

JEFFERSON PEDRO CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MATERIAL A PARTIR DA COMPOSIÇÃO
DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE VARVITO E DA PRODUÇÃO DE CAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr.Sc. Vsévolod Mymrine

Co-Orientador: Prof. Dr. Fernando Wypych

CURITIBA

2007

JEFFERSON PEDRO CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MATERIAL A PARTIR DA COMPOSIÇÃO
DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE VARVITO E DA PRODUÇÃO DE CAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr.Sc. Vsévolod Mymrine

Co-Orientador: Prof. Dr. Fernando Wypych

CURITIBA

2007

DEDICATÓRIA

A Deus.

A minha mãe.

A meu pai (in memoriam)

A minha esposa e a meu filho.

Todos com parcelas iguais de incentivo, paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a coordenação, professores e funcionários do Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia.

Ao Prof. Dr. Haroldo Araújo Pontes, pela disposição do Laboratório de Tecnologia Ambiental para o armazenamento das amostras e preparo dos corpos-de-prova.

Sou grato ao Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto, Coordenador do LAMIR e sua equipe, em especial à Técnica Eliziane pela cooperação.

Ao funcionário Sérgio, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, pela sua colaboração e cordialidade.

Aos amigos Rodrigo Manoel do Nascimento, José Rossa Junior e José Carlos Cordeiro, dos Laboratórios de Argamassa e Raio X da empresa Votorantin.

Agradeço especialmente ao Dr.Sc. Vsévolod Mymrine, que sem a sua orientação seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Maurício Lepiensi, pela disposição e paciência na correção desta dissertação.

E a todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	Vii
LISTA DE TABELAS	Viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos e Vantagens	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 O VARVITO	5
2.1.1 Aspecto Econômico da Extração do Varvito	7
2.1.2 Resíduos Gerados na Mineração do Varvito	8
2.2 A ARDÓSIA	9
2.2.1 Aplicações dos Resíduos de Ardósia na Obtenção de novos Materiais	10
2.3 A CAL	12
2.3.1 Histórico, Definição e Utilização	12
2.3.2 Produção da Cal	15
2.3.3 Tipos de Cal	15
2.3.4 Utilização da Cal e dos Resíduos da Produção da Cal	16
2.4 COMPÓSITOS	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 ESCOLHA DOS RESÍDUOS	20
3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS RESÍDUOS	21
3.2.1 Resíduos de Varvito – Composição Química	21
3.2.2 Resíduos de Varvito – Composição Mineralógica	21
3.2.3 Resíduos de Produção de Cal – Composição Química	22
3.2.4 Resíduos da Produção de Cal- Composição Mineralógica	23
3.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES PARA OS CORPOS DE PROVA	24
3.4 PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA (cp's)	24
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS, FÍSICO-QUÍMICOS E MICROSCÓPICOS	26
3.5.1 Resistência Mecânica à Compressão	26
3.5.2 Absorção de Água	28
3.5.3 Fluorescência de Raio-X	28
3.5.4 Difração de Raio-X	29
3.5.5 Análise Térmica Diferencial e Gravimétrica	29
3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	31
4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA	32
4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	33

4.3.1	Processos Físico-Químicos de Fortalecimento dos Corpos de Provas	34
4.4	ANÁLISE TÉRMICA DIFRENCIAL E GRAVIMÉTRICA	39
4.4.1	Caracterização e Interpretação das Curvas de ATD e ATG	40
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	42
4.5.1	Resíduo da Mineração de Varvito (estrutura natural)	43
4.5.2	Resíduo da Mineração de Varvito (aspecto sedimentado)	45
4.5.3	Resíduo da Mineração de Varvito (pó de varvito)	46
4.5.4	Resíduos da Produção de Cal	47
4.5.5	Mistura Seca da composição V5	49
4.5.6	Composição V5, idade de 7 dias	50
4.5.7	Composição V5, idade de 28 dias	51
4.5.8	Composição V5, idade de 90 dias	53
4.5.9	Composição V5, idade de 270 dias	55
5	CONCLUSÕES	58
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	GLOSSÁRIO	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE 1	64
	APÊNDICE 2	69
	ANEXOS	72
	ANEXO 1 - Difratoograma de Raio X do Resíduo da Mineração do Varvito	73
	ANEXO 2 - Difratoograma de Raio X do Resíduo de Produção de Cal Seco	75
	ANEXO 3 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 Mistura Seca	77
	ANEXO 4 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 3 dias	79
	ANEXO 5 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 7 dias	81
	ANEXO 6 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 –14 dias	83
	ANEXO 7 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 28 dias	85
	ANEXO 8 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 60 dias	87
	ANEXO 9 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 90 dias	89
	ANEXO 10 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 270 dias	91
	ANEXO 11 - Representação Gráfica das Curvas de ATD e ATG	92
	ANEXO 12 - Representação Gráfica das Curvas de ATD e ATG	93
	ANEXO 13 - Depósito do Pedido de Patente	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	LAVRA DE VARVITO EM TROMBUDO CENTRAL.	06
FIGURA 2	DISPOSIÇÃO INADEQUADA DE LAMA DE VARVITO.	08
FIGURA 3	PLACAS DE VARVITO QUEBRADAS SEM NENHUM TIPO DE ARMAZENAMENTO ADEQUADO.	09
FIGURA 4	(A) e (B) FOTOS DA ORIGEM E TIPO DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE VARVITO.	20
FIGURA 5	CORPO DE PROVA MOLDADO COM DIMENSÃO DE 20 mm X 20 mm.	25
FIGURA 6	MOLDE UTILIZADO NA COMPACTAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	25
FIGURA 7	PRENSA MANUAL DA MARCA SCHULTZ - CAPACIDADE DE 15 TONELADAS.	26
FIGURA 8	(A) MODELO DA PRENSA E, (B) DISPLAY PARA LEITURA DA RUPTURA.	27
FIGURA 9	RUPTURA DO CORPO DE PROVA DE COMPOSIÇÃO V5 E IDADE DE 90 DIAS	27
FIGURA 10	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CURVAS DE ATD E ATG AMOSTRA DE COMPOSIÇÃO V5, IDADE DE 270 DIAS.	41
FIGURA 11	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DE VARVITO (estrutura natural) 1.000x (A) e 5.000x (B).	43
FIGURA 12	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DE VARVITO (estrutura natural) 5.000x (C) e 10.000x (D).	44
FIGURA 13	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DE VARVITO (aspecto sedimentado) 1.000x (A) e 5.000x (B).	45
FIGURA 14	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DE VARVITO (pó de varvito) 1.000x (A) e 10.000x (B).	46
FIGURA 15	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CAL 50x (A) e 200x (B).	47
FIGURA 16	MICROGRAFIAS DO RESÍDUO DE CAL 950x (C) e 3.000x (D)	48
FIGURA 17	MICROGRAFIAS DA MISTURA SECA 1.000x (A) e 3.000x (B).	49
FIGURA 18	MICROGRAFIAS DA COMPOSIÇÃO V5, 7 DIAS 300x (A) e 8.000x (B).	50
FIGURA 19	MICROGRAFIAS DA COMPOSIÇÃO V5, 28 DIAS 300x (A), 1.000x (B), 8.000x (C) e 12.000x (D)	52
FIGURA 20	MICROGRAFIAS DA COMPOSIÇÃO V5, 90 DIAS 300x (A), 5.000x (B), 12.000x (C) e 12.000x (D)	54
FIGURA 21	MICROGRAFIAS DA COMPOSIÇÃO V5, 270 DIAS 300x (A), 3.000x (B), 8.000x (C) e 8.000x (D)	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	CONSUMO PER-CAPITA DE CAL NOS PRINCIPAIS PAÍSES.	13
TABELA 2	RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RX DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE VARVITO	21
TABELA 3	RESULTADO DE DRX	22
TABELA 4	RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RX DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAL	22
TABELA 5	RESULTADO DE DRX	23
TABELA 6	DENOMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E PORCENTAGENS DE RESÍDUOS	24
TABELA 7	RESUMO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO – (MPa)	31
TABELA 8	RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DE TODAS AS COMPOSIÇÕES E IDADE DE 28 DIAS	32
TABELA 9	TRANSFORMAÇÕES ANTES E DURANTE HIDRATAÇÃO DA COMPOSIÇÃO V5	37
TABELA 10	CARACTERIZAÇÃO DAS CURVAS DE ATD E ATG DA COMPOSIÇÃO V5 NA MISTURA SECA E NAS IDADES DE 3, 7, 14, 28 90 E 270 DIAS	40
TABELA 11	AMOSTRAS ANALISADAS X AMPLIAÇÕES OBTIDAS	42
TABELA A1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	65
TABELA A2	RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estudo

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

RX -Raio X

DR-X -Difração de Raio-X

NBR -Norma Brasileira

CP's -Corpos de Prova

CP -Corpo de Prova

SC Santa Catarina

SP São Paulo

UFPR Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	- porcentagem
°C	- graus Celsius
Å	- angstroms
ABS	-Absorção
cm	-centímetro
cm ³	-centímetro cúbico
dm	-decímetro
g	-grama
g/ cm ³	-grama por centímetro cúbico
h	- horas
kg	- kilograma
kg/ano	- kilograma por ano
km	-quilômetro
kN	-quilo Newton
mm	-milímetro
MPa	- Mega Pascal. Unidade de tensão.
µm	- micrômetro
mm/µm	- milímetro por micrômetro
ton	- tonelada
ton/mês	- tonelada por mês
ton/ano	- tonelada por ano

RESUMO

Foi desenvolvido e patenteado no Brasil um novo material obtido de rejeitos de varvito (ardósia) e da produção de cal para aplicação na construção civil e como decorativos entre outros. Neste trabalho são apresentados os resultados sobre a possibilidade da utilização do resíduo de mineração e extração do varvito como matéria prima para a produção do novo material. Como ligante do varvito foi utilizado o resíduo da produção de cal. A mistura destes componentes foi homogeneizada, hidratada e compactada com força de compactação de 10 MPa. Foram estudadas amostras de diferentes composições variando as porcentagens do elemento ligante e do resíduo da mineração de varvito. Verificou-se o aumento da resistência do material com o crescimento do teor de ligante e com o tempo de cura. As composições com 15 e 35 % de resíduo da produção de cal já permite obter uma resistência mecânica na idade de 28 dias de cura de 5,0 MPa e 10,1 MPa, respectivamente e na idade de 270 dias as resistências das amostras variam de 12,6-36,4 MPa para a mesma composição e idade. Para um material convencional como blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural a característica de resistência mecânica exigida é de 2,5 MPa na média para a idade de 28 dias. Através da análise dos ensaios de Difractometria de Raios-X, Análises Térmicas (ATD E ATG) e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV foi estabelecido que, a resistência do novo material cresce por razão da síntese de carbonatos amorfos e cristalinos (Calcita, Dolomita e Portlandita). A maior importância na utilização deste novo material conferido pelos resultados obtidos pode ser para o meio ambiente, tendo em vista a possibilidade na redução do volume gerado tanto do resíduo da mineração e extração do varvito como o da produção de cal.

Palavras-chaves: resíduo de varvito, ardósia, resíduo da produção de cal, novos materiais de construção civil, resíduos industriais, resistência, síntese de novas formações.

ABSTRACT

It was developed and patented in Brazil a new material gotten from varve waste (slate) and from the lime production of for application in the civil construction and as decoration, among others. In this work are presented the results on the possibility of the use of varve residue from mining and extraction as raw material for the production of a new material. As ligament of the varve the lime residue from the production was used. The mixture of these components was homogeneized, moistured and compacted with 10 MPa compacting power. It was studied samples of different compositions varying the percentages of the ligament element and the varve mining residue. The increase of the material resistance with the growth of the ligament tenor and with the time of cure was verified. The compositions with 15 and 35 % of residue of the lime production already allow to get a mechanical resistance in the age of 28 days of cure of 5,0 MPa e 10,1 Mpa, respectively and in the age of 270 days the samples resistance vary of 12,6-36,4 MPa for the same composition and age. For a conventional material as perforated blocks of simple concrete for masonry without structural function the mechanical resistance demanded is of 2,5 MPa in the average for the age of 28 days. Through the assays analysis of X-ray diffractometry, thermal analysis and scanning electron microscopy was established that the new material resistance grow because of the amorphous and crystalline carbonate synthesis (calcite, dolomite and portlandite). The biggest importance in the use of this new material conferred for the gotten results can be for the environment, having in mind possibility of the reduction of the generated volume both of the varve mining and extraction and the lime production.

Keywords: varve residue, slate, lime production residue, new materials of civil construction, industrial residues, resistance, synthesis of new formations.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Os resíduos industriais e urbanos vêm se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade moderna enfrenta. Sua deposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação dos mananciais de água e do solo (MENEZES et al.,2002).

Por outro lado, técnicos da indústria cerâmica se deparam com a escassez de reservas de matérias-primas de boa qualidade em locais economicamente viáveis de exploração (MENEZES et al.,2002).

A mineração representa uma atividade industrial que será sempre necessária para o desenvolvimento e o bem estar da sociedade, embora produza impactos ambientais mais ou menos significativos em todas as suas fases como a prospecção e pesquisa, de menor impacto, e a extração, o beneficiamento, refino e fechamento da mina, considerados de maior impacto (FIGUEIREDO, 2000).

Na cidade de Trombudo Central, Estado de Santa Catarina, no Alto Vale do Itajaí ocorre a mineração, extração e beneficiamento do varvito, rocha sedimentar de origem periglacial lacustre. Esta exploração acontece a céu aberto desde a década de 60. A mineração da rocha tem como aplicações a confecção de artefatos como pisos, revestimentos e calçamento, bem como no suprimento de algumas necessidades físicas da região. Atualmente também estão sendo exportadas placas para serem produzidas mesas de uso domiciliar, peças decorativas e tampões em mesas de bilhar.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE para o ano de 2003, havia quarenta e três unidades industriais de extração do varvito em Trombudo Central. Hoje a cidade conta com o mesmo número de unidades sendo que apenas três possuem a concessão de lavra.

Como sendo a principal atividade industrial da região, é significativa a geração de empregos diretos e indiretos para a população local se tornando em muitos casos a única fonte de renda para muitas famílias.

Segundo Mansur, et al., (2006) durante a mineração e extração do varvito, cerca de 30 % deste minério não corresponde às normas de produção devido à falta de uniformidade sendo esta fração automaticamente encaminhada aos aterros das jazidas em formas de pedaços de rochas considerados como resíduos. A borra de varvito é gerada pelo uso de água durante o corte que, em mistura com o pó de varvito (finos) apresenta características plásticas. Outra fonte de geração de resíduo também considerado como finos é através do polimento das peças cortadas. Apesar do grande volume de material minerado e retirado das jazidas, o processo de extração e beneficiamento da rocha ainda é feito de maneira bem rudimentar, sendo utilizados carrinhos com pequenos discos diamantados para o corte e com guias para se obter as dimensões da peça desejada, como pisos, tampas de mesa, bancos, etc.

Todos os resíduos da mineração e exploração de varvito criam grandes problemas tecnológicos e ambientais, pois vão se acumulando ao redor da mina criando grandes montanhas de resíduo. Para evitar problemas durante a extração da rocha, grande parte dos resíduos são transportados para locais próximos às jazidas criando grandes prejuízos à fauna e flora da região. A estimativa da quantidade deste resíduo de minério se encontra na ordem de 50-60 mil ton/mês, segundo um dos donos de concessão de uma das lavras.

Atualmente os únicos resíduos recuperados da mineração são os pedaços maiores, resultantes da quebra de peças já cortadas. Elas são retiradas da mina e levadas para britadores da Prefeitura para a homogeneização dos tamanhos e utilizados como revestimentos em estradas do Município. Um dos problemas, neste caso é a laminosa estrutura do varvito, que diminui a resistência mecânica à carga dinâmica, especialmente quando úmido, não permitindo o uso deste material na escala significativa.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de um novo material obtido pela composição de resíduos da mineração e extração de varvito (ardósia) e da produção de cal.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver novos materiais a partir da composição de rejeitos de varvito e resíduos da produção de cal.
2. Pesquisar os processos físico-químicos de formação de estruturas do novo material e as propriedades mecânicas, físico-químicas e mineralógicas.
3. Analisar os resultados obtidos comparando com normas aplicáveis aos materiais convencionais, indicando as possibilidades técnicas de aplicação do novo material na construção civil.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao trabalho de pesquisa, destacando-se os aspectos gerais, seus objetivos gerais e específicos, a estrutura do trabalho e limitações.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o varvito, a ardósia, sobre a cal e os compósitos.

No capítulo 3 é descrita a metodologia empregada para a execução dos ensaios, a escolha dos resíduos, a caracterização dos resíduos, a definição das composições, a confecção dos corpos-de-prova, os ensaios mecânicos, físico-químicos e microscópicos dos corpos-de-prova.

No capítulo 4 são analisados e discutidos os resultados dos ensaios realizados como: Resistência Mecânica à Compressão, Absorção de Água, Difração de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões baseadas nos resultados obtidos neste trabalho, assim como sugestões para futuros trabalhos de pesquisa.

1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A forma de deposição e as diferentes formas dos resíduos da mineração de varvito no local dificultaram a coleta de amostras mais representativas.

A localização da mineração do varvito se encontra a 360 Km de distância de Curitiba dificultando a coleta de novas amostras.

A falta de informação na literatura sobre trabalhos já realizados com este tipo de resíduos dificultou a comparação dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O VARVITO

Varvito é o nome utilizado pelos geólogos para denominar um tipo especial de rocha sedimentar formada pela sucessão repetida de lâminas ou camadas, cada uma delas depositada durante o intervalo de um ano. Cada lâmina ou camada de Varvito é, na verdade, um par formado de uma porção inferior, mais espessa (de cm a dm) de arenito ou siltito, de cor mais clara, seguida de uma porção mais fina (mm) de siltito ou argilito, de cor mais escura (cinza escuro). O termo deriva da palavra *Varve*, de origem sueca, geralmente usada para denominar depósitos sedimentares chamados sazonais, isto é, controlados pelas variações das estações do ano (SOUZA, 1995).

O acúmulo de partículas sedimentares em lagos leva à formação de vários tipos de depósitos e de formas de terrenos subaquáticos. A formação do varvito pode ocorrer pela deposição de sedimentos rítmicos ou ritmicamente estratificados, mostrando alternância de depósitos grossos e finos.

Os primeiros são formados por correntes de turbidez que caracterizam os fluxos de fundo. A interrupção de entradas de sedimentos, durante o inverno, quando a superfície dos lagos congela, permite a decantação do material em suspensão na água sobre a camada inferior. Em casos em que essa alternância é controlada sazonalmente, o extrato ou camada resultante é chamada *varve*. Os fluxos de fundo, durante o verão, quando a entrada de água de degelo é mais intensa, alternam-se com a decantação de partículas em suspensão, durante o inverno, quando os lagos congelam e correntes densas de fundo cessam. O famoso varvito da pedreira de Itu-SP, apresenta muitas destas características (ROCHA-CAMPOS e SANTOS, 2000).

A origem de extração de varvito na pedreira de Itu é contemporânea do início do povoamento da região, no século XVII. Com o passar dos anos ela se constituiu em uma significativa atividade econômica. A rocha era então reconhecida como “lage de Itu”, e usada no revestimento dos pisos nas residências, conventos, igrejas e também das calçadas do povoado.

No centro histórico de Itu pode se encontrar vários exemplos da antiga utilização da lage como pedra de construção, elas são empregadas na

pavimentação de calçadas, interiores de residência, jardins e na fabricação de utensílios diversos, como bancos, mesas, etc.

A retirada das lages e seu beneficiamento são feitos com o auxílio de máquinas diversas. Somente lages variando de 5 a 10 cm são aproveitadas. Assim as camadas mais espessas, da parte inferior dos paredões, e as mais finas, da sua parte superior, são deixadas de lado e constituem a maior parte do rejeito da pedreira.

Outra maneira de formação dos varves é através da queda de partículas a partir do derretimento de massas flutuantes, os icebergs, mecanismo denominado chuva de partículas. Vários tipos de processos e depósitos sedimentares estão relacionados a esses mecanismos. O caso mais conhecido resulta da deposição de clastos caídos, de tamanhos variados, sobre as camadas de sedimentos de fundo do lago, deformando ou rompendo-as (ROCHA-CAMPOS e SANTOS, 2000).

A região de Trombudo Central, no estado de Santa Catarina (FIGURA 1), apresenta o varvito com estas características.



FIGURA 1 – Lavra de varvito em Trombudo Central. É visível a camada superficial de material argiloso retirada para atingir o nível do depósito da rocha. Algumas peças são recortadas nas dimensões de uso como pisos e tampas de mesas de bilhar. É consumido um volume significativo de água no corte das peças.

É caracterizada como uma rocha sedimentar de origem periglacial lacustre. GERRA, 1997, acrescenta ainda que o varvito é composto por

sucessão de camadas – argilosas e siltosas. Estas camadas indicam ciclos anuais, e possuem espessuras que variam de 1 mm a 2-3 cm. Os varvitos constituem-se de leitos ou camadas de cores clara e escura, os quais foram respectivamente depositados no verão e/ou no inverno, em lagos glaciais.

Em Trombudo Central o varvito é extraído desde a década de 60 na localidade de Bracatinga I, onde existem diversas jazidas. A exploração começou de maneira rudimentar, através de alavancas e cunhas de metal, auxiliadas por explosões de dinamite. As rochas extraídas eram aproveitadas sem qualquer beneficiamento, apresentando-se com simetria bastante regular. A melhoria de acabamento do produto foi obtida pelo uso de esquadros que definiam as linhas dos cortes, realizados após a perfuração efetuada com o auxílio de uma ponteira de ferro e marreta.

Máquinas elétricas dotadas com discos de bordas de diamante substituíram as ponteiros, marretas e os esquadros, permitindo cortes perfeitamente esquadrejados e profundos (BITTENCOURT, 2004).

Grande parte das necessidades físicas da região é suprida pelo processo de mineração e extração do varvito como, calçamentos, construção de muros, coberturas, construção de pontos de ônibus e estruturas decorativas relacionadas ao entretenimento.

2.1.1 Aspecto Econômico da Extração do Varvito.

Segundo a prefeitura de Trombudo Central (ano base de 2003), os valores associados a extração e beneficiamento do varvito são os seguintes:

- Valor adicionado do município: R\$ 41.769,81
- Valor adicionado referente à extração e ao beneficiamento:
R\$1.049,37
- Participação em percentual: 2,51%

Em função da disponibilidade do material na região e do número de jazidas em atividade, o valor agregado aos materiais acaba se tornando baixo.

2.1.2 Resíduos Gerados na Mineração do Varvito

Na mineração do varvito podem ser considerados como resíduos o pó de varvito, considerado como finos, provenientes do corte e do polimento das peças, e as placas que se quebram durante o corte e até mesmo após o polimento.

Com o uso constante de água no corte da rocha, forma-se uma grande quantidade de lama de varvito, a qual é parcialmente depositada em caixas de sedimentação, sendo que a maior parte desses resíduos é depositada inadequadamente sobre áreas de vegetação, causando impactos ambientais no local, conforme demonstrada pela FIGURA 2.



FIGURA 2 – Disposição Inadequada de Lama de Varvito. A lama de varvito que é gerada com o uso de água no corte da rocha é inicialmente depositada em caixas de sedimentação para a separação das fases líquido/sólido e evitar o contato com rios próximos à mineração. Quando as caixas estão saturadas, a lama é retirada e depositada em áreas de vegetação .

As placas de varvito que se quebram com o manuseio e transporte são depositadas no local, conforme a FIGURA 3. Atualmente, somente parte desse material é retirado das minas e levados para britadores da prefeitura para serem empregadas no melhoramento de estradas na região.



FIGURA 3 - Placas de varvito quebradas sem nenhum tipo de armazenamento adequado. Em função do volume de placas que quebram durante a extração do varvito, com o tempo se formam enormes pilhas de resíduo na própria área de mineração dificultando o trabalho de mineração e impactando significativamente o ambiente.

Em alguns casos o material é retirado da mina para não dificultar o trabalho contínuo de extração.

2.2 A ARDÓSIA

A ardósia é uma rocha de granulação muito fina, com minerais de difícil separação a olho nu, e orientação planar muito intensa, chamada clivagem ardosiana. É composta essencialmente de Sericita (tipo de mica) e Quartzo.

De acordo com Oliveira (1998) suas características mineralógicas favorecem a sua exploração e o corte de placas de espessura desejadas (fissilidade). São utilizadas na cobertura de casas nos países de clima frio, por apresentarem maior resistência mecânica e isolamento térmico que as telhas de cerâmicas normais. No Brasil são utilizadas principalmente para o revestimento de pisos.

As características descritas para a ardósia são semelhantes ao folhelho intercalado em laminação rítmica com siltito (Giannini, 2000). A região de onde provem este tipo de ritmito concentra-se em Trombudo Central, leste do Estado de Santa Catarina.

2.2.1 Aplicação dos Resíduos de Ardósia na Obtenção de Novos Materiais.

Os resíduos da mineração e beneficiamento de rochas estão sendo largamente estudados no mundo inteiro em virtude do grande impacto ambiental que provocam quando são descartados indiscriminadamente na natureza e do enorme potencial que possuem como matérias-primas para formação de novos materiais cerâmicos.

No Brasil, estudos para o uso do rejeito de ardósia na fabricação de tijolos, foram realizados pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia, no estado de Minas Gerais. Segundo MANSUR et al.(2006), os estudos constataram que o resíduo pode substituir a cerâmica vermelha na fabricação de tijolos e tubos cerâmicos, reduzindo significativamente os gastos, já que o rejeito de ardósia, além de nada custar, é abundante em Minas Gerais, outra vantagem é a eliminação de mais um problema ambiental, já que a cerâmica resulta de uma atividade extremamente poluidora: a extração da argila.

A região noroeste do estado de Minas Gerais possui a maior jazida de ardósia do Mundo e responde por 90% da produção nacional. MANSUR (1997), cita que cada tonelada de ardósia mineral usada na construção civil como peça de acabamento rende 300 quilos de rejeito, composto principalmente de pó e de cascalho.

Peças cerâmicas obtidas a partir do pó de ardósia (finos) são produzidas através de combinações e moldagem e queimadas a 1000°C por 4 horas. Os resultados demonstram que o resíduo tem uso potencial na fabricação de peças cerâmicas. MANSUR, et al, (2006).

Os resíduos de ardósia se mostram adequados à produção de peças por colagem denominados por resíduos redutores de plasticidade, que se caracterizam por serem materiais friáveis que, quando adicionados às massas cerâmicas, provocam a redução de sua plasticidade.

As quantidades de resíduos incorporados às matrizes cerâmicas podem variar entre 10 e 60%, provocando ligeiras mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água. (SABRAH e EBIED, 1987).

Os benefícios ambientais causados pelo uso de material residual para construção já são investigados desde 1974. Conforme BUTLER et al (2000), os

resíduos de ardósia podem ser utilizados como agregados em estruturas de concreto de baixo custo. Os resíduos de ardósia tem sido recuperados para uso como matéria prima por várias indústrias do setor cerâmico.

Resíduos de ardósia são recuperados como matéria prima na fabricação de telhas. CAMPOS, et al. (2004) define como resíduos da mineração de varvito a lama de corte e as escórias de escavação.

A caracterização mineralógica por análises químicas e DRX, junto com uma análise térmica fornecem dados para o processo de sintetização. As propriedades das amostras sintetizadas são checadas por densidade, variação dimensional, perda de volume e massa, curva de resistência, absorção de água e permeabilidade e resistência ao desgaste para garantir o comportamento das amostras.

Outra aplicação do resíduo de ardósia é na fabricação de telhas. CATARINO et al. (2003) comparando testes de laboratório e em escala industrial para os ensaios de resistência mecânica obteve valores de 75 e 52 MPa, respectivamente. Mesmo o teste em escala industrial apresentando valores menores do que nos testes de laboratório o resultado atende à exigência mínima de 27 MPa para a aplicação do material.

CAMBRONERO, cita a obtenção de espumas sem a adição de agentes espumantes devido às várias transformações dos componentes presentes na ardósia durante o processo de aquecimento. Um material com base vítrea com baixa porosidade, cor acinzentada e densidade por volta de $0,3 \text{ g/cm}^3$ pode ser obtido.

Portugal é abundante em depósitos de rochas naturais e também reconhecido pela qualidade dos mármore. Em conformidade com as indústrias mineradoras de rochas, esta atividade representa papel de suma importância econômica para o país.

As rochas mais importantes para uso ornamental e de propósito industrial são; o granito, o mármore, o calcário e também em menor escala, a ardósia. Estas atividades industriais produzem uma enorme quantidade de resíduos durante os processos de mineração e extração caracterizados como o pó, o cascalho e a lama. Todo esse material é depositado em locais inadequados. A caracterização dos diferentes tipos de resíduos é de crucial importância para definir uma estratégia de gerenciamento para o setor

industrial. CHAMBINO et al. (2003) viabilizam diferentes possibilidades de uso destes resíduos em várias indústrias visando uma diminuição do volume gerado e uma melhoria das condições ambientais.

A empresa Petrarch Claddings Ltd, no Reino Unido, está empregou resíduos de escavação como material de enchimento em uma nova linha de camadas de proteção em construções. O resíduo utilizado foi o resíduo de ardósia combinado com uma resina de poliéster. Foram usadas fibras de vidro na mistura para garantir a resistência necessária CLADDING, (1995).

No início desta pesquisa o resíduo de Trombudo Central foi tratado como ardósia em função da denominação utilizada comercialmente na região. Mas, com a evolução da pesquisa constatou-se que a rocha encontrada na região trata-se de um folhelho rítmico (Varvito).

Outra descoberta proporcionada por esta pesquisa foi que, atualmente não existe nenhum tipo de trabalho sendo realizado com os resíduos da mineração de varvito, o que torna ainda mais importante a proposta de desenvolvimento de novos materiais, diminuindo significativamente os impactos ambientais causados por esta atividade, repercutindo diretamente na qualidade sócio-econômica e ambiental da população local.

2.3 A CAL

2.3.1 Histórico, Definição e Utilização

Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal – virgem e hidratada – está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante.

Na TABELA 1 são fornecidos dados sobre o consumo per-capita nos principais países, cujos números não expressam a realidade desejável, pois não englobam a produção dos pequenos fabricantes disseminados pelo interior dos países (GUIMARÃES, 2002).

TABELA 1 – CONSUMO PER-CAPITA DE CAL NOS PRINCIPAIS PAÍSES.

PAÍS (1994)	PRODUÇÃO DE CAL (em 1000 ton)	POPULAÇÃO EM MILHÕES	CONSUMO PER CAPITA (Kg)
ESTADOS UNIDOS	16.649	260,7	64
JAPÃO	10.890	124,7	87
ALEMANHA	6.101	80,9	75
AFRICA DO SUL	1.913	40,7	47
BRASIL	5.289	146,9	36
CHINA (EM 1994)	17.017	1.171,7	15
URSS (EM 1990)	28.082	-	-
FRANÇA	2.822	57,3	49
U.K.	1.297	57,9	22
TURQUIA	3.860	56,5	68

Fonte: GUIMARÃES, 2002.

Apesar do considerável nível de produção – entre 5 e 6 milhões de ton./ano – o Brasil tem baixo consumo per-capita (aproximadamente 36 kg/ano). Mesmo assim, este índice está acima do consumo médio mundial, em torno de 25 kg/ano.

O volume de consumo de cal pode ser considerado como índice de desenvolvimento de um Estado (GUIMARÃES, 2002).

O homem conheceu a cal provavelmente nos primórdios da Idade da Pedra (período Paleolítico). Desde os tempos da existência dos primeiros Hominídeos. A natureza dispunha para os seres vivos abrigos para a defesa das espécies contra as intempéries. Eram as grutas ou cavernas, cavidades naturais geralmente em rochas carbonatadas, geradas por fenômenos geológicos ocorridos nas eras passadas (GUIMARÃES, 2002).

O conhecimento do cálcio como elemento químico é relativamente recente. Contudo, alguns dos seus compostos são conhecidos desde tempos remotos, pois os romanos já usavam a cal apagada (CaOH - hidróxido de cálcio), a cal hidráulica e a cal viva (CaO - óxido de cálcio) nas construções. O nome do elemento deriva precisamente de *calx*, o nome latim para cal.

Tanto os gregos como os romanos sabiam que a adição de certas terras de origem vulcânica às argamassas de cal e areia melhorava sua resistência mesmo quando submetidas à ação da água. Os gregos empregavam, com

esse intuito, as terras vulcânicas da ilha de Santorim. O material correspondente dos construtores romanos era uma cinza vulcânica encontrada em pontos diversos da baía de Nápoles.

Os gregos empregavam a cal como aglomerante, o mesmo acontecendo com os etruscos e depois com os romanos. A argamassa era preparada pelo mesmo processo ainda hoje adotado, e que consiste na extinção de pedra cozida e mistura da pasta com areia. Essa técnica continua – aliás, até nossos dias – a ser largamente empregada onde não se pede grande resistência mecânica, e em obras que não estejam sujeitas à ação da água (PETRUCCI, 1976).

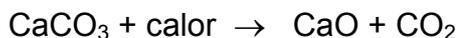
Apesar de ser considerado o produto manufaturado mais antigo da humanidade é cada vez mais freqüente as descobertas de novas aplicações para a cal.

Num inventário teórico para mostrar a composição do mercado mundial, pode-se alinhar com os dez mais significativos setores, em ordem decrescente de expressão quantitativa (GUIMARÃES, 1985):

- A siderurgia;
- O meio ambiente, representado pelos sub-setores do tratamento de águas residuais, tratamento de águas ácidas da mineração, tratamento dos gases de combustão de combustíveis ricos em enxofre e tratamento de águas para fins potáveis;
- A indústria de papel e celulose;
- A indústria de álcalis;
- A indústria de açúcar;
- A mineralurgia dos não ferrosos (cobre, alumínio, ouro, urânio e magnésio);
- A indústria química (derivados de petróleo, curtume, graxas, tintas, carbureto de cálcio e produtos farmacêuticos);
- A construção civil (argamassas, blocos construtivos e misturas asfálticas);
- A estabilização de solos;
- Indústria cerâmica (vidros e refratários).

2.3.2 Produção da Cal

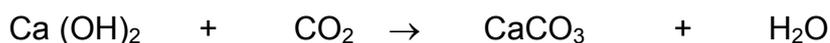
A cal é produzida a partir da calcinação do calcário, tendo como produto da reação o CO_2 :



. A cal hidratada ou extinta é produzida pela reação da cal viva com a água:



A reação de extinção é acompanhada de grande produção de calor. A cal hidratada endurece nas argamassas graças a sua lenta reação com o dióxido de carbono do ar (CO_2):



ocorrendo portanto uma recarbonatação (PATTON, 1978).

2.3.3 Tipos de Cal

Conforme aparece nas estatísticas mundiais, a cal compreende seis produtos resultantes da calcinação de calcários magnesianos/dolomitos – hidratados ou não. Estes produtos são: cal virgem cálcica (óxido de cálcio – CaO), cal hidratada cálcica (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2), cal virgem dolomítica (óxidos de cálcio e de magnésio – CaO.MgO), cal dolomítica hidratada normal tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio – $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2.\text{MgO}$), cal dolomítica hidratada especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio – $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$), utilizadas em argamassas, os tipos intermediários (classificados como cales magnesianas) das cales cálcicas e dolomíticas e a cal hidráulica utilizada em estruturas.

Cal de calcário puro ou cálcica, com extinção violenta, origina-se a partir da calcinação de calcários dolomíticos, com teores de CaO entre 57 e 64% e entre 36 a 43% de MgO .

Cal dolomítica ou magnesiana, com extinção lenta, obtidas a partir da calcinação de calcários dolomíticos, com teores de CaO entre 57 e 64% e entre 36 a 43% de MgO.

Cal silicosa, contendo pequenas percentagens de sílica, como quartzo ou outros silicatos.

Cal argilosa, cal que contém aditivos argilosos (cal hidráulica natural).

Cal metalúrgica, adicionada à escória, usada em fornos siderúrgicos (alto-fornos).

Cal pozolânica, cal adicionada de cinzas (uso na antiga Roma, cinzas do Vesúvio).

As pastas preparadas com excesso de água fornecem as chamadas natas.

As natas de cal são utilizadas em revestimentos e pinturas; as de cimento são preparadas para a ligação de argamassas e concretos de cimento e para injeções (PETRUCCI, 1976).

2.3.4 Utilização da Cal e dos Resíduos da Produção de Cal

A combinação da cal com cinzas volantes e uma pequena porcentagem de gesso calcinado reduz o tempo de endurecimento do material. A aplicação desta técnica pode ser usada na fabricação de tijolos com a vantagem de redução de consumo energético e na redução desses resíduos, AMBALAVAN, et al, (1996).

Uma pesquisa realizada no norte do Vietnã para a obtenção de novos materiais utilizando resíduos industriais está empregando o pó de cal com cimento portland de baixa qualidade para produção de compósito de cimento obtendo um novo material de alta performance (STROEVEN et al. 2001).

É bastante discutido o uso de materiais alternativos derivados de resíduos industriais por produtos no manufaturamento do cimento Portland. Resíduos como calcário e carbonatos à base de cal são utilizados pelas indústrias do cimento na clinkerização para a conservação de energia térmica e otimização da produção BHATTY et al. (2004)

A habitação é um grande problema mundial atualmente. O material mais comumente usado na fabricação de casas é o tijolo de argila queimado. Uma

quantidade significativa de combustível é consumida na fabricação desses tijolos. Além disso, a contínua remoção de camadas superficiais do solo, na produção convencional de tijolos, criam sérios problemas ambientais. Segundo KUMAR (2002), estudos da possibilidade de produção de tijolos e blocos vazados com uso de cinzas volantes-cal-gesso (FAL-G) apresentaram resultados de resistência suficiente para a aplicação na construção civil e na produção de casas de baixo custo.

Nos Estados Unidos, é aplicada uma técnica de Solidificação/Estabilização de solos contaminados por resíduos perigosos utilizando o cimento portland, pó dos fornos de cimento, a cal, pó dos fornos de cal e cinzas volantes. Estes materiais são usados sozinhos ou combinados (JOINT, 2002).

De acordo com SINGH et al.(2006), cimentos de edificações de baixo custo podem ser obtidos pela combinação de resíduos industriais como cinzas volantes, borra de cal, gesso, cimento portland e ativadores químicos. O emprego do novo material está sendo apresentado para uso na Índia.

A cal é considerada um material de cimentação não hidráulico, ou seja, um composto que substitui a água e que pode ser usado no endurecimento do cimento (CALLISTER, 2002).

2.4 COMPÓSITOS

Materiais compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades que estão separados por uma interface.

Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada freqüentemente de fase dispersa. As propriedades dos compósitos é uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Nesse contexto, por “geometria da fase dispersa” subentende-se a forma das partículas, seu tamanho, sua distribuição e sua orientação.

Existem diversos tipos de compósitos como as ligas metálicas, as cerâmicas e os polímeros multifásicos. Existem também uma variedade de compósitos que ocorre na natureza. CALLISTER, (2002).

Quando se misturam dois materiais de composições granulométricas diferentes, eles podem formar um terceiro material com um maior ou menor empacotamento das partículas, gerando assim uma massa unitária diferente da média das duas iniciais (JOHN, 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta e preparo dos corpos de prova à base dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal seguiram os seguintes procedimentos:

- 1) Coleta: as amostras de resíduos da mineração de varvito foram compostas do resíduo de corte (seco) e do polimento da rocha, em seguida homogeneizados e quarteados, apresentando partículas de diferentes tamanhos, e os resíduos da produção de cal foram fornecidos em pó.
- 2) Moagem: Tanto os resíduos de varvito quanto os resíduos da produção de cal foram macerados separadamente em gral com pistilo para a obtenção de partículas menores e de tamanhos homogêneos
- 3) Peneiramento: após a moagem, os resíduos de varvito e da produção de cal foram peneirados separadamente em peneiras de 0,50 mm/ μm .
- 4) Composição: Foram fixadas as porcentagens dos resíduos de varvito e de cal para cada composição.
- 5) Pesagem: Em balança de precisão com quatro casas decimais os resíduos foram pesados separadamente.
- 6) Mistura: após a pesagem, os resíduos foram misturados em cápsulas de porcelana e bem homogeneizados.
- 7) Hidratação: A porcentagem de água adicionada na mistura foi definida como sendo a mesma em relação ao resíduo da produção de cal (1:1). O tempo de espera para a hidratação foi de 20 minutos antes da compactação.
- 8) Compactação: após o tempo de hidratação, a mistura de cada composição foi compactada em prensa hidráulica, com uma carga de 15 MPa por 30 segundos. Foram preparados 10 corpos de prova por composição, com dimensões dos corpos de prova – 20 x 20 mm em formato cilíndrico.
- 9) Cura: o processo de cura foi realizado a seco.

3.1 ESCOLHA DOS RESÍDUOS

A idéia de se trabalhar com os resíduos da mineração de varvito surgiu após a informação de que no Estado de Santa Catarina havia uma mineradora de ardósia gerando um volume muito grande de resíduos sem nenhum critério de tratamento e disposição.

Os resíduos da mineração de varvito têm sua origem nas jazidas pela quebra de placas (a) e como finos de corte e polimento (b), conforme mostrado na FIGURA 4.



(A)



(B)

FIGURA 4 – (A) e (B) Fotos da origem e tipo dos resíduos da mineração de varvito. A FIGURA 4A mostra as pilhas de resíduo de placas quebradas pelo manuseio e depositadas próximas à frente de lavra e a FIGURA B, os resíduos do corte e polimento retirados das caixas de sedimentação e depositados em locais próximos à mineração

O resíduo da produção de cal foi escolhido devido as suas propriedades de elemento aglomerante-ligante, pela disponibilidade e baixo custo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS RESÍDUOS

3.2.1 Resíduos de Varvito – Composição Química

A composição química dos resíduos da mineração de varvito é apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 - RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE raios-X DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE VARVITO

Amostra de Varvito	
Óxidos	(%)
C	5,90
Na ₂ O	2,27
MgO	3,46
Al ₂ O ₃	17,21
SiO ₂	57,70
P ₂ O ₅	0,26
SO ₃	0,19
K ₂ O	3,38
TiO ₂	0,98
MnO	0,06
CaO	1,15
F ₂ O ₃	7,28
Co ₃ O ₄	0,02
Rb ₂ O	0,01
SrO	0,01
ZrO ₂	0,03
BaO	0,09
Total	100,0

São apresentados os óxido de silício (SiO₂), o óxido de alumínio (Al₂O₃) e o óxido de ferro (F₂O₃) em maiores concentrações

3.2.2 Resíduos de Varvito – Composição Mineralógica

De acordo com o ensaio de Difractometria de raios-X , a TABELA 3 apresenta a composição dos minerais presentes na amostra.

TABELA 3 – RESULTADO DE DRX

Nome do Composto	Fórmula Química do Mineral
Quartzo	Si O ₂
Albita	Na Al Si ₃ O ₈
Clinocloro	Mg _{2.5} Fe _{1.65} Al _{1.5} Si _{2.2} Al _{1.8} O ₁₀ (O H) ₈
Dolomita	Ca Mg (C O ₃) ₂
Muscovita	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂
Ortoclásio	K Al Si ₃ O ₈

3.2.3 Resíduos de Produção de Cal – Composição Química

Uma das exigências químicas adotadas para aplicação da cal conforme a NBR 6453:2003 é apresentar o teor mínimo de óxidos totais na base não volátil (CaO+ MgO) de 88%. Este teor foi fixado tendo como base matérias primas nacionais. O teor mínimo aceitável para a produção de cal só pode ser dado com base no estudo das matérias primas diversas de diferentes formações geológicas, GUIMARÃES, 1985.

Outro parâmetro importante é o teor de anidrido carbônico (CO₂), sendo fixado para a cal virgem especial e para a cal comum, teores máximos de 6 e 12 % respectivamente.

Conforme a TABELA 4 o resíduo de cal apresentou um teor de 23,55 % de CO₂, caracterizando a cal como sendo de baixa reatividade.

TABELA 4- RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE raios-X DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAL

Amostra de Cal	
Óxidos	(%)
C	23,55
Na ₂ O	-
MgO	28,03
Al ₂ O ₃	0,28
SiO ₂	5,12
P ₂ O ₅	0,02
SO ₃	0,04
K ₂ O	0,074
TiO ₂	-
MnO	0,03
CaO	42,59

Amostra de Cal	
Óxidos	(%)
F ₂ O ₃	0,23
Co ₃ O ₄	-
Rb ₂ O	-
SrO	0,030
ZrO ₂	-
BaO	-
Total	99,78

O aproveitamento da cal residual como aglomerante depende das suas características a serem determinadas em laboratório, tomando-se como referência os requisitos e critérios da especificação para a cal industrial (CORREA, 2005).

3.2.4 Resíduos da Produção de Cal- Composição Mineralógica

TABELA 5 – RESULTADO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Nome do Composto	Fórmula Química do Mineral
Portlandita	Ca (O H) ₂
Quartzo	Si O ₂
Periclasio	Mg O
Calcita	Ca (C O ₃)
Brucita	Mg (O H) ₂
Gesso	Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂
Flogopita-	K (Mg , Fe) ₃ (Al , Fe) Si ₃ O ₁₀ (O H , F) ₂

Conforme a TABELA 5, o material residual empregado é constituído de óxido de cálcio não hidratado (CaO), hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, restos de carbonato de cálcio e magnésio não queimados (CaCO₃ e MgCO₃), óxido de magnésio não hidratado (MgO) e traços de óxidos Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, etc.

A relação da quantidade de resíduos gerados, e a estimativa de resíduos da produção de cal com menor teor de calcário são, aproximadamente, 10 ton/mês, e com maior teor de calcário – 20 ton / mês (CORREA, 2005).

3.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES PARA OS CORPOS DE PROVA

Foi estabelecido para o presente trabalho o preparo de cinco composições, variando os percentuais entre 15 e 35 % de resíduos da produção de cal e 65 a 85 % do resíduo da mineração do varvito, conforme a TABELA 6.

A proporção de água usada em cada composição foi de 1:1 em relação à porcentagem de resíduo de produção de cal.

TABELA 6 – DENOMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E PORCENTAGENS DE RESÍDUOS

Denominação da Composição	Resíduo de Mineração de Varvito	Resíduo da Produção de Cal
	Composição, %	Composição, %
V1	85	15
V2	80	20
V3	75	25
V4	70	30
V5	65	35

As composições foram fixadas entre 15 e 35% de resíduo da produção de cal. Composição maior que 35% não torna a proposta economicamente viável e o teor mínimo de 15% foi adotado levando em consideração o alto teor de carbonatos mal queimados e teores de portlandita.

3.4 PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA (CP's)

Para cada uma das cinco composições trabalhadas foram confeccionados dez corpos-de-prova por idade. As idades trabalhadas foram: 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 270 dias, perfazendo um total de 350 corpos de prova nas dimensões de 20 mm x 20 mm. A FIGURA 5 apresenta um exemplo de corpo de prova



FIGURA 5 – Foto de um corpo de prova moldado com dimensão de 20 mm x 20 mm. As dimensões trabalhadas nos cp's foram definidas em função do tipo de moldagem e equipamentos disponíveis.

Os resíduos de varvito e de cal foram pesados separadamente em suas respectivas composições, misturados e hidratados. Após o período de hidratação pré-fixado (20 minutos) pesou-se em torno de 13,0 g da mistura para cada corpo de prova e levou-se para moldagem e compactação.

O molde utilizado na confecção dos cp's foi fabricado em aço, material não absorvente e quimicamente inerte aos resíduos trabalhados, com as seguintes dimensões internas: 20 x 60 mm, conforme demonstrado na FIGURA 6.



FIGURA 6 – Foto do molde utilizado na compactação dos corpos-de-prova. Fabricado em aço-carbono e constituído em três partes: cilindro, pistão e tampa.

A compactação dos cp's foi realizada com uma prensa manual com capacidade de carga de 15 toneladas, disponível no Laboratório de Tecnologia Ambiental da UFPR, conforme demonstrado na FIGURA 7



FIGURA 7–Foto da prensa manual da marca Schultz - capacidade de 15 toneladas.

A pressão empregada para a carga foi de 15 MPa. O tempo de permanência dos cp's a esta pressão foi de aproximadamente 30 segundos. Todos os corpos-de-prova foram moldados pela mesma pessoa para minimizar a variação de comportamentos nos ensaios de resistência à compressão.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS, FÍSICO-QUÍMICOS E MICROSCÓPICOS

Os ensaios realizados foram: Resistência à Compressão, Absorção de Água, Difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

3.5.1 Resistência Mecânica à Compressão

A resistência mecânica à compressão está diretamente relacionada a qualidade do material, à sua estrutura interna e ao seu desempenho em termos mecânicos e conseqüentemente à sua durabilidade. Os resultados encontrados podem fornecer parâmetros para a viabilidade de aplicação do material na construção civil.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio mecânico marca TONI TECHNIK, modelo 1540, FIGURA 8, com base na NBR 5739:2003.



Figura 8 (A) Modelo da máquina de ensaio mecânico e, (B) display para leitura da ruptura.

Após a ruptura do corpo de prova, conforme FIGURA 9, o resultado obtido foi em KN, transformado em MPa em função da carga de ruptura e a área do corpo de prova.



Figura 9 – Foto da ruptura do corpo de prova de composição V5 e idade de 90 dias. Após o ensaio de resistência mecânica à compressão os corpos de prova de composição V5 foram levados para o laboratório de raios-X para os ensaios de difração e fluorescência.

Os corpos-de-prova de todas as composições e idades passaram por este ensaio.

3.5.2 Absorção de Água

Para o ensaio de absorção de água por imersão (A), foram preparados 3 cp's para cada uma das 5 composições e analisados na idade de 28 dias, conforme especificado na norma NBR 9778:2005.

Cálculo da absorção (A), em porcentagem, pela equação:

$$A = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \times 100$$

em que;

M_{sat} = é a massa do corpo de prova saturado após imersão total em água por 24 horas a 23 ± 5 °C

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa a 105 ± 5 °C por 24 horas.

3.5.3 Fluorescência de raios-X

Quando essa radiação incide em um material, vários fenômenos acontecem e o feixe é atenuado, tanto por absorção como por espalhamento. A absorção é mais significativa e cresce com o número atômico da substância.

A energia de absorção provocará a remoção total de elétrons no material irradiado, que por sua vez se rearranjará e emitirá a radiação secundária denominada Fluorescente. Desta forma pode-se quantificar os elementos com padrões adequados. Somente as amostras de resíduos da mineração de varvito e da produção de cal foram analisadas por este método. Os ensaios foram realizados no laboratório de raios-X da Votorantin por técnicos da própria empresa.

3.5.4 Difração de Raios- X

O uso da técnica de difração de raios-X tem a finalidade de identificar quais são as espécies cristalinas das amostras estudadas. A quantificação das espécies na difração de raios-X é difícil, pois as alturas dos picos obtidos depende não só da quantidade mas também do grau de cristalinidade das espécies. Na técnica empregada utilizou-se o Modelo X-Pert da marca Philips.

A difração de raios-X é usada como ferramenta nos equipamentos de FRX para separação dos diferentes comprimentos de onda emitidos pela amostra excitada por raios X.

A técnica de DRX oferece um modo conveniente para determinar a análise mineralógica dos sólidos cristalinos. Se um mineral é exposto a raios X de um comprimento de onda específico, as camadas de átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. A escala horizontal (ângulo de difração) de um padrão DRX típico fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado.

Após a ruptura nos ensaios de resistência mecânica à compressão, ficou estabelecido que somente os corpos de prova de composição V5 de todas as idades seriam analisadas. Foi escolhida esta composição por apresentar o teor máximo de resíduo da produção de cal. Nesta composição se tornam mais visíveis todos os processos de reconstrução dos componentes mineralógicos: o desaparecimento de alguns deles e o aparecimento de outros. Os corpos de prova foram analisados no laboratório de raios-X da Votorantin por técnicos da empresa e repassados para a interpretação dos dados.

3.5.5 Análise Térmica Diferencial e Gravimétrica – ATD e ATG

As análises térmica diferencial e gravimétrica foram realizadas no Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR – LAMIR no equipamento de marca BP Engenharia, modelo 3000-20. As amostras analisadas foram todas da composição V5 sendo a mistura seca e as idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 270 dias.

O objetivo dessas análises foi o de comprovar o crescimento da resistência do material através de novas formações amorfas e cristalinas.

3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

No método de microscopia eletrônica de varredura, MEV, foram utilizadas amostras de superfície de ruptura retiradas dos cp's rompidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão. Além dos corpos de prova de composição V5 das idades 7, 28, 90 e 270 dias, amostras do resíduo da mineração de varvito, de resíduos da produção de cal e da mistura seca (composição V5) também foram analisadas por este método. O preparo das amostras foi realizado pelo técnico do próprio laboratório e a leitura e varredura microscópica feita pelo Prof. Dr. Sc Vsévolod Mymrine

Utilizou-se o Microscópio de Varredura de Elétrons marca JEOL JSM 6360LV, disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFPR, com capacidade de aumento de 50 a 300.000 vezes e as imagens obtidas foram registradas em arquivo digital.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

Foram submetidos a ensaios de compressão quatro corpos de prova para cada composição, calculou-se a média e o desvio padrão. Para a idade de três dias os cp's apresentaram pouca resistência mecânica dificultando a leitura de ruptura, não sendo possível a realização do cálculo do desvio padrão para esta composição.

De acordo com a TABELA 7 todas as idades apresentaram aumento de resistência a medida que adicionou-se mais elemento ligante, tal fato confirma a importância do resíduo da produção de cal nas composições.

Para os corpos de prova de menor composição de resíduo de cal (V1) o aumento da resistência entre as idades de 7 e 270 dias foi de aproximadamente 4 vezes (de 3,02 até 12,64 MPa) e para os cp's de maior composição (V5) o aumento da resistência entre as mesmas idades foi de aproximadamente 7 vezes (de 5,54 à 38,55 MPa).

Entre as variáveis tempo de cura e composição, verificou-se então que, o tempo de cura foi o fator principal para o aumento das resistências.

TABELA 7 - RESUMO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO – (MPa)

Composições	Parâmetros Estatísticos	Resistência x Idade (MPa)						
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias	270 dias
V1	Média	0,63	3,02	3,84	5,00	8,10	9,54	12,64
	Desvio Padrão		0,38	0,45	0,10	0,40	0,94	0,62
V2	Média	0,95	3,79	4,63	5,91	8,99	10,18	20,22
	Desvio Padrão		0,31	0,21	1,84	0,50	0,54	2,
V3	Média	1,27	4,12	6,26	7,66	9,73	13,15	26,08
	Desvio Padrão		0,46	0,20	0,72	0,46	0,66	1,34
V4	Média	1,58	4,79	6,96	8,93	11,84	14,71	36,46
	Desvio Padrão		0,43	0,42	0,46	0,08	0,48	1,92

Composições	Parâmetros	Resistência x Idade (MPa)						
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias	270 dias
V5	Média	1,91	5,54	8,55	10,30	14,10	15,84	38,35
	Desvio Padrão		0,71	0,33	0,65	0,07	0,69	0,76

Concretos para fins estruturais são classificados em grupos de resistência. O grupo I compreende concretos com resistência característica à compressão que variam entre 10 e 50 MPa's e concretos do grupo II entre 55 e 80 MPa's, segundo a NBR 8953:1992.

Para a fabricação de blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural a característica à resistência mecânica é de 2,5 MPa como valor médio e de 2,0 MPa como valor individual, segundo a NBR 7173:1991 para a idade de 28 dias. Comparando com os valores obtidos na TABELA 7, todas as composições de idade 28 dias apresentam resistência mecânica superior ao valor médio estabelecido.

A tabela com os resultados e as representações gráficas de todos os ensaios encontram-se no Apêndice 1.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

TABELA 8 - RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DE TODAS AS COMPOSIÇÕES E IDADE DE 28 DIAS

Composições	Parâmetros Estatísticos	Idade 28 dias		Resultados Calculados
		Peso seco (g) após 24 h de secagem em estufa a 105 ± 5 °C	Peso úmido (g) após 24 h de imersão total em água a 23 ± 5 °C	Absorção de Água (%)
V1	Média	11,42	13,08	14,53
	Desvio Padrão	0,04	0,08	
V2	Média	10,97	12,68	15,58
	Desvio Padrão	0,05	0,07	
V3	Média	10,58	12,30	16,25
	Desvio Padrão	0,02	0,01	

Composições	Idade 28 dias			Resultados Calculados
	Parâmetros Estatísticos	Peso seco (g) após 24 h de secagem em estufa a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Peso úmido (g) após 24 h de imersão total em água a $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Absorção de Água (%)
V4	Média	10,15	11,82	16,45
	Desvio Padrão	0,03	0,07	
V5	Média	9,71	11,41	17,50
	Desvio Padrão	0,03	0,05	

O método aplicado neste ensaio foi baseado na NBR 3459:1991.

O aumento de aproximadamente 21% de absorção de água (de 14,53 à 17,50%) entre as composições V1 e V5 não foi significativo na diminuição da resistência dos materiais. Este comportamento está diretamente relacionado com a presença do elemento ligante conforme TABELA 8.

Para blocos vazados de concreto simples para alvenaria, a porcentagem de absorção de água é de no máximo 15% como valor médio segundo a NBR 7173:1991. Conforme a TABELA 8 a composição V1 apresenta como valor médio 14,53% de absorção de água. Para as demais composições poderia adotar areia como agregado na mistura para aumentar o índice de porosidade e a diminuição da porcentagem de absorção de água.

A tabela com os resultados e a representação gráfica de todos os ensaios encontra-se no APÊNDICE 2.

4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

As amostras analisadas foram: resíduo da mineração de varvito, resíduo da produção de cal, mistura seca da composição V5, e os cp's de idades 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 270 dias de hidratação, também da composição V5.

As amostras foram analisadas após a ruptura pelo método de resistência mecânica à compressão.

A composição V5 foi escolhida por apresentar valores de maior resistência mecânica e por isso o maior teor de novas formações responsáveis

pelo fortalecimento do material. O alto teor dessas novas formações facilitam os processos de pesquisa da composição química, mineralógica e de suas estruturas.

4.3.1 Processos Físico-Químicos de Fortalecimento dos Corpos de Provas.

Foram observadas transformações significativas em alguns picos caracterizando o fortalecimento dos cp's apresentando componentes de estruturas cristalinas e principalmente a formação de novas estruturas amorfas. Os elementos que apresentaram tais transformações foram a cal (CaO), o periclásio (MgO), a Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a Calcita CaCO_3 e a Dolomita $\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$.

Conforme a TABELA 9 as linhas de Portlandita apresentam os picos com $d = 3,12; 2,63; 2,46, 1,928; 1,805$ e $1,689 \text{ \AA}$, e com o tempo, na Portlandita da amostra de mistura seca até a idade de 270 dias ocorre uma diminuição da porcentagem da intensidade relativa destes picos. Isto significa que durante o processo de hidratação ocorre a transformação da Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em Calcita – CaCO_3 ou Dolomita $\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$

Nas linhas da Calcita os picos com $d = 3,04; 2,50; 1,91; \text{ e } 1,889 \text{ \AA}$ apresentaram um aumento da intensidade. Mas somente o pico de Calcita com $d = 3,04 \text{ \AA}$ não apresenta coincidências com picos de outros minerais e a intensidade relativa cresce em 27% (de 0,96 à 27,82%) durante a hidratação observada no período de 270 dias. O pico com $d = 1,91 \text{ \AA}$ aparece somente após 60 dias de hidratação e a intensidade cresce até 2,61% Isto indica o crescimento da quantidade de Calcita e o contínuo aperfeiçoamento de estruturas cristalina da Calcita CaCO_3 .

Os picos com $d = 4,04, 3,67; 2,89$ (único pico de Dolomita); $1,805$ e $1,372 \text{ \AA}$ demonstram uma tendência ao crescimento da intensidade dos picos mais lentamente e com o mesmo tempo de hidratação, mas isto é esperado devida às características da Dolomita

Apesar do método de difração de Raio-X apresentar dificuldades na identificação mineralógica de amostras com muitos componentes devido à coincidência de picos, é possível justificar o aumento da resistência do material

através dos resultados apresentados. Exceto pelo desaparecimento de cal (CaO), Periclásio (MgO) e da Portlandita (Ca(OH)_2) e o crescimento de novas formações cristalinas bem visíveis nos difratogramas. O alto fundo de Raios-X em todos os difratogramas é um forte comprovante da existência de significativa quantidade de novas formações amorfas. A mais clara evidencia da presença, do crescimento e do endurecimento dos componentes amorfos são os picos exotérmicos amplos na curva de Análise Térmica Diferencial-ATD. Porém, é de conhecimento a presença de novas formações amorfas, as quais também podem fortalecer os materiais. Entre estas podem estar carbonatos amorfos, especialmente nas primeiras etapas de hidratação da cal. Além disso, a resistência dos materiais pode crescer por causa da síntese de outros tipos em novas formações amorfas, anteriormente estudadas por MYMRIN, 1968.

Esse autor estudou misturas hidratadas de escórias siderúrgicas (genérico) e solos argilosos com crescimento de até 50 MPa ou mais; sem visível mudança dos picos cristalinos nos difratogramas de raios X.

Nas bases de dados de muitos métodos de pesquisa MYMRIN, 1968 explicou o evento de endurecimento de materiais por meio da transição de soluções coloidais de baixa densidade em gel; depois do crescimento da densidade do colóide transformando-se em gel. Com o passar do tempo ocorre o envelhecimento do gel (evento de sinereses do gel), e transição para um material com propriedades similares a uma rocha no estado amorfo com alta resistência – 50 MPa ou mais.

Outros autores, como MEHTA e MONTEIRO, 1994, mencionam o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) como responsável pela constituição de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo por isso o mais importante na determinação das propriedades da pasta.

A morfologia do C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Devido às suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, os cristais de C-S-H puderam ser observados somente com o advento do microscópio eletrônico. O material é freqüentemente citado como C-S-H gel em literatura tradicional. A estrutura cristalina interna do C-S-H também permanece não totalmente distinguível. Ela foi anteriormente assumida como semelhante à do mineral tobermorita; por isto, foi às vezes denominada gel de tobermorita.

Estruturas amorfas parecidas têm algumas rochas naturais, como a calcedônia, a cornalina, opala, etc.

TABELA 9 – TRANSFORMAÇÕES ANTES E DURANTE HIDRATAÇÃO DA COMPOSIÇÃO V5

MISTURA SECA		3 DIAS		7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS		60 DIAS		90 DIAS		270 DIAS		MINERAIS
d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	d-[Å]	Int. [%]	
4,04	5,31	4,03	6,42	4,02	6,46	4,02	5,75	4,02	6,18	4,03	5,49	4,03	5,38	4,02	6,40	A, Cl, D
3,67	2,99	3,67	3,46	3,66	3,68	3,66	2,96	3,66	3,75	3,66	3,23	3,66	2,58	3,66	3,67	A, D, M,
3,35	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	3,34	100,0	A, M, Q,
3,12	2,73	3,12	0,80			3,10	0,37	3,11	0,35			3,11	0,64			M, P
3,04	0,96	3,03	1,23	3,03	4,26	3,03	1,53	3,03	4,64	3,04	11,68	3,04	12,2	3,03	27,82	C,M
2,89	1,98									2,89	1,75	2,88	1,55	2,88	2,03	D
2,63	11,60	2,63	8,08	2,63	3,23	2,63	4,59	2,63	5,43	2,63	5,95	2,63	4,72			A, M, P
2,50	0,55									2,50	1,66	2,50	1,62	2,50	2,50	A, C, M
2,46	9,28	2,45	7,28	2,46	7,19	2,46	6,63	2,46	7,18	2,46	8,34	2,46	5,72	2,46	6,69	A, C, Cl, M, P, Q
1,928	2,83	1,928	2,09	1,927	0,88	1,928	1,15	1,929	1,44	1,926	21,95	1,928	1,52			A,C, Cl, M, P,
1,910										1,910	2,00	1,910	1,75	1,910	2,61	C
1,889	0,68	1,885	0,72					1,878	0,49	1,876	1,26	1,876	1,40	1,874	2,94	A, C, Cl, M,

MISTURA SECA		3 DIAS		7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS		60 DIAS		90 DIAS		270 DIAS		MINERAIS
d-[Å]	Int. [%]															
1,805	2,53	1,793	2,59	1,802	1,57	1,802	1,90	1,799	1,84	1,804	3,30	1,803	1,77	1,801	1,31	A, Cl, D, M, P, Q
1,689	1,48	1,687	1,11	1,686	0,51	1,686	0,74	1,686	0,62	1,687	0,92	1,688	0,58	1,686	0,08	A, Cl,, M. P
1,507	0,28	1,504	0,84	1,505	0,62	1,503	0,68	1,507	0,68	1,506	0,60	1,507	0,54	1,506	0,99	A, C, Cl,, M
1,372	2,53	1,371	3,42	1,372	2,12	1,372	2,61	1,372	3,64	1,372	5,53	1,372	2,85	1,372	3,15	Cl, D, M, Q

LEGENDA:

Nome	Símbolo	Fórmula Cristalo - Química
Quartz	Q	SiO₂
Albite	A	NaAl Si₃O₈
Clinochlore	Cl	(Mg_{2.96} Fe_{1.55} Fe_{.136} Al_{1.275}) (Si_{2.622} Al_{1.376} O₁₀) (OH)₈
Muscovite	M	K_{0.77} Al_{1.93} (Al_{0.5} Si_{3.5})O₁₀ (OH)₂
Periclase	Pr	MgO
Portlandite	P	Ca(OH)₂
Calcite	C	CaCO₃
Dolomite	D	CaMg_{0.77}Fe_{0.23}(CO₃)₂

Todos os difratogramas estão nos ANEXOS de 1 a 10.

4.4 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E GRAVIMÉTRICA – ATD e ATG

Através da representação gráfica das curvas de ATD, aparecem visíveis erros de calibração do equipamento, podendo ser observado pelo não comportamento horizontal da linha de base (linha zero) dificultando a separação das reações endotérmicas e exotérmicas. Sobrepondo as curvas de ATD e ATG da composição V5 na mistura seca e nas idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 270 dias observa-se nas temperaturas entre 800 e 1000° C pela curva de ATD a continuação de reações de descarbonização de carbonatos com perda de CO₂, isto é, com perda de peso e não o aumento de peso demonstrado pela curva de ATG, por isto existe um rebaixamento dos valores de carbonatos. Todos os resultados experimentais da pesquisa estão demonstrados nos ANEXOS 11 e 12.

Porém não obstante, através destes métodos recebemos claras informações experimentais sobre mudanças de valores de água livre, água ligada e componentes amorfos.

4.4.1 Caracterização e Interpretação das Curvas de ATD e ATG.

Através da curva de ATD, conforme a TABELA 10, nas temperaturas entre 25 e 1000°C podemos separar diferentes reações tais como: perda de água livre (entre 25 e 250°C), perda de água ligada (entre 250 e 440°C), cristalização de matéria amorfa (entre 440 e 675°C), descarbonização de carbonatos amorfos e cristalinos como a Calcita e a Dolomita (entre 675 e 850°C) e a cristalização da Mullita (entre 850 e 1000°C).

TABELA 10 - Caracterização das curvas ATD e ATG da composição V5.

№	Componente	Temperatura aproximada (°C)	Antes da hidratação	Perda de peso (%) após dias de hidratação					
			Mistura seca	3	7	14	28	90	270
1	água livre	25-250	3,10	7,25	4,60	4,40	2,15	1,98	1,75
2	água ligada	250-440	1,55	2,25	2,05	1,75	1,60	1,47	1,08
3	amorfos	440-675	2,95	2,85	2,75	2,25	1,40	2,30	4,50
4	carbonatos	675-850	1,91	1,75	2,00	2,15	2,35	3,40	6,65
5	mullita A_3S_2	850-1000	-	-	-	-	-	-	-
6	Total		9,51	14,10	11,40	10,55	7,50	9,15	13,98

Após a hidratação da mistura seca, ocorre um aumento do teor de água livre de até 7,25% seguida de uma significativa diminuição dessa porcentagem no período de 3 dias até 270 dias. Observa-se para a água ligada um aumento de 2,25% após a hidratação e também ocorrendo um decréscimo entre os dias 3 e 270 dias. Para as substâncias amorfas, no início da mistura seca até a idade de 270 dias cresce o teor até 1,65% de peso como esperado, mas nas diferentes etapas de hidratação não há coerência entre os resultados. O crescimento de carbonatos, da mistura seca até a idade de 270 dias de hidratação é de 1,91% até 6,65%, isto é, um aumento de 4,74% de peso. Para as curvas de ATD fica evidente o pico exotérmico de Mullita – $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ para todos os componentes entre as temperaturas de 840 a 890 °C mas pela curva de ATG não é possível efetuar o cálculo do teor em porcentagem.

Os cálculos do aumento e da diminuição das porcentagens de peso dos componentes reativos podem ser melhores visualizados através da FIGURA 10 e da TABELA 10.

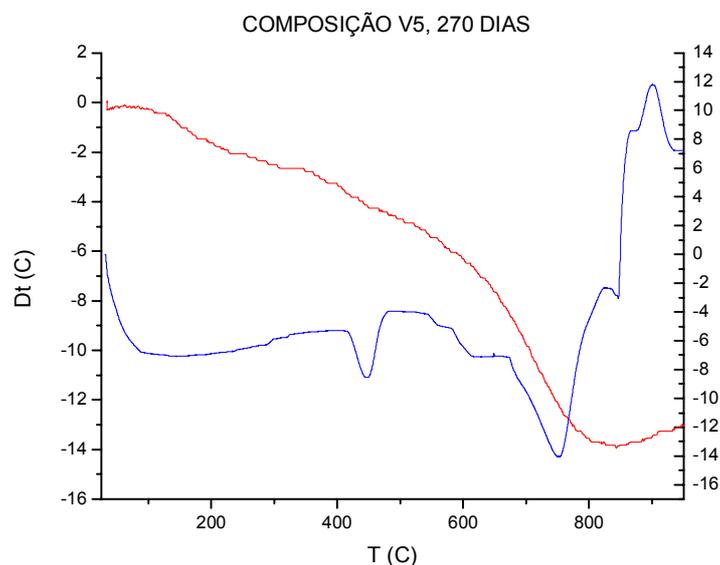


Figura 10 – Representação gráfica das curvas de ATD e ATG da amostra de composição V5, idade de 270 dias. As curvas de ATD e ATG foram plotadas separadamente em cada ensaio. Com o uso do software Origin 6.1 foi possível a sobreposição das curvas.

A decifração das curvas ATD e ATG tem como princípio o ponto de encontro de dois processos reativos caracterizados pelo enfraquecimento do primeiro e predominância do segundo processo (água livre e água ligada em 250 °C). A correlação é obtida pela extensão deste ponto partindo da curva de ATD até a curva ATG. O resultado obtido está relacionado á % de peso total da amostra. Para o segundo processo (água ligada e amorfos em 440 °C) o princípio de obtenção do ponto de encontro do processo reativo é o mesmo sendo o valor da porcentagem adquirido pela diferença do primeiro valor. A reunião dos dados obtidos e comparados através das curvas das análises térmicas e gravimétricas comprovam o crescimento de resistência do material em razão do aumento dos teores de carbonatos e substâncias amorfas.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foram analisadas as seguintes amostras separadamente: resíduo da mineração de varvito, resíduo de produção de cal, mistura seca da composição V5 e as idades 7, 14, 28, 90 e 270 dias, também da composição V5. As amostras de resíduo da mineração de varvito foram divididas em: estrutura natural, estrutura com aspecto resedimentado e pó de varvito.

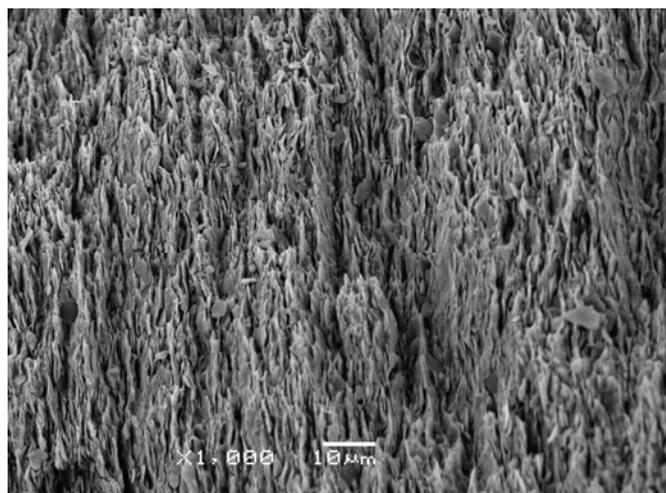
Na TABELA 11 são apresentadas às amostras analisadas e suas respectivas ampliações.

TABELA 11 – AMOSTRAS ANALISADAS / AMPLIAÇÕES OBTIDAS.

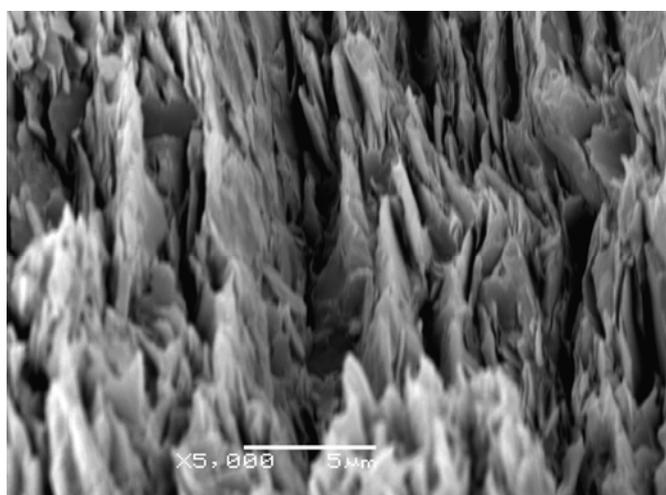
Amostra analisada	Ampliações Obtidas
Resíduo da mineração de varvito (estrutura natural)	1.000, 5.000 e 10.000x
Resíduo da mineração de varvito (aspecto resedimentado)	1.000 e 5.000x
Resíduo da mineração de varvito (pó de varvito)	1.000 e 10.000x
Resíduo da produção de cal	50, 200, 950 e 3000x
Mistura seca da composição V5	1.000 e 3.000x
Composição V5, 7dias	300 e 8.000x
Composição V5, 28 dias	1.000, 8.000 e 12.000x
Composição V5, 90 dias	300, 5.000 e 12.000x
Composição V5, 270 dias	300, 3.000 e 8.000x

A seguir são apresentadas as figuras das microscopias para cada uma das amostras analisadas.

4.5.1 Resíduo da Mineração de Varvito (estrutura natural).



A

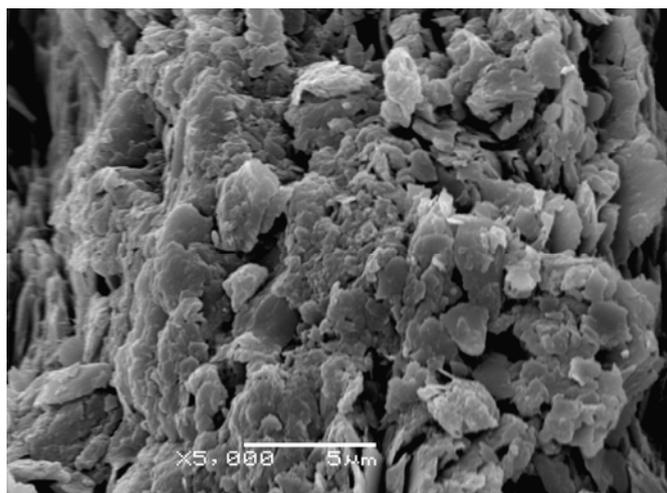


B

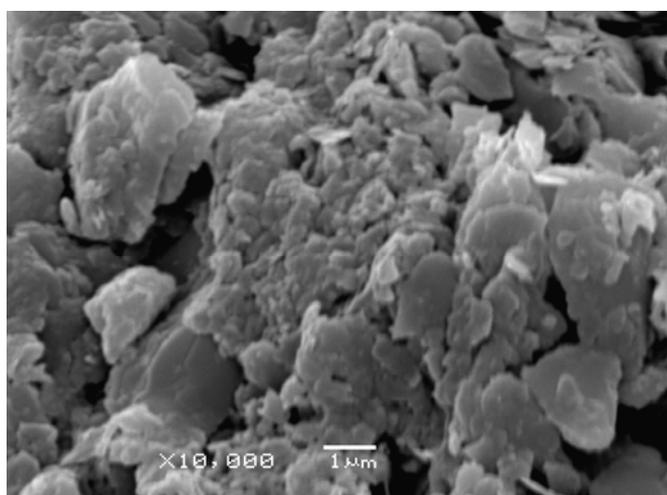
FIGURA 11 – Microscopias do resíduo de varvito (estrutura natural) Fig.A (1.000x) e B (5.000x). A figura 11 (A e B) demonstra uma estrutura metamorfizada sem a inclusão de outras formas geométricas.

Na FIGURA 11-A com ampliação de 1.000x, pode-se observar a estrutura sedimentada e metamorfizada nas condições naturais de depósito de varvito como estratiforme vertical paralelas, podendo ser melhor observada na FIGURA 11-B com ampliação de 5.000x. As camadas aparecem distribuídas uniformemente por substâncias muito finas como argila sem inclusão de outras formas geométricas. Apresentam coloração negra nas superfícies das camadas, mas nas superfícies de quebra a coloração muda para o cinza. Apresentam forças de resistência alta para cada camada.

Resíduo da Mineração de Varvito (estrutura natural)



A



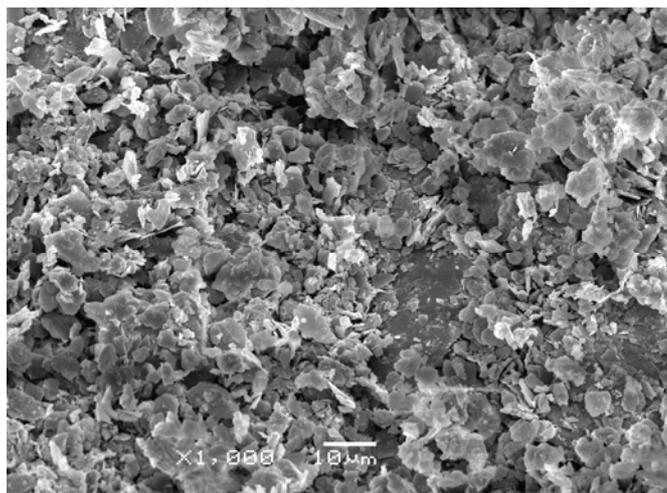
B

FIGURA 12 - Microscopias do resíduo e varvito (estrutura natural) Fig. A (5.000x) e B (10.000x). Demonstram pontos isolados das figuras 11 (A e B) com estruturas menos metamorfisadas e com diferentes formas e Tamanhos e com características de material argiloso.

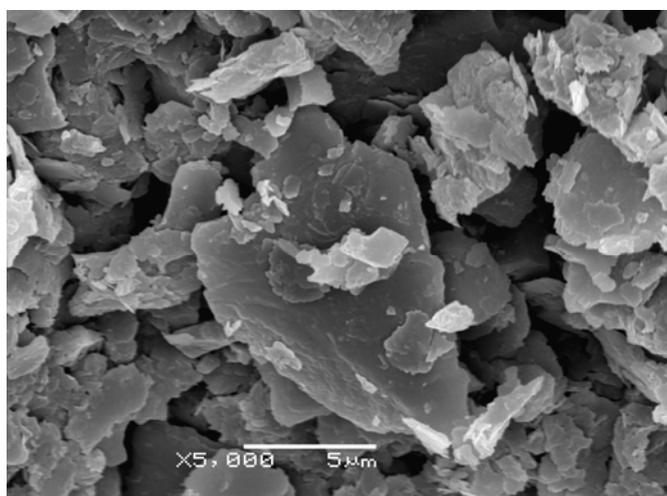
As FIGURAS 12 (A e B) com ampliações de 5.000 e 10.000x respectivamente, representam pontos isolados nas superfícies das amostras apresentadas nas FIGURAS 11 (A e B). Também apresentam estrutura natural de varvito, mas a principal diferença entre as FIGURAS 11 (A e B) e as FIGURAS 12 (A e B) é que, nas FIGURAS 11 (A e B) as amostras aparecem com formas mais metamórficas (obtidas sob altas temperaturas e pressão) e nas FIGURAS 12 (A e B), aparecem com estruturas menos metamórficas, com

menos compactação e estruturadas em camadas não paralelas. Aparecem entre essas estruturas partículas de tamanhos e formas geométricas indefinidas. Possuem camadas estratiformes, porém não podendo ser visualizadas por causa das forças metamórficas de aglomeração destas “escamas”, que são estruturas características de todos os minerais argilosos.

4.5.2 Resíduo da Mineração de Varvito (aspecto resedimentado)



A



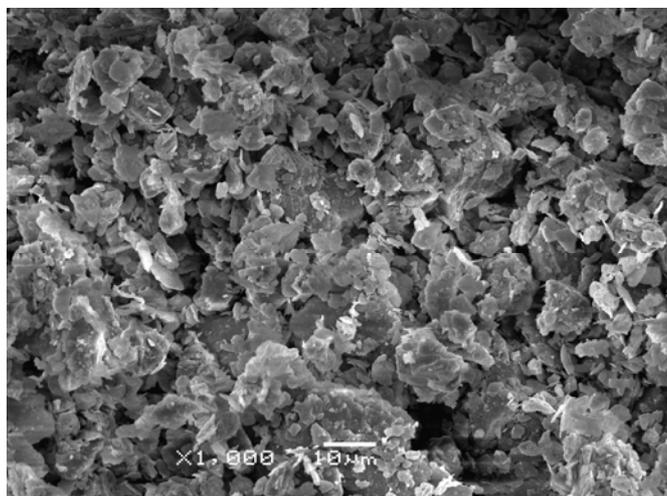
B

FIGURA 13 - Microscopias do resíduo de varvito (aspecto resedimentado) Fig. A (1.000x) e B (5.000x). Apresentam igualdade de estrutura em comparação com as figuras 12 (A E B).

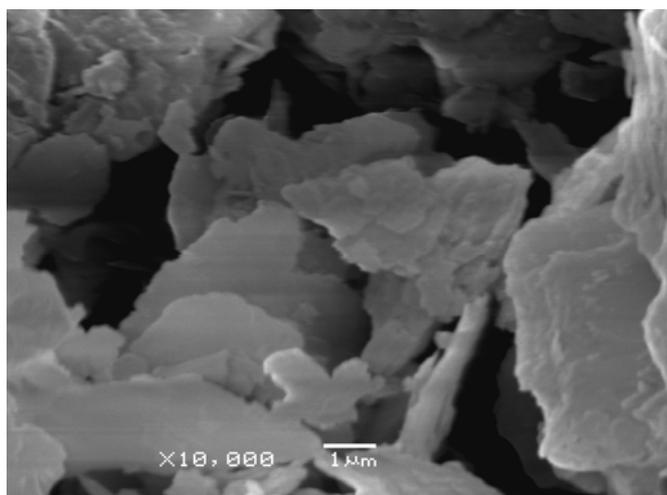
As amostras apresentam coloração da estrutura inteiramente cinzas, quase branca. A superfície das partículas de cada camada não são tão

paralelas quanto às amostras apresentadas pelas FIGURAS 11 (A e B), mas com resistências parecidas. Em uma análise do ponto de vista microestrutural, podemos observar igualdade de estruturas dos materiais.

4.5.3 Resíduo da Mineração de Varvito (pó de varvito)



A



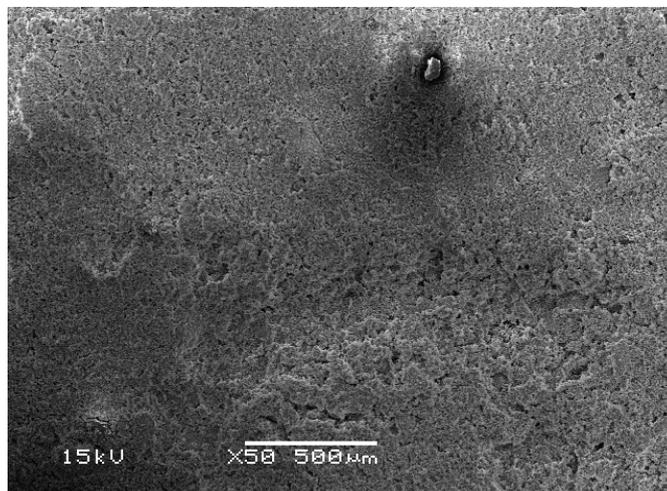
B

FIGURA 14 - Microscopias do resíduo de varvito (pó de varvito) Fig. A (1.000x) e B (10.000x). Amostra de varvito após a moagem e peneiramento em peneira de 0,50 mm. Também demonstram estruturas de material argiloso sem tamanhos e formas definidas, em ambas as ampliações.

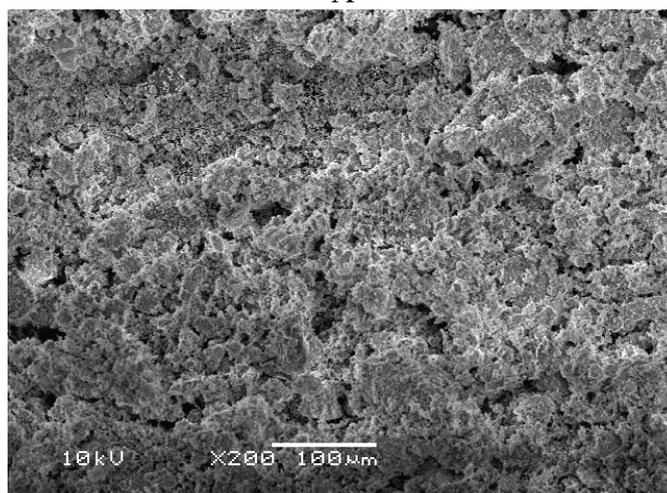
As imagens apresentadas na FIGURA 14-A com ampliações de 1.000x e na FIGURA 14-B com ampliação de 10.000x, são do mesmo material mostrado nas FIGURAS 11-13 (A e B) só que, após a moagem e peneiramento em

peneira de 0,50 mm. A FIGURA 14-A, na ampliação de 1.000x e a FIGURA 14-B com ampliação de 10.000x mostram a presença de materiais com as formas clássicas escamadas de argila, sem tamanhos definidos entre as partículas.

4.5.4 Resíduos de Produção de Cal



A



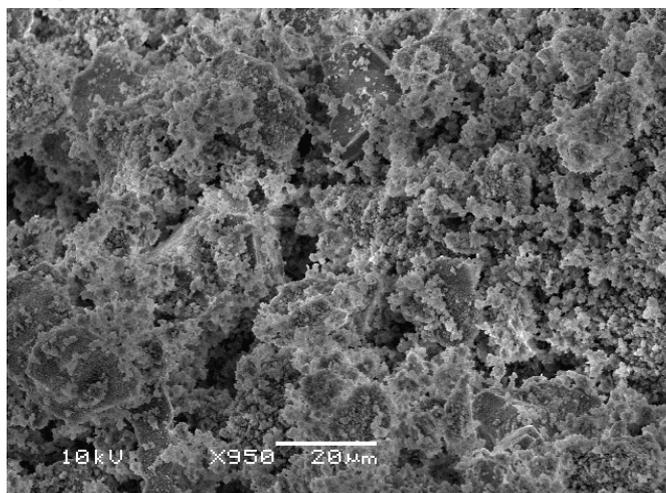
B

FIGURA 15 –Microscopias do resíduo da produção de cal- Fig. A (50x) e B (200x). A Figura-A, apresenta uma superfície lisa com poros irregulares que são mais visíveis pela figura B na ampliação de 200x apresentando partículas sem formas cristalinas e com extremidades assimétricas.

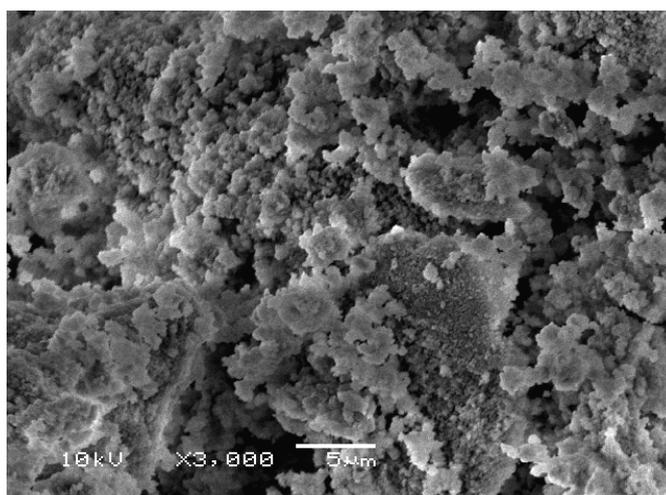
Na ampliação 50x (FIGURA 15-A), pode-se ver que a superfície é lisa e uniforme, com elevada rede de poros irregulares. Na Figura 15-B, com ampliação de 200x, estes poros são mais visíveis e suas formas irregulares. As

partículas não possuem formas cristalinas muito visíveis, com extremidades assimétricas.

Resíduos de Produção de Cal



C

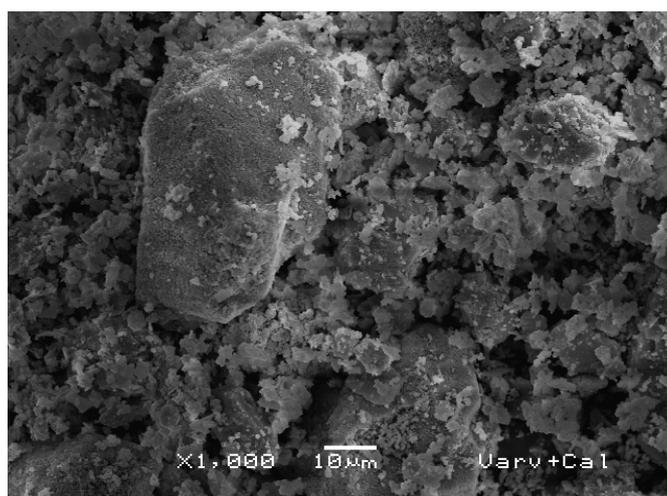


D

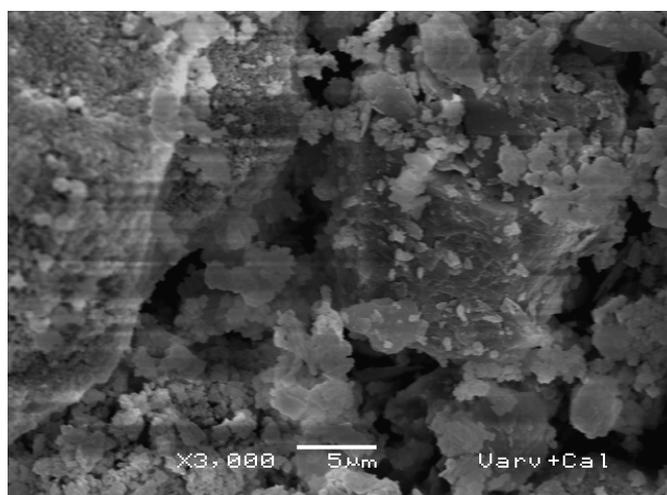
FIGURA 16 – Microscopias do resíduo da produção de cal – Fig. C (950x) e D (3.000x). Ampliações das formas assimétricas.

Estas formas assimétricas são mais visíveis na ampliação 950x, FIGURA 16-C e na ampliação de 3.000x, FIGURA 16-D. Sendo que nesta última, todas as formações são parecidas com as amorfas.

4.5.5 Mistura Seca da composição V5



A

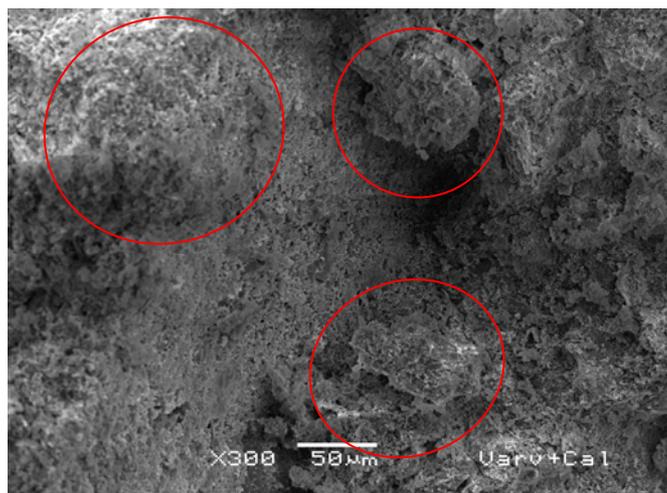


B

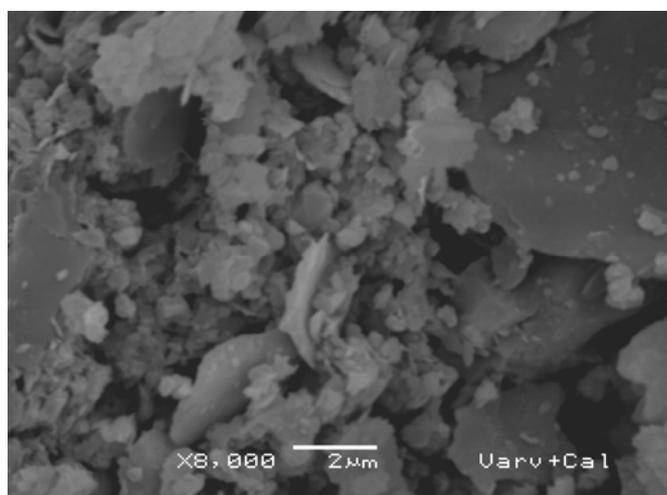
FIGURA 17 - Microscopias da mistura seca – Fig. A (1000 x) e B (3000 x). Apresentam partículas de diferentes tamanhos e sem alguma interação química visível entre elas.

As imagens da mistura inicial dos componentes secos apresentadas nas FIGURAS 17 (A e B) com ampliações de 1.000 e 3.000x, respectivamente, representam partículas com diferentes tamanhos e morfologia. Apresentam uma mistura heterogênea de partículas separadas sem interação química entre elas. É visível a grande quantidade de poros entre as partículas com diferentes tamanhos e distribuição sem compactação.

4.5.6 Composição V5, idade de 7 dias



A

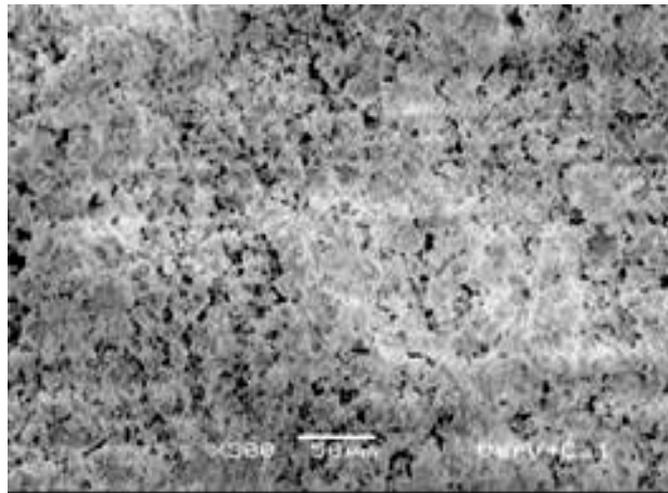


B

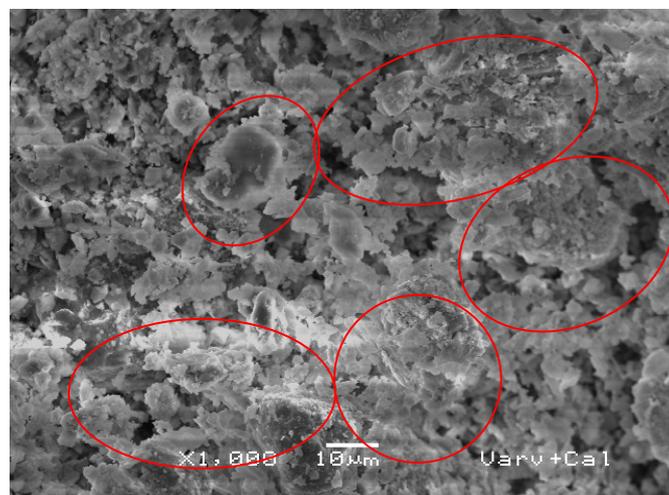
FIGURA 18 - Microscopias da composição v5, 7 dias – Fig. A (300x) e B (8.000x). Após 7 dias de hidratação é visível a formação de novas estruturas amorfas sem estruturas definidas.

Na ampliação de 300x, FIGURA 18-A, é possível observar pelas áreas circuladas, amplas áreas de material regionalmente estruturados com a formação de novo material, porém sem uma estrutura definida. Existem áreas com poucas ligações entre estas regiões conforme FIGURA 18-B em uma ampliação de 8.000x.

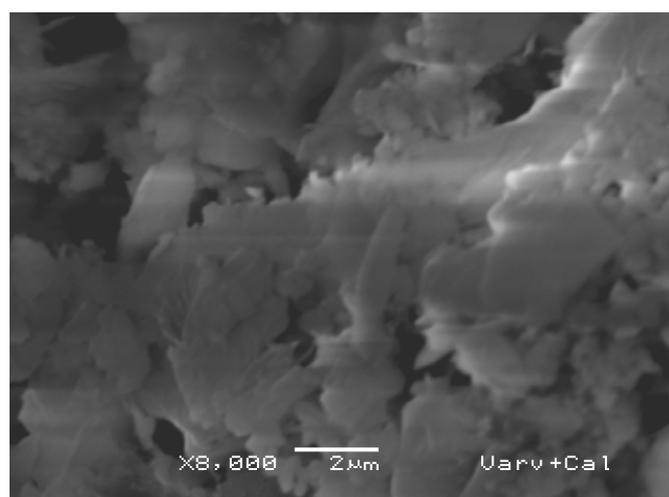
4.5.7 Composição V5, idade de 28 dias



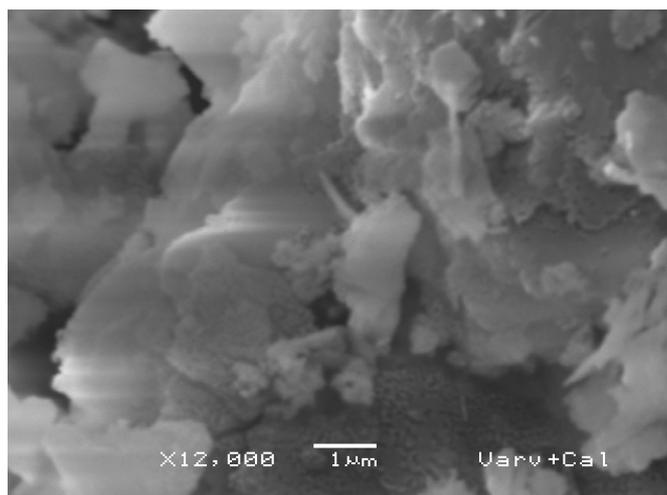
A



B



C



D

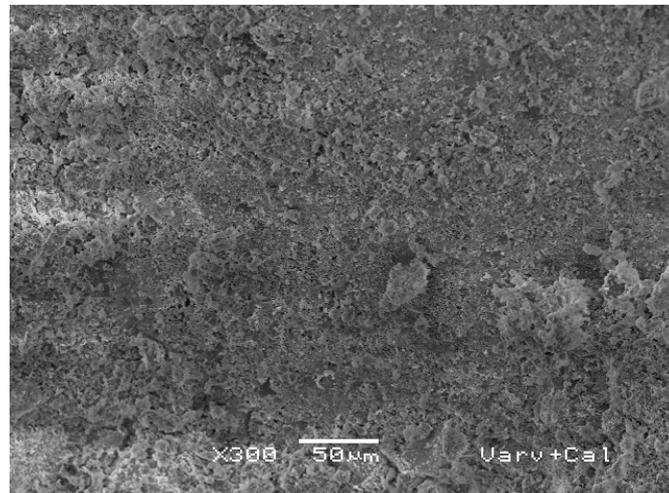
FIGURA 19 – Microscopias da composição v5, 28 dias –Fig. A (300x), B (1.000x), C (8.000x) e D (12.000x). A figura-A, apresenta a superfície sem estruturas regionais de novas formações e com aspecto monolítico. Com o aumento das ampliações para 1000x é visível a formação de novas estruturas na superfície de cada partícula, conforme indicado pela área circulada na figura 19 (C e D). Quando ampliadas para 8.000 e 12.000x, essas novas formações são mais visíveis.

A FIGURA 19-A, com ampliação de 300x apresenta as amostras com idade de 28 dias e composição V5. Comparadas com a FIGURA 18-A, de mesma ampliação com idade de 7 dias e mesma composição, já não apresentam blocos regionais diferentes e sim completamente estruturados. Apresenta toda a superfície monolítica, sem separação regional de estruturas diferentes. Na FIGURA 19-B com ampliação de 1.000x é visível a formação de estruturas novas na superfície de cada partícula. As estruturas destas novas formações são melhores visualizadas nas ampliações de 8.000 e 12.000x das FIGURAS 19 (C e D), respectivamente. Todas as imagens de novas formações demonstram a ausência de estruturas cristalinas evidentes, mas demonstram formações parecidas com estruturas amorfas.

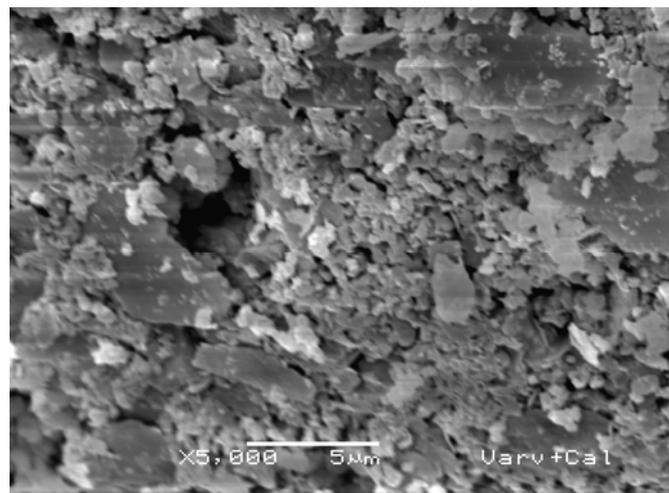
Pelos ensaios de DRX de amostras de mesmas idades, obtivemos informações de que estas novas formações apresentam minerais de C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado ($\text{Ca}_{1,5} \text{SiO}_{3,5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$), carbonatos $\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$ e Ancerita $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$, com a presença de alto teor de substâncias

amorphas. A formação destes minerais acima citados e suas estruturas (cristalinas e amorfas) explicam o crescimento das resistências média de 5,53 à 10,30 MPa para amostras com idades entre 7 e 28 dias de composição V5.

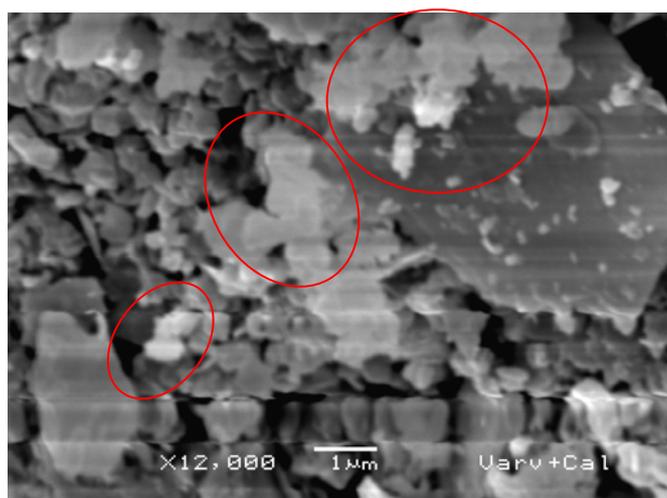
4.5.8 Composição V5, idade de 90 dias



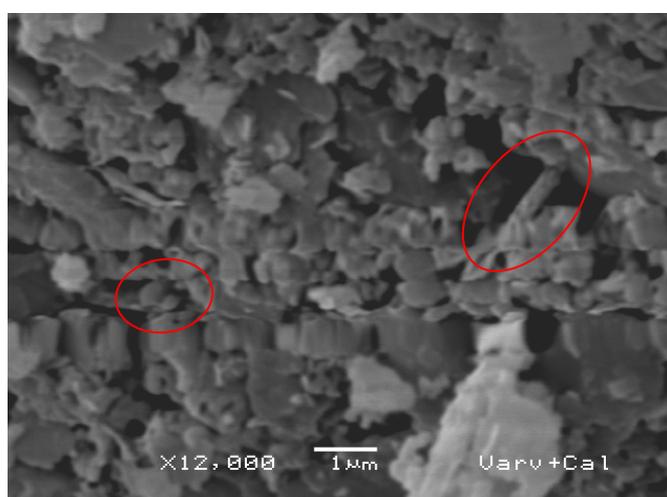
A



B



C



D

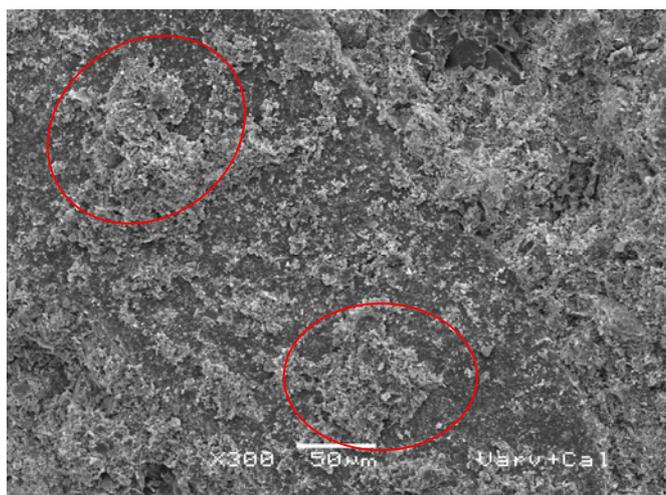
FIGURA 20 - Microscopias da composição v5, 90 dias – Fig. A (300x), B (5.000x), C e D (12.000x). A figura-A demonstra uma estrutura de superfície monolítica sem separação regional de outras estruturas e diminuição de porosidade demonstrada pela ampliação de 5.000x. A formação de novas estruturas cristalinas bem como a de novas formações amorfas são visíveis pelas figuras C e D.

Comparando as imagens das FIGURAS 19-A e 20-A com as mesmas ampliações de amostras, com idades de 28 e 90 dias respectivamente, e de mesma composição, podemos observar uma mesma estrutura de superfície toda monolítica sem separação regional de diferentes estruturas como mostrado na FIGURA 18-A, também com ampliação de 300x. A mais visível

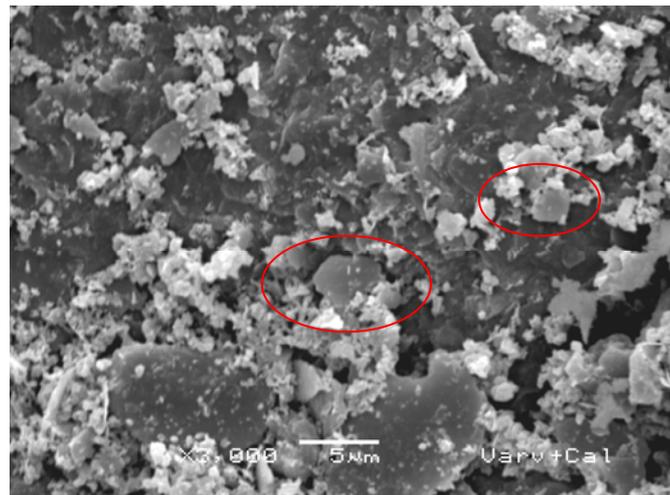
diferença entre as imagens das FIGURAS 19-A e 120-A, é a diminuição de porosidade de amostras na idade de 90 dias de hidratação, representada pela FIGURA 20-A.

Esta porosidade pode ser visualizada na FIGURA 20-B, com ampliação de 5000x. Nas figuras 20 (C e D) com ampliação de 12.000x podemos ver, pelas áreas circuladas, estruturas parecidas com estruturas cristalinas de composição mineralógica como minerais de C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado ($\text{Ca}_{1,5} \text{SiO}_{3,5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$), carbonatos $\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$ e Ancerita $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$. Ainda sendo visível a presença de novas formações amorfas. A formação destes minerais acima citados e suas estruturas (cristalinas e amorfas) explicam o continuação do crescimento das resistências médias de 10,30 à 15,84 MPa para amostras com idades entre 28 e 90 dias de composição V5.

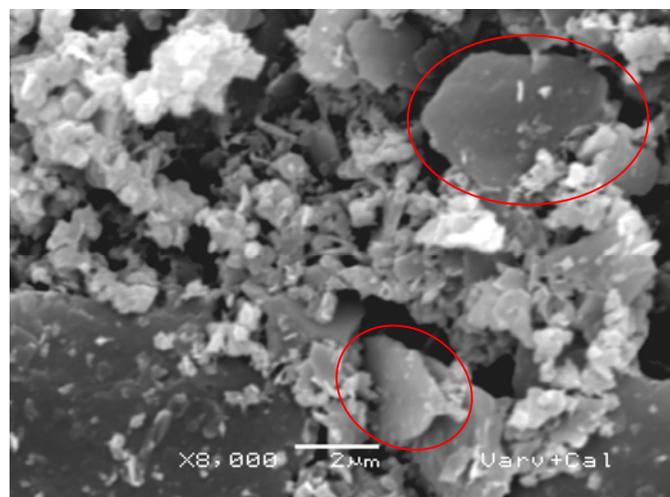
4.5.9 Composição V5, idade de 270 dias



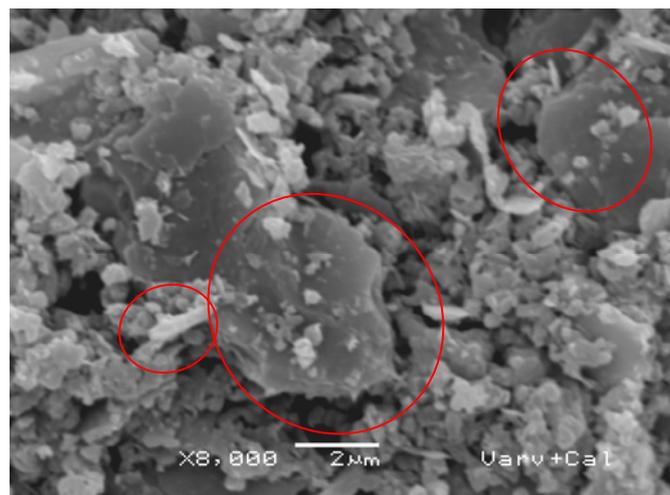
A



B



C



D

FIGURA 21 - Microscopias da composição v5, 270 dias – Fig. A (300x), B (3.000x) e C e D (8.000x). Na figura-A, observa-se pelas áreas circuladas, o

aparecimento de novas formações. Com a ampliação de 8.000x é possível visualizar a predominância de estruturas hexagonais bem como a formação de estruturas amorfas (Fig. C e D).

A comparação das FIGURAS 21-A com 20-A de mesmo material, mesma ampliação de 300x com idades de amostras de 90 e 270 dias, respectivamente, demonstram o crescimento de novas formações com maiores elevações conforme a área circulada. Com o aumento das ampliações para 3.000x para a FIGURA 21-B e 8.000x para as FIGURAS 21 (C e D), constata-se a predominância de estruturas cristalinas hexagonais e prolongadas em comparação com novas formações de estruturas amorfas. Com a continuidade da formação destas novas estruturas mantêm-se o crescimento das resistências médias de 15,8 e 38,35 MPa para as amostras de idades entre 90 e 270 dias de composição V5.

5 CONCLUSÕES

1. A realização deste trabalho confirma experimentalmente a possibilidade de obtenção de um novo material para construção civil na base de rejeitos de varvito (ardósia) com os resíduos de produção de cal. Os resíduos de cal foram caracterizados pela má calcinação de calcários resultando em teores de anidrido carbônico CO_2 (23,55 %). Este valor sendo acima do máximo exigido (10-12%) pela NBR 6543:2003. A resistência uniaxial do material desenvolvido depende de teor de ligante e tempo de cura. O valor da resistência da composição com o menor teor de resíduo da produção de cal (15%) foi variando de 5,00 MPa na idade de 28 dias e 12,64 MPa na idade final de 270 dias de hidratação. Amostras com teor máximo de resíduo da produção de cal (35%) no 28º dia de hidratação tem valor de resistência 10,30 MPa e na idade de 270 dias de 38,35 MPa.
2. Os resultados obtidos com os ensaios de resistência mecânica a compressão para todas as composições na idade de 28 dias do novo material em comparação com valores aplicados para blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural apresentaram valores superiores aos exigíveis pela norma.
3. Por meio dos métodos DRX e MEV foi estabelecido que, em consequência da hidratação das composições iniciais ocorreram a transformação completa da Cal (CaO), Periclásio (MgO) e parcialmente de Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em forma de diferentes carbonatos, como Calcita CaCO_3 e Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Além da síntese de carbonatos cristalinos foram estabelecidas com métodos de DRX e MEV quantidades significativas de novas formações amorfas.
4. As análises Térmica Diferencial e Gravimétrica comprovam que a resistência mecânica do material cresce em razão do aumento dos teores de carbonatos e substâncias amorfas.
5. A obtenção do cálculo de eficiência econômica do reaproveitamento de rejeitos de varvito e resíduos de produção de cal ficou fora dos objetivos deste trabalho, mas pelo bom senso, sugere-se a utilização de matérias-primas sem custo econômico, sem dúvida proporcionando uma considerável economia.
6. Com o aproveitamento dos resíduos citados neste trabalho podemos citar várias vantagens como a minimização de impactos ambientais causados pela

deposição destes resíduos no ambiente, uma significativa redução de área impactada, redução de consumo energético, diminuição do consumo de lenha para a queima de materiais cerâmicos e uma conseqüente redução de emissão de CO₂ na atmosfera.

6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 Estudo das propriedades das composições com teores de resíduo da produção de cal entre 7-10 %;
- 2 Trabalho com maior número de corpos de prova por composição;
- 3 Confeções de corpos de provas com diferentes composições para o mesmo material;
- 4 Confeções de corpos de prova com outros resíduos de propriedades ligantes;
- 5 Realização de Análise Química Elementar com EDS na Microscopia Eletrônica de Varredura;
- 6 Desenvolvimento de tecnologia adequada para a ampliação dos resultados da pesquisa em escala industrial;
- 7 Estudo da viabilidade econômica.

GLOSSÁRIO

- 1 Compósito – Material compósito é qualquer tipo de material caracterizado de uma estrutura não homogênea constituída de duas ou mais substâncias fisicamente separadas e de propriedades diferentes.
- 2 Concessão de lavra – Abrange a maior parte das substâncias minerais comparadas com as substâncias exploradas sobre regime de licenciamento.
- 3 Beneficiamento – é o procedimento adicional dos produtos finais procedentes das etapas de enriquecimento em um processo.
- 4 Jazidas – toda massa individualizada, substância mineral ou fóssil, aflorando da superfície ou existente no interior da terra e que tenha valor econômico.
- 5 Impactos ambientais – Qualquer alteração significativa no meio ambiente em um ou mais de seus componentes provocada por uma ação humana.
- 6 Mananciais – Qualquer corpo d'água, superficial ou subterrâneo, utilizado para o abastecimento humano, animal ou irrigação. Pode ser um rio, um lago ou um poço.
- 7 Resíduos Industriais – desperdícios resultantes de uma atividade industrial. Podem ser líquidos, lamas, sólidos ou resíduos perigosos.

REFERÊNCIAS

- [1] AMBALAVANAN, R.; ROJA, A. Feasibility studies on utilization of waste lime and gypsum with flyash. **Indian Concrete Journal**, v 70, n 11, Nov, p 611-615, 1996.
- [2] BHATTY, J. I.; GAJDA, J. Alternative materials. **World Cement**, v 35, n 12, p 41-48, Dec. 2004.
- [3] BITTENCOURT, R. **Trombudo Central: Capital Sul-Brasileira da pedra ardósia**. Jornal Mercosul, Taió-SC Set/Out/Nov. 2004. p.-5-6
- [4] BUTLER, A.K.; LEEK, D.S.; JOHNSON, R.A. Potential for using some alternative aggregates in structural concrete. **Structural Engineer**, v. 78, n. 22, p. 22-25, Nov 21 2000.
- [5] CALLISTER Jr, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**, 5ª. Ed. Editora LTC, 2002.
- [6] CAMBRONERO, L. E. G.; RUIZ-ROMAN, J. M.; RUIZ, PRIETO J. M. Ceramic foams manufacturing from slate wastes. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 44, n. 6, p. 368-372. 2005.
- [7] CAMPOS, M.; VELASCO, F.; MARTINEZ, M.A.; TORRALBA, J.M. Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 5, p 811-819, May 2004.
- [8] CATARINO, L.; SOUSA, J.; MARTINS, I.M.; VIEIRA, M.T.; OLIVEIRA, M.M. Ceramic products obtained from rock wastes. **Journal of Materials Processing Technology**, v 143-144, n. 1, p 843-845, Dec 20 2003.
- [9] CHAMBINO, M.T.; CORREIA, A.; FIGUEIREDO, J.M. Pollution prevention in the Portuguese natural stone industry. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v 29, n. 4, p 247-255, Nov. 2003.
- [10] CLADDING composite uses waste slate. **Adv. Compos. Bull. (UK)** , p. 12. July 1995.
- [11] CORRÊA, S.M. **Compósito a base de resíduo de concreto e resíduo de produção de cal**. Paraná: Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. 2005. 107p.
- [12] FIGUEIREDO, B.R. **Mineração: Efeitos no meio ambiente e saúde humana**. In: FIGUEIREDO, B.R. **Minérios e ambiente**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2000. Cap. 18 p.325-326.
- [13] GERRA, A.T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 652p.

- [14] GIANINNI, P.C.F. **Depósitos e rochas sedimentares**. IN: TEIXEIRA, W. (org). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000.
- [15] GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª. Ed. – São Paulo: Pini, 2002.
- [16] GUIMARÃES, J. E. P. Dimensões do Universo da Cal. In: V Reunião Aberta da Indústria da Cal – o uso da cal na Engenharia Civil, 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1985.174 p. p1-13.
- [17] JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas**. 2000.
- [18] JOINT 2002 CSCE/ASCE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ENGINEERING - An International Perspective on Environmental Engineering, Jul 21-24 2002, Niagara Falls. Canadian Society for Civil Engineering, 2002. p 675-687.
- [19] KUMAR, S. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. **Construction and Building Materials**, v 16, n 8, p 519-525, Dec. 2002.
- [20] MANSUR, A.A.P.; PERES, A.E.C.; PALHARES, L.; MANSUR, H.S. Study of pore size distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 5, p 525-527, April 2006.
- [21] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI. São Paulo, 1994.
- [22] MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. **O Estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 6 n.2 Campina Grande-PB, 2002
- [23] MYMRIN, V.A., **Synthesis of five main mono-minerals of Portland Cement**. Report of the Research Department of Geology Faculty, Moscow State University of Lomonosow (MGU), 7.1967 - 12.1968.
- [24] PATTON, W.J. **Materiais de construção para engenharia**. 2ª. edição. E.P.U. Editora Pedagógica e Universitária. São Paulo , 1976.
- [25] PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª. edição. Editora Globo, 1976.
- [26] ROCHA-CAMPOS, A.C.; SANTOS, P.R. dos. **Ação Geológica do gelo**. In: TEIXEIRA, W. (org). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000.
- [27] SABRAH, B.A.; EBIED, E.A. Utilization of cement-dust as a substitute of some clay content in clay-sand. Interbrick, Freiburg, v.1, p.5129-5137, 1987

[28] SINGH, M.; GARG, M.; SOMANI, K.K. Experimental investigations in developing low cost masonry cement from industrial wastes. **Indian Concrete Journal**, v 80, n 3, p 31-36, March, 2006.

[29] SOUZA, S.S. **Museu e desenvolvimento econômico: o caso do Parque do Varvito (Itu, SP_Brasil)**. Museu Paulista – USP. Brasil-Porto Feliz – SP

[30] STROEVEN, P.; VU, D.D.; BUI, D.D.; DONG, A.V. Research on cementitious materials to promote sustainable developments in Vietnam. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE AND DEVELOPMENT, 1, Tehran, 2001. **Proceedings**. [s.l.] : Building and Housing Research Center, 2001.

[31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3459**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida.

[32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

[33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**. Cal virgem para construção civil – Requisitos.

[34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7173**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural.

[35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concreto para Fins Estruturais – Classificação por Grupos de Resistência

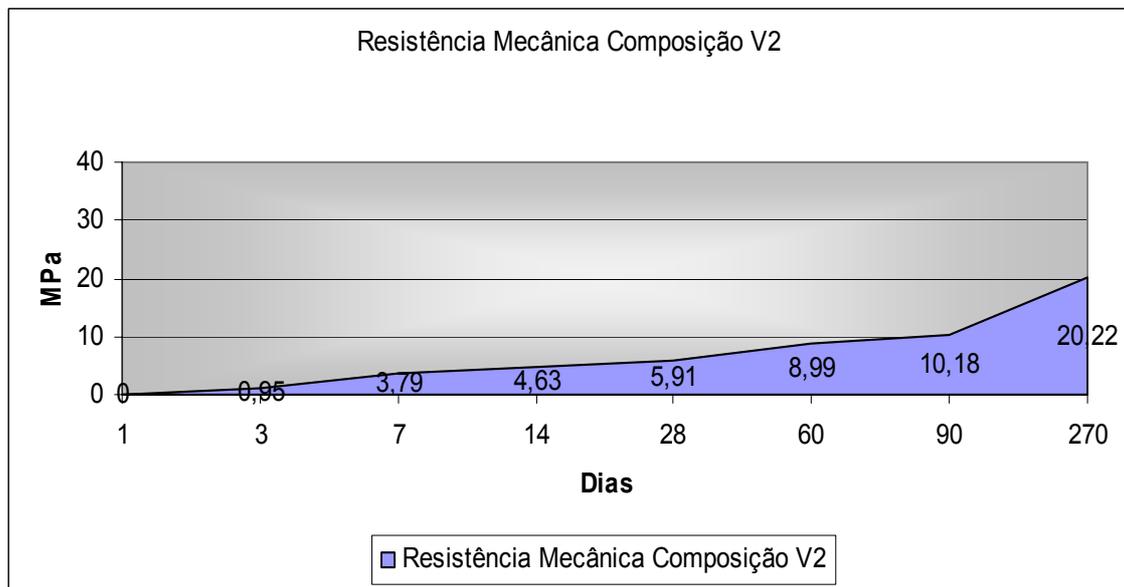
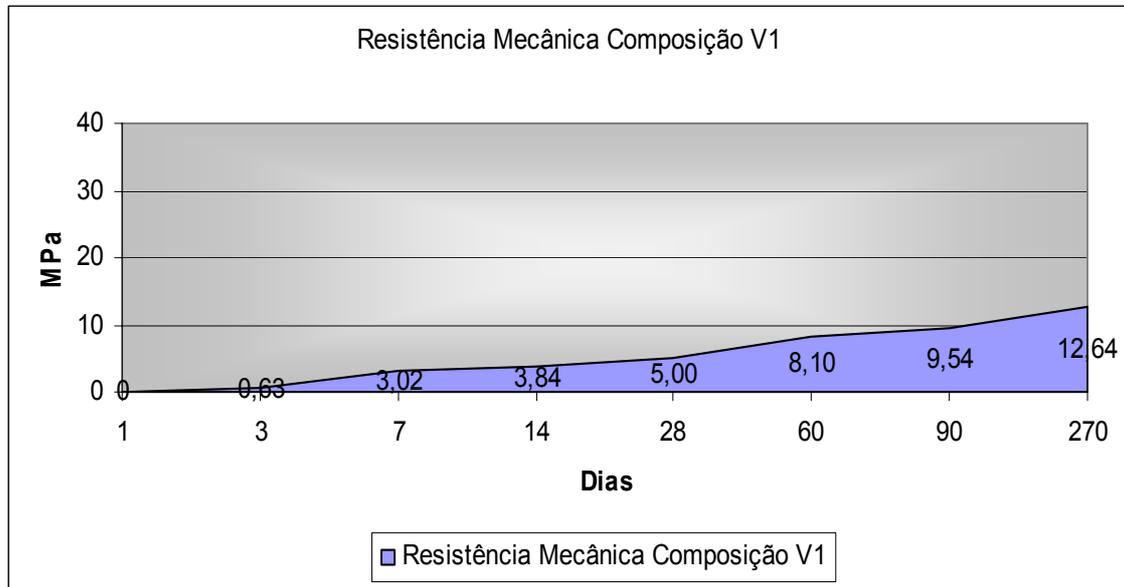
[36] <http://www.ufmg.br/proex/geresol/rejeitoardosia.html>

APÊNDICE 1
RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE
RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

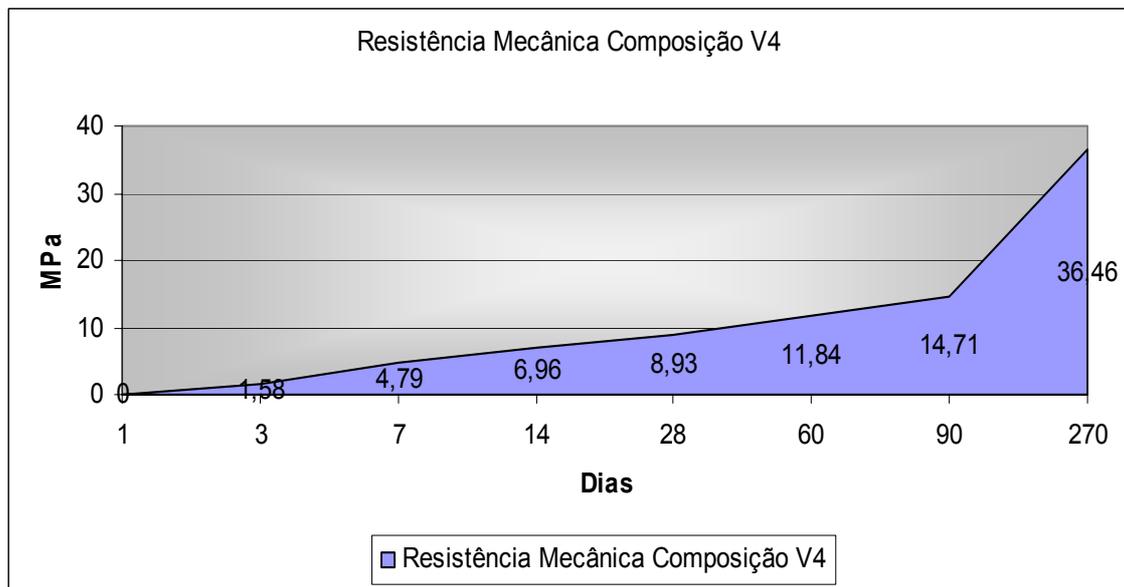
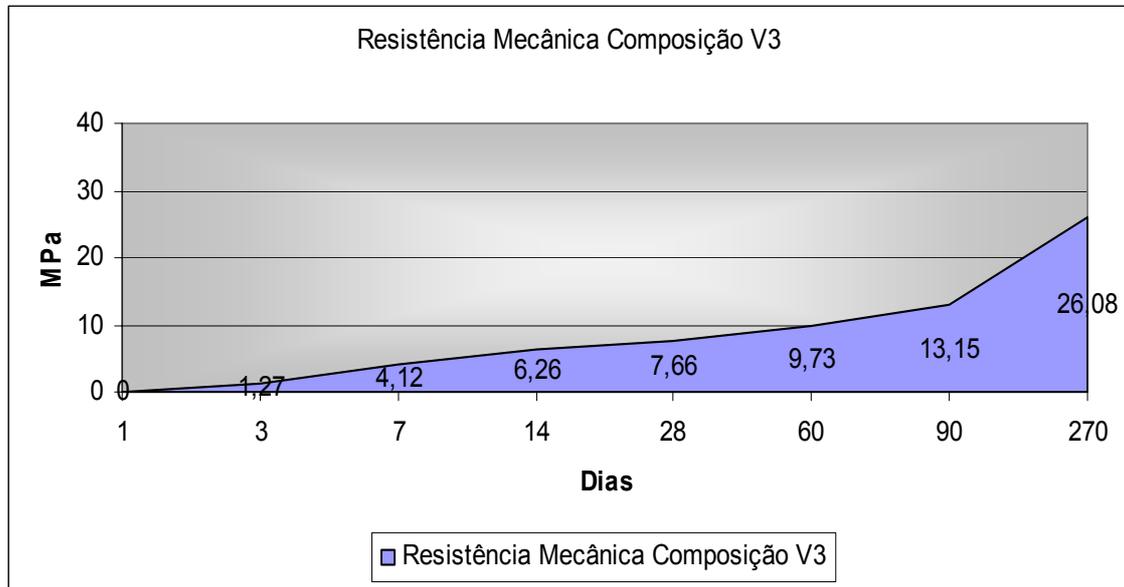
TABELA A 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

IDADES	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA) X COMPOSIÇÕES				
	V1	V2	V3	V4	V5
7 dias	2,73	3,43	4,67	4,92	4,80
	2,70	3,68	3,62	5,11	5,46
	3,49	4,16	4,32	4,16	5,37
	3,14	3,87	3,87	4,95	6,51
14 dias	4,29	4,64	6,00	7,34	8,45
	3,21	4,86	6,48	7,73	8,64
	4,61	4,67	6,19	7,27	8,96
	3,91	4,35	6,35	6,48	8,16
28 dias	4,97	3,41	8,15	8,40	11,16
	5,11	5,67	6,61	9,30	10,46
	4,86	7,29	8,13	8,69	9,77
	5,02	7,28	7,75	9,32	9,83
60 dias	9,13	8,91	10,04	11,73	14,05
	8,56	9,71	9,37	11,82	14,10
	7,00	8,62	9,29	11,92	14,04
	7,70	8,70	10,20	11,88	14,20
90 dias	9,66	9,72	13,25	14,07	14,96
	9,59	10,89	14,01	15,12	15,63
	9,93	10,29	12,90	15,03	16,46
	8,97	9,82	12,45	14,61	16,33
270 dias	12,56	21,91	24,45	36,24	39,20
	12,94	19,67	26,63	33,84	38,34
	11,83	16,21	27,57	38,13	38,50
	13,27	22,11	25,68	37,62	37,36

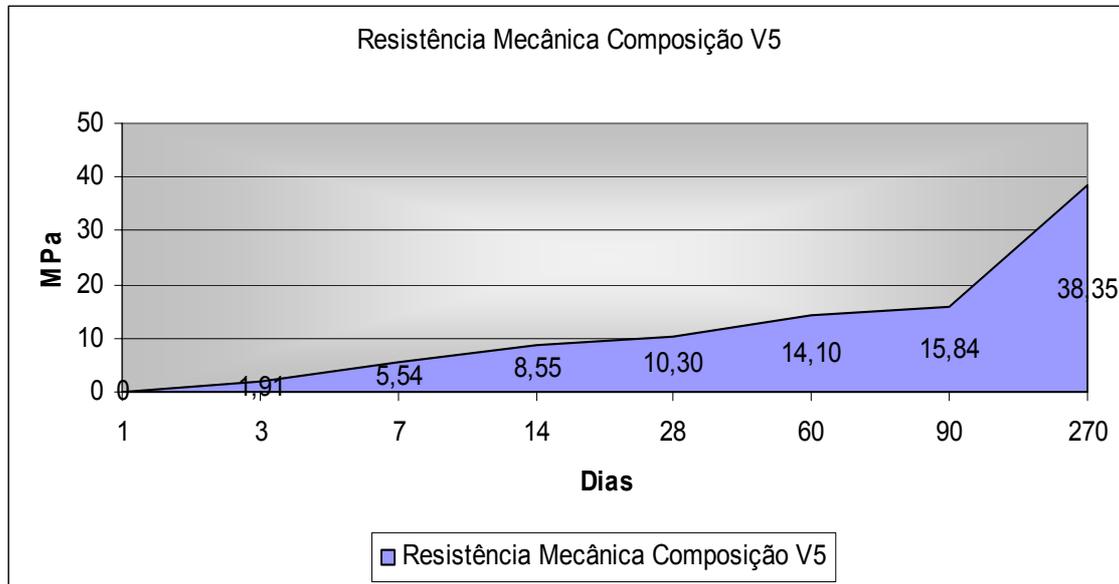
REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO



REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO



REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

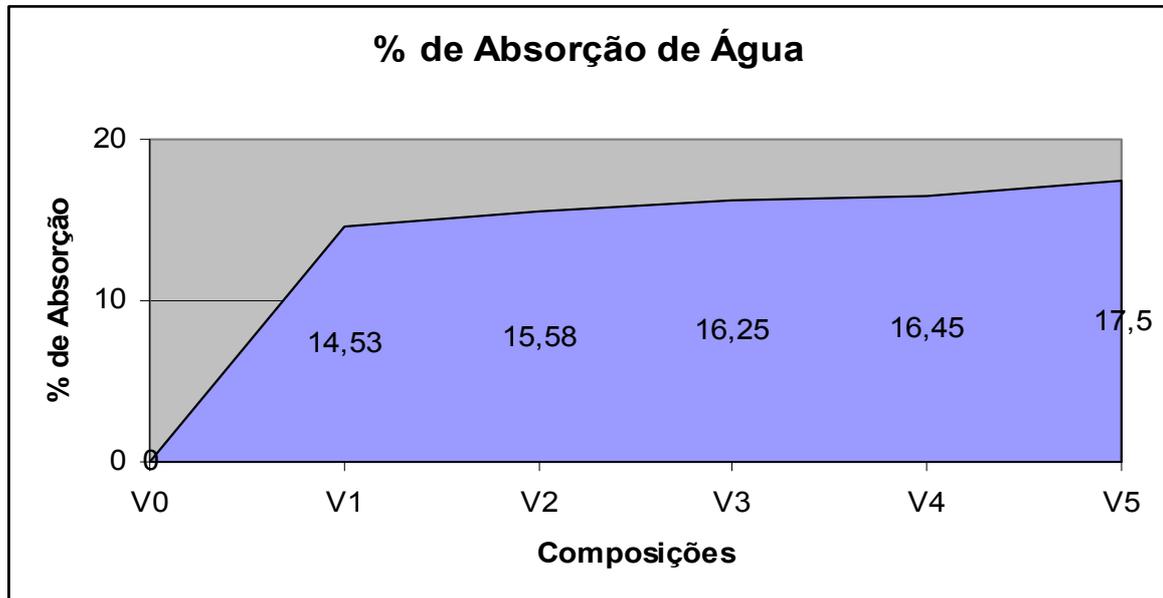


APÊNDICE 2
RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE
ABSORÇÃO DE ÁGUA

TABELA A 2 – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

COMPOSIÇÃO	Peso Inicial Seco, Antes da Estufa	Peso da Amostra Após Secagem em Estufa à 105±5 °C por 24 horas	Peso da Amostra Após Imersão Total em Água à 23±5 °C por 24 horas
V1	11,4345	11,3862	13,0004
	11,5447	11,4951	13,2003
	11,4484	11,3948	13,0412
Média	11,47	11,42	13,08
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,08
V2	11,0098	10,9520	12,6439
	10,9895	10,9319	12,6188
	11,1076	11,0503	12,7844
Média	11,03	10,97	12,68
Desvio Padrão	0,05	0,05	0,07
V3	10,6871	10,6202	12,33,50
	10,6466	10,5817	12,2913
	10,6315	10,5669	12,3170
Média	10,65	10,58	12,30
Desvio Padrão	0,02	0,02	0,01
V4	10,2163	10,1351	11,8166
	10,2772	10,2083	11,9109
	10,1933	10,1159	11,7376
Média	10,22	10,15	11,82
Desvio Padrão	0,03	0,03	0,07
V5	9,7277	9,6694	11,3369
	9,7541	9,7044	11,4366
	9,8237	9,7645	11,4788
Média	9,76	9,71	11,41
Desvio Padrão	0,04	0,03	0,05

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA



ANEXOS

ANEXO 1 - Difratoograma de Raio X do Resíduo da Mineração do Varvito

ANEXO 2 - Difratoograma de Raio X do Resíduo de Produção de Cal Seco

ANEXO 3 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 Mistura Seca

ANEXO 4 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 3 dias

ANEXO 5 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 7 dias

ANEXO 6 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 14 dias

ANEXO 7 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 28 dias

ANEXO 8 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 60 dias

ANEXO 9 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 90 dias

ANEXO 10 - Difratoograma de Raio X da Composição V5 – 270 dias

ANEXO 11 - Representação Gráfica das Curvas de ATD e ATG da Composição V5 na Mistura Seca e nas idades 3, 7, e 14 dias

ANEXO 12 - Representação Gráfica das Curvas de ATD e ATG da Composição V5 nas idades 28, 90, e 270 dias

ANEXO 13 - Depósito do Pedido de Patente

ANEXO 14 - Certificado de Participação em Congresso

Pattern List

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-1560	66	Quartz low	0,000	0,939	Si O ₂
*	00-009-0466	58	Albite, ordered	0,000	0,230	Na Al Si ₃ O ₈
*	01-089-2972	41	Clinocllore 1Mla	0,000	0,177	Mg _{2.5} Fe _{1.65} Al _{1.5} Si _{2.2} Al _{1.8} O ₁₀ (O H) ₈
*	01-083-1530	32	Dolomite	0,000	0,028	Ca Mg (C O ₃) ₂
*	01-084-1303	33	Muscovite 2\ITMRG#1	0,000	0,133	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (O H) ₂
*	01-075-1592	27	Orthoclase	0,000	0,067	K Al Si ₃ O ₈

Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-087-0673	59	Portlandite, syn	0,000	0,695	Ca (O H) ₂
*	00-033-1161	56	silica	0,000	0,296	Si O ₂
*	01-087-0652	52	Periclase	0,000	0,983	Mg O
*	01-083-1762	53	Calcite	0,000	0,577	Ca (C O ₃)
*	01-082-2453	38	Brucite, syn	0,000	0,153	Mg (O H) ₂
*	01-070-0982	20	Gypsum	0,000	0,095	Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂
*	00-042-1437	31	Phlogopite-	0,000	0,240	K (Mg , Fe) ₃ (Al , Fe) Si ₃ O ₁₀ (O H , F) ₂

Pattern List

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-1560	63	Quartz low	0,000	0,857	Si O ₂
*	01-086-0439	25	Orthoclase	0,000	0,059	K (Al Si ₃ O ₈)
*	01-078-0315	46	Portlandite, syn	0,000	0,110	Ca (O H) ₂
*	00-009-0466	50	Albite, ordered	0,000	0,183	Na Al Si ₃ O ₈
*	01-079-0761	25	Clinochlore Ilb-2	0,000	0,084	(Mg , Fe) ₅ Al (Si ₃ Al) O ₁₀ (O H) ₈
*	01-084-1302	33	Muscovite 2\ITMRG#1	0,000	0,142	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (O H) ₂
*	01-083-1766	25	Dolomite	0,000	0,029	Mg Ca (C O ₃) ₂

Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-2465	71	Quartz, syn	0,000	0,987	Si O ₂
*	01-089-6427	30	Albite (heat-treated)	0,000	0,093	Na (Al Si ₃ O ₈)
*	01-079-1270	31	Clinochlore	0,000	0,083	(Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe. ₁₃₆ Al _{1.275}) (Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀) (O H) ₈
*	01-078-0315	40	Portlandite, syn	0,000	0,069	Ca (O H) ₂
*	01-070-1869	23	Muscovite-2\ITM\RG#2	0,000	0,063	K _{0.77} Al _{1.93} (Al _{0.5} Si _{3.5}) O ₁₀ (O H) ₂
*	01-083-1604	20	Microcline intermediate	0,000	0,090	K Al Si ₃ O ₈

Pattern List

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-079-1270	24	Clinochlore	0,000	0,051	(Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{.136} Al _{1.275}) (Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀) (O H) ₈
*	01-084-1208	13	Dolomite	0,000	0,015	Ca Mg (C O ₃) ₂
*	01-082-0576	28	Muscovite 2\ITM\RG#1	0,000	0,112	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (O H) ₂
*	00-009-0466	50	Albite, ordered	0,000	0,130	Na Al Si ₃ O ₈
*	01-085-1054	69	Quartz	0,000	0,907	Si O ₂

Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-0930	67	Quartz	0,000	0,991	Si O ₂
*	01-082-0576	30	Muscovite 2\ITM\RG#1	0,000	0,110	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (O H) ₂
*	00-004-0733	37	Portlandite, syn	0,000	0,046	Ca (O H) ₂
*	01-075-1142	39	Albite high	0,000	0,098	Na (Al Si ₃ O ₈)
*	01-089-2972	21	Clinochlore 1Mla	0,000	0,050	Mg _{2.5} Fe _{1.65} Al _{1.5} Si _{2.2} Al _{1.8} O ₁₀ (O H) ₈
*	01-084-1208	17	Dolomite	0,000	0,018	Ca Mg (C O ₃) ₂

Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-1054	74	Quartz	0,000	0,925	Si O ₂
*	01-087-0673	40	Portlandite, syn	0,000	0,047	Ca (O H) ₂
*	01-076-1819	35	Albite low	0,000	0,111	Na (Al Si ₃ O ₈)
*	01-079-1270	28	Clinochlore	0,000	0,080	(Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe. _{1.36} Al _{1.275}) (Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀) (O H) ₈
*	01-081-2027	24	Calcite, syn	0,000	0,046	Ca (C O ₃)
*	01-086-1385	25	Muscovite 2\ITM#1\RG	0,000	0,183	K _{0.86} Al _{1.94} (Al _{0.965} Si _{2.895} O ₁₀) ((O H) _{1.744} F _{0.256})

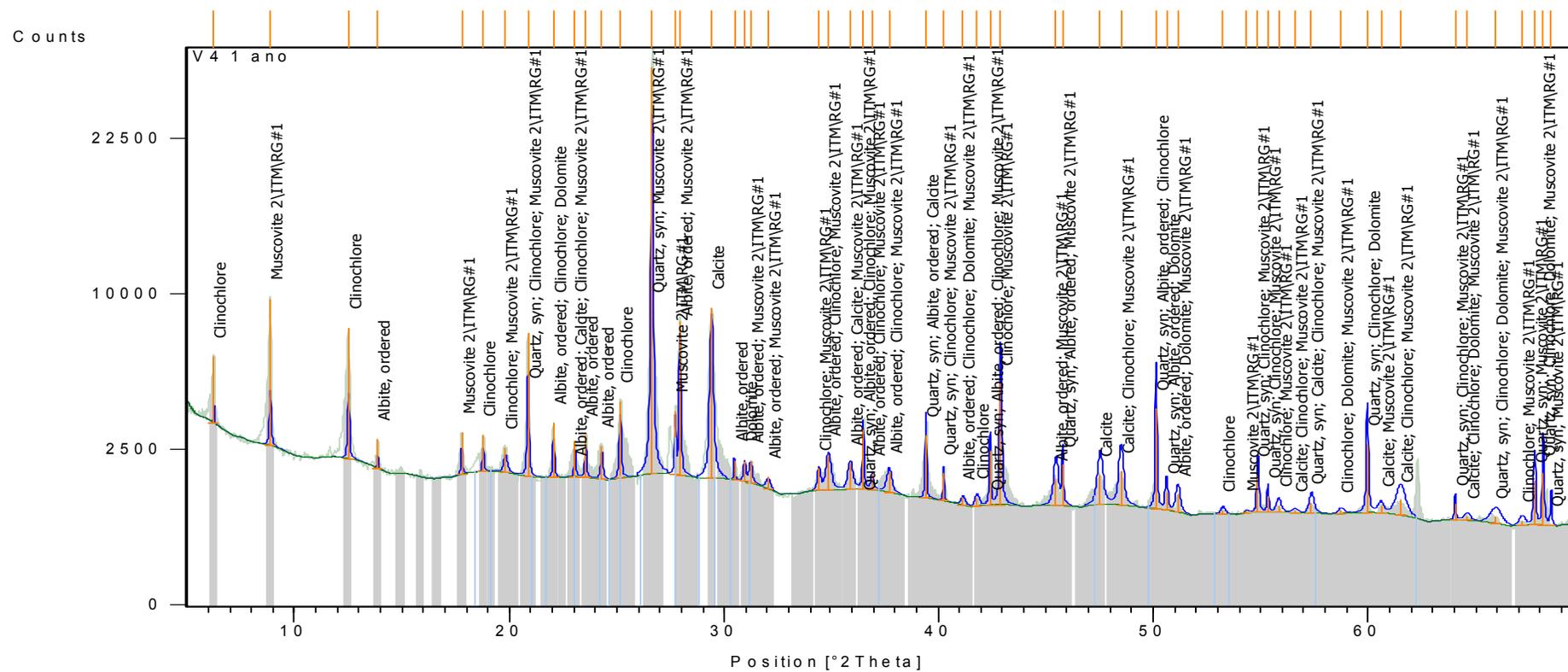
Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-079-1910	63	Quartz	0,000	0,994	Si O ₂
*	00-044-1481	46	Portlandite, syn	0,000	0,066	Ca (O H) ₂
*	00-009-0466	48	Albite, ordered	0,000	0,193	Na Al Si ₃ O ₈
*	01-081-2027	43	Calcite, syn	0,000	0,119	Ca (C O ₃)
*	01-079-1270	37	Clinochlore	0,000	0,189	(Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{.136} Al _{1.275}) (Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀) (O H) ₈
*	01-084-2065	25	Dolomite	0,000	0,026	Ca Mg _{0.77} Fe _{0.23} (C O ₃) ₂
*	01-084-1302	34	Muscovite 2\ITM\RG#1	0,000	0,146	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (O H) ₂

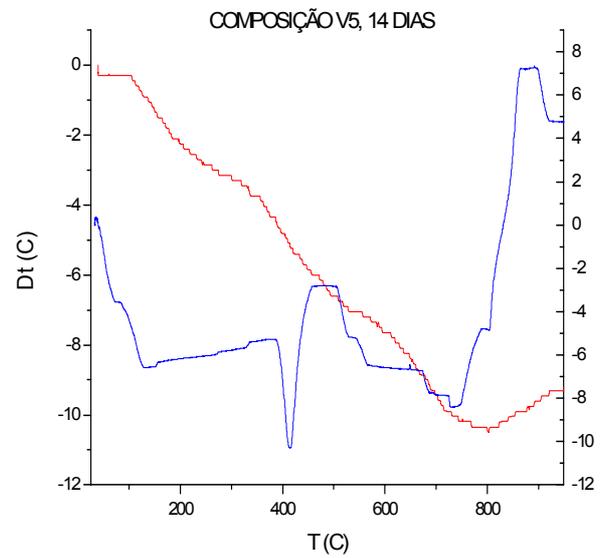
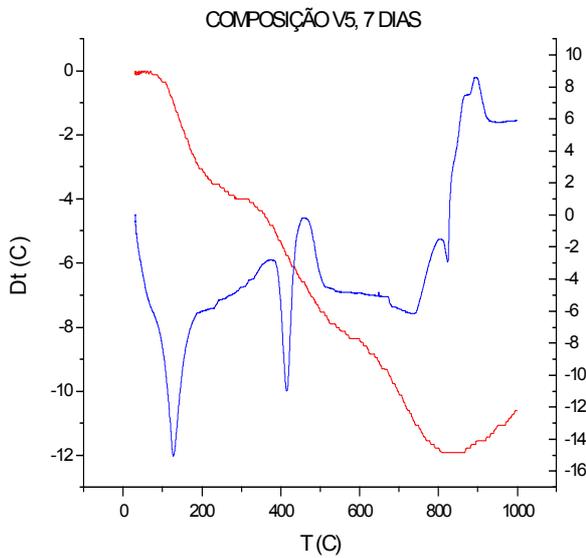
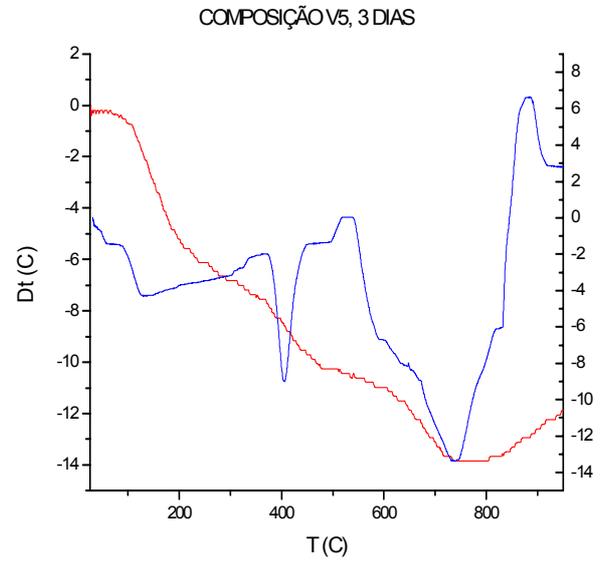
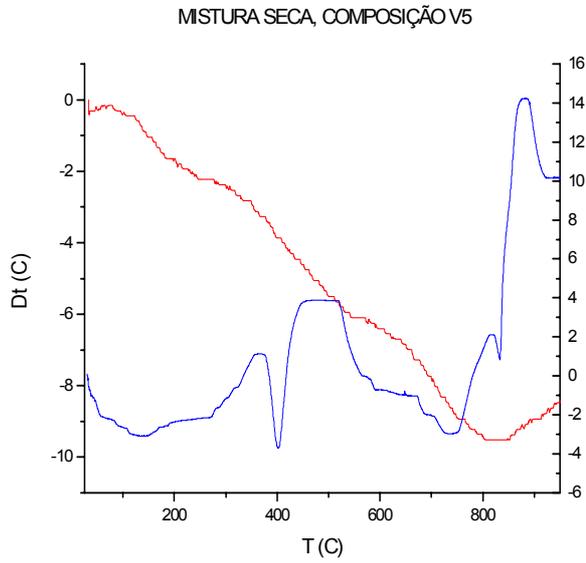
Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-2465	64	Quartz, syn	0,000	0,986	Si O ₂
*	00-009-0466	49	Albite, ordered	0,000	0,152	Na Al Si ₃ O ₈
*	01-072-1937	43	Calcite	0,000	0,109	Ca C O ₃
*	00-044-1481	41	Portlandite, syn	0,000	0,042	Ca (O H) ₂
*	01-089-2972	34	Clinochlore 1Mla	0,000	0,147	Mg _{2.5} Fe _{1.65} Al _{1.5} Si _{2.2} Al _{1.8} O ₁₀ (O H) ₈
*	01-084-2065	25	Dolomite	0,000	0,016	Ca Mg _{0.77} Fe _{0.23} (C O ₃) ₂
*	01-080-0742	33	Muscovite 2\ITM\RG#1	0,000	0,155	(K _{0.82} Na _{0.18}) (Fe _{0.03} Al _{1.97}) (Al Si ₃) O ₁₀ (O H) ₂

ANEXO 10 – Difratograma de Raio X da Composição V5 – 270 dias



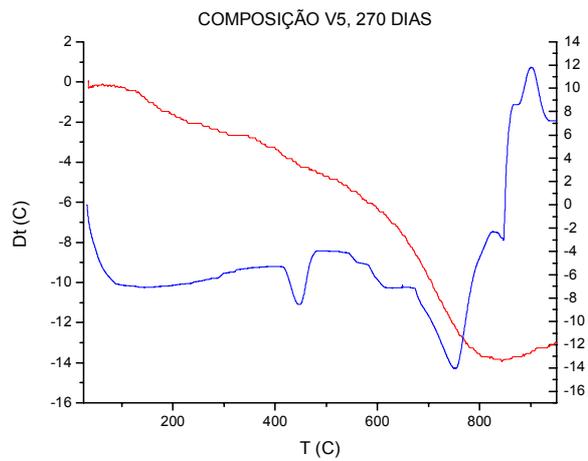
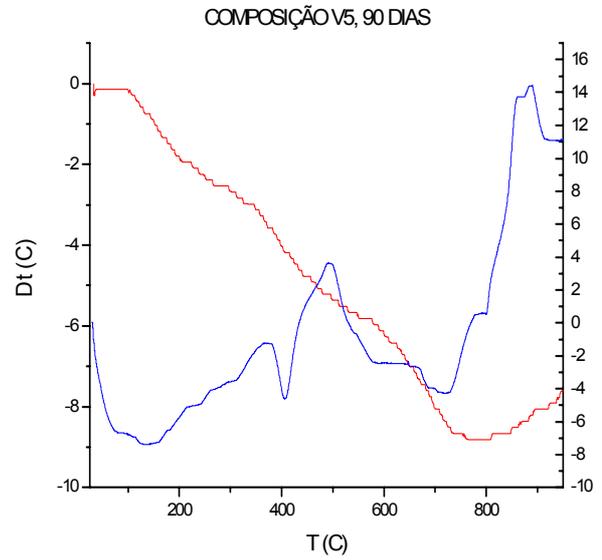
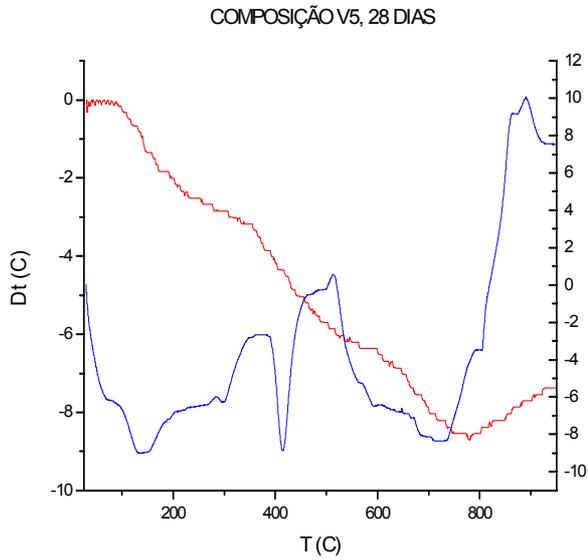
ANEXO 11 – Representação Gráfica das Curvas das Análises Térmicas Diferencial e Gravimétrica da Composição V5 das Amostras Mistura Seca, 3 dias, 7 dias e 14 dias.



Legenda:

- Curva ATG
- Curva ATD

ANEXO 12 – Representação Gráfica das Curvas das Análises Térmicas Diferencial e Gravimétrica da Composição V5 das amostras 28 dias, 90 dias e 270 dias



Legenda:

- Curva ATG
- Curva ATD

ANEXO 13 – Depósito do Pedido de Patente