com incorporação de até 15% de RO aos 28 dias de cura.

A Figura 28 ilustra os resultados da absorção de água, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RO, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Na Figura 28 verifica-se que os valores de absorção de água dos blocos foram decrescendo em relação ao tempo de cura e crescendo, de maneira geral, em relação à incorporação de resíduo confirmando a relação inversa entre RCS e absorção de água, já que quanto maior os poros do bloco maior a absorção de água e menor a RCS. Analisando os resultados apresentados pelos blocos observa-se que nenhuma incorporação apresentou desempenho melhor que os blocos de referência e que apenas a incorporação de 15% de RO, aos 90 dias de cura, apresentou absorção de água inferior a 20%, que é o valor máximo estabelecido pela ABNT NBR 8491/12. Estes resultados são superiores aos encontrados por Moura e Leite (2011) em seu trabalho de pesquisa com blocos pré-moldados com incorporação de até 15% de RO aos 28 dias de cura.



RO: resíduo de rochas ornamentais

Figura 28 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de rochas ornamentais

Portanto, de acordo com resultados obtidos, os blocos que apresentaram melhor comportamento mecânico foram os solo-cal com incorporação de 15% de RO, para o período de cura de 90 dias.

5.3.2 Resíduo cerâmico

A avaliação mecânica das incorporações com resíduo cerâmico foram coerentes com o que se observou em sua composição mineralógica, por meio das difrações de raios X.

As Figuras 29, 30 e 31 ilustram os difratogramas dos blocos de referência e com incorporação de RCER avaliadas, respectivamente, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Analisando as Figuras 29, 30 e 31 observa-se nos difratogramas referentes a todos os blocos avaliados, em todas as idades de cura, a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8), feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3).

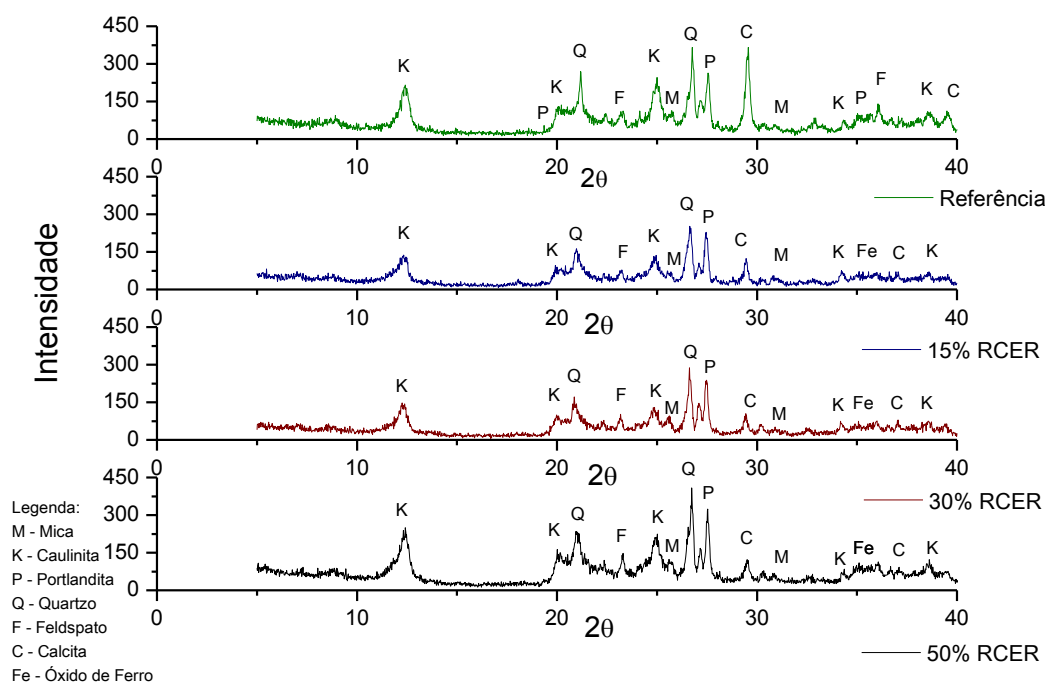


Figura 29 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 28 dias de cura

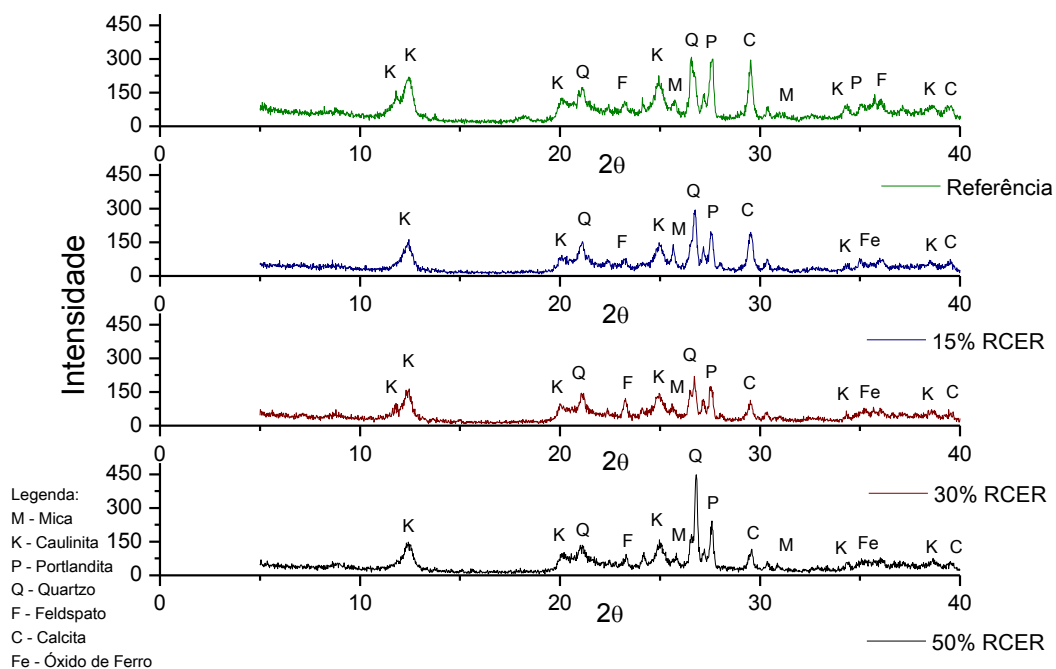


Figura 30 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 60 dias de cura

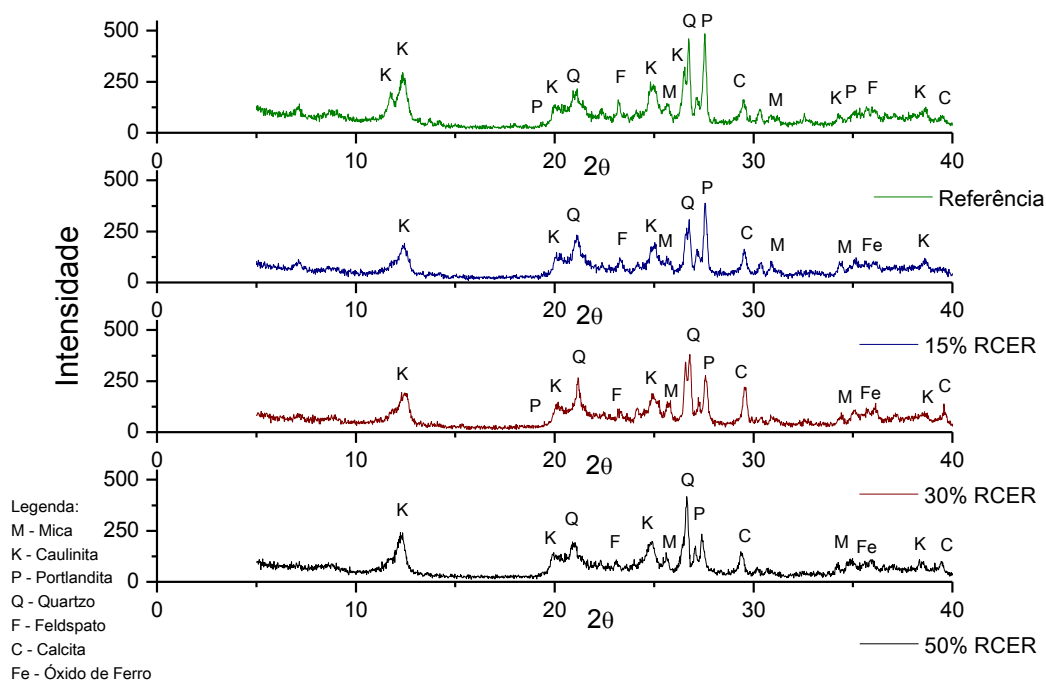
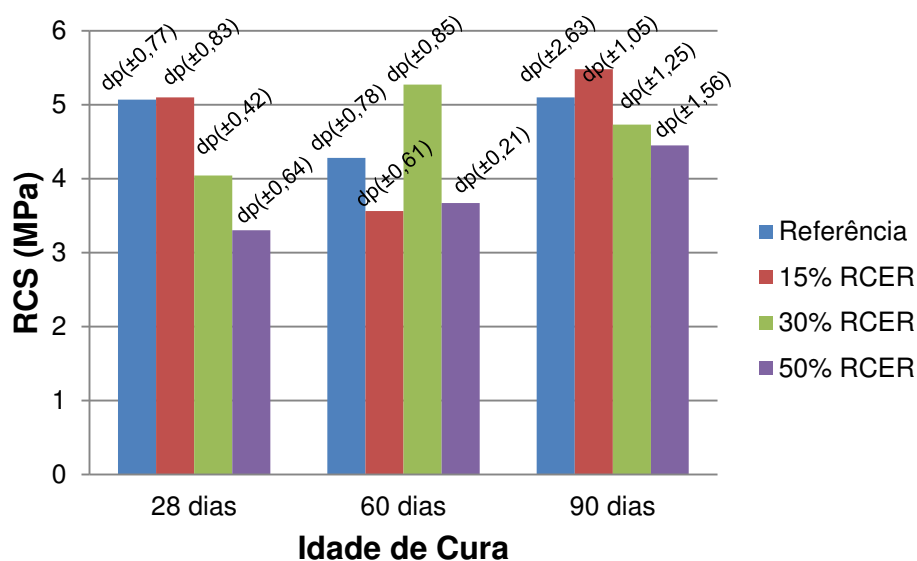


Figura 31 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo cerâmico avaliados aos 90 dias de cura

Observa-se picos referentes à portlandita pouco mais intensos nos blocos com incorporação de 50% de RCER aos 28 dias de cura e com incorporação de 15% de RCER aos 90 dias de cura em relação aos blocos de referência, e picos referentes à calcita menos intensos, proporcionalmente.

A Figura 32 ilustra os resultados da RCS, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RCER, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.



dp: desvio padrão

RCER: resíduo cerâmico

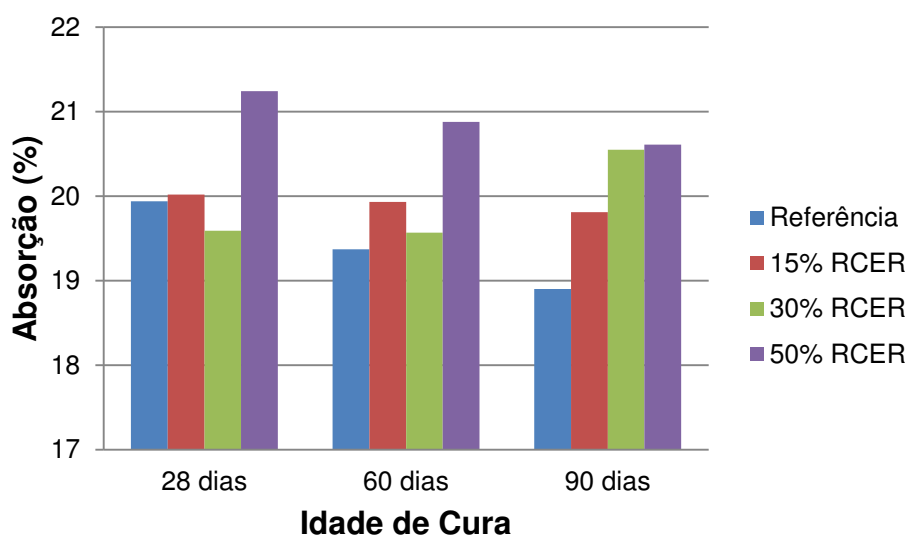
Figura 32 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo cerâmico

Analisando a Figura 32 pode-se verificar que a RCS foi decrescendo em relação à incorporação de resíduo e crescendo, de maneira geral, em relação à idade de cura, já que quanto maior os poros do bloco maior a absorção de água e menor a RCS. Observa-se ainda que a composição com incorporação de 15% de RCER apresentou um desempenho melhor que a composição de referência aos 28 e 90 dias de cura e a composição com incorporação de 30% de RCER apresentou melhor desempenho que a referência aos 60 dias de cura. Aos 28 dias de cura a composição 15% RCER apresentou uma RCS 0,59% maior que a composição de referência, aos 60 dias de cura a composição 30% RCER apresentou uma RCS 23,13% maior que a composição de referência e aos 90 dias de cura a composição 15% RCER apresentou uma RCS 7,45% maior que a composição de referência.

Estes resultados estão coerentes com as fases mineralógicas observadas (Figuras 29, 30 e 31) e com os índices de atividade pozolânica (Tabela 6). Os blocos que apresentaram picos mais intensos da portlandita e picos menos intensos da calcita (indicando a carbonatação), apresentaram melhor desempenho mecânico.

Os valores da RCS foram superiores ao exigido pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa, para todas as composições avaliadas com incorporação de RCER e em todos os períodos de cura. Estes resultados são superiores aos encontrados por Silva *et al.* (2014) em seu trabalho de pesquisa com tijolos solo-cimento-cal incorporados com até 12% de RCER aos 60 dias de cura.

A Figura 33 ilustra os resultados da absorção de água, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RCER, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.



RCER: resíduo cerâmico

Figura 33 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo cerâmico

Na Figura 33 verifica-se que os valores de absorção de água dos blocos decresceu com o tempo de cura e cresceu, de maneira geral, em relação à incorporação de resíduo confirmando a relação inversa entre RCS e absorção de água. Analisando os resultados apresentados pelos corpos de prova observa-se que nenhuma composição apresentou desempenho melhor que a composição de referência e que apenas a incorporação de 15% de RCER, aos 60 e 90 dias de cura,

apresentaram absorção de água inferior a 20%, que é o valor máximo estabelecido pela ABNT NBR 8491/12. A composição com incorporação de 15% de RCER apresentou uma menor absorção de água aos 90 dias de cura em relação a mesma composição aos 60 dias de cura. Estes resultados são superiores aos encontrados por Silva *et al.* (2014) em seu trabalho de pesquisa com tijolos solo-cimento-cal incorporados com até 12% de RCER aos 60 dias de cura.

Portanto, de acordo com resultados obtidos, a composição que apresentou melhor comportamento mecânico foi a solo-cal com incorporação de 15% de RCER, para o período de cura de 90 dias.

5.3.3 Resíduo de caulim

A avaliação mecânica das incorporações com resíduo de caulim foram coerentes com o que se observou em sua composição mineralógica, observada nas difrações de raios X.

As Figuras 34, 35 e 36 ilustram os difratogramas dos blocos com incorporação de RC avaliados, respectivamente, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

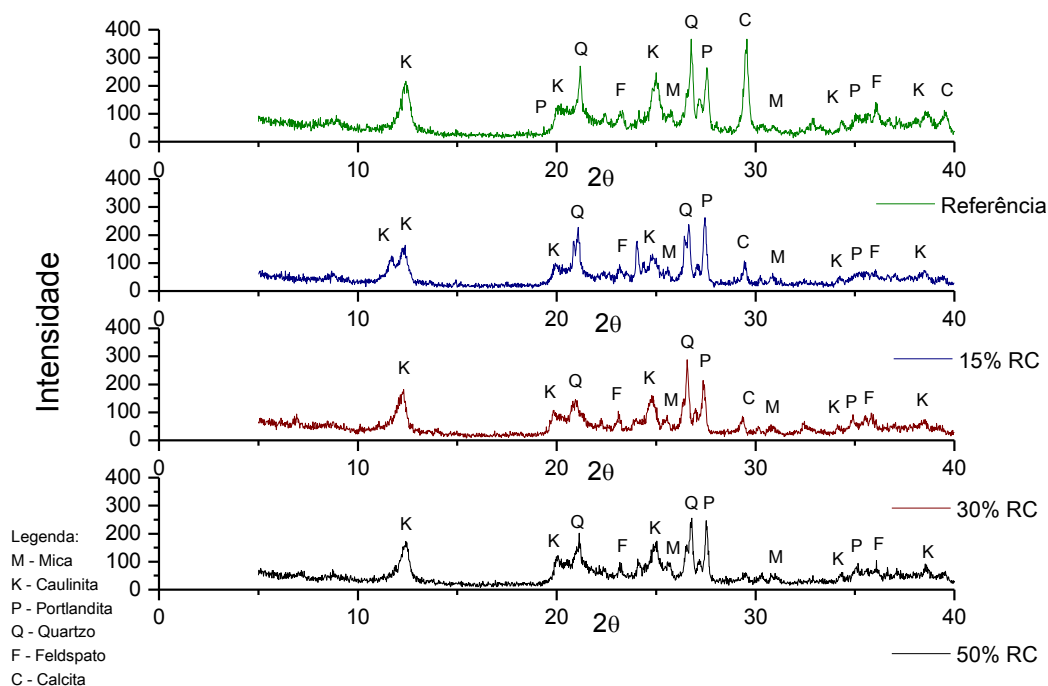


Figura 34 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 28 dias de cura

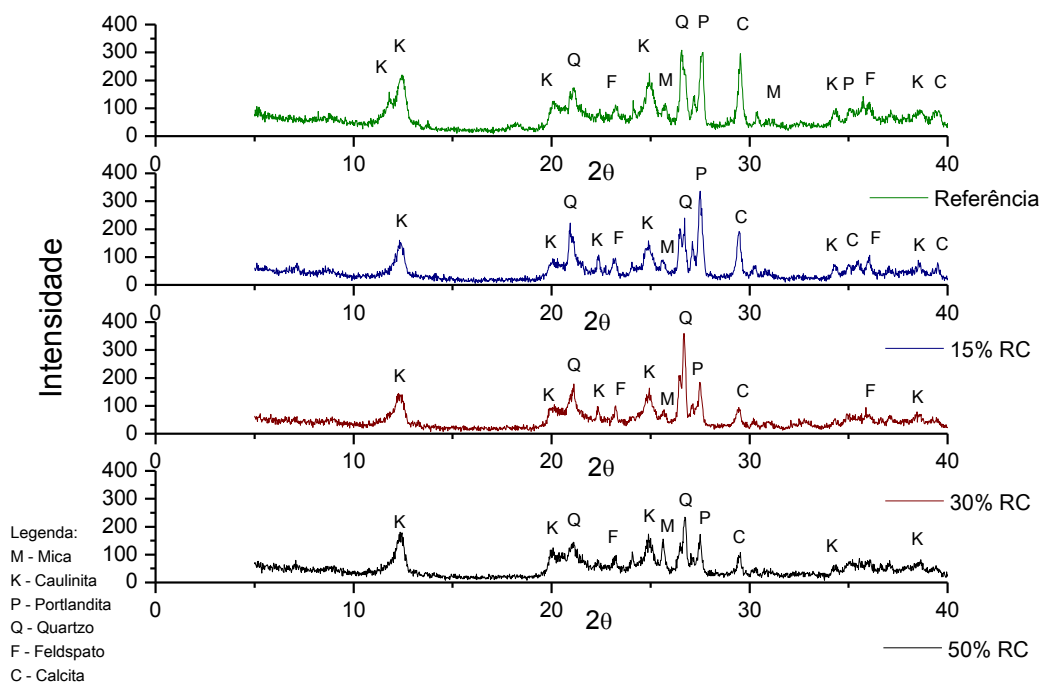


Figura 35 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 60 dias de cura

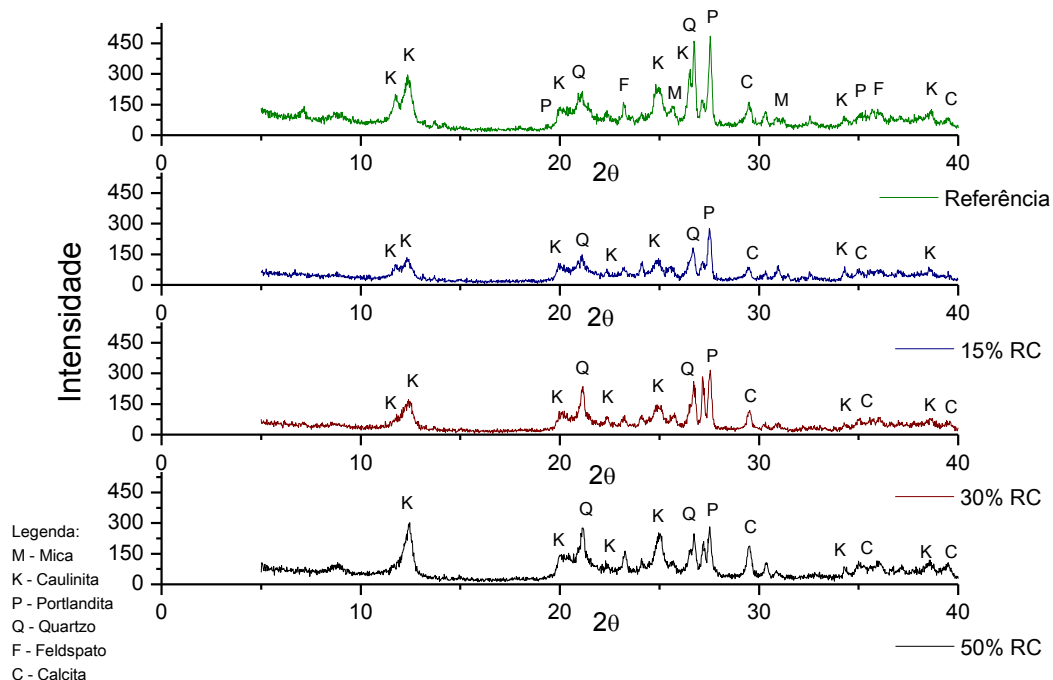
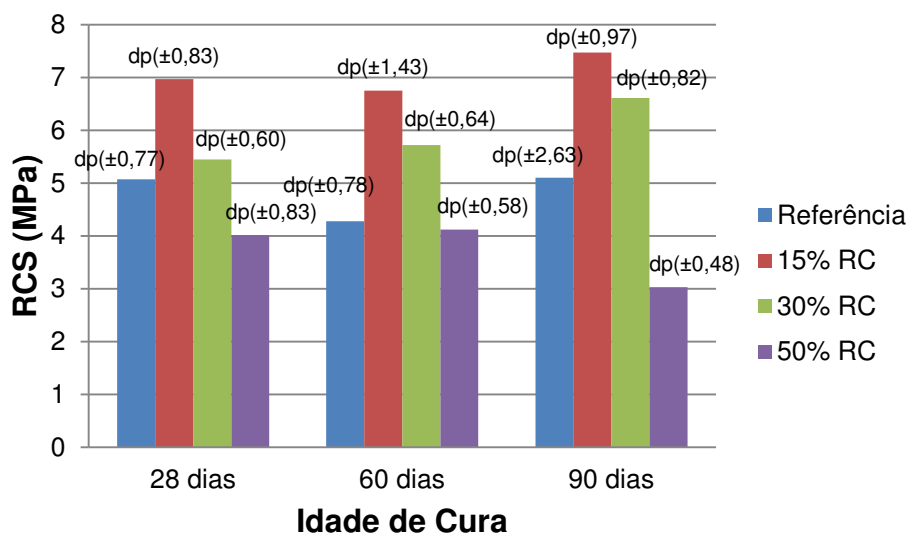


Figura 36 - Difração de raios X dos blocos com incorporação de resíduo de caulim avaliados aos 90 dias de cura

Analisando as Figuras 34, 35 e 36 observa-se nos difratogramas referentes a todas aos blocos avaliados, em todas as idades de cura, a presença das seguintes fases mineralógicas: mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8) e feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Observa-se picos referentes a portlandita na composição com 15% e 30% de RCER em todas as idades de cura, e picos referentes à calcita menos intensos, proporcionalmente, em relação aos blocos de referência.

A Figura 37 ilustra os resultados da RCS, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RC, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.



dp: desvio padrão

RC: resíduo de caulim

Figura 37 - Resistência à compressão simples dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de caulim

Analisando a Figura 37 pode-se verificar que a RCS foi decrescendo em relação à incorporação de resíduo e crescendo, de maneira geral, em relação à idade de cura. Observa-se ainda que os blocos com incorporações de 15% e 30% de RC apresentaram um desempenho melhor que os blocos de referência em todas as idades de cura. Aos 28 dias de cura os blocos 15% RC apresentaram uma RCS 37,48% maior que os blocos de referência, aos 60 dias de cura 57,71% e aos 90

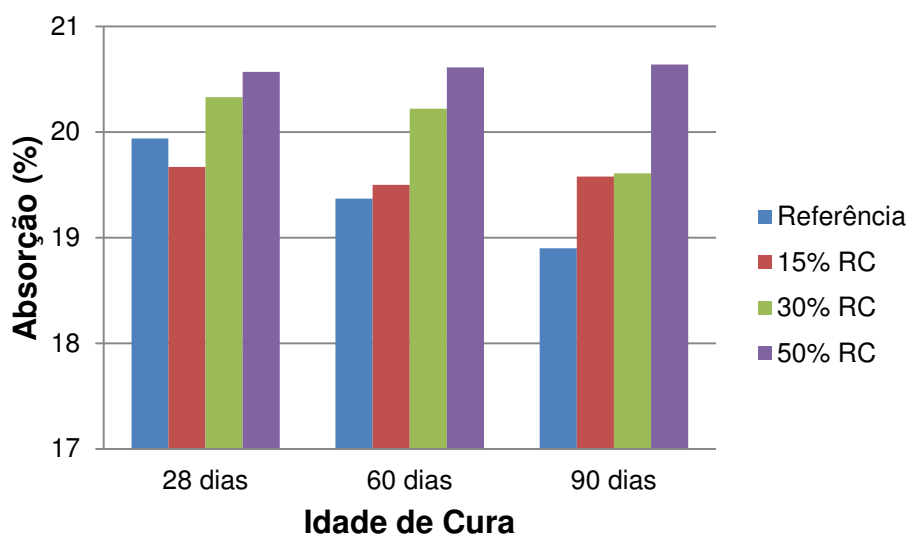
dias de cura os blocos 15% RC apresentaram uma RCS 46,47% maior que os blocos de referência.

Os blocos com incorporação de 30% RC apresentaram uma RCS 7,50% maior que os blocos de referência, aos 60 dias de cura 33,64% e aos 90 dias de cura os blocos com incorporação de 30% RC apresentou uma RCS 29,61% maior que os blocos de referência. Estes resultados estão coerentes com as fases mineralógicas observadas (Figura 34, 35 e 36) e com os índices de atividade pozolânica (Tabela 7). Os blocos que apresentaram picos mais intensos da portlandita e picos menos intensos da calcita (indicando a carbonatação) apresentaram melhor desempenho mecânico.

Os valores da RCS foram superiores ao exigido pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa, para todos os blocos avaliados com incorporação de RC e em todos os períodos de cura. Estes resultados são superiores para os 28 e 60 dias de cura e inferiores para os 90 dias de cura quando comparados aos encontrados por Beltrão *et al.* (2014) em seu trabalho de pesquisa com argamassas incorporadas com até 30% de RC.

A Figura 38 ilustra os resultados da absorção de água, respectivamente, dos blocos de referência e incorporados com RC, nos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Na Figura 38 verifica-se que os valores de absorção de água dos blocos foram decrescendo em relação ao tempo de cura e crescendo, de maneira geral, em relação à incorporação de resíduo confirmando a relação inversa entre RCS e absorção de água. Analisando os resultados apresentados pelos blocos observa-se que os blocos com incorporação de 15% de RC aos 28 dias de cura apresentaram desempenho melhor que os blocos de referência e que os blocos com incorporação de 15% de RC, para todas as idades cura, e com incorporação de 30% de RC aos 90 dias de cura apresentaram absorção de água inferior a 20%, que é o valor máximo estabelecido pela ABNT NBR 8491/12. Os blocos com incorporação de 15% de RC apresentaram uma menor absorção de água aos 60 dias de cura, porém praticamente igual a mesma composição aos 90 dias de cura. Estes resultados são superiores aos encontrados por Beltrão (2014) em seu trabalho de pesquisa com argamassas incorporadas com até 30% de RC.



RC: resíduo de caulim

Figura 38 - Absorção de água dos blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduo de caulim

Portanto, de acordo com os resultados obtidos, os blocos que apresentaram melhor comportamento mecânico foram os solo-cal com incorporação de 15% de RC, para o período de cura de 90 dias.

5.4 Durabilidade

Os blocos com incorporação de 15% de RO, RCER e RC aos 90 dias de cura, que apresentaram melhores resultados de RCS, foram submetidos aos ensaios de durabilidade utilizando os métodos do envelhecimento natural, envelhecimento acelerado pela técnica de molhagem e secagem, simulação da chuva dirigida e avaliação da resistência ao ataque por sulfatos.

5.4.1 Envelhecimento natural

Após o período de cura de 90 dias, os blocos solo-cal com e sem incorporação de resíduos foram expostos às condições climáticas naturais, em ambiente externo, por um período médio de 365 dias.

A Figura 39 ilustra os difratogramas dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.

Analisando a Figura 39 observa-se nos difratogramas referentes a todos os blocos avaliados a presença das seguintes fases mineralógicas: mica

($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), feldspato potássio (KAlSi_3O_8), feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Nas incorporações 15% RO e 15% RCER avaliadas, estão presentes fases mineralógicas referentes ao feldspato potássio (KAlSi_3O_8) e feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) nos blocos com incorporação de RCER.

Em relação a portlandita observa-se picos mais intensos para os blocos incorporados com 15% de RCER e 15% RC, e picos referentes à calcita menos intensos em relação aos blocos de referência. Observa-se ainda que os blocos de referência e com incorporação de 15% RO apresentaram predominantemente reações de carbonatação, já os blocos com incorporação de 15% RCER e 15% RC apresentaram reações pozolânicas mais intensas.

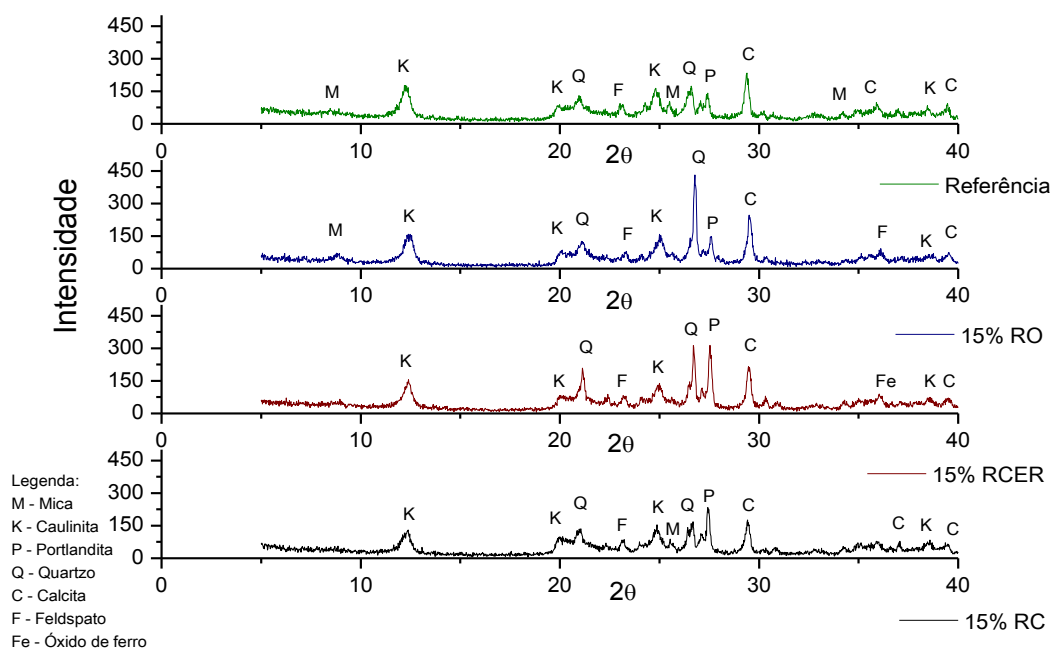


Figura 39 - Difração de raios X dos blocos submetidos ao envelhecimento natural

Na Figura 40 e 41 estão apresentadas as curvas das análises termodiferenciais e termogravimétricas dos blocos submetidos ao envelhecimento natural.

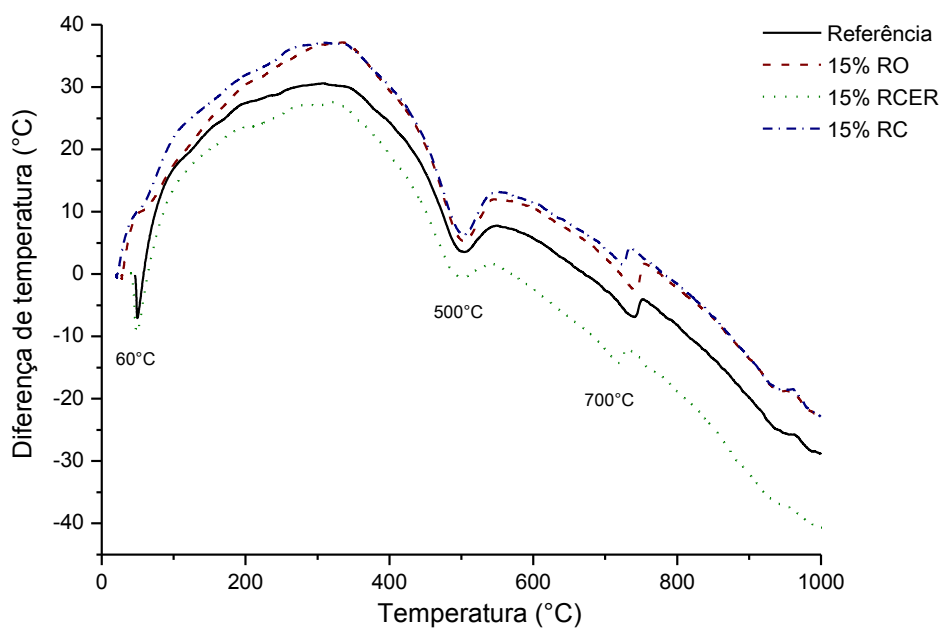


Figura 40 - Curvas das análises termodiferenciais dos blocos submetidos ao envelhecimento natural

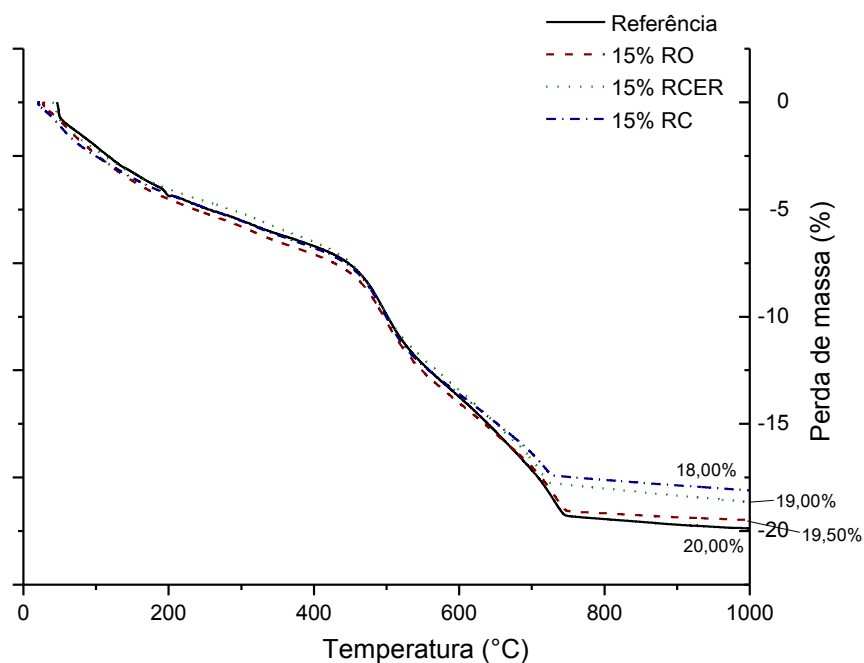
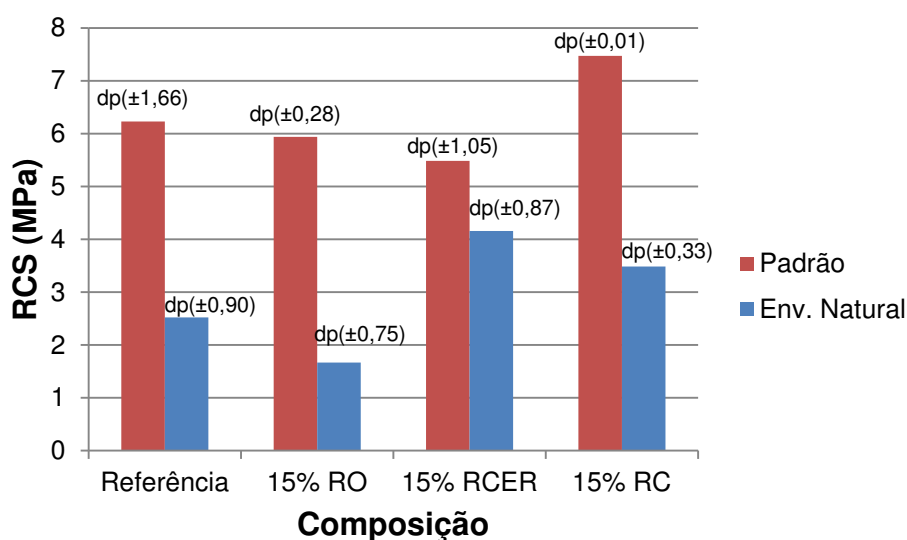


Figura 41 - Curvas das análises termogravimétricas dos blocos submetidos ao envelhecimento natural

Analisando as curvas da Figura 40 verifica-se que os blocos avaliados apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos de envelhecimento natural. As amostras apresentaram picos endotérmicos em temperaturas aproximadas de 60°C provavelmente associado à presença de água livre e adsorvida, picos endotérmicos na temperatura aproximada de 500°C correspondente, provavelmente, a perda de hidroxilas da caulinita (eventualmente da portlandita) e picos endotérmicos na temperatura aproximada de 700°C correspondente, provavelmente, a decomposição do carbonato de cálcio.

Analisando as curvas da Figura 41 verifica-se que os blocos avaliados apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos de envelhecimento natural. As amostras apresentaram perda de massa total entre 18% e 20%, sendo estas correspondentes a perda de água livre, a perda de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3).

A Figura 42 ilustra os resultados da RCS dos blocos padrão, solo-cal (referência) e com incorporação de 15% de RO, RCER e RC, submetidos ao envelhecimento natural.



dp: desvio padrão

RO: resíduo de rochas ornamentais

RCER: resíduo cerâmico

RC: resíduo de caulim

Figura 42 - Resistência à compressão simples dos blocos padrão e dos blocos submetidos ao envelhecimento natural

Analisando os resultados da Figura 42, observa-se que os blocos submetidos ao envelhecimento natural em relação ao padrão, que não passaram pelo processo do envelhecimento, foram bastante afetados quando expostos ao ambiente, tendo seu envelhecimento evidenciado pela perda de RCS em todas os blocos avaliados.

Os blocos com incorporação de 15% RO apresentaram resultados significativamente inferiores de RCS em relação ao seu padrão, de 71,89%; a incorporação de 15% RCER apresentou valor 24,09% menor em relação ao seu padrão; os blocos de referência apresentaram resultado inferior na sua RCS em relação ao seu padrão de 59,55% e os blocos com incorporação de 15% RC apresentaram RCS 53,28% menor que seu padrão.

Da amostra inicial de 5 blocos os únicos que resistiram à ação do tempo foram os blocos com incorporação de 15% de RCER e 15% de RC, para os blocos de referência (solo-cal) apenas 3 dos 5 blocos resistiram até o final do ensaio e para os blocos com incorporação de 15% de RO apenas 2 dos 5 blocos resistiram (Figura 43).

A baixa resistência dos blocos após submetidos à exposição no envelhecimento natural, provavelmente, deve-se ao carreamento da fração argilosa do solo pela chuva, à diminuição da fase da portlandita, representada pelos picos de pequena intensidade e à presença de picos intensos referentes à calcita, decorrente das reações ocorridas entre a cal e CO_2 do ar ambiente, favorecendo a carbonatação (Figura 43).



Figura 43 – Blocos solo-cal com incorporação de resíduo de rochas ornamentais submetidos ao envelhecimento natural

Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram inferiores aos obtidos por Farias Filho (2007), para o envelhecimento natural de blocos de argamassa, expostos por 180 dias ao ambiente, sem incorporação de resíduo, com incorporação de 30%, 40% e 50% de resíduo da construção civil e com incorporação de 30% e 40% de resíduo de granito.

Mesmo os blocos avaliados tendo apresentado baixo desempenho mecânico quanto ao envelhecimento natural, apenas a incorporação de 15% RO apresentou RCS inferior ao exigido pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa.

5.4.2 Envelhecimento acelerado

Após o período de cura de 90 dias, os blocos solo-cal de referência e incorporados com resíduos que apresentaram melhor desempenho mecânico foram submetidos a avaliação da durabilidade utilizando o envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, utilizando-se como indicador de degradação a resistência à compressão simples.

As Figuras 44, 45, 46 e 47 apresentam os difratogramas dos blocos solo-cal e incorporados com resíduos no ciclo padrão e no décimo segundo ciclo da molhagem e secagem para as composições submetidas ao envelhecimento acelerado.

Analisando as Figuras 44, 45, 46 e 47 observa-se nos difratogramas referentes a todos os blocos avaliados a presença das seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Na composição de referência, 15% RO e 15% RCER observa-se ainda a presença da fase mineralógica referente à mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Nos blocos com incorporações de 15% RO e 15% RCER avaliados, estão presentes fases mineralógicas referentes ao feldspato potássio (KAlSi_3O_8) e feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) nos blocos com incorporação de RCER.

Em relação a portlandita observa-se picos mais intensos para os blocos de referência e incorporados com 15% de RC, e picos referentes à calcita menos intensos em relação aos blocos de referência, para todas as incorporações no último ciclo da molhagem e secagem.

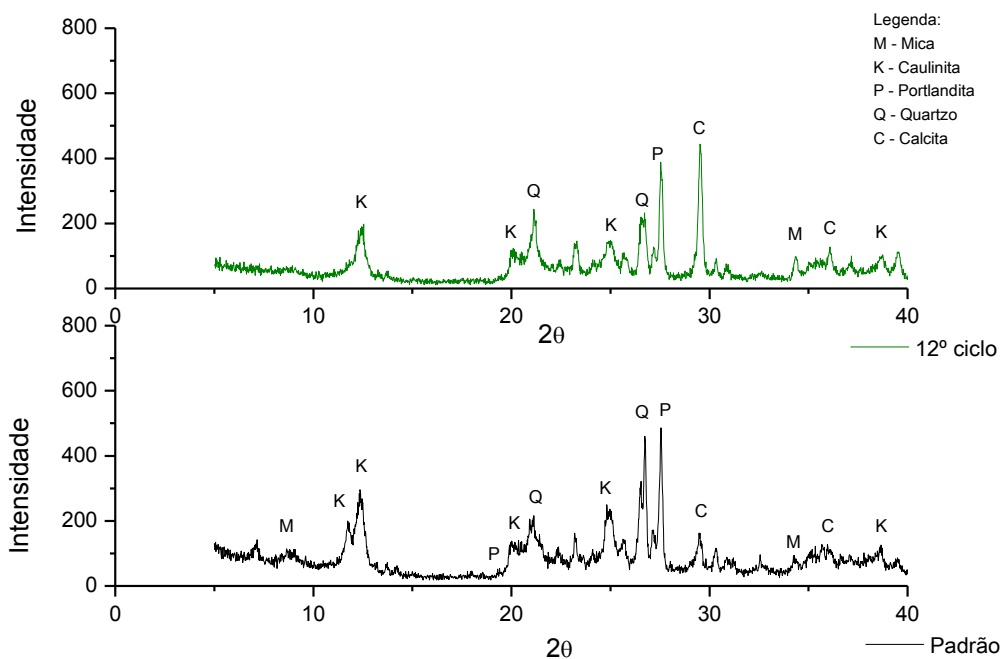


Figura 44 - Difração de raios X dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado

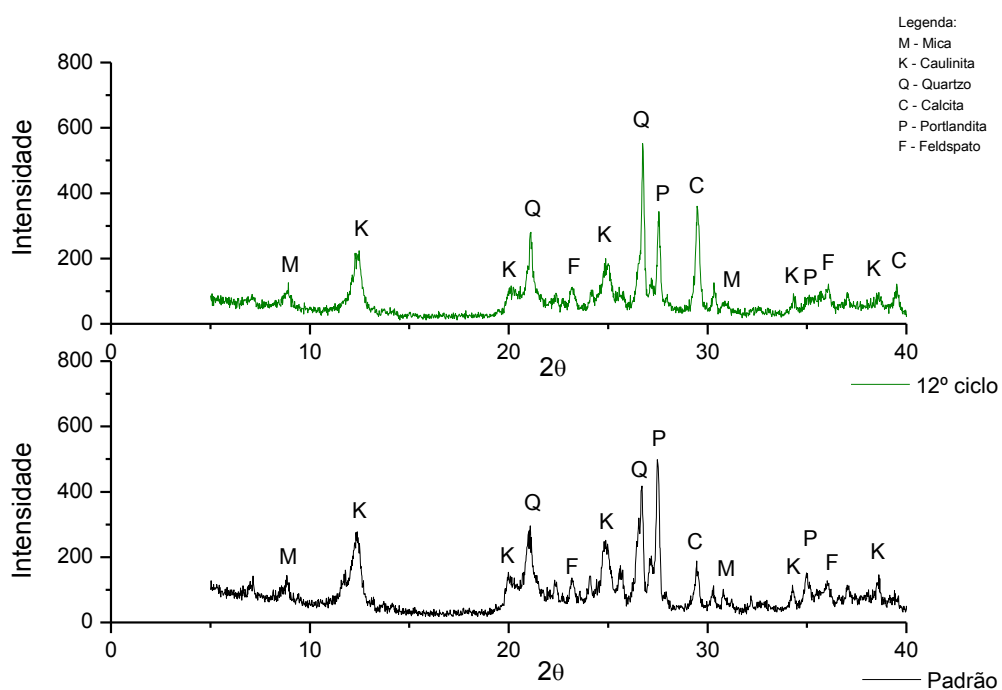


Figura 45 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RO submetidos ao envelhecimento acelerado

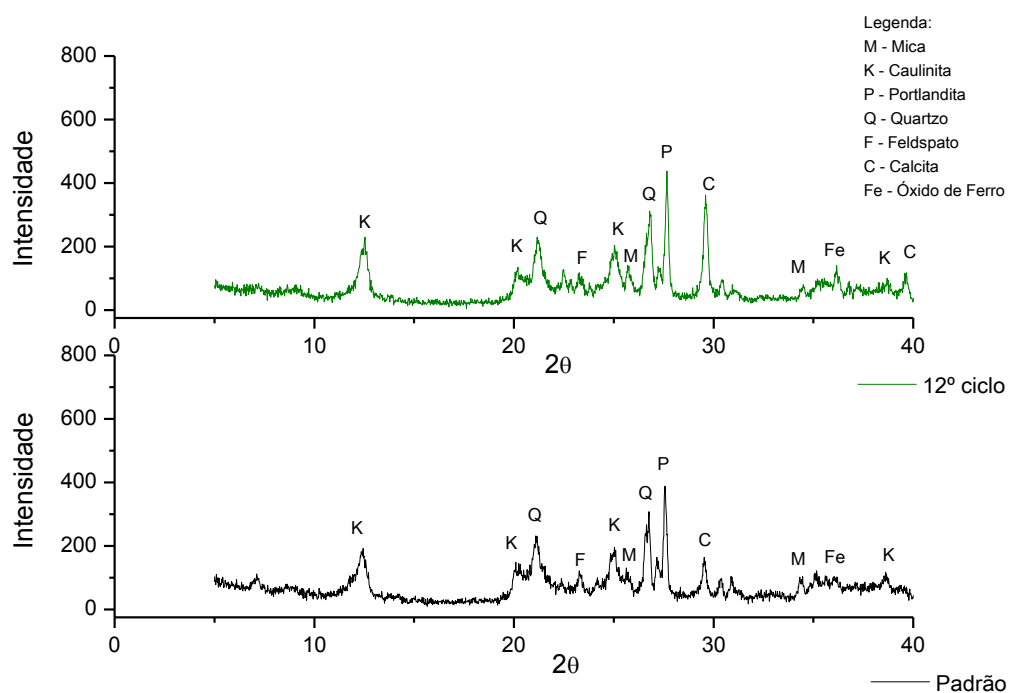


Figura 46 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RCER submetidos ao envelhecimento acelerado

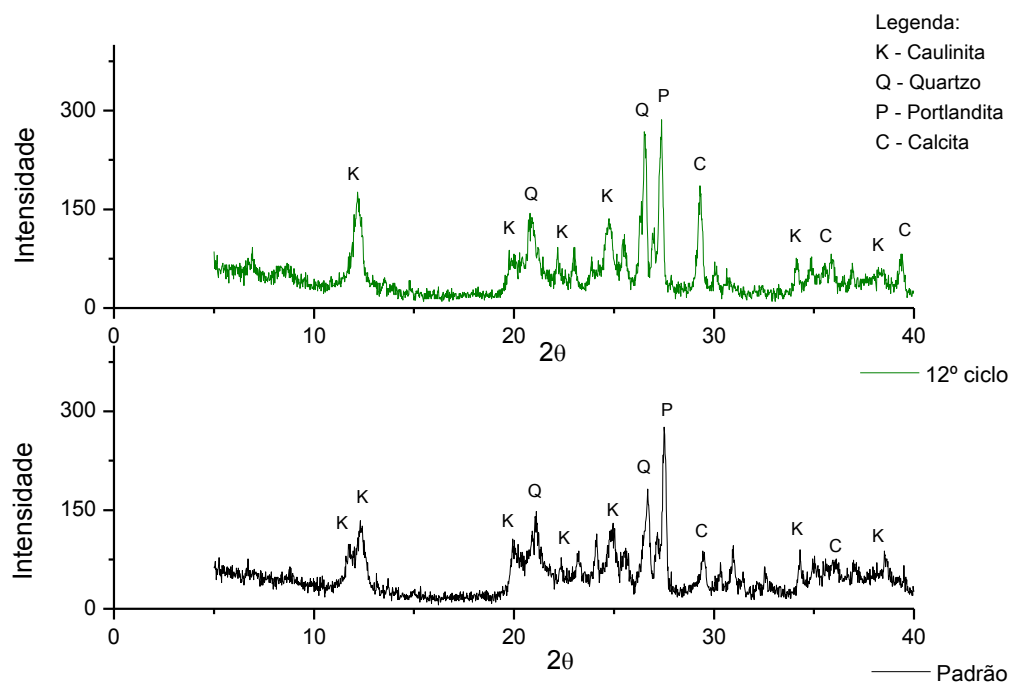


Figura 47 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15% RC submetidos ao envelhecimento acelerado

Nas Figuras 48, 49, 50 e 51 estão apresentadas as curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal incorporados com resíduos, padrão e do último ciclo da molhagem e secagem, submetidos ao envelhecimento acelerado.

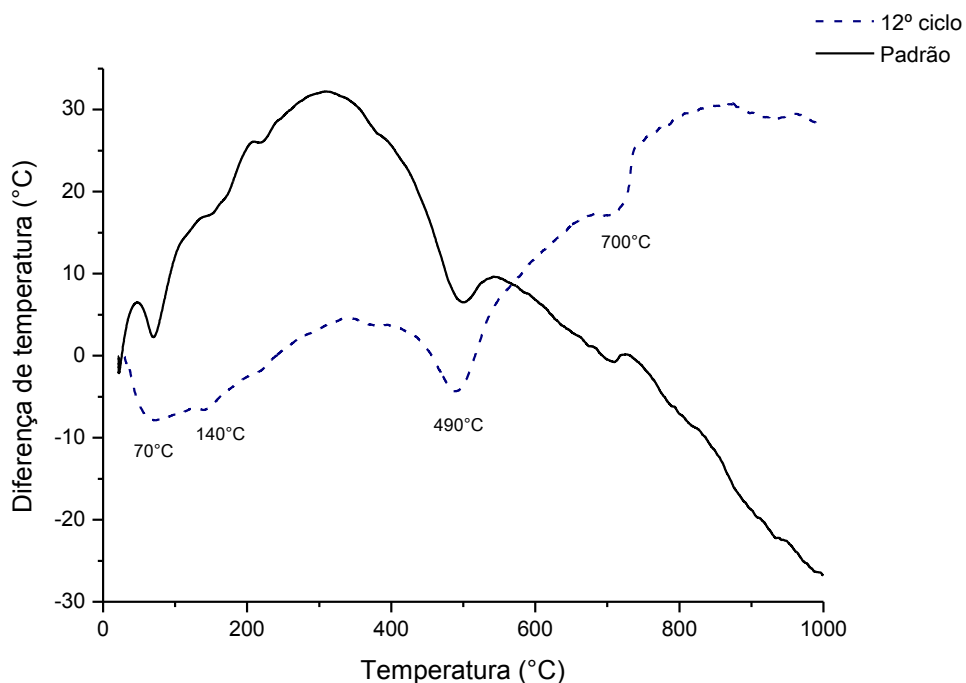


Figura 48 – Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado

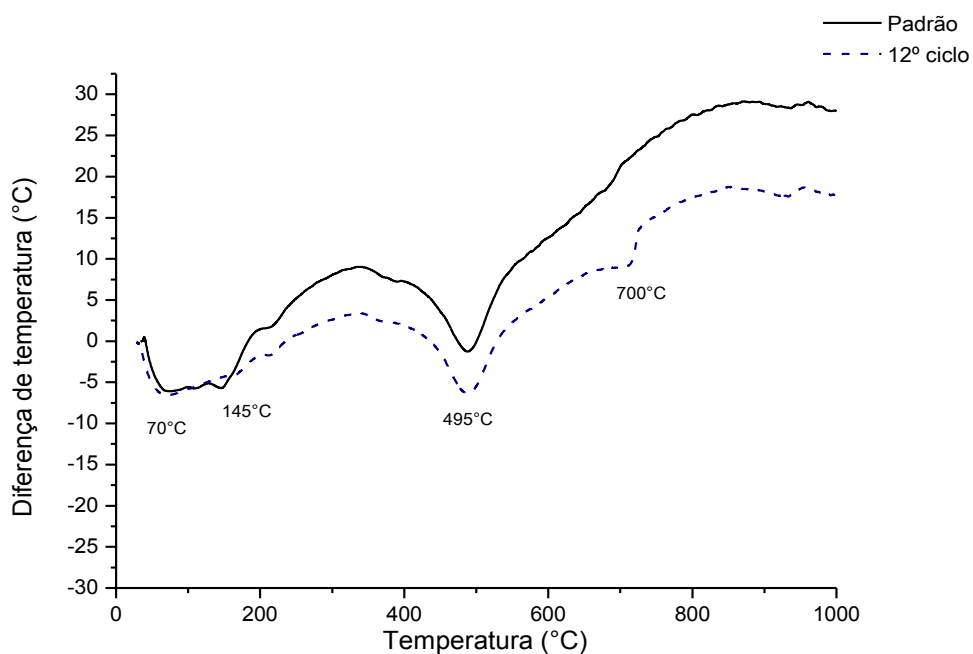


Figura 49 – Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RO submetidos ao envelhecimento acelerado

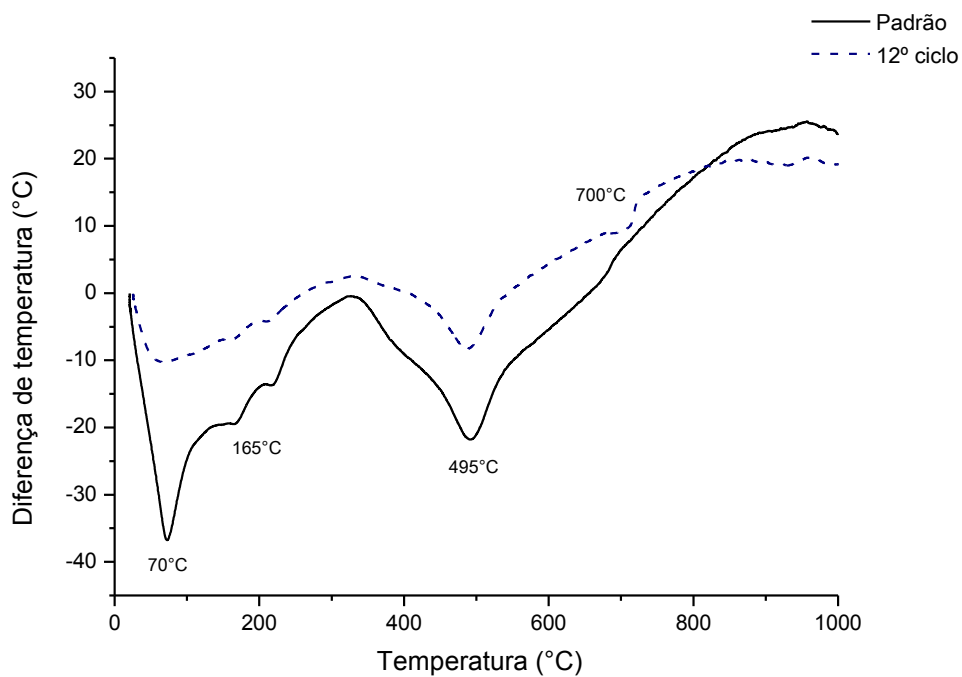


Figura 50 – Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RCER submetidos ao envelhecimento acelerado

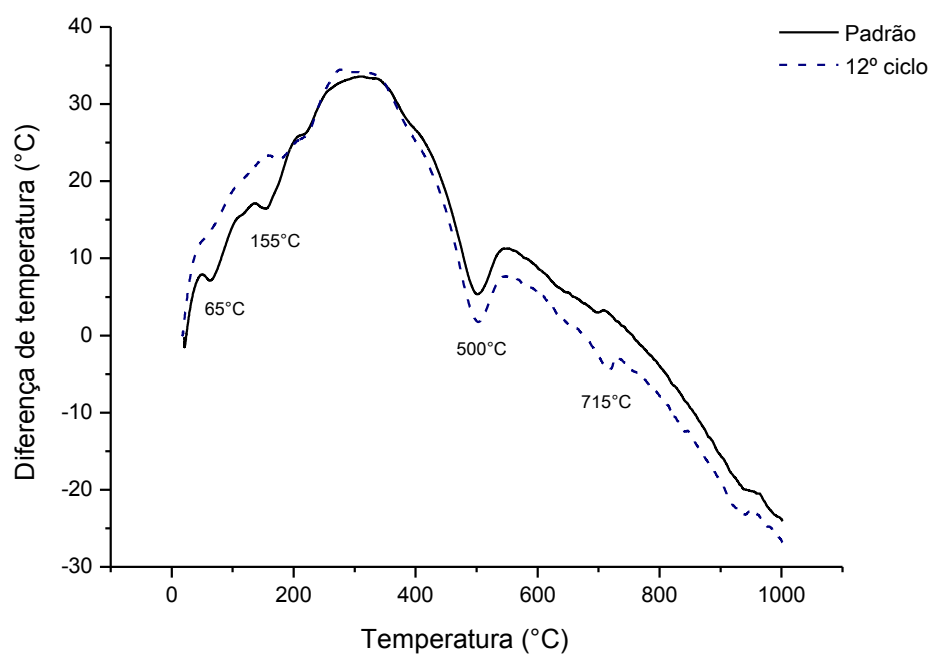


Figura 51 – Curvas das análises termodiferenciais dos blocos solo-cal-15% RC submetidos ao envelhecimento acelerado

Analisando as curvas da Figura 40, verifica-se que os blocos avaliados apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos de envelhecimento acelerado. As amostras apresentaram picos endotérmicos em temperaturas aproximadas de 65°C-70°C provavelmente associado à presença de água livre e adsorvida, picos endotérmicos na temperatura aproximada de 490°C-500°C correspondente, provavelmente, a perda de hidroxilas da caulinita (eventualmente da portlandita) e picos endotérmicos na temperatura aproximada de 700°C correspondente, provavelmente, a decomposição do carbonato de cálcio. Além desses picos, observam-se discretos picos endotérmicos, em temperaturas entre 140°C e 165°C, possivelmente, referente aos silicatos formados nas reações pozolânicas com a cal. Segundo Kapel *et al.* (1989) alguns neossilicatos são evidenciados quando o processo de cura é acelerado.

Nas Figuras 52, 53, 54 e 55 estão apresentadas as curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal incorporados com resíduos, padrão e do último ciclo da molhagem e secagem, submetidos ao envelhecimento acelerado.

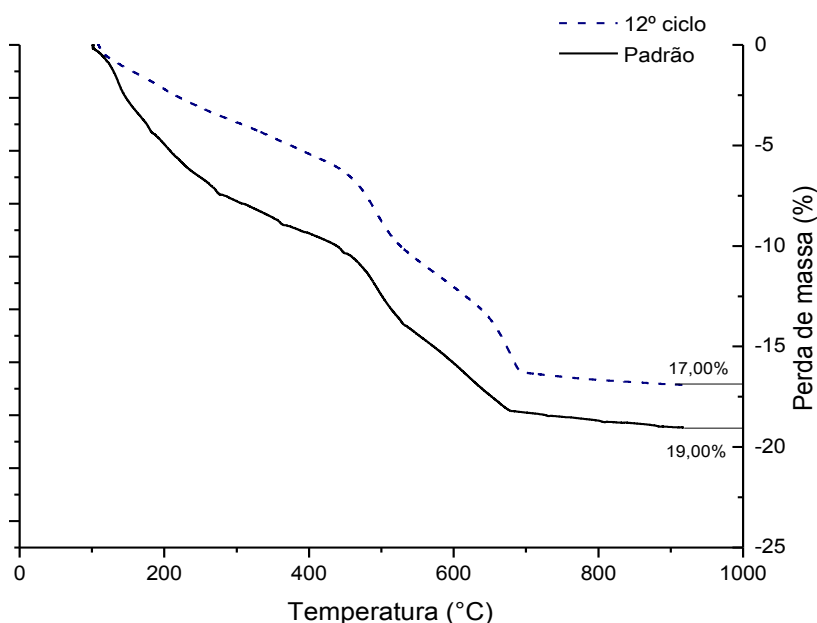


Figura 52 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal submetidos ao envelhecimento acelerado

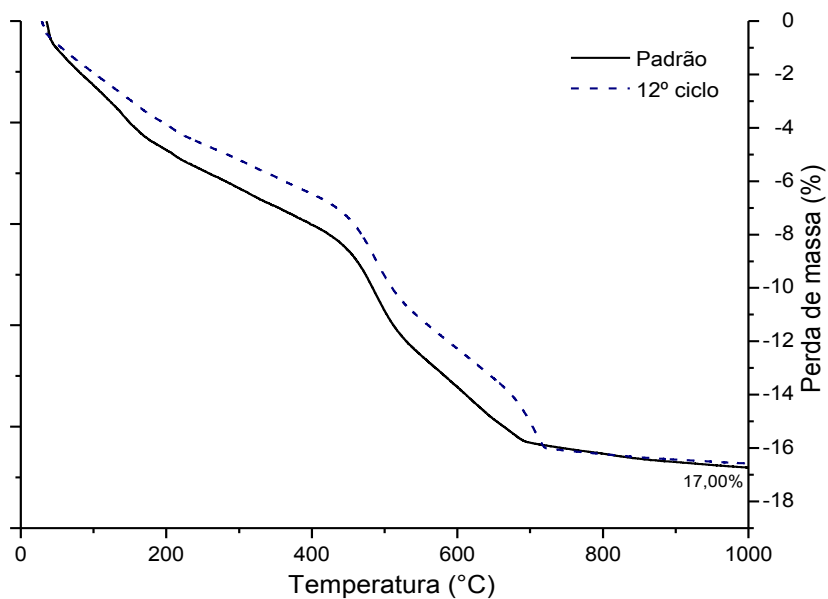


Figura 53 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RO submetidos ao envelhecimento acelerado

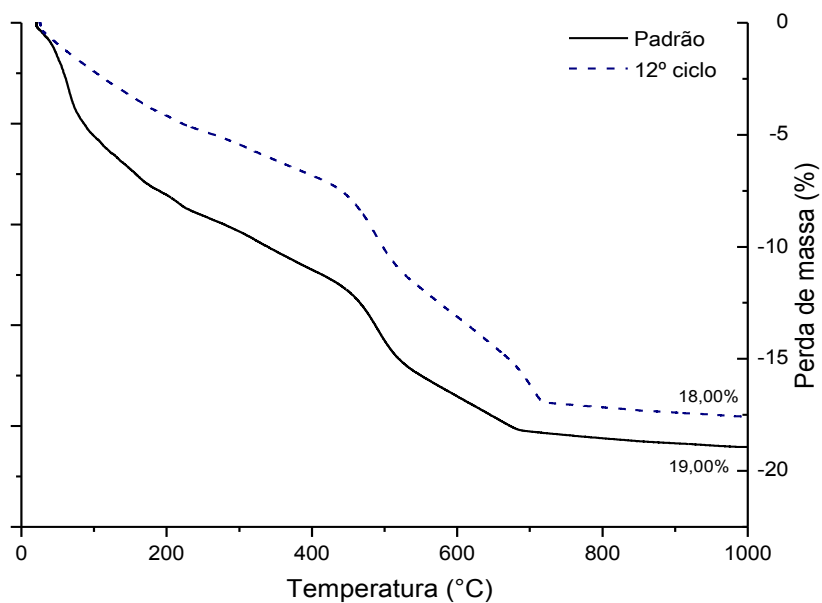


Figura 54 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos ao envelhecimento acelerado

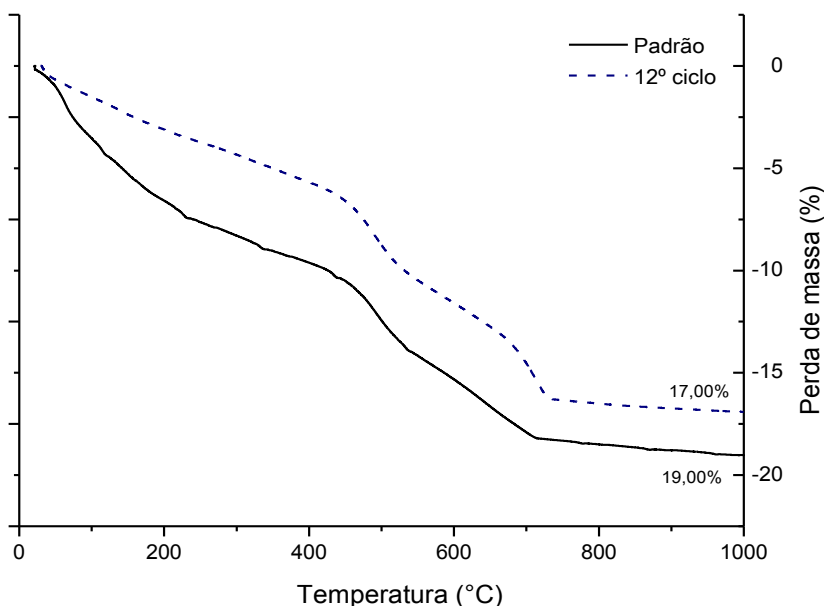


Figura 55 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RC submetidos ao envelhecimento acelerado

Analisando as curvas das Figuras 52, 53, 54 e 55 verifica-se que os blocos apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos de envelhecimento acelerado. As amostras apresentaram perda de massa total entre 17% e 19%, sendo estas correspondentes a perda de água livre, a perda de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). A maior perda de massa entre o ciclo padrão e o décimo segundo ciclo de molhagem e secagem foi de 2%, observado nos blocos de referência e 15% RC.

A Figura 56 ilustra os resultados da RCS dos blocos solo-cal (referência) e com incorporação de 15% de RO, RCER e RC, submetidos ao envelhecimento acelerado, pela técnica da molhagem e secagem.

Analisando a Figura 56 na curva referente ao bloco solo-cal (referência) houve um ganho de resistência até o 9º ciclo sendo esse acréscimo total de 94,90%, mesmo observado-se um decréscimo na RCS média do 8º ciclo ao 9º ciclo ainda percebe-se a tendência ao acréscimo de RCS, a partir do 9º ciclo ocorreu um decréscimo na RCS equivalente a 20,82%. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram superiores aos obtidos por Souza (2011), para o envelhecimento de corpos de prova solo-cimento sem incorporação de resíduo.

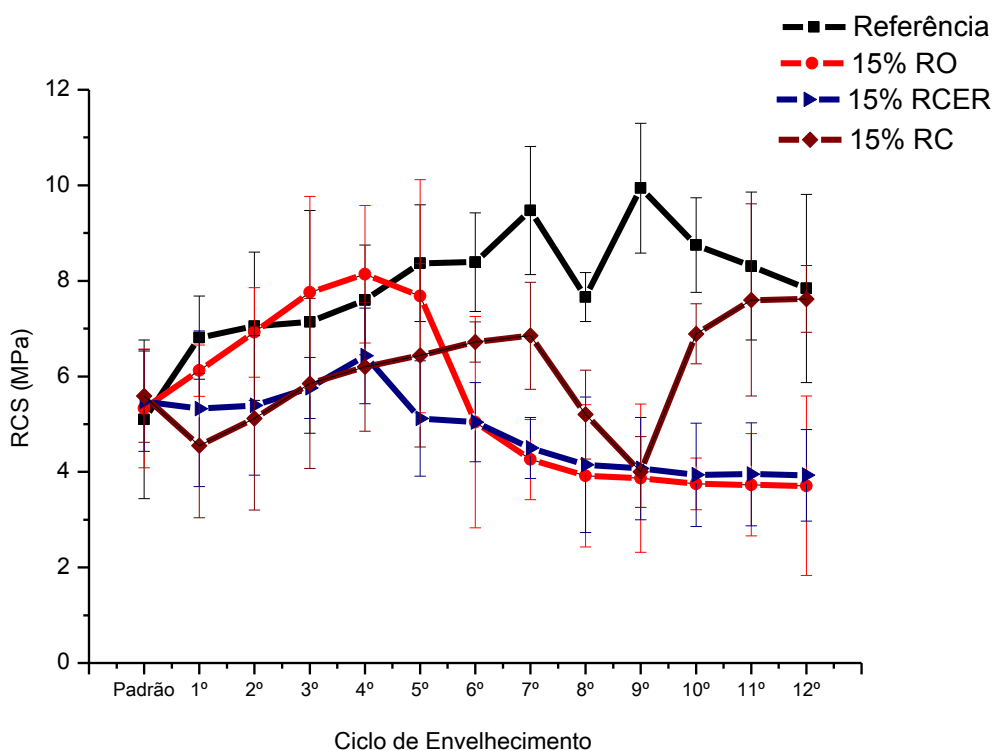


Figura 56 – Resistência à compressão simples após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos de molhagem e secagem

Na curva referente aos resultados dos blocos solo-cal com incorporação de 15% de RO houve acréscimo até o 4º ciclo de 52,72% em sua resistência à compressão simples e a partir do 4º ciclo ocorreu uma diminuição de 30,39% em relação à resistência padrão. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, estão coerentes com aqueles obtidos por Lima (2010) para corpos de prova solo-cimento incorporados com percentuais de 30% a 50% de resíduo de granito.

Na curva referente aos resultados dos blocos solo-cal com incorporação de 15% de RCER observou-se um aumento na resistência até o 4º ciclo de 17,34%, logo após um decréscimo de 28,28% em relação à resistência padrão. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, são semelhantes àqueles obtidos por Dallacort *et al.* (2002) para o envelhecimento de blocos solo-cimento incorporados com percentuais de 25% e 50% de resíduo cerâmico.

Na curva referente aos resultados dos blocos solo-cal com incorporação de 15% de RC observou-se um aumento total na resistência até o 12º ciclo de 36,31%, porém o 8º e 9º ciclos apresentaram uma diminuição na RCS equivalente a 41,61%, voltando em seguida a apresentar aumento na RCS. Estes resultados, quando

analisados com o desvio padrão, são superiores àqueles obtidos por Beltrão (2014) para o envelhecimento de blocos de argamassa incorporados com percentuais de 0% a 30% de resíduo de caulim, o resíduo sendo composto de 50% RCF + 50% RCG.

Observa-se ainda, que os blocos de referência, sem incorporação de resíduo, apresentaram melhor desempenho ao longo do ensaio. Os blocos com incorporação de 15% de RO apresentaram desempenho melhor até o 5º ciclo de envelhecimento, porém posteriormente houve grande perda de RCS. Os blocos com incorporação de 15% de RCER apresentaram comportamento mais estável ao longo dos ciclos de envelhecimento, já aqueles incorporados com 15% de RC apresentaram grande perda de RCS no 8º e 9º ciclo posteriormente voltando a apresentar ganho de resistência até o final do ensaio.

Os valores da RCS estão de acordo com as fases mineralógicas observadas (Figuras 44, 45, 46 e 47) ao longo dos ciclos do envelhecimento, nos blocos avaliados observa-se a presença de picos mais intensos referentes à portlandita e picos referentes à calcita que se intensificaram ao longo do ensaio, decorrente das reações ocorridas entre a cal e CO_2 do ar ambiente, favorecendo a carbonatação.

Os picos referentes a calcita apresentaram-se mais intensos nos blocos 15% RO e 15% RCER, indicando maiores reações de carbonatação, que podem impedir a penetração do ar e do CO_2 no material não permitindo a continuidade das reações pozolânicas, justificando assim seu desempenho inferior às demais incorporações. Observa-se também que nos blocos com incorporação de 15% RC a atividade pozolânica foi favorecida e a carbonatação ocorreu de maneira menos intensa.

Verifica-se que os blocos submetidos ao envelhecimento acelerado apresentaram grande dispersão nos resultados indicadas pelo desvio padrão, porém os valores da RCS foram superiores ao exigido pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa. De maneira geral, as curvas referentes ao ensaio de envelhecimento acelerado apresentaram comportamento ascendente para um determinado número de ciclos, em seguida um decréscimo, evidenciando o envelhecimento.

5.4.3 Simulação da chuva dirigida

Após o período de cura de 90 dias, os blocos solo-cal (referência) e com incorporação de resíduos que apresentaram melhor desempenho mecânico foram submetidos a avaliação da durabilidade utilizando o envelhecimento acelerado por

simulação da chuva dirigida, utilizando-se como indicador de degradação a resistência à compressão simples e a perda de massa.

As Figuras 57, 58, 59 e 60 apresentam os difratogramas do segundo e do vigésimo quarto ciclos da simulação da chuva dirigida para os blocos avaliados.

Analisando as Figuras 57, 58, 59 e 60 observa-se nos difratogramas referentes a todos os blocos avaliados a presença das seguintes fases mineralógicas: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Na composição de referência, 15% RO e 15% RCER observa-se ainda a presença da fase mineralógica referente à mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Nas incorporações 15% RO e 15% RCER avaliadas, estão presentes fases mineralógicas referentes ao feldspato potássio (KAlSi_3O_8) e feldspato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Verifica-se também a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) nos blocos com incorporação de RCER.

Em relação a portlandita observa-se picos mais intensos para os blocos de referência e incorporados com 15% de RO, e picos referentes à calcita menos intensos nos blocos de referência.

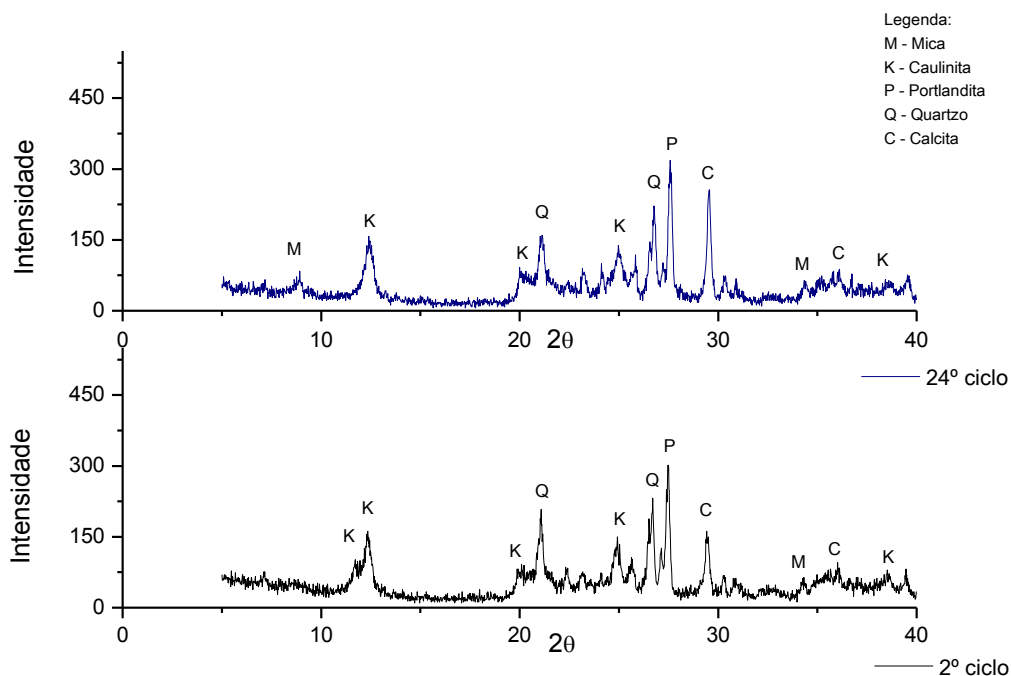


Figura 57 - Difração de raios X dos blocos solo-cal submetidos à chuva dirigida

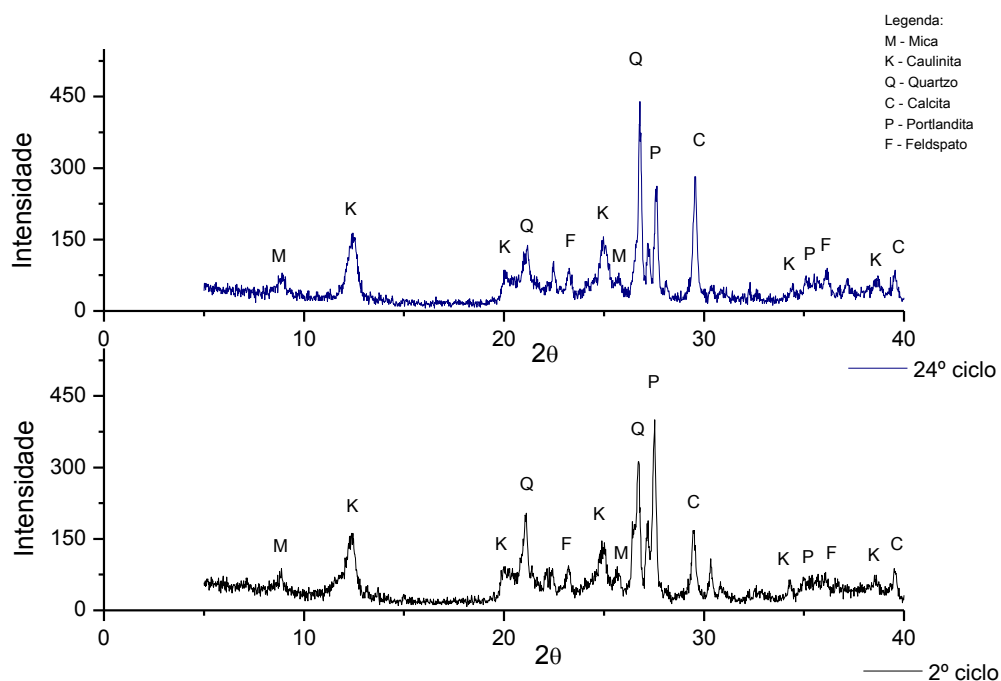


Figura 58 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RO submetidos à chuva dirigida

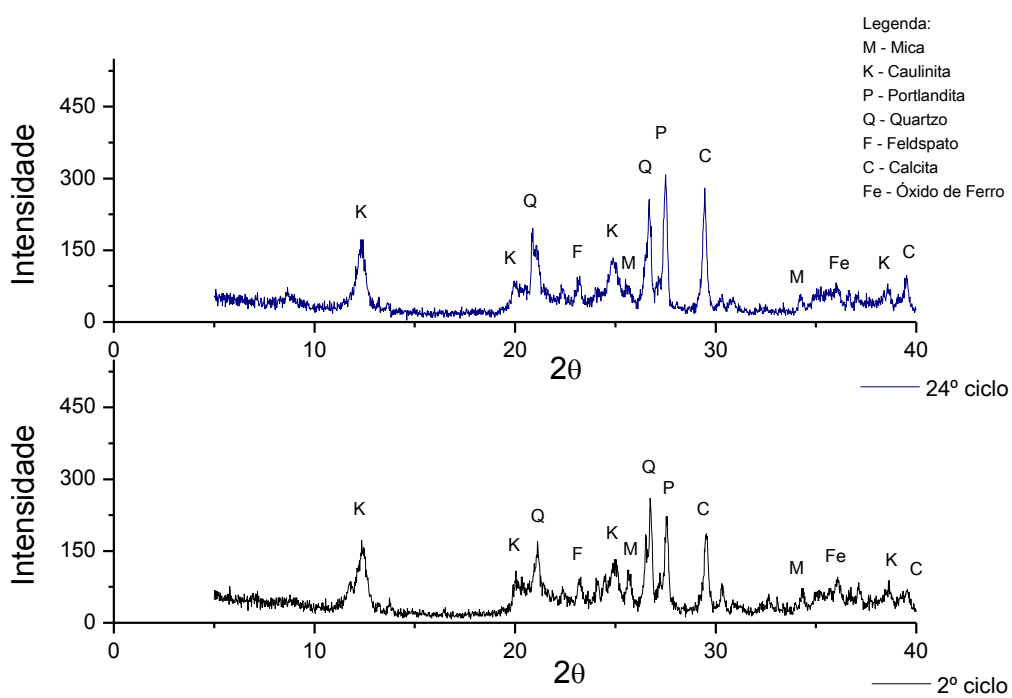


Figura 59 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos à chuva dirigida

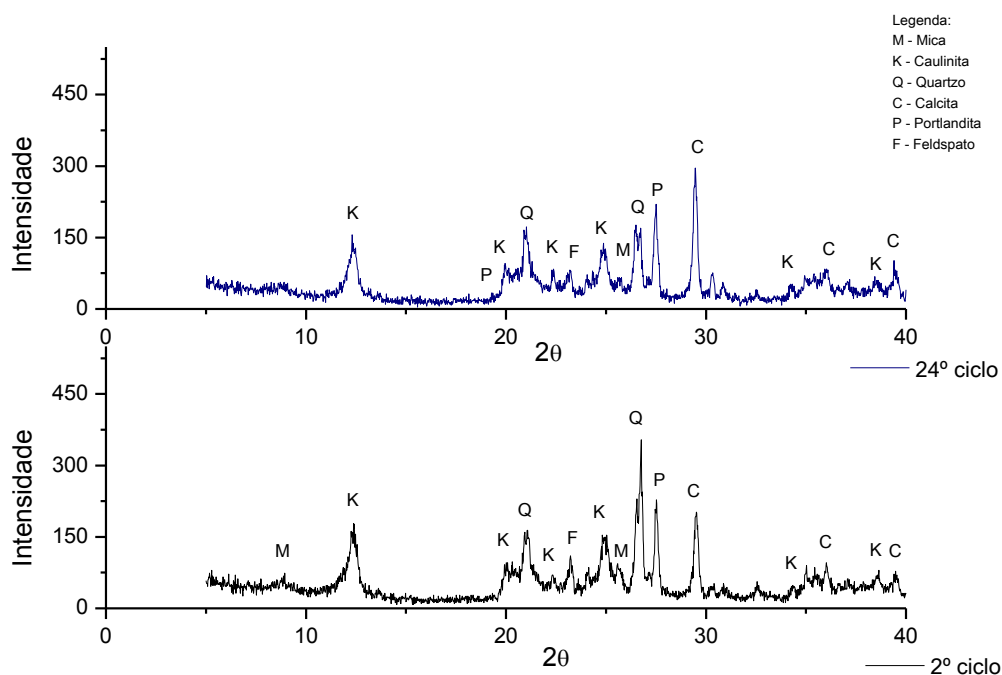


Figura 60 - Difração de raios X dos blocos solo-cal-15%RC submetidos à chuva dirigida

Nas Figuras 61, 62, 63 e 64 estão ilustradas as curvas das análises termodiferenciais do segundo e do vigésimo quarto ciclos da simulação da chuva dirigida para os blocos avaliados.

Analisando as curvas das Figuras 61, 62, 63 e 64 verifica-se que os blocos avaliados apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos da chuva dirigida. As amostras apresentaram picos endotérmicos em temperaturas aproximadas de 55°C-70°C provavelmente associado à presença de água livre e adsorvida, picos endotérmicos na temperatura aproximada de 490°C-500°C correspondente, provavelmente, a perda de hidroxilas da caulinita (eventualmente da portlandita) e picos endotérmicos na temperatura aproximada de 700°C-720°C correspondente, provavelmente, a decomposição do carbonato de cálcio. Além desses picos, observam-se discretos picos endotérmicos, em temperaturas entre 150°C e 200°C, possivelmente, referente aos silicatos formados nas reações pozolânicas com a cal. Segundo Kapel *et al.* (1989) alguns neossilicatos são evidenciados quando o processo de cura é acelerado.

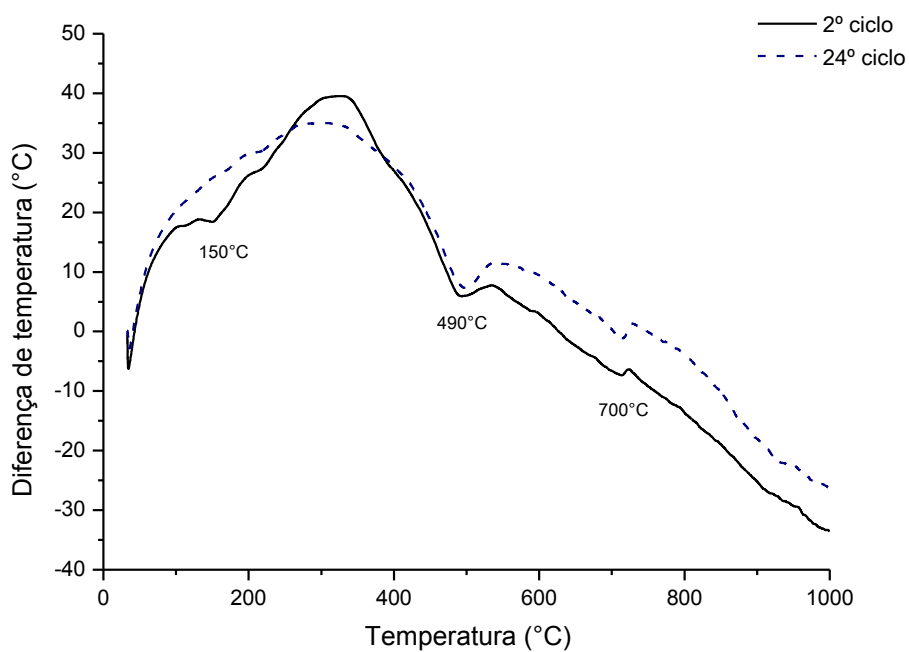


Figura 61 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal submetida à chuva dirigida

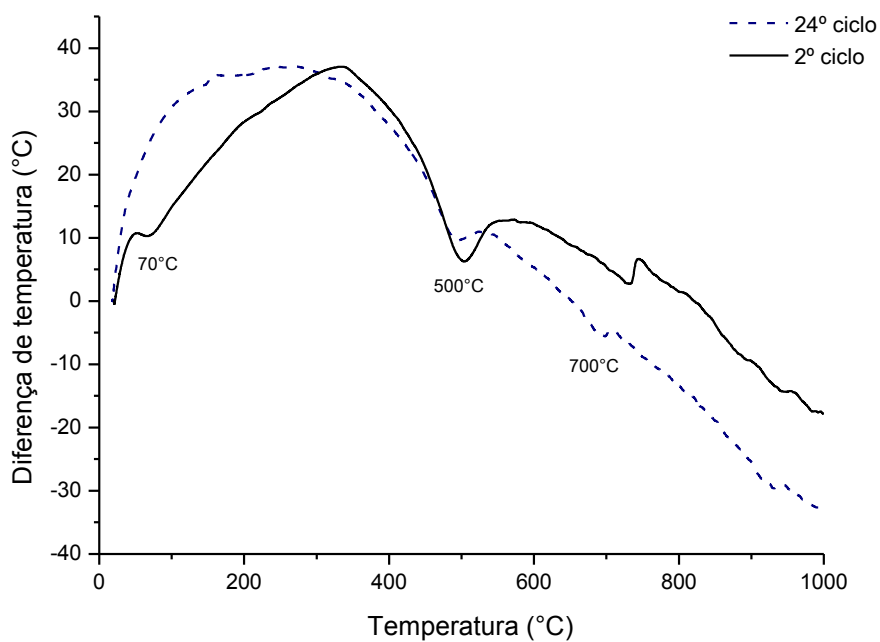


Figura 62 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RO submetida à chuva dirigida

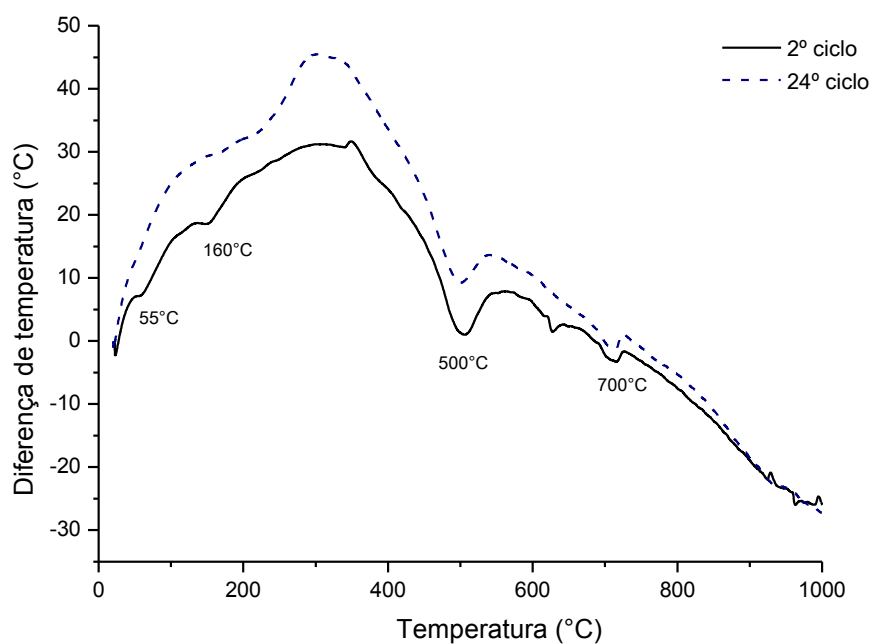


Figura 63 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RCER submetida à chuva dirigida

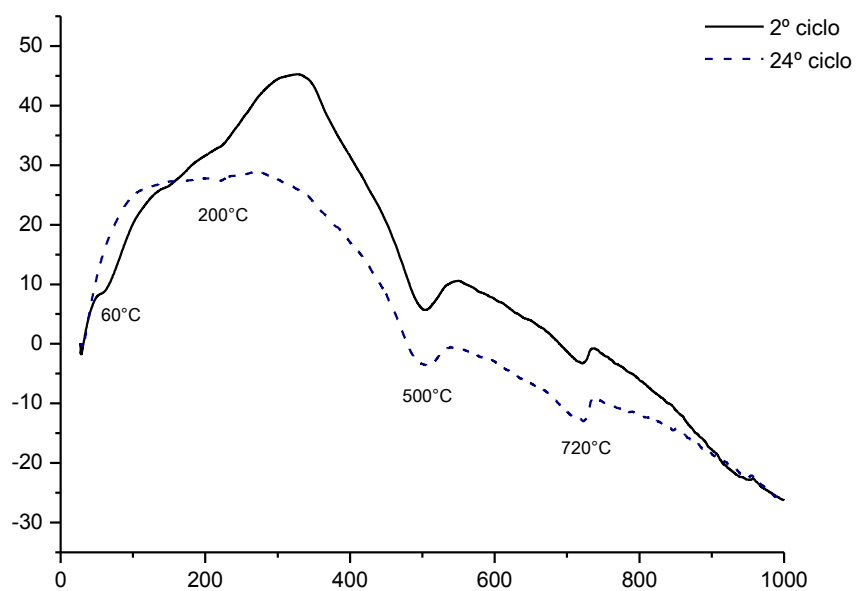


Figura 64 – Curvas das análises termodiferenciais da composição solo-cal-15%RC submetida à chuva dirigida

As Figuras 65, 66, 67 e 68 ilustram as curvas das análises termogravimétricas do segundo e do vigésimo quarto ciclos da simulação da chuva dirigida para os blocos avaliados.

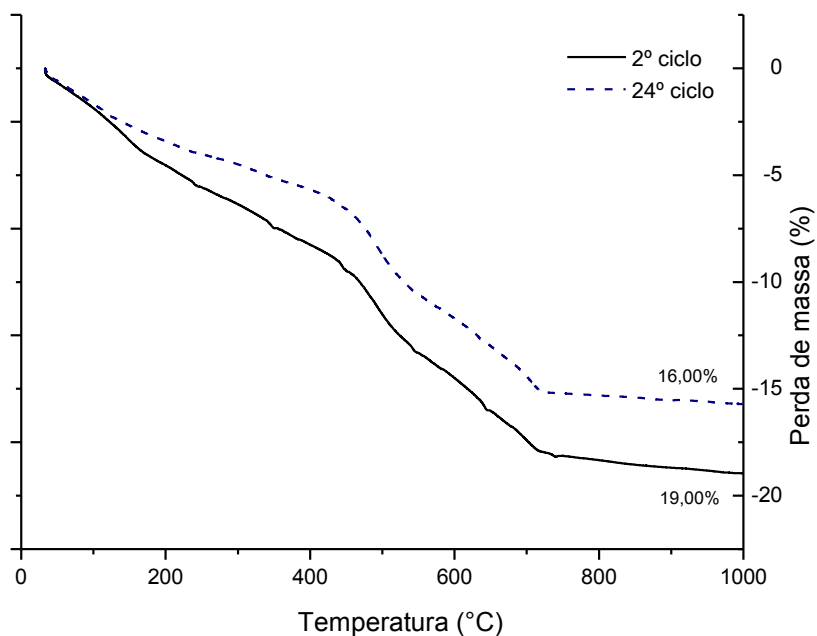


Figura 65 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal submetidos à chuva dirigida

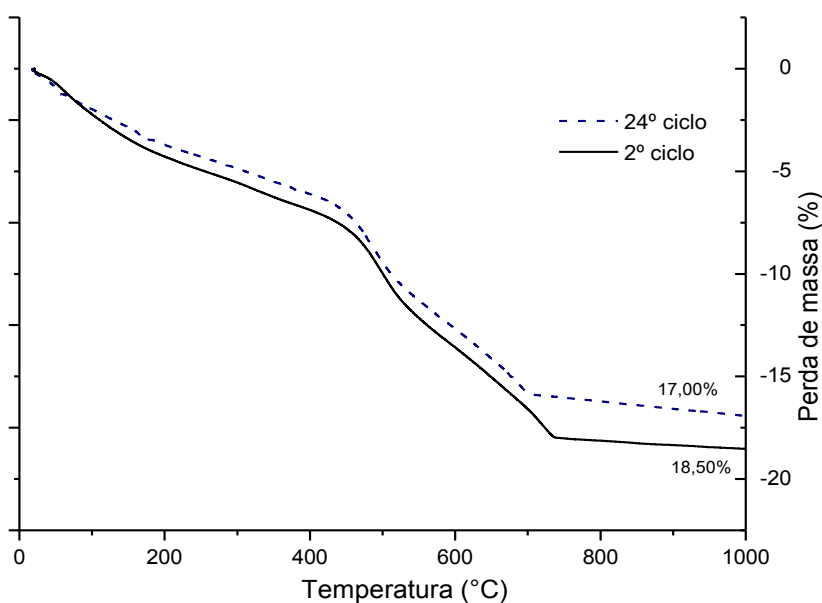


Figura 66 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RO submetidos à chuva dirigida

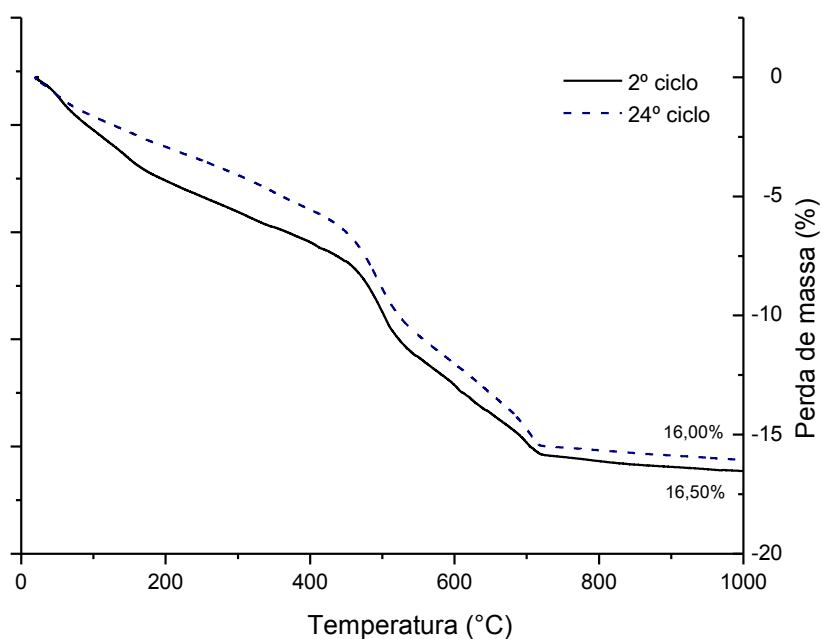


Figura 67 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RCER submetidos à chuva dirigida

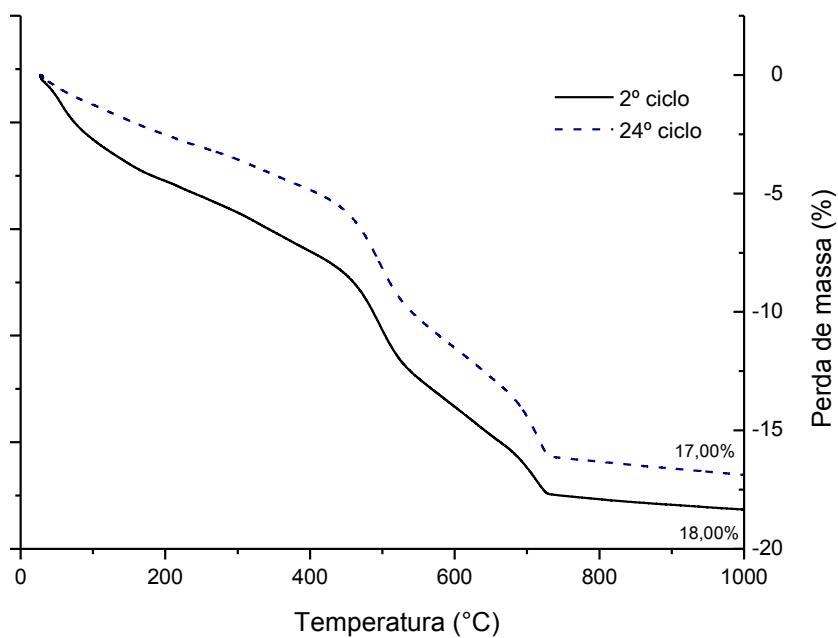


Figura 68 – Curvas das análises termogravimétricas dos blocos solo-cal-15%RC submetidos à chuva dirigida

Analisando as curvas das Figuras 65, 66, 67 e 68 verifica-se que os blocos apresentaram comportamento semelhante ao longo dos ciclos da chuva dirigida. As amostras apresentaram perda de massa total entre 16% e 19%, sendo estas correspondentes a perda de água livre, a perda de massa da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). A maior perda de massa entre o segundo ciclo e o vigésimoquarto ciclo da chuva dirigida foi de 3%, observado nos blocos solo-cal (referência).

A Figura 69 ilustra os resultados da RCS dos blocos solo-cal (referência) e com incorporação de 15% de RO, RCER e RC, submetidos ao envelhecimento acelerado pela técnica da simulação da chuva dirigida, nos ciclos 2, 6, 12, 18 e 24.

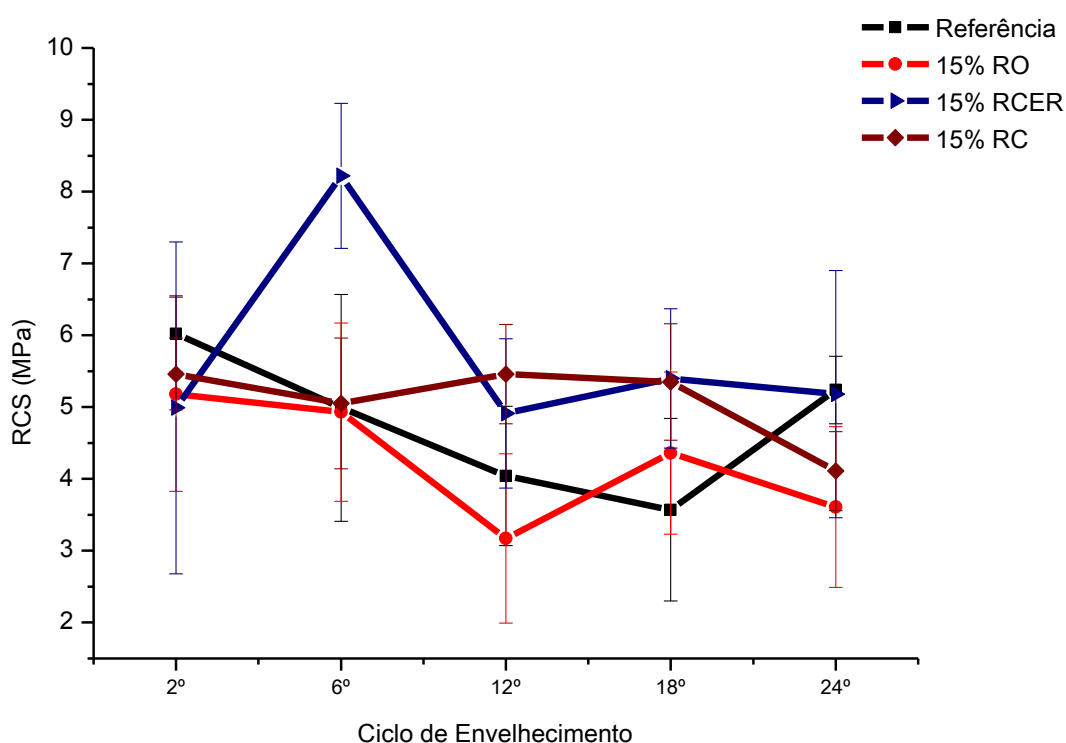


Figura 69 – Resistência à compressão simples após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos da simulação da chuva dirigida

Analisando a Figura 69 observa-se nos blocos de referência que do 2º para o 18º ciclo, a resistência mecânica diminuiu em 40,70%, aumentando 46,78% em seguida, no 24º ciclo, apresentando uma diminuição total de 12,36% do início ao fim do ensaio. Esse comportamento pode estar relacionado a lixiviação inicial de

partículas solúveis presentes na estrutura do material ocasionando diminuição na RCS, mas que estabilizou com a continuação dos ciclos, como também pelo desenvolvimento de reações pozolânicas. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram inferiores aos resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado utilizando a técnica da molhagem e secagem, bem como aos obtidos por Souza (2011), para o envelhecimento de blocos solo-cimento sem incorporação de resíduo.

Na curva referente aos blocos com incorporação de 15%RO houve uma diminuição na resistência do 2º ao 12º ciclo de 38,80%, em seguida apresentou um aumento de RCS entre o 12º e 18º ciclo de 37,54%, voltando em seguida a evidenciar o envelhecimento com uma perda de RCS entre o 18º e 24º ciclo de 17,20%. A diminuição de RCS total entre o 2º e o 14º ciclo observada foi de 30,31%, esse comportamento pode estar relacionado a lixiviação inicial de partículas solúveis presentes na estrutura do material ocasionando diminuição na RCS. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram inferiores aos resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado utilizando a técnica da molhagem e secagem, bem como aqueles obtidos por Lima (2010) para blocos solo-cimento, submetidos à molhagem e secagem, incorporados com percentuais de 30% a 50% de resíduo de granito.

Os blocos com incorporação de 15%RCER apresentaram um aumento na resistência do 2º ao 6º ciclo de 64,73%, em seguida apresentaram uma diminuição na RCS entre o 6º e 12º ciclo de 40,27%, posteriormente apresentaram novo aumento na RCS entre o 12º e 18º ciclo de 9,98%, voltando em seguida a evidenciar o envelhecimento com uma diminuição na RCS entre o 18º e 24º ciclo de 4,07%. Mesmo apresentando comportamento instável a RCS apresentou um aumento total entre o 2º e o 24º ciclo de 3,81%. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram próximos aos resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado utilizando a técnica da molhagem e secagem, bem como aqueles obtidos Dallacort *et al.* (2002) para o envelhecimento de blocos solo-cimento, submetidos à molhagem e secagem, incorporados com percentuais de 25% e 50% de resíduo cerâmico.

Na curva referente aos blocos com incorporação de 15%RC houve uma diminuição na resistência do 2º ao 6º ciclo de 7,51%, em seguida apresentaram um aumento de RCS entre o 6º e 18º ciclo de 8,12%, voltando em seguida a evidenciar

o envelhecimento com uma perda de RCS entre o 12º e 24º ciclo de 24,73%. A diminuição de RCS total entre o 2º e o 14º ciclo observada foi de 24,73%. Estes resultados, quando analisados com o desvio padrão, foram inferiores aos resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado utilizando a técnica da molhagem e secagem, porém são superiores àqueles obtidos por Beltrão (2014) para o envelhecimento de blocos de argamassa incorporados com percentuais de 0% a 30% de resíduo de caulim, o resíduo sendo composto de 50% RCF + 50% RCG.

Observa-se ainda, que os blocos com incorporação de 15% RCER e os blocos com incorporação de 15% RC apresentaram, de maneira geral, melhor desempenho ao longo do ensaio. Os blocos com incorporação de 15% de RO mesmo apresentando melhor desempenho que os blocos de referência no 18º ciclo, foram bastante afetados pelo envelhecimento. Os blocos com incorporação de 15% de RC apresentaram comportamento mais estável ao longo dos ciclos de envelhecimento, mesmo esta tendência tendo sido observada em todos os blocos ao longo do ensaio.

Os valores da RCS estão de acordo com as fases mineralógicas observadas (Figuras 57, 58, 59 e 60) ao longo dos ciclos da chuva dirigida, nos blocos avaliados observa-se a presença de picos mais intensos referentes à portlandita e picos referentes à calcita que se intensificaram ao longo do ensaio, decorrente das reações ocorridas entre a cal e CO_2 do ar ambiente, favorecendo a carbonatação.

Os picos referentes a calcita apresentaram-se mais intensos em todos os blocos avaliados no 24º ciclo, indicando maiores reações de carbonatação, que podem impedir a penetração do ar e do CO_2 no material não permitindo a continuidade das reações pozolânicas, podendo justificar a tendência das RCS's ao longo do ensaio serem mais estáveis, mesmo ainda sendo observado fases mineralógicas referentes à portlandita bastante intensas até o 24º ciclo da chuva dirigida.

Verifica-se que os blocos submetidos à chuva dirigida apresentaram grande dispersão nos resultados indicadas pelo desvio padrão, porém os valores da RCS foram superiores ao exigido pela norma ABNT NBR 8491/12, que é de 2,0MPa. De maneira geral, as curvas referentes ao ensaio de simulação da chuva dirigida apresentaram comportamento ascendente para um determinado número de ciclos, em seguida um decréscimo, evidenciando o envelhecimento.

A Figura 70 ilustra os resultados da perda de massa dos blocos solo-cal (referência) e com incorporação de 15% de RO, RCER e RC, submetidos ao envelhecimento acelerado pela técnica da simulação da chuva dirigida, nos ciclos 2, 6, 12, 18 e 24.

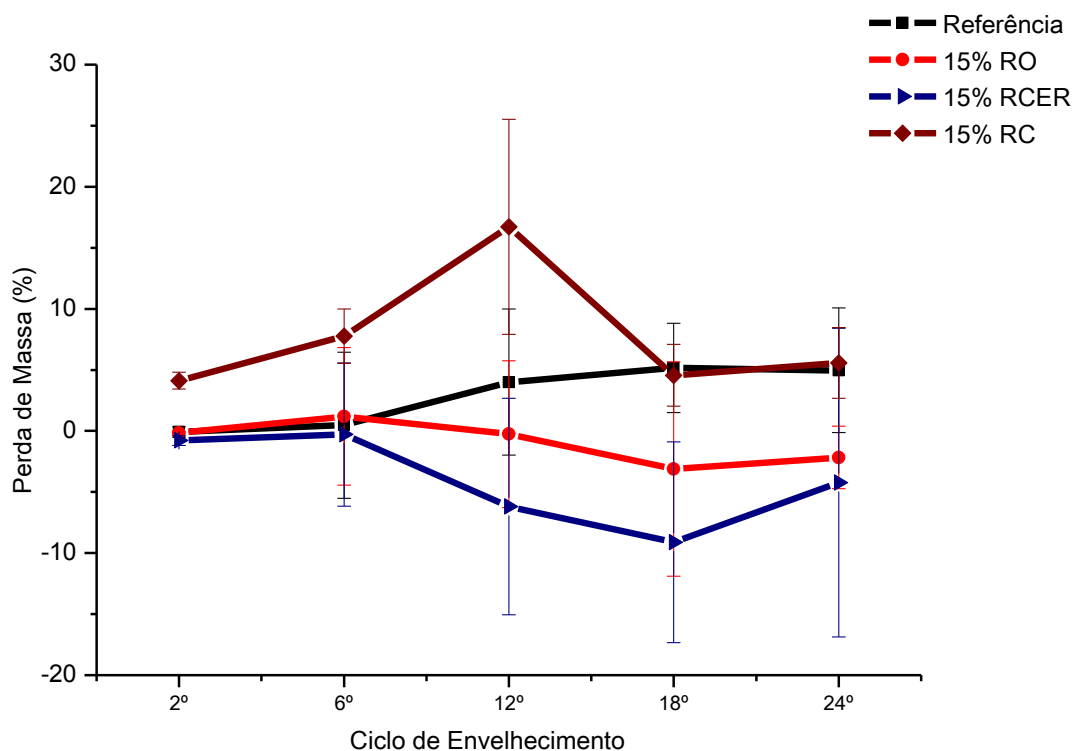


Figura 70 - Perda de massa após os ciclos de envelhecimento para os blocos submetidos aos ciclos da simulação da chuva dirigida

Analisando a perda de massa das amostras, Figura 70, observa-se que para a amostra de referência ocorreu uma estabilização da perda de massa do 18º ao 24º ciclos, quando analisado com o desvio padrão. Esse comportamento está de acordo com as resistências mecânicas observadas, os blocos solo-cal (referência) apresentaram queda em sua RCS até o 18º ciclo. Estes resultados são inferiores aos resultados encontrados por Souza (2011), em seu estudo com blocos solo-cimento incorporados com até 4% de casca de arroz em substituição ao cimento.

Para os blocos com 15% de incorporação de RO observa-se, apesar da grande dispersão, uma tendência ao ganho de massa do 6º ao 18º ciclos, o que pode ser justificado pela aceleração da cura decorrente dos ciclos, voltando a apresentar pequena perda de massa no 24º ciclo. Esse comportamento está de

acordo com as resistências mecânicas observadas, a incorporação de 15% de RO apresentou ganho de resistência no 8º e 12º ciclos. Estes resultados são inferiores aos encontrados por Lima (2010) para a perda de massa de blocos cilíndricos de solo-cimento incorporado com teores de 30%, 40% e 50% de resíduo de granito submetidos à seis ciclo de molhagem e secagem.

Os blocos com incorporação de 15% de RCER apresentaram a maior dispersão dentre as incorporações avaliadas e maior ganho de massa. Observou-se tendência ao ganho de massa do 6º ao 18º, o que pode ser justificado pela aceleração da cura decorrente dos ciclos, voltando a apresentar perda de massa no 24º. Esse comportamento confirma as resistências mecânicas observadas. Os blocos com incorporação de 15% de RCER apresentaram ganho de resistência no 8º e 18º ciclos. Estes resultados são superiores aos encontrados por Bezerra (2014) em seu estudo com corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha.

Para os blocos com 15% de incorporação de RC observou-se grande dispersão e perda de massa durante todo o ensaio. Verifica-se uma perda de massa mais acentuada até o 12º ciclo e uma tendência à estabilização entre o 18º e o 24º ciclo. Mesmo com a grande perda de massa observada nos blocos com incorporação de 15% de RC, a RCS apresentou pequenos acréscimos e decréscimos durante o ensaio, evidenciando um comportamento estável ainda que em contato com os agentes de degradação simulados. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Severo (2014) em seu estudo da durabilidade de blocos geopoliméricos incorporados com resíduo de caulim.

5.4.4 Resistência ao ataque por sulfatos

Os blocos imersos na solução de sulfato de sódio, a partir de 72h, apresentaram um elevado índice de deterioração em todo o bloco, principalmente nas bases devido à intrusão dos sulfatos em suas faces adjacentes, conforme pode ser observado nas Figuras 71, 72 e 73.

Essa deterioração precoce, deve-se provavelmente ao fato da alumina e dos silicatos, presentes no solo e nos resíduos utilizados e do hidróxido de cálcio, proveniente da cal, quando em contato com a água serem bastante vulneráveis ao ataque por íons sulfato. Desta forma, as reações formaram compostos altamente

expansivos que além da desagregação do material também proporcionaram a perda de resistência devido a perda de coesão.



Figura 71 - Blocos imersos em solução de sulfato por 24h, respectivamente: referência, 15%RCER, 15%RC e RO



Figura 72 - Blocos imersos em solução de sulfato por 48h, respectivamente: RO, 15%RC, 15% RCER e referência



Figura 73 - Blocos imersos em solução de sulfato por 96h, respectivamente: RO, 15%RC, 15% RCER e referência

A medida da variação dimensional causada pela exposição a sulfatos foi inviabilizada, já que em menos de uma semana de exposição os blocos já estavam bastante deteriorados e amolecidos, conforme pode ser observado nas Figuras 74 e 75.

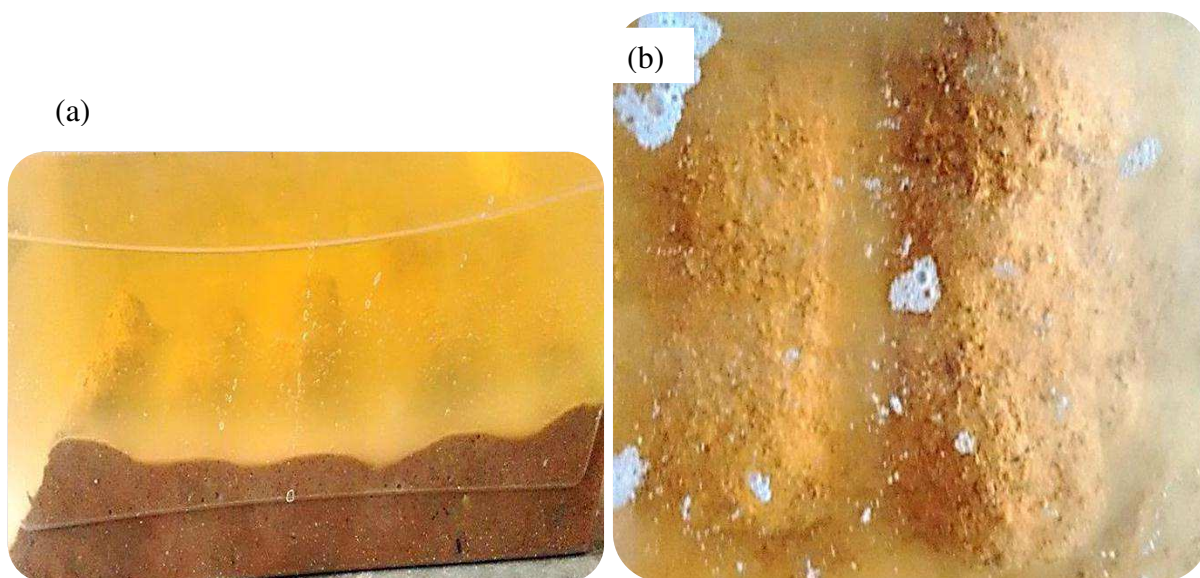


Figura 74 - Blocos imersos em solução de sulfato por 1 semana: (a) visão lateral; (b) visão de topo

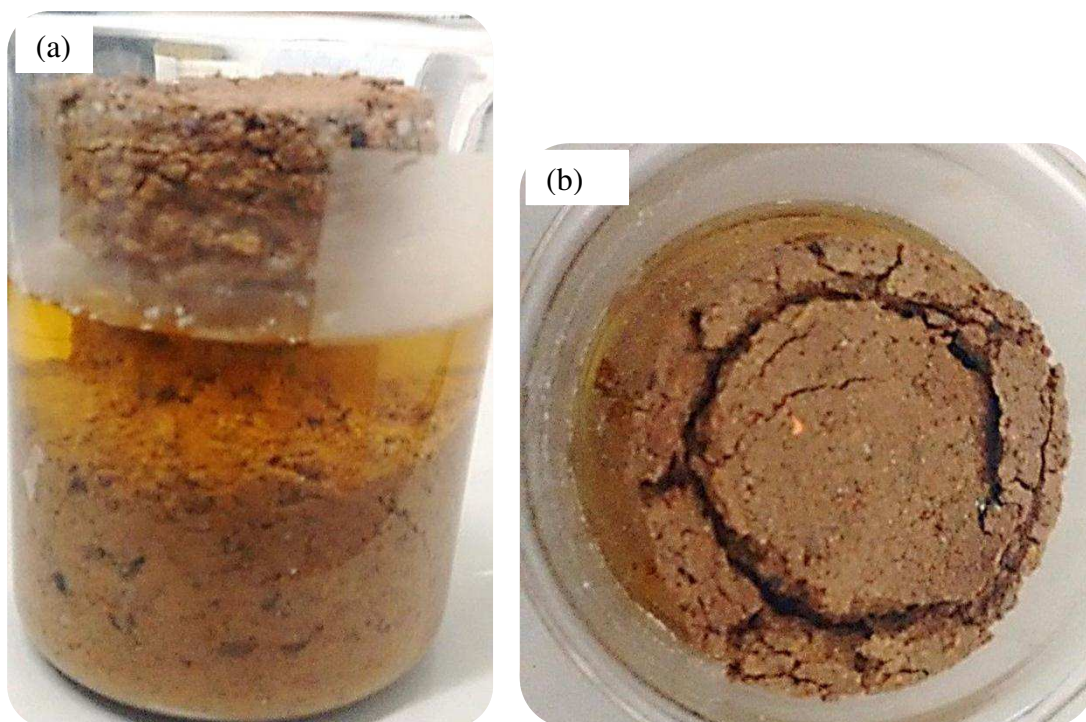


Figura 75 - Blocos de referência imerso em solução de sulfato por 96h: (a) visão lateral; (b) visão de topo

A resistência ao ataque do sulfato em blocos solo-cal sem incorporação de resíduo e com incorporação de 15% de RO, RCER e RC, basearam-se apenas nas observações visuais, dado a inviabilidade para realizar as medições devidas. Desta forma, os blocos de referência apresentaram uma degradação mais rápida, seguidos pelos blocos com incorporação de 15%RO e 15%RC, por fim os blocos que apresentaram uma maior resistência ao ataque do sulfato, ou seja, demoraram mais para se degradarem, foram os blocos com incorporação de 15% RCER.

6 CONCLUSÕES

Após o estudo do efeito da adição de resíduos industriais na durabilidade de blocos solo-cal pode-se concluir que:

- O RO, RCER, o RC, a cal e o solo apresentaram distribuição de tamanho das partículas e composição mineralógica adequada à utilização em solo-cal.
- Os blocos incorporados com resíduo de caulim apresentaram maiores índices de atividade pozolânica.
- Os blocos solo-cal incorporados com 15% de RO, RCER e RC para o período de cura de 90 dias apresentaram propriedades físico-mecânicas de acordo com as especificações da ABNT.
- Os blocos solo-cal incorporados com 15% RCER apresentaram melhor resistência em relação ao envelhecimento natural.
- Em relação ao envelhecimento acelerado os blocos com incorporação de 15% RCER apresentaram comportamento mecânico mais estável durante todos os ciclos.
- Comparando o desempenho dos blocos submetidos à simulação da chuva dirigida e à técnica da molhagem e secagem, os blocos solo-cal e com incorporação de 15% RO e 15% RC, ao longo dos ciclos do envelhecimento, apresentaram desempenho inferior no ensaio de molhagem e secagem, os blocos com incorporação de 15% RCER apresentaram comportamento semelhante em ambos ensaios.
- No ensaio de resistência ao ataque de sulfatos todos os blocos avaliadas apresentaram grande degradação em menos de 7 dias.

Portanto, os blocos incorporados com resíduos industriais provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, do beneficiamento da cerâmica vermelha e do caulim apresentam potencial para serem utilizados em habitações de interesse social, desde que esses blocos não fiquem expostos por um prolongado período às condições climáticas ambientais. No entanto, quando trata-se de uma alternativa ao volume destes resíduos que são lançados no meio ambiente, a incorporação ao solo-cal para esta e outras utilizações mostra-se extremamente promissora.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a durabilidade de tijolos solo-cal utilizando outras técnicas de envelhecimento.
- Avaliar o envelhecimento natural em um intervalo de tempo maior.
- Avaliar a durabilidade com o material em uso.
- Avaliar o envelhecimento acelerado com maior número de ciclos e variação na duração dos ciclos;
- Avaliar o envelhecimento utilizando blocos solo-cal com incorporação dos resíduos.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

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

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8491:** Tijolo maciço de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12024:** Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12025:** Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13554:** Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13583:** Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

ALCANTARA, M. A. M.; SANTOS, L. P.; LIMA, D. C.; SEGANTINI, A. A. S.; AKASAKI, J. L. **O uso de cinzas de casca de arroz como aditivo auxiliar na**

produção de tijolos de solo-cal. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. v.1, n.3, p.1-11, 2011.

ANJOS, C. M. **Utilização de resíduos de caulim em tijolos de solo-cal.** 2011. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. **Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v.6, n.2, p.91-96, 2011.

ASTM – American Society for Testing and Materials Standard Specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzoolans for use as mineral admixtures in concrete, **C-618**. 2008.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. **Caracterização dos resíduos cauliniticos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade.** Cerâmica. Vol. 58. Nº 345. São Paulo – SP. p. 36 - 42, 2012.

BELTRÃO, S. L. D. **Comportamento mecânico e durabilidade de argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado.** 2014. 162f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materias), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

BELTRÃO, S. L. D.; SEVERO, C. G. S.; BEZERRA, I. M. T.; LIRA, B. S.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A. **Kaolin residue as an alternative binder for grout seat and revetment.** Materials Science Forum. Vols. 775-776, pp. 653-658, jan. 2014.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

BEZERRA, I. M. T. **Desenvolvimento de corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha.** 2014. 114f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

CABRAL, E. S.; LEITE FILHO, E. M.; ARAÚJO, R. B. **Impactos ambientais: uma abordagem das atividades de beneficiamento de caulim na região Borborema/Seridó na Paraíba.** Centro Científico Conhecer – ENCICLOPÉDIA BIOSFERA. v.5, n.8, 2009.

CAMÕES, A.; COSTEIRA, A. **Durabilidade de betões reforçados com fibras de aço.** In: Encontro Nacional Betão Estrutural – BE2012. Porto. Outubro, 2012.

CASTRO, W. A. de M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil.** 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e

Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

COSTA, C. H. **Estudo ecotoxicológico para valorização do resíduo produzido no processo de polimento de piso porcelanato na indústria cerâmica.** 2010. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CRUZ, M.; JALALI, S. **Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento.** In: 12º Congresso Nacional de Geotecnia. Guimarães. Abril, 2010.

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. **Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - AGRIAMBI. Vol. 6. Nº 3. p. 511 - 518, 2002.

DE PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N. da; SOUZA, C. F. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Engenharia na Agricultura. Vol. 17. Nº 1. p. 15 - 20, 2009.

DIAS, S. L. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil – avaliação da atividade pozolânica.** 2010. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito.** 2007. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FARIAS FILHO, J.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos.** Cerâmica. Vol. 57. Nº 344. São Paulo – SP. Oct/Dec, 2011.

FARIAS FILHO, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, P. R. L. **Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - AGRIAMBI. Vol. 14. Nº 10. p. 1109 - 1114, 2010.

FIGUEIREDO, S. S. **Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil.** 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; NEVES, G. A. **Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil.** Rem: Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.64, n.3, p.277-283, 2011.

FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; SILVA, I. A.; NEVES, G. A. **Utilização de resíduo de demolição da construção civil em tijolos solo-cal.** In: 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2011, Porto de Galinhas, PE.

FONTES, T.; FARIA, P.; SILVA, V. **Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico.** In: Congresso Construção, 2012, Coimbra, Portugal.

FONTES, T. I. M. **Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional – Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino.** 2013. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção), Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

FREIRE, W. J. **Tecnologias e materiais alternativos de construção.** Campinas, SP: Editora Unicamp, 2003, 332p.

FUSARI, D. G. **Efeito do uso de resíduos do caulim e granito na regressão de resistência em microconcreto.** 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos.** Rem: Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.60, n.4, p.639-644, 2007.

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.

KAPEL, I. C.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Previsão da atividade pozolânica através do uso da análise térmica diferencial – Resultados preliminares.** Cerâmica. v.35, p. 158-161, 1989.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito.** 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LIMA, R. C. O.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; SILVA, M. C.; FRANÇA, K. B. **Study of the influence of granite residue in different compositions to prepare ceramic membranes.** Materials Science Forum. Vols. 798-799, pp. 542-547, jun. 2014.

LIMA, R. C. O.; NEVES, G. A.; CARVALHO, J. B. Q. **Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v.5, n.2, 2010.

LIMA, S. A E Rossignolo, J. A. - **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios.** Acta Scientiarum. Technology Maringá, v. 32, nº 4, p. 383-389, 2010.

LOTFY, A.; KARAHAN, O.; OZBAY, E.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. **Effect of kaolin waste content on the properties of normal-weight concretes**. Construction and Building Materials. Vol. 83. Nº 15, p. 102-107. May, 2015.

MANHÃES, J. P. V. T.; MOREIRA, J. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Varição microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental**. Cerâmica. Vol. 55. Nº 336. São Paulo – SP. Out/Dez, 2009.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas**. Cerâmica. Vol. 48. Nº 306. São Paulo – SP. Abr/Jun, 2002.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. **Atividade pozolônica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - AGRIAMBI. Vol. 13. Nº 6. p. 795 - 801, 2009.

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.

MONTEIRO, S. N.; PEÇANHA, L. A.; VIEIRA, C. M. F. **Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations**. Journal of the European Ceramic Society. Vol. 24, p. 2349-2356, 2004.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. **Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação**. Rem: Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.64, n.2, p.147-154, 2011.

NEVES, G. de A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima cerâmica**. 2002. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

NURAN AY, J. Ü. **The use os waste ceramic tile in cement production**. Technical Cement and Concrete Research. 2000. 497-499p.

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**. 2004. 218f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

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, n.2, 2006.

PATRICIO, S. M. R. **Aproveitamento de resíduos da construção civil na produção de tijolos solo-cal.** 2011. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

PATRICIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil.** Cerâmica. Vol. 59. Nº 349. São Paulo – SP. Jan/Mar, 2013.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F.; LEVY, S. M. **Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica.** Ambiente Construído. Vol. 12. Nº 3, p. 125-134. Jul/Set, 2012.

PINHEIRO, I. S. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica.** 2008. 152f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

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

REIS, A. S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008.

REZENDE, M. L. S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade.** 2013. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ROCHA, A. K. A. **Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria.** 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ROJAS, J. W. J.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. **Durabilidad de un suelo contaminado y tratado com cemento portland.** Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 Nº 3, Dez/2008.

SEGANTINI, A. A. da S.; WADA, P. H. **Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição.** Technology Acta Scientiarum. Vol. 33 Nº 2, p. 179-183, 2011.

SEVERO, C. G. S. **Reciclagem de resíduos de serragem do granito e do beneficiamento do caulim utilizando ativação alcalina.** 2014. 116f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SILVA, M. A.; PAES JR., H. R.; HOLANDA, J. N. F. **Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain.** Journal of Environmental Management. Vol. 92, p. 936-940, 2011.

SILVA, V. M. da; GÓIS, L. C.; DUARTE, J. B.; SILVA, J. B. da; ACCHAR, W. **Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks.** Materials Research. Vol. 17, Nº 2, p. 326-331, 2014.

SOUZA, F. A. **Estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz.** 2011. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento.** 2006. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Ensaio de avaliação da durabilidade das construções em terra.** In: Seminário Ibero-Americano de Construção e Arquitetura com Terra - SIACOT. Coimbra. Fevereiro, 2010.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Resistência e envelhecimento acelerado de betões contendo resíduos cerâmicos.** Engenharia Civil. Nº 36. p. 63 – 71. Portugal, 2010.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Desempenho de betões com substituição parcial de 20% de cimento Portland por resíduos cerâmicos moídos.** Betão. Nº 27. Novembro, 2011.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. **Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles.** Journal of the European Ceramic Society. Vol. 29. Issue 1, p. 23-30. Jan, 2009.

VASCONCELOS, A. R. B. de; AKASAKI, J. L. **Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu.** Ambiente Construído. Vol. 10, p. 1-7. September, 2013.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; GANESH PRABHU, G. **Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste.** Construction and Building Materials. Vol. 46. Nº 1, p. 77-90. Jan/Mar, 2010.

WADA, P. H. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas *in loco*.** 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

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. Cerâmica. Vol. 55. Nº 333. São Paulo – SP. Jan/Mar, 2009.