



**UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE**

**Dissertação de Mestrado**

**em**

**Química e Processamento de Recursos Locais**

**Efeito da composição mineralógica de calcários, usados em  
substituição parcial do cimento, nas propriedades de  
argamassas**

**Autor:** Carla Chiachuanhane Augusto Macia Casimiro

**Maputo, 12 de Outubro de 2015**



**UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE**

**Dissertação de Mestrado**

**em**

**Química e Processamento de Recursos Locais**

**Efeito da composição mineralógica de calcários, usados em  
substituição parcial do cimento, nas propriedades de  
argamassas**

**Autor:** Carla Chiachuanhane Augusto Macia Casimiro

**Supervisor(es):** Professor Doutor Carvalho Madivate

Prof. Doutor Arão Manhique

Eng Rodrigues Manjate

**Maputo, 12 de Outubro de 2015**

## Agradecimentos

À Deus, autor e finalizador da minha vida, que sempre esteve do meu lado ao longo de todo o percurso.

Ao meu esposo, Alberto Casimiro, e aos meus filhos Melanie Casimiro, Alberto Casimiro Júnior e Shekainae Casimiro, pelo amor, compreensão, paciência e apoio incondicional em todos momentos, a minha profunda e eterna gratidão.

Aos meus irmãos e a toda minha família, pelas orações, apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

Desejo manifestar o meu sincero agradecimento aos meus tutores, Professor Doutor Carvalho Madivate, Prof. Doutor Arão Manhique e Eng.º Rodrigues Manjate, pela orientação, sugestões, disponibilidade e partilha de conhecimentos em todas as fases do trabalho, e também pela forma atenciosa com que sempre se prontificavam para esclarecer todas as dúvidas e pelo espírito crítico evidenciado, o qual foi fundamental no enriquecimento científico e literário desta pesquisa.

Os meus agradecimentos vão ainda para:

- O Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM), por ter disponibilizado todo o apoio técnico necessário para a execução da parte experimental da pesquisa, em particular a pessoa de senhor Director Geral, dr. Henrique Vasco Filimone, por ter autorizado a execução de toda pesquisa no LEM;
- O Ministério de Ciência e Tecnologia, Ensino Superior e Ensino Técnico Profissional, que em parceria com o Banco Mundial, aprovou e financiou esta pesquisa, fundos sem os quais não teria sido possível produzir os resultados aqui apresentados, que serviram de base para a elaboração desta dissertação
- A ASDI, Agência Sueca para o Desenvolvimento Internacional, financiadora deste mestrado e da pesquisa em que assenta esta dissertação.

Não queria deixar de fora:

Os Chefes do Departamento de Química e de Materiais, do Laboratório de Engenharia de Moçambique, dr. Moisés Mabui e Eng<sup>o</sup>. Manuel da Conceição, por terem disponibilizado os laboratórios onde decorreu a parte experimental.

A Senhora Amélia Matebele (funcionária do LEM) e ao dr. José Sibindi (estudante da UEM), que estiveram presentes na realização de todos ensaios laboratoriais, pela sua companhia, conhecimentos transmitidos e espírito de equipa, e serviram de suporte às produções e ensaios efectuados.

Todos colegas do Departamento de Química do LEM pelo apoio prestado na preparação das amostras em particular aos Srs. Alberto Machava e Tomás Macúacua.

Os meus colegas do curso de Mestrado, pelo encorajamento e incentivo a levar avante este projecto.

E por fim, todos que não foram citados, mas que contribuíram directa ou indirectamente para a realização desta pesquisa, o meu MUITO OBRIGADA.

## Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu esposo Alberto Casimiro, meus filhos, Melanie, Alberto e Shekainae, aos meus irmãos, Salvador, Olímpio, Albertina, Lídia, Nathaniel e Célia, que sempre me acompanharam e deram seu apoio nos momentos mais difíceis da minha vida.

À memória dos meus pais, Augusto Macia e Elisa Nhambi, e amigas Ivete Mariza e Rosa Siteó.

*Com eterna saudade!*

## Declaração de Honra

Declaro por minha honra que a presente Dissertação de Mestrado é resultado da investigação por mim realizada, com base nos meios que são referenciados ao longo do relatório, e que a mesma nunca foi submetida a nenhuma Instituição de Ensino Superior para a obtenção de qualquer grau académico.

Maputo, 12 de Outubro de 2015

A autora

.....

(Carla Chiachuanhane Augusto Macia Casimiro)

## Resumo

Em Moçambique, nos últimos tempos, tem-se verificado uma grande preocupação na busca de habitações melhoradas construídas com materiais de construção alternativos, como forma de minimizar os elevados custos de aquisição dos mesmos. A utilização de resíduo de calcário como substituinte parcial de cimento na produção de materiais de construção pode ser uma das vias alternativas para minimizar este problema.

Esta pesquisa teve por objectivo estudar o efeito da composição mineralógica de calcários, usados em substituição parcial do cimento, nas propriedades de argamassas.

As amostras de calcários foram colhidas nas províncias de Maputo (Magude e Salamanga) e Inhambane (Massinga) e submetidas à caracterização química pelo método de Fluorescência de Raios X, mineralógica, pela Difracção de Raios X, mecânica, através de desgaste de Los Angeles, e tecnológica, pela absorção da água, alteração em sulfato de sódio e reactividade potencial. Para a pesquisa da aplicação de calcários em argamassas foram produzidas 8 composições onde substituiu-se parcialmente o cimento Portland por quantidades definidas de *filler* de calcário e duas composições de referência para efeitos de comparação. Na produção das argamassas foi usada areia, água da rede pública e cimento Portland de classe 32.5N com substituições percentuais de 10, 20, 25 e 30 de *filler* de calcário e cimento 42.5N, com quantidades percentuais de 10, 15, 20 e 25. Com as argamassas produzidas, foram moldados provetes sob a forma de prismas e levados a cura nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Os provetes depois foram submetidos à ensaios de absorção de água, resistência à flexão e à compressão.

As amostras de calcários de Salamanga com 95.71 e 94.58% de calcite e as de Massinga com 98.24 e 98.70% de calcite, em geral, apresentaram melhores resultados mecânicos e tecnológicos, quando comparadas às de Magude com 33.00 e 3.86% de calcite.

Os resultados obtidos na avaliação tecnológica, mostram que a substituição parcial do cimento pelo *filler* de calcário nas proporções até 20% dá valores de resistência à compressão superiores a 32.5MPa, valor de referência aos 28 dias de idade de cura.

Palavras-chaves: *filler* de calcário, cimento, argamassas.

## Abstract

As a result of the limited access to conventional materials in Mozambique, in recent times, a major effort is being made in the search for improved and sustainable alternative building materials, in order to minimize the high acquisition costs associated with the conventional materials. The use of limestone residue as partial replacement for the production of building materials is being explored as an alternative way to minimize this problem.

As part of this efforts present study was carried out with the aim to study the effect of the mineralogical composition of limestone, used in partial replacement of cement, in the technological properties of mortar.

Samples of limestone were collected in Maputo (Magude and Salamanga) and Inhambane (Massinga) and submitted to a chemical characterization, by X-Ray Fluorescence, and mineralogical characterization, by X-Ray Diffraction. Samples were further submitted to a mechanical characterization, water absorption tests, reactivity against sodium sulfate solution and potential reactivity. Limestone samples were then used to produce mortars, based in 8 compositions where limestone replaced partially Portland. Prepared mortar samples included two reference compositions (with no limestone) used for comparison and determination of the effect of limestone on mortar specimens. In the production of mortars we used sand, water and two cement types (Portland cement 32.5N and Portland cement 42.5N). On the preparation of mortars specimens with the 32.5N Portland cement we worked with limestone filler contents of 10, 20, 25 and 30, while with the 42.5N cement limestone content of 10, 15, 20 and 25% were used. From prepared mortar compositions prismatic specimens were produced and cured at ages of 3, 7, 14 and 28 days. The samples were then submitted to the water absorption tests, flexural and compressive strength.

Samples of Salamanga limestone with 95.71 and 94.58% of calcite and Massinga with 98.24 and 98.70% of calcite showed, in general, better mechanical and technological results, when compared to Magude samples with 33.00 and 3.86% calcite.

The results of the technological evaluation show that partial substitution of limestone for the cement filler in proportions up to 20% gives compression strength greater than the 32.5MPa, reference value for a curing age of 28 days.

**Key words:** limestone filler, cement, mortar.

## Índice

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJECTIVOS .....	2
1.1.1	Geral.....	2
1.1.2	Específicos .....	2
1.2	JUSTIFICATIVA.....	3
1.2.1	Factos históricos sobre o uso do calcário na construção civil .....	3
1.2.2	Origem e ocorrência de calcários em Moçambique.....	4
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	7
2.1	CALCÁRIOS .....	7
2.2	Efeito do calcário nas propriedades de argamassas e outros materiais .....	8
2.3	Efeito do <i>filler</i> nas propriedades do betão fresco e endurecido .....	13
3	PARTE EXPERIMENTAL .....	16
3.1	METODOLOGIA DO TRABALHO DE ENSAIOS.....	16
3.1.1	Amostragem.....	16
3.1.2	Pré – Tratamento das amostras .....	18
3.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS .....	19
3.2.1	Determinação da composição química dos calcários.....	19
3.2.2	Fluorescência de raio X .....	19
3.2.3	Determinação da alteração pelo sulfato de sódio.....	19
3.2.4	Determinação da reactividade potencial .....	19
3.3	DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA MINERALÓGICA .....	20
3.3.1	Difracção de Raio X.....	20
3.4	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS .....	20
3.4.1	Análise granulométrica .....	20
3.4.2	Determinação da Massa específica, absorção de água e Baridade .....	20

3.4.3	Desgaste à máquina de Los Angeles.....	21
3.5	Preparação das argamassas e dos provetes.....	21
3.5.1	Preparação dos provetes prismáticos .....	23
3.6	ENSAIOS TECNOLÓGICOS .....	25
3.6.1	Resistência à flexão.....	25
3.6.2	Resistência à compressão.....	26
3.6.3	Absorção de água.....	27
4	RESULTADOS.....	28
4.1	Composição química e mineralógica .....	28
4.2	Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio.....	29
4.3	Reactividade potencial aos alcális.....	30
4.4	Distribuição granulometria da areia .....	31
4.5	Absorção da água, densidade, baridade e desgaste de Los Angeles .....	33
4.6	Resultados dos ensaios tecnológicos.....	34
4.6.1	Resistência à flexão das argamassas formuladas com cimento 32.5N .....	34
4.6.2	Resistência à compressão nas argamassas formuladas com cimento 32.5N .....	34
4.6.3	Resistência à flexão das argamassas formuladas com cimento 42.5N .....	37
4.6.4	Resistência à compressão das argamassas formuladas com cimento 42.5N .....	37
4.6.5	Absorção de água de argamassas.....	40
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	41
5.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA .....	42
5.1.1	Variação da Resistência à flexão e à compressão das argamassas formuladas com cimento 32.5N.....	42
5.1.2	Variação da resistência à flexão e à compressão das argamassas formuladas com cimento 42.5N.....	44
5.1.3	Variação da absorção de água nas argamassas com cimento 32.5N.....	46
5.1.4	Variação da absorção de água nas argamassas com cimento 42.5N.....	46

---

6	CONCLUSÕES .....	48
7	RECOMENDAÇÕES .....	49
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
9	ANEXOS .....	55
9.1	Provetes preparados com cimento 32.5N.....	56
9.1.1	Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 7 de cura	56
9.1.2	Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 14 dias ...	59
9.2	Provetes preparados com cimento 42.5N.....	62
9.2.1	Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 2 de cura	62
9.2.2	Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 7 de cura	65
8.3	Composição mineralógica.....	68

## Índice de Figuras

Figura 1 - Principais depósitos de calcários em Moçambique.....	6
Figura 2 - Fluxograma dos ensaios realizados nesta pesquisa.....	17
Figura 3 – Peneiro de 150µm.....	18
Figura 4 - Misturador mecânico.....	23
Figura 5 - Moldes com argamassa na câmara húmida.....	24
Figura 6 - Compactador mecânico.....	24
Figura 7 - Provetes em cura no tanque de água.....	25
Figura 8 - Prensa usada para o ensaio de resistência à flexão.....	26
Figura 9 - Prensa usada para o ensaio de resistência à compressão.....	26
Figura 10 - Espectro de raios X da amostra MG1.....	29
Figura 11 - Gráfico para a determinação da reactividade potencial.....	31
Figura 12 - Curva granulométrica da areia usada na formulação das argamassas.....	33
Figura 13 - Variação da resistência à flexão das composições de argamassas formuladas com cimento 32.5N, em relação ao padrão.....	43
Figura 14 - Variação da resistência à compressão das composições das argamassa formuladas com cimento 32.5N, em relação ao padrão.....	44
Figura 15 - Variação da resistencia à flexão das composições de argamassas formuladas com cimento 42.5N, em relação ao padrão.....	45
Figura 16 - Variação da resistência à compressão das composições de argamassas formuladas com cimento 42.5N, em relação ao padrão.....	45
Figura 17 - Variação da absorção de água entre as argamassas formuladas com amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1, MS2 usando cimento 32.5N e argamassa padrão.....	46
Figura 18 - Variação da absorção de água entre as argamassas formuladas com amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1, MS2 usando cimento 42.5N e argamassa padrão.....	47

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação de calcário de acordo com teores de óxido de cálcio e magnésio .....	7
Tabela 2 - Composição química típica de um calcário para fabricação de cimento.....	7
Tabela 3 - Proporção dos diferentes materiais nas composições para a produção das argamassas .....	22
Tabela 4 - Composição química das matérias primas.....	28
Tabela 5 - Composição mineralógica semi-quantitativa dos calcários.....	28
Tabela 6 - Perda total de massa das amostras MS1, MS2, SL1 e SL2.....	29
Tabela 7 - Resultados da reactividade potencial aos álcalis nas amostras MS1 e MS2 .....	30
Tabela 8 - Caracterização granulométrica da areia (NP 1379-1976).....	32
Tabela 9 - Resultados de absorção da água, densidade, baridade e desgaste de Los Angeles	34
Tabela 10 - Resistência à flexão aos 28 dias de cura com cimento 32.5N .....	35
Tabela 11 - Resistência à compressão aos 28 dias de cura com cimento 32.5N .....	36
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à flexão aos 28 dias de cura, cimento 42.5N .....	37
Tabela 13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, cimento 42,5N..	39
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura (Amostras preparadas com cimento 32.5N).....	40
Tabela 15 - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura, cimento 42.5N.....	40

## Lista de Fórmulas Químicas, Símbolos e Abreviaturas

CO <sub>2</sub> :	Dióxido de carbono
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :	Sulfato de sódio
MgO :	Óxido de magnésio
CaCO <sub>3</sub> :	Carbonato de cálcio
CaO :	Óxido de cálcio
SiO <sub>2</sub> :	Dióxido de silício
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Óxido ferroso
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Óxido de alumínio
K <sub>2</sub> O :	Óxido de potássio
Na <sub>2</sub> O :	Óxido de sódio
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> :	Dolomite
SO <sub>3</sub> :	Trióxido de enxofre
MgCO <sub>3</sub> :	Carbonato de magnésio
PPC :	Perda por calcinação
nm :	Nanómetro
µm :	Micrómetro
r.p.m :	Rotações por minuto
FRX :	Fluorescência de Raios X
DRX :	Difracção de Raios X
ATG :	Análise Termogravimétrica
C <sub>3</sub> S :	Silicato tricálcico
C <sub>2</sub> S :	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A :	Aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF :	Aluminoferrato tetracálcico

---

ASTM :	American Society Testing and Matirials
NM :	Norma Moçambicana
NP :	Norma Portuguesa
EN :	Norma Europeia
LNEC :	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
LEM :	Laboratório de Engenharia de Moçambique
RBLH :	Regulameto de Betões e Ligantes Hidráulicos
MEV :	Microscópio electrónico de varredura
EDS :	Espectrometria de energia dispersiva de raios-X
F:	Carga aplicada
$\delta_c$ :	Resistência à compressão
$\delta_F$ :	Resistência a flexão
A.A :	Absorção de água
$M_{sat}$ :	Massa do provete saturado
$M_s$ :	Massa do provete seco em estufa
MS :	Areia fabricada

## 1 INTRODUÇÃO

Moçambique é um país com uma grande diversidade de rochas calcárias que ocorrem ao longo da costa em quase todo território, cuja utilização pressupõe um conhecimento das suas características assim como a realização de ensaios tecnológicos visando estudar a sua adequabilidade para os diferentes usos propostos.

O calcário é uma rocha com uma ampla variedade de uso e talvez se possa até afirmar que não existem outras rochas com uma variedade de uso tão ampla quanto calcário e dolomito: Essas rochas são usadas na obtenção de blocos para a indústria da construção, material para agregados, cimento, cal e até rochas ornamentais. As rochas carbonatadas e seus produtos são também usados como fluxantes, fundentes, matéria-prima para as indústrias de vidro, refractários, carga, agentes para remover enxofre, fósforo e outros na indústria siderúrgica, abrasivos, correctivos de solos, ingredientes em processos químicos, na pavimentação de vias e calçadas, de entre outros (Sampaio e Almeida, 2005).

Segundo Santos (2008), a utilização de resíduos minerais tem demonstrado ser muito importante no desempenho dos materiais que possuem matrizes cimentícias, tanto nas propriedades no estado fresco quanto no endurecido, como no aspecto da durabilidade (Silva, 2012).

Pelas razões apresentadas, mas também por razões ambientais e face aos desafios colocados ao sector da construção, visando o desenvolvimento sustentável do sector, têm sido realizadas nos últimos anos várias pesquisas, visando estudar a incorporação de resíduos minerais em argamassas e outras massas cimentícias, em substituição parcial do cimento ou da areia. De entre os resíduos minerais mais usados pode-se citar resíduos da indústria metalúrgica, calcários, cinzas de centrais térmicas, cinzas do processamento do bagaço da cana do açúcar e a sílica amorfa resultante de processos industriais, usados individualmente ou combinados para um melhor aproveitamento das suas propriedades (Chang et al., 2005; Mikhailova et al., 2013; Torkaman, et al., 2014). Estes materiais apresentam uma actividade pozolânica devido, basicamente, a presença de sílica amorfa e a sua elevada superfície específica (Sua-Iam e Makul, 2013; Meddah et al., 2014; Torkaman, et al., 2014).

A incorporação destes resíduos pode contribuir para (Menadi et al., 2009; Mikhailova et al., 2013):

- A poupança da energia dispendida na produção do cimento assim como das emissões de CO<sub>2</sub>;
- A reutilização de materiais tratados como desperdícios;
- A poupança de matérias primas naturais, sendo de destacar as usadas na produção do cimento e as areias. Alguns países vêm experimentando limitações nas suas reservas de areias devido a sua exploração massiva ou as limitadas reservas de que dispõem.

Baseado nestas experiências, foi desenvolvida a presente pesquisa visando o aproveitamento de calcários moçambicanos na substituição parcial do cimento em argamassas, pesquisa conduzida de acordo com os objectivos definidos no capítulo 1.1.

## **1.1 OBJECTIVOS**

### **1.1.1 Geral**

O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo da incorporação de alguns calcários que ocorrem na região sul de Moçambique em argamassas, em substituição parcial do cimento.

### **1.1.2 Específicos**

- Fazer a caracterização química, mineralógica e tecnológica dos calcários e das argamassas produzidas com estas matérias primas, visando determinar a sua potencial utilização;
- Correlacionar os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos com a composição mineralógica dos calcários.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

### 1.2.1 Factos históricos sobre o uso do calcário na construção civil

Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado misturado com areia para produção de argamassas. Os Gregos e Romanos usavam calcário calcinado e aprenderam, posteriormente, a misturar cal, água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos para a construção de infra-estruturas e monumentos. Este foi o exemplo do primeiro betão da história de construção na humanidade (Neville, 1997).

Em 1813, Collet-Descotils, Professor da Escola de Minas de Paris, ao analisar o calcário para a fabricação da cal hidráulica, observou que quando este era atacado por ácidos deixava um resíduo de sílica insolúvel, ao passo que a cal hidráulica atacada pelos ácidos não deixava praticamente nenhum resíduo de sílica. Esta descoberta fundamental mostrava que durante a cozedura tinha havido uma reacção da sílica com a cal. Collet-Descotils atribuiu ao composto assim formado as propriedades hidráulicas da cal. Estava então aberto o caminho para a obtenção do cimento artificial (Coutinho, 2012).

Coube mais tarde a Louis Vicat a glória de ter compreendido as causas do endurecimento dos cimentos e das misturas da cal e pozolana na água, seguindo a linha de raciocínio que vinha de Smeaton e Collet-Descotils.

Com efeito, por meio de numerosas análises químicas mostrou que toda a cal hidráulica provinha de calcários argilosos e que, reciprocamente, todos os calcários que continham uma proporção conveniente de argila, podiam servir para a fabricação de cal hidráulica. Compreende-se assim que para se obter ligantes hidráulicos ou cimentos, não era necessário que a argila estivesse já naturalmente incorporada no calcário. Misturando a argila com calcários finamente moídos e cozendo essa mistura, era possível obter, por outra via, o que naturalmente se conseguia pela cozedura de calcários argilosos. Este facto fundamental levou Vicat à preparação dos cimentos artificiais, sendo por isso considerado o inventor do cimento artificial (Coutinho, 2012).

A denominação do cimento usualmente conhecida na construção civil é o cimento portland. Ele foi criado e patenteado em 1824 por um construtor inglês, chamado Joseph Aspdin. Era modismo na Inglaterra, construir com uma pedra, de cor acinzentada originária da ilha de

Portland. Devido ao bom desempenho e semelhança, tanto de cor como de dureza, a invenção bem sucedida de Aspdin foi patenteada com o nome de cimento portland (Araujo et al, 2000).

O cimento portland artificial é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e outros componentes presentes em quantidades menores (Coutinho, 2012).

A mistura das matérias primas básicas (calcário e argila) é doseada de tal modo que, depois de perder a água e o dióxido de carbono, devido à elevada temperatura atingida no forno, a mistura obtida tenha uma composição química dentro dos limites seguintes:

- 60 a 68% de CaO; 17 a 25% de SiO<sub>2</sub> ; 2 a 9% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,5 a 6% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Além destes componentes principais, a matéria prima contém ainda metais alcalinos, magnésio, manganês, titânio, fosforo e, eventualmente sulfatos em teores que podem perfazer .0 a 2% de MgO; 0,5 a 1,5% de K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O (Coutinho, 2012).

Sob a acção do calor, os componentes da matéria prima sofrem transformações e reacções químicas que levam à formação dos componentes principais do cimento portland, os quais cristalizam em elementos mais ou menos individualizados, enumerados a seguir, com indicação de percentagens que geralmente ocorrem (Coutinho, 2012):

- silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S - 20 a 65%);
- silicato bicálcico (C<sub>2</sub>S - 10 a 55%);
- aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A - 0 a 15%) e
- aluminoferrato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF - 5 a 15%).

## 1.2.2 Origem e ocorrência de calcários em Moçambique

Os calcários são rochas sedimentares constituídas essencialmente por carbonato de cálcio que se deposita originalmente sob forma de calcite e aragonite. São rochas formadas pela acumulação de organismos inferiores (por exemplo, cianobactérias) ou precipitação de carbonato de cálcio (por vezes, carbonato de magnésio) na forma de bicarbonatos, principalmente em meio marinho. Também podem ser encontrados em rios, lagos e no subsolo (cavernas).

Os calcários magnesianos ou dolomíticos foram formados pela substituição, no próprio calcário calcítico, do cálcio pelo magnésio oriundo de águas com elevado teor de sais de

magnésio. Muito embora vários depósitos de dolomita aparentam ter origem na co precipitação de ambos os carbonatos, a teoria da substituição dos metais ainda é aceite (Sampaio e Almeida, 2005).

A calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) é o principal constituinte dos calcários e mármore com elevada pureza. O calcário encontrado extensivamente em todos os continentes é extraído de pedreiras ou depósitos. As reservas de rochas carbonatadas são grandes e intermináveis, entretanto a sua ocorrência com elevada pureza corresponde a menos de 10% da reservas exploradas em todo mundo (Sampaio e Almeida, 2005).

Moçambique possui ocorrências e depósitos de calcários, principalmente nas regiões sul e centro do país. Contudo, a sua aplicação e exploração vinha sendo muito limitada devido a falta de estudos prévios sobre a caracterização (Afonso e Marques, 1993). Esta situação parece estar a inverter-se com o surgimento de grandes investimentos que têm estado a levar a implantação de unidades produtivas para a produção do cimento.

Magaia, L. T., (2010), desenvolveu um estudo visando determinar as potenciais aplicações e qualidade dos calcários de Moçambique, em função da sua caracterização e textura das secções polidas.

Segundo Afonso e Marques (1993) os calcários sedimentares são abundantes nas formações mesozóicas e cenozóicas de Moçambique. Destas, as mais produtivas, são as do terciário. É desse exemplo a formação de Salamanga, que ocorre a sul do Maputo, a formação de Cheringoma ao longo do rio Búzi, e a formação de Jofane, que se estende ao longo do troço a jusante do rio Save e a sul do mesmo rio. As formações calcárias do Quaternário, embora ocorram em pequeno afloramento ao longo do litoral, entre Maputo e Beira, contêm um alto teor em carbonato de cálcio.

Finalmente as formações mesozóicas são de fraco valor económico, dado que os afloramentos calcários são pequenos e com um teor em carbonato de cálcio relativamente baixo.

Das jazidas de calcário acima referenciadas salientam-se a seguir as que ficam próximo aos centros consumidores: depósito de Cheringoma, do Búzi, de Salamanga e de Inhambane, e ainda ocorrências de Magude, Mapulanguene, Sábie, Massingir, Inharrime, Massinga, Vilanculo, Pemba, Mocímboa da praia, e Nacala (figura 1) (Afonso e Marques, 1993).

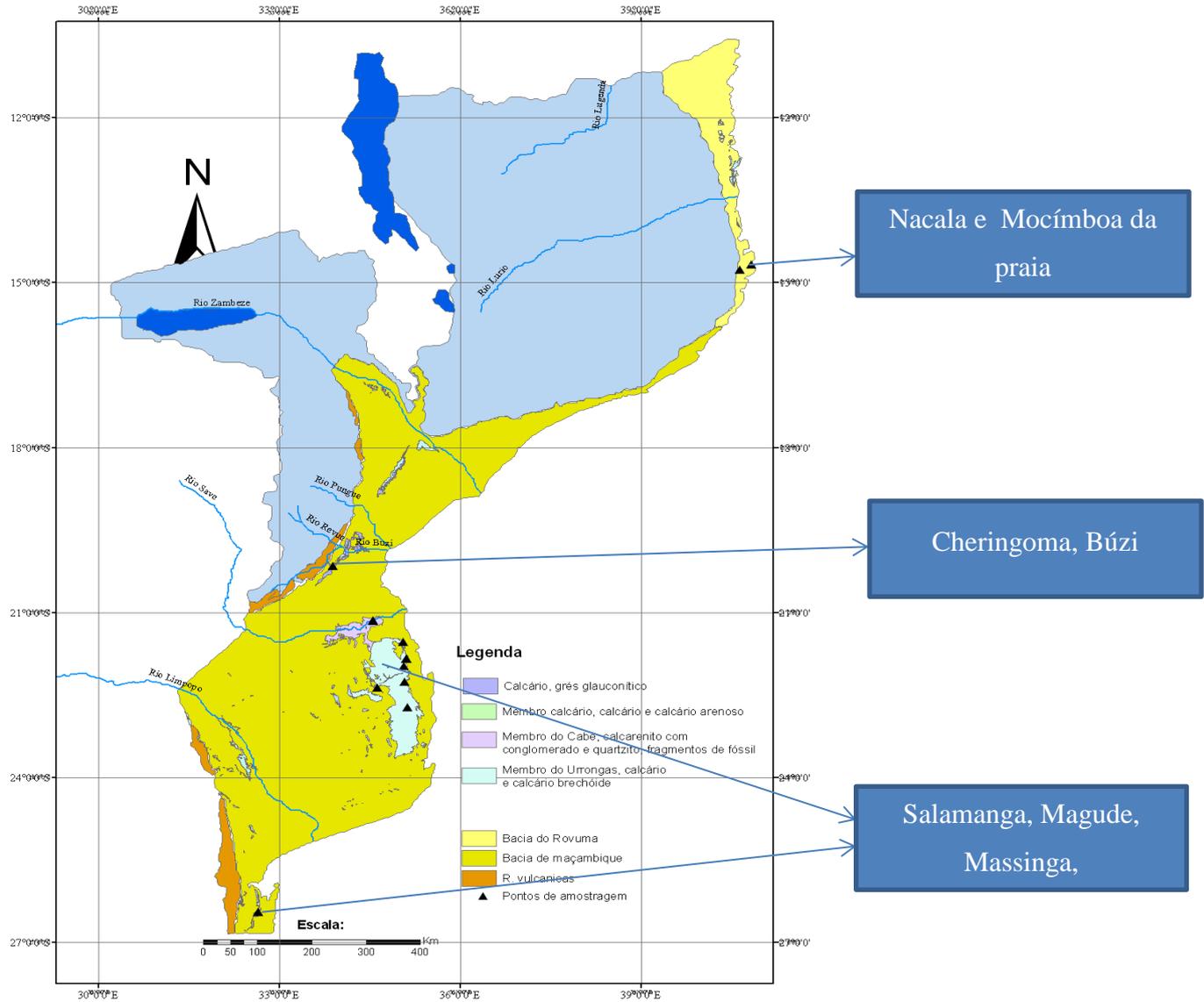


Figura 1 - Principais depósitos de calcários em Moçambique

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 CALCÁRIOS

Os calcários podem ser classificados e diferenciados de acordo com os teores de óxido de cálcio e de magnésio que apresentam a sua composição, conforme a tabela 1 (Moura et al, 2014).

Tabela 1 - Classificação de calcário de acordo com teores de óxido de cálcio e magnésio.

Classificação de calcários		
Tipo	% de CaCO <sub>3</sub>	% de MgO
Calcítico	45 a 55	< 5
Magnesiano	31 a 32	5 a 12
Dolomítico	25 a 45	> 12

O calcário para uso na indústria de cimento deve ter elevado teor de CaCO<sub>3</sub>, baixos teores em SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e, baixo teor de MgCO<sub>3</sub> sendo muito difícil encontrar no estado natural como apresenta a tabela 2. O carbonato de magnésio e as argilas constituem as impurezas mais comuns dos calcários na natureza (Ambrósio, 1974 citado por Almeida e Sampaio, 2005).

Tabela 2 - Composição química típica de um calcário para fabricação de cimento

Óxidos	%	Óxidos	%
PPC	37.35	MgO	1.19
SiO <sub>2</sub>	9.40	SO <sub>3</sub>	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	K <sub>2</sub> O	0.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	Na <sub>2</sub> O	0.12
CaO	47.40		

## 2.2 Efeito do calcário nas propriedades de argamassas e outros materiais

Galetakis et al. (2012) realizaram um estudo sobre o aproveitamento do pó de calcário gerado durante o processo de serragem da pedra calcária para produção de blocos de construção de suporte de carga, onde os materiais utilizados para a preparação das amostras foram o pó de pedra calcária, areia britada, produzida pela mesma pedreira, pedra de lodo e cimento Portland. Estes produziram seis provetes cilíndricos formulados para cada mistura, designados por:

- M2: 30% de mistura de lamas de pedra, 20% de pó branco de calcário, 50% de areia de pedreira e cimento;
- M3: mistura de quantidades iguais de pó branco de calcário, areia esmagada da mesma pedreira e cimento; e
- Prepararam também misturas de pó de calcário e cimento designado por M0, para efeitos de comparação.

Estas amostras foram curadas por 28 dias, de acordo com o regulamento grego de betão e as suas propriedades mecânicas e físicas testadas. Os resultados dos testes laboratoriais indicaram que a adição de lodo de pedra e areia de pedreira melhorou significativamente as propriedades físicas e mecânicas de provetes fabricados (M2, M3) em comparação com obtidos de pó de calcário misturado com cimento (M0). Quanto a resistência á compressão os valores de M2 e M3 crescem perfazendo 115% e 136%, respectivamente, quando comparados com a composição de referência. A densidade também aumentou em 8,67% e 13,78%, enquanto que a absorção de água diminuiu em 15,55% e 25,55% respectivamente.

Provetes fabricados a partir da composição M3 deram uma resistência á compressão ligeiramente maior, uma maior densidade e menor absorção de água em relação a M2. Com base nos resultados de laboratório estes sugeriram misturas M2 e M3 para a produção de unidades de construção de suporte de carga sólidas. No entanto a conclusão final sobre a adequação das misturas M2 e M3 para a produção de blocos de construção de suporte de carga poderia ser elaborada após a realização de um programa de investigação adicional incluindo a fabricação de unidades em escala industrial (Galetakis et al., (2012).

Mahrous *et al* (2010), fizeram um estudo sobre avaliação das propriedades de engenharia de algumas pedras de calcários egípcios como materiais de construção para a pavimentação de estradas, onde as amostras de calcários de oito depósitos no Egipto foram submetidas a testes,

tendo avaliado as suas características mecânicas e a composição mineralógica. Os resultados mostraram que três destes depósitos, contêm calcários com alta resistência à tração e são relativamente resistentes à abrasão, o que indica que os calcários dessas áreas são adequados para a pavimentação de estradas.

Turgut e Algin (2007), investigaram o potencial uso da combinação do pó de calcário com resíduo da serragem de madeira para produzir tijolos de baixo custo como material de construção. Algumas das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos obtidos a partir da mistura foram investigadas e verificaram que a resistência à compressão, resistência à flexão, o peso específico, impulso ultra-sônico valores de absorção de velocidade (UPV) e água satisfazem as normas internacionais pertinentes.

Pipilikaki et al (2009) estudaram o desempenho de argamassas da mistura calcário-cimento em um ambiente de sulfatos, onde avaliaram o desempenho da argamassa da mistura calcário-cimento quando imerso numa solução de 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  durante 1,5 anos, comparado com uma de argamassa padrão de cimento Portland. O estudo demonstrou a maior vulnerabilidade da mistura de calcário-cimento em um ambiente de sulfatos. A argamassa de calcário-cimento apresentou as primeiras rachaduras macroscópicas após 6 meses de imersão na solução que se manteve durante toda a experiência. A fissuração grave foi o resultado da expansão causada à argamassa. Por outro lado, o ataque pelos sulfatos no caso das argamassas de cimento Portland nas mesmas condições laboratoriais não foi agressivo. No entanto, mesmo que o clínquer de ambos os cimentos era o mesmo, os produtos da degradação foram realmente diferentes nas duas argamassas. Assim, concluíram que a adição de calcário em cimento leva a um comportamento completamente diferente do que o cimento Portland no que diz respeito à resistência em ambiente agressivo de sulfatos.

Menezes et al. (2010) realizaram um estudo sobre a reutilização do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos, onde o trabalho tinha por objectivo a caracterização do resíduo da serragem da Pedra Cariri e a avaliação de sua aplicabilidade como matéria-prima cerâmica alternativa para a produção de telhas e blocos cerâmicos. O resíduo foi caracterizado através da determinação de sua composição química e mineralógica, por difracção de raios X, análise térmica diferencial, distribuição de tamanho de partículas e análise morfológica por microscopia electrónica de varredura. Foram formuladas composições contendo o resíduo e confeccionados corpos-de-prova por prensagem. Os corpos-de-prova foram queimados e, em seguida, foram determinados a absorção de água e o

módulo de ruptura à flexão. Tendo-se concluído que o resíduo é constituído por calcita e dolomita, que apresenta elevada finura e que é possível a incorporação de até 10% de resíduo em formulações para a produção de telhas e blocos cerâmicos.

Othmane et al. (2001) desenvolveram um estudo sobre a resistência à hidratação da cal refractária do calcário egípcio e ilmenite como matérias-primas onde produziram quatro lotes de cal refractária a partir do calcário puro economicamente disponível em Beni Khaled, El Menia, Egito, fizeram a queima a 1550 ° C, usando um processo de cozedura de duas fases. O minério de ferri- ilmenite existente em Abu Ghalaga, foi adicionado como um material contaminante em quantidades de 0.5, 1.0, 2.0 e 3.0%. Parâmetros de densificação e de resistência a hidratação dos grãos foram investigados. Os grãos com hidratação mais densos resistentes foram seleccionados para avaliar a sua qualidade refractária por meio da determinação de capacidade de carga e resistência ao choque térmico. Estes resultados foram interpretados à luz da composição da fase e da microestrutura dos grãos. Estes investigadores concluíram que a densificação e resistência a hidratação de grãos de cal podem ser processadas por dopagem do pó de calcário puro com 2.0 - 3.0% em peso de ferri-ilmenita antes de disparar até 1550°C.

Ramezaniapour et al. (2009), estudaram a influência da substituição do cimento portland, por quantidades variadas de pó de calcário sobre o desempenho do betão, onde fizeram testes de resistência à compressão, absorção de água, resistividade eléctrica e permeabilidade de cloretos em betões produzidos por meio de uma combinação de cimento portland e pó de calcário durante 20, 90 e 180 dias de cura. As quantidades de calcário que substituíram o cimento portland foram de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em massa. Os autores concluíram que para os materiais em estudo, a substituição óptima de calcário é entre 10% a 15%.

Tsivilis et al. (2002) analisaram as propriedades dos betões do cimento portland de calcário, tendo discutido a cerca dos principais factores que afectam as propriedades de cimento portland de calcário, examinaram o comportamento de hidratação e estudaram também o processo de moagem relativamente á produção destes cimentos. Finalmente as propriedades do betão de cimentos portland de calcário, bem como o comportamento a corrosão da argamassa foram investigados. Estes concluíram que a distribuição das partículas do cimento portland de calcário bem como a finura do clínquer e do calcário, está fortemente relacionada com o teor da pedra calcária e a finura do cimento, os cimentos de calcário indicaram uma resistência satisfatória e, geralmente, exigem menos água do que os relativos cimentos puros.

A adição de calcário melhora a reactividade do clínquer e da exploração do seu potencial hidráulico. Os cimentos portland de calcário indicaram competitivas propriedades do betão e melhoram a durabilidade do mesmo.

Boke et al. (2008) estudaram as características de cal produzida a partir de calcário contendo diatomáceas. Neste estudo utilizaram cal aglutinante em pedra e argamassa em alvenaria de tijolo de alguns banhos históricos Otomanos que foram examinadas para entender se os ligantes eram hidráulicos ou não. Para este efeito, as composições mineralógicas e elementares e da microestrutura de cal aglutinante foram determinadas por DRX, MEV-EDS e análises de ATG. Os resultados deste estudo indicaram que a cal ligante utilizada nas argamassas de alvenaria de tijolo dos banhos era hidráulica. Ao mesmo tempo, nas argamassas de alvenaria de tijolo foi encontrada uma resistência à compressão relativamente elevada. Tendo em conta as condições do forno e combustível do Século 15, foi examinada a possibilidade de obtenção de cal hidráulica por calcinação de calcário que contém compostos de diatomáceas, óxido de silício amorfo à temperatura relativamente baixa. Os resultados mostram que a produção de silicato de cálcio, a uma temperatura relativamente baixa de calcinação (850 ° C) é possível. Considerando este resultado os investigadores concluíram que a cal hidráulica pode ser produzida pela calcinação de calcário contendo diatomáceas com condições de forno do século 15. Novas investigações podem ser feitas para investigar a hidraulicidade de cal em condições de laboratório, verificando a resistência à compressão das argamassas que são preparadas utilizando cal produzida a partir de calcário contendo diatomáceas.

Gozde (2012) levou a cabo um estudo sobre a resistência à compressão e ao ambiente agressivo em sulfatos das argamassas de mistura de calcário e pó de sílica em diferentes níveis de substituição. Para este efeito, foi utilizado uma pedra calcária de 5%, 20%, 35%, e foi usado pó de sílica com proporções de 5%, 10%, 15%, em peso de cimento. Foram formuladas argamassas usando 16 tipos de mistura de calcário e pó de sílica. Os provetes produzidos com as argamassas foram levados a cura aos 2, 7, 28, 90, 180 dias e submetidos aos ensaios de resistência à compressão, e resistência ao sulfato de sódio e magnésio. Concluíram que, o efeito negativo da sílica activa na trabalhabilidade de argamassas pode ser compensado pelo uso de calcário e de fumo de sílica em conjunto. Em argamassas de calcário - fumos de sílica, até certo ponto o fumo de sílica compensou o efeito negativo de calcário na força de compressão de argamassas em idades posteriores. A utilização simultânea de calcário e sílica activa aumentou significativamente a resistência de argamassas aos sulfatos.

As expansões de todas argamassas de misturas foram mais elevadas em solução de sulfato de magnésio em relação as soluções de sulfato de sódio. As melhores argamassas produzidas a partir da mistura de calcário-fumos de sílica para a fluidez, resistência à compressão e resistência aos sulfatos foram obtidos com as misturas: 35 calcário-5 sílica, 5 calcário – 5 sílica e 35 calcário – 15 sílica respectivamente.

Algin e Turgut (2008) estudaram a possibilidade de usar uma combinação de resíduo de algodão e resíduo de pó de calcário para a produção de novo compósito de baixo custo e leve como material de construção. Uma vez que eles constataram que grandes quantidades de resíduos de algodão e calcário são acumulados a partir dos países de todo mundo, onde maior parte dos resíduos de algodão e resíduos de calcário em pó são abandonados, fazendo com que surjam problemas ambientais graves e de saúde pública. Foram investigadas as propriedades físicas e mecânicas de amostras de tijolos formulados com resíduo de algodão e de calcário. Os testes mostram que a combinação fornece resultados satisfatórios, no entanto, durante os testes eles observaram que o efeito das substituições de 10 a 40% não apresenta uma fractura frágil repentina mesmo para além de cargas de falha, e indica alta capacidade de absorção de energia permitindo menor custo de laboração, e cerca de 60% de peso mais leve do que os tijolos convencionais de concreto.

Estes salientaram que os testes realizados e apresentados neste trabalho constituem apenas um primeiro passo de pesquisa em combinações de resíduo de algodão e resíduo de pó de calcário a serem utilizadas como materiais para o fabrico de tijolos, sendo necessários testes adicionais, possivelmente, antes de utilizar os novos tijolos como materiais de construção.

Bederina et al. (2011) fizeram um estudo sobre o efeito das cargas de calcário nas propriedades físico-mecânicas de betão de calcário. Este trabalho enfoca a exploração de locais de resíduos industriais e da sua utilização na formulação de novos betões que podem ser usados em construções locais. Portanto, a pesquisa constitui um trabalho experimental que visa o estudo do efeito da adição de cargas de calcário sobre o comportamento físico-mecânico de betão de calcário. Para realizar este estudo, diferentes proporções de agentes de carga que vão de 0 a 40% foram considerados. Estes constataram que a adição de cargas de calcário melhora a trabalhabilidade do betão, e também melhora a sua resistência mecânica (compressão e flexão). Concluíram que é possível formular betões de calcário tendo boas propriedades físico-mecânicas usando cargas e agregados extraídos a partir de resíduos de calcários locais com substituição até 5%.

Beixing et al. (2009) investigaram o efeito do teor de finos de calcário na areia fabricada na durabilidade de betões de baixa e de alta resistência. Estes estudaram o efeito do teor de calcário fino na areia fabricada (MS), na resistência a compressão, permeabilidade de íons cloreto e resistência ao congelamento-descongelamento de ambos os betões de baixa e de alta resistência. A resistência à abrasão dos betões e argamassas e o ataque por sulfatos também foram testados. Os resultados mostram que para betões de baixa resistência, o incremento de finos de calcária de 0% a 20% melhorou a resistência à penetração de íons cloretos, mas diminuiu a resistência à congelação. Para betões de alta resistência, o incremento de finos de calcária de 0% a 15% não afectou a permeabilidade de íons cloreto e resistência a congelamento-descongelamento. Além disso, a resistência aos sulfatos aumentou devido ao incremento de finos de pedra calcária, e a quantidade de 7% a 10% de finos resultou em maior resistência à abrasão. Concluíram que os betões duráveis podem ser produzidos a partir de areia fabricada com calcários finos até 10%.

Colak (2008), estudou os efeitos do óxido de cromo e de cargas de calcário no desgaste característico de pastas e betões produzidos com cimento Portland branco. Este trabalho se preocupou com as características de perda por desgaste de cargas de calcário misturado em pastas e betões de cimento Portland branco com e sem óxido de cromo. Os resultados indicaram que a perda por desgaste em cargas de calcário misturado com cimento Portland branco é muito elevada, no entanto, a substituição do material de enchimento de calcário na mistura pelo óxido de cromo provocou uma diminuição significativa da perda por desgaste.

### **2.3 Efeito do *filler* nas propriedades do betão fresco e endurecido**

No estado fresco, contribuem para a melhoria na trabalhabilidade, na diminuição da segregação e da exsudação da água e tem ainda um efeito benéfico na fluidez do material (Pontes e Vidal, 2005). Com relação aos tempos de presa e tempo de cura, também não ficam alterados com a incorporação de *fillers*.

A incorporação de aditivos sem actividade pozolânica nos betões confere às propriedades deste no estado fresco várias influências, como: aumento da coesão (Wallevik, 1995, citado por Gonçalves, 2000), diminuição da segregação, minimização da exsudação, podendo ou não aumentar o consumo de água.

Dentre as características do filler que exercem maiores influências no betão estão: finura, forma e massa específica. A finura, caracterizada pelo tamanho médio da partícula, influenciara directamente na demanda de água, no preenchimento de poros capilares e na densificação da zona de transição entre pasta e agregado. Quanto menor for o diâmetro médio das partículas, maior será a água de molhagem, aumentando sua demanda. Como os poros capilares possuem diâmetro de 50nm a 10µm (Campitelli, 1978, citado por Gonçalves, 2000) e a zona de transição tem espessura média de 10 a 50 µm (Metha e Monteiro, 1994, Citado por Gonçalves, 2000), o *filler* poderá colmatar esses e densificar esta zona.

A massa específica também é um outro factor muito importante, pois determina a quantidade de grãos num mesmo volume. Tão importante quanto a finura e a massa específica, é a forma das partículas, pois tanto a forma mais angulosa quanto a forma mais esférica, influenciarão no atrito entre as partículas na mistura e a sua disseminação pelos poros existentes. Associada à forma dos grãos encontra-se também a sua textura, que contribuirão na aderência e atrito entre as partículas.

Soroka e Setter (1977), citado por Gonçalves (2000), adicionaram o filler calcário, dolomítico e basáltico em argamassas e demonstram que há uma aceleração na hidratação devido às pequenas partículas, causando um incremento na resistência aos 28 dias de 39%, 48% e 56%, respectivamente. No caso do *filler* calcário, há formação do carboaluminato de monocalcico (Sawicz e Heng (1996), citado por Gonçalves (2000)).

Nos betões no estado endurecido, as adições influenciam na resistência mecânica, permeabilidade, porosidade, resistência a iões agressivos, reacção alcali-agregado, dentre outras. Os fillers podem influenciar tanto nas propriedades mecânicas quanto na durabilidade.

Com relação às propriedades mecânicas, as maiores influências são nas idades iniciais, por estar difundido em toda mistura, e por apresentarem elevada finura, actuando como pontos de nucleação. Desta forma tende a acelerar o processo de hidratação do cimento e aumentar a quantidade de produtos hidratados. Em idades mais avançadas não há ganhos de resistência, já que não há actividade química (Gonçalves, 2000).

Segundo Gonçalves (2000), a maior contribuição dos fillers está na diminuição da permeabilidade e no refinamento da estrutura de poros. A alta finura contribui para uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia. Esta maior densificação promoverá um ganho de resistência à compressão, porém o ganho na resistência à tração não será proporcional.

No betão endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfico para betões com baixas resistências. Já para betões de elevada resistência este efeito pode ser adverso (Gonçalves, 2000).

A adição de 10% de fíller de calcário em betões com relação  $a/c = 0,70$  e 5% em betão com relação 0,53, apresentaram significativa influência nas propriedades do betão endurecido. Houve um incremento de 8% e 9% respectivamente, na resistência à compressão aos 28 dias e 91 dias (Malhotra e Carette, 1985, citado por Gonçalves, 2000).

Sawicz e Heng (1996), citado por Gonçalves (2000), realizando um trabalho experimental com pó de calcário, verificaram que a resistência à compressão e a porosidade dependem da interação da relação  $a/c$  e do teor de adição. Observaram, ainda, que para relações  $a/c = 0,5$  e  $a/c = 0,60$ , com o incremento do teor há um aumento da resistência e um decréscimo da porosidade. Segundo Penttala e Komonem (1997), citados por Gonçalves (2000), fillers de quartzo estão sendo usados para produção de betão de baixas e médias resistências. Quando se utiliza partículas com dimensão máxima em torno de 0,1mm ocorre um aumento na resistência à compressão e flexão.

### 3 PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental foi realizada no LEM, nos Departamentos de Química e Materiais de Construção e Estruturas. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas Moçambicanas, Portuguesas e Brasileiras.

O objecto desta investigação consistiu no estudo da substituição parcial do cimento por *filler* de calcário em argamassas, avaliada a partir do comportamento físico e mecânico das argamassas produzidas. No desenvolvimento do trabalho experimental foram formuladas argamassas (ligante, agregado, calcário e água), mantendo-se constantes os teores dos elementos constituintes, e variando apenas a percentagem de cimento, que foi substituído por percentuais de filler de calcário. Com estas formulações pretende-se avaliar a percentagem máxima de filler que pode substituir o cimento nas argamassas, sem comprometer o seu desempenho mecânico através de ensaios realizados aos 28 dias de idade de cura.

De modo a aferir o desempenho das argamassas quando submetidas à diferentes ensaios no estado endurecido, optou-se por produzir provetes prismáticos e submetê-los aos ensaios tecnológicos.

Neste capítulo faz-se uma descrição dos ensaios realizados sobre os constituintes das argamassas e sobre as argamassas produzidas, não tendo como finalidade uma descrição exaustiva dos procedimentos experimentais, mas fazer uma ilustração das metodologias adoptadas na realização de diversos ensaios, sendo pertinente estabelecer o enquadramento das referências normativas neste contexto. Para além da apresentação da metodologia seguida nos ensaios realizados, apresentam-se também no presente capítulo, e onde for relevante, as expressões para o cálculo das grandezas de interesse.

#### 3.1 METODOLOGIA DO TRABALHO DE ENSAIOS

##### 3.1.1 Amostragem

As amostras de calcário foram colhidas em três pontos da zona sul de Moçambique, concretamente nas províncias de Maputo e Inhambane, nos distritos de Magude, Salamanga e Massinga respectivamente. As amostras colhidas em pontos distintos das reservas, foram

conservadas em sacos de rafia e referenciadas de acordo com a sua proveniência, de seguida transportadas para o LEM onde foi executada a parte experimental.

Apresenta-se na figura 2 o fluxograma descritivo dos ensaios realizados no âmbito da presente pesquisa.

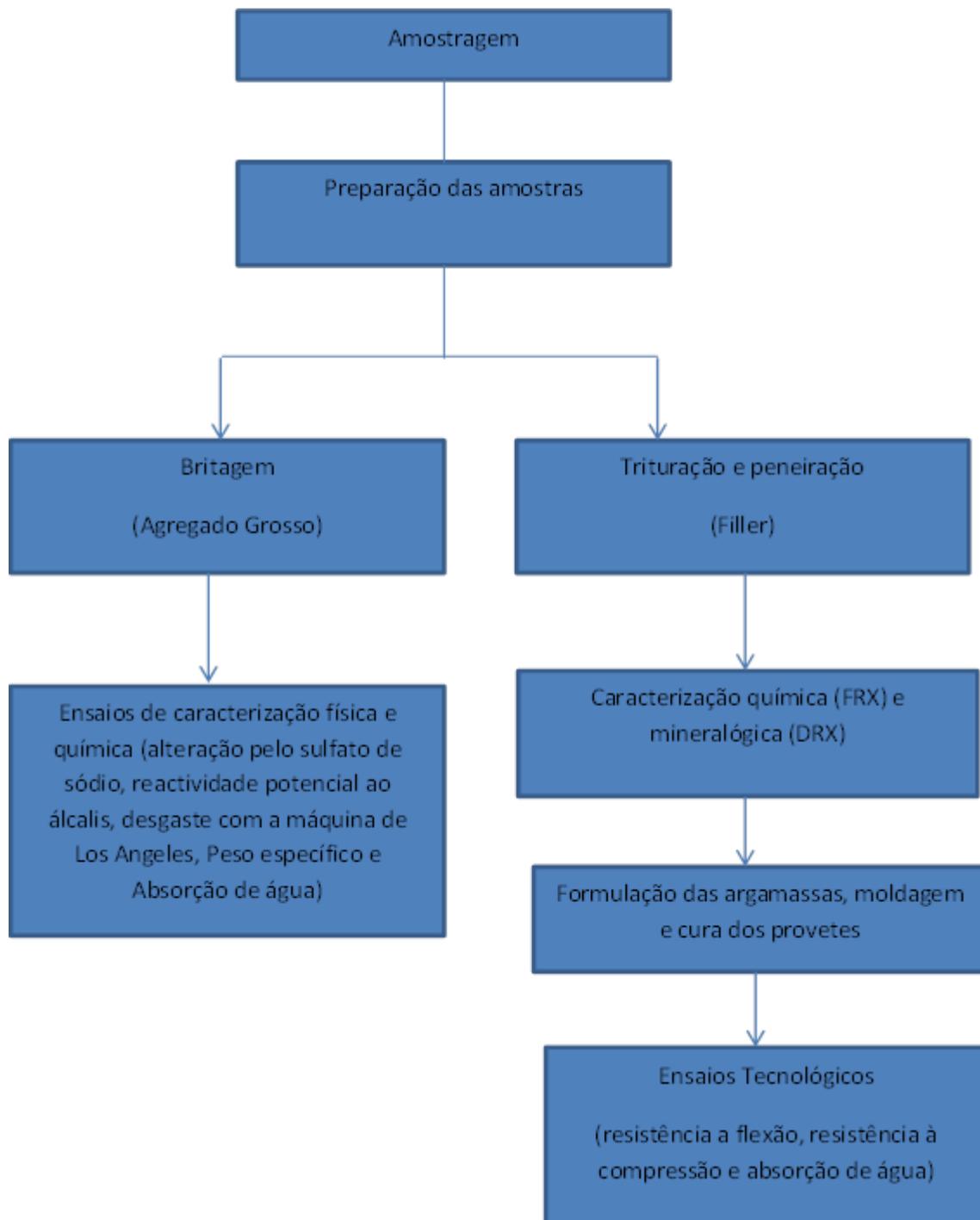


Figura 2 - Fluxograma dos ensaios realizados nesta pesquisa

As amostras foram identificadas de acordo com a sua proveniência, tendo a seguinte designação:

- Amostras do jazigo de Magude – MG1 e MG2;
- Amostras do jazigo de Salamanga – SL1 e SL2 e
- Amostras do jazigo de Massinga – MS1 e MS2.

As referências 1 e 2 em cada uma das amostras referem-se a amostras colhidas em diferentes pontos do mesmo jazigo.

### 3.1.2 Pré – Tratamento das amostras

Após a colheita as amostras foram submetidas a um pré-tratamento que consistiu na britagem, uma de cada vez com ajuda do britador mecânico, e parte das amostras foi reduzida a pó usando um triturador, e por fim peneiradas com ajuda de um peneiro de 150 $\mu$ m, (figura 3) e conservadas em frascos bem secos, limpos e devidamente referenciados.



Figura 3 – Peneiro de 150 $\mu$ m

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Após o pré - tratamento, as amostras de calcários foram submetidas a caracterização Química, Mineralógica, Físico-Mecânica e Tecnológica.

### 3.2.1 Determinação da composição química dos calcários

A caracterização química das amostras consistiu na determinação da composição química, alteração pelo sulfato de sódio, que determina a resistência de um agregado quando submetido a ambientes agressivos, e da reactividade potencial.

### 3.2.2 Fluorescência de raio X

A fluorescência de raios X compreendeu a determinação da composição química em termos de óxidos dos elementos principais que compõem a amostra.

### 3.2.3 Determinação da alteração pelo sulfato de sódio

O ensaio de alteração pelo sulfato de sódio, consistiu na molhagem e secagem das amostras por imersão dos calcários na solução saturada de sulfato de sódio em cinco ciclos, à temperaturas controladas de 20<sup>0</sup>C e 105<sup>0</sup>C. Este ensaio permite-nos avaliar a resistência dos agregados a ambientes agressivos, através da sua alterabilidade quando sujeito a agentes climáticos, segundo a norma *ASTM C 88 – 73 (1976)*. De acordo com esta norma depois da crivagem em peneiros específicos os agregados são lavados em água da rede pública e secos à temperatura ambiente durante 24 horas, depois seguem os ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio a uma temperatura de 20<sup>0</sup>C e secagem na estufa a 105<sup>0</sup>C.

### 3.2.4 Determinação da reactividade potencial

Este ensaio consistiu no tratamento do provete por um volume determinado da solução de hidróxido de sódio, filtração e determinação da alcalinidade de uma alíquota do filtrado, e

insolubilização da sílica contida noutra fracção do filtrado, pela acção do ácido clorídrico. A reactividade potencial de certos agregados é avaliada em função da redução da alcalinidade e da concentração em sílica, segundo a norma NP I – 882 (1968).

### **3.3 DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA MINERALÓGICA**

#### **3.3.1 Difraccção de Raio X**

Para a caracterização mineralógica usando método da Difraccção de Raios-X as amostras foram preparadas pelo método *backloading*, e fez-se a análise usando um difractometro de marca PANalytical Empyrean com dectetor Pixel e fendas fixas de Fe e filtros de radiação Co –  $K\alpha$ , cujos resultados quantitativos de cada fase e expressos de forma percentual em peso foram estimados pelo método de Rietveld.

### **3.4 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS**

A caracterização físico-mecanica das matérias primas foi realizada através da determinação da distribuição granulométrica, massa específica e absorção da água, baridade e desgaste à máquina de Los Angeles.

#### **3.4.1 Análise granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma NP-1379, com ajuda de peneiros ASTM. A análise consistiu na crivagem e pesagem do agregado retido no crivo imediatamente inferior. Após a pesagem foram determinadas as percentagens do agregado retido, percentagem do agregado acumulado e percentagem total do agregado que passa.

#### **3.4.2 Determinação da Massa específica, absorção de água e Baridade**

Para a detrminação da massa específica e absorção de água foi uasada a norma NP-581 1969. Uma amostra representativa obtida por esquartelamento foi tomada, e submetida a pesagens sucessivas, da amostra seca, saturada com água mas com a superfície seca com ajuda de um

pano e da amostra seca em uma estufa a 105<sup>0</sup>C por um período de 24 horas. Os resultados obtidos serviram de base para a determinação da percentagem das massas volúmicas e da absorção de água dos agregados.

A determinação da baridade realizou-se com base na norma NP-955 1973. Para a determinação usou-se um cilindro metálico com um peso igual a 15000g e um volume de 15260L de capacidade, foram feitas três compactações de 25 pancadas cada com ajuda de um varão de aço, de modo a garantir a melhor arrumação das partículas do agregado, e por fim foram feitas três determinações para cada amostra e calculada a média.

### **3.4.3 Desgaste à máquina de Los Angeles**

Este método determina a perda por desgaste sofrida por um agregado quando submetido ao ensaio na máquina de los Angeles, segundo a norma LNEC E 237.

## **3.5 Preparação das argamassas e dos provetes**

Neste trabalho foram usadas duas classes de cimento portland na preparação das argamassas, cimento 32.5N e 42.5N (CEM II / B – L) por razões de comparação. A escolha deste tipo de cimento deveu-se ao facto de ser o cimento mais disponível no mercado nacional e o mais usado em obras de construção civil. O cimento foi comprado em um dos estabelecimentos de revenda de materiais de construção e mantido nos respectivos sacos em salas climatizadas até o momento do seu uso. Foi submetido à caracterização química, pelo método da Fluorescência de Raios X, e a determinação da massa específica e da expansibilidade, realizados com base na norma NP EN 196-3-1996.

As argamassas foram formuladas a partir da substituição parcial de cimento por diferentes teores de filler de calcário, como mostra a tabela 3. Um total de 74 argamassas foram preparadas, das quais 72 com adição de calcário e 2 sem adição consideradas argamassas de referência que serviram como parâmetro de comparação, para cada classe de cimento portland.

Tabela 3 - Proporção dos diferentes materiais nas composições para a produção das argamassas

Designação	Teor de substituinte		Cimento (g)	Areia (g)	Água (ml)
	(%)	(g)			
Ar	0	0	450	1350	225
F10	10	45	405		
F15	15	67.5	382		
F20	20	90	360		
F25	25	112.5	337.5		
F30	30	135	315		

As areias usadas foram secas na estufa a uma temperatura de 105°C até a massa constante, arrefecidas até a temperatura ambiente. As quantidades de cada constituinte por argamassa constam da tabela 3. Todos os materiais constituintes das argamassas em estudo, nomeadamente cimento, areia e pó de calcário foram medidos com auxílio de uma balança analítica com capacidade de carga de 8000g e resolução de, 0.1g, de marca ADAM, modelo CBK 8H. A água medida com ajuda de uma proveta graduada de 500ml de capacidade. Para manter as condições de humidade dos materiais desde que são armazenados até ao instante que são retiradas as proporções pretendidas para a produção das argamassas, tanto os ligantes bem como os agregados foram conservados dentro de um recipiente de plástico bem selado, com tampa vedante.

O processo de preparação das argamassas foi realizado de acordo com a NM NP EN 196-1:2000. Na produção das argamassas utilizaram-se como utensílios balança electrónica, tabuleiros metálicos para a pesagem dos materiais sólidos, raspadeira de borracha, uma proveta para medir a quantidade de água recomendada e misturador mecânico (figura 4).



Figura 4 - Misturador mecânico

Antes fez-se a pesagem de todos os constituintes das argamassas, de modo a garantir que a quando do processo de mistura, todos os componentes necessários se encontrem disponíveis nas devidas proporções, no sentido de garantir que tudo esteja preparado para o arranque da produção da argamassa. Após a pesagem dos materiais introduziu-se água, o cimento, o pó de calcário e a areia na panela do misturador nas proporções pré definidas na tabela 3. De seguida ligou-se o misturador começando por funcionar em movimentos lentos ( $140 \pm 5$  r.p.m.) passado um minuto o misturador passou a executar movimentos mais rápidos ( $285 \pm 10$  r.p.m.) e misturou-se os materiais por mais dois minutos. Ao fim do tempo referido o misturador cessa os movimentos e amassadura fica pronta para a produção imediata dos provetes.

### 3.5.1 Preparação dos provetes prismáticos

A preparação dos provetes prismáticos baseou-se no preenchimento de moldes, feitos na base de aço, que permitem a execução de três provetes prismáticos de dimensões de  $160 \times 40 \times 40$  [mm<sup>3</sup>] de cada vez (figura 5). A compactação das argamassas dentro dos moldes para a moldagem dos provetes prismáticos foi realizada mecanicamente numa mesa de compactação. Imediatamente após a moldagem dos prismas, os moldes com argamassa ainda no estado fresco foram para uma câmara condicionada, a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  onde permaneceram por 24 horas, depois foram desmoldados com ajuda de uma barra metálica.

Inicialmente unta-se as superfícies dos moldes com óleo mineral, que serve de material lubrificante. Posiciona-se o molde e fixa-se as extremidades ao compactador (figura 6), com

ajuda de uma colher de pedreiro introduz-se a argamassa no molde até a metade da sua capacidade (meia altura do compartimento). Com auxílio de uma espátula metálica faz-se a distribuição da argamassa em camada uniforme, esta operação é feita na posição vertical e com movimento vaivém. Liga-se o aparelho para a compactação da primeira camada, submetendo-a a 60 pancadas e depois completa-se o enchimento do molde, com um ligeiro excesso, distribuindo a segunda camada conforme foi efectuado para a primeira camada, recorrendo a uma espátula de menor comprimento.



Figura 5 - Moldes com argamassa na câmara húmida



Figura 6 - Compactador mecânico

Acciona-se novamente o aparelho, submetendo a argamassa a mais 60 pancadas para a compactação da segunda camada. Retira-se o molde do aparelho e remove-se seguidamente os excessos de argamassa e alisa-se superfície com ajuda da colher de pedreiro na posição vertical e movimentos ligeiros de um lado para o outro. Finalmente identificam-se os moldes segundo a designação de cada argamassa, data de produção e a respectiva idade de cura, para efeitos de organização dos moldes na camara condicionada da figura 5, por 24 horas a temperatura ambiente.

Após 24 horas desmolda-se os provetes e são levados a cura em água corrente em tanques apropriados, figura 6, onde permanecem até atingir a respectiva idade de cura e retira-se para realização dos ensaios tecnológicos.

Foram produzidos por amostra um total de trinta e dois provetes, o que corresponde a nove provetes por proporção e ensaiados três para cada idade de cura de 2, 7, 14 e 28 dias, como ilustrado na figura 7.



Figura 7 - Provetes em cura no tanque de água

### 3.6 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

#### 3.6.1 Resistência à flexão

Este ensaio tem como objectivo determinar a carga máxima de rotura por flexão. Os provetes são sujeitos a uma carga que actua no centro de dois apoios. A carga é aplicada de forma gradual e a velocidade constante. Na figura 8 está patente a prensa usada para realização do ensaio. O valor da carga deflexional é calculado pela expressão seguinte:

$$\delta_F = 0.001148 * F \quad (1)$$

Onde  $\delta_F$ - a resistência a flexão [MPa] e  $F$  - a carga aplicada [N/mm<sup>2</sup>]



Figura 8 - Prensa usada para o ensaio de resistência à flexão

### 3.6.2 Resistência à compressão

Este ensaio tem como propósito testar a carga máxima suportada pelos provetes até a sua rotura. Na figura 9 está patente a prensa usada para o ensaio da compressão. O valor da resistência à compressão é dado pela seguinte expressão:

$$\delta_c = 0.000625 * F \quad (2)$$

Onde  $\delta_c$  - resistência à compressão [MPa] e  $F$  - a carga aplicada [N/mm<sup>2</sup>].



Figura 9 - Prensa usada para o ensaio de resistência à compressão

### 3.6.3 Absorção de água

Este ensaio serve para determinar a permeabilidade através da imersão em água dos provetes em condições específicas. A permeabilidade está directamente ligada ao poder absorvente dos materiais, este ensaio de acordo com o nível de absorção da água dá-nos uma ideia do quanto permeável é o material.

Segundo a norma NBR 9778 (1987), os provetes são secos em estufa à temperatura de 105<sup>0</sup>C por um período de 72 horas e arrefecidos à temperatura de 23<sup>0</sup>C de preferência em dessecador, depois segue a imersão dos provetes em água corrente à temperatura de 23<sup>0</sup>C, durante 72 horas. Enxuga-se a superfície da amostra com toalha absorvente e determina-se a percentagem de absorção de água de acordo com a fórmula (3).

O valor da absorção de água é dado em forma de percentagem (%) e é calculado pela seguinte expressão matemática:

$$\%A.A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

$M_{sat}$ : é a massa do corpo de prova saturado e,

$M_s$ : a massa do corpo de prova seco em estufa.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Composição química e mineralógica

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos na caracterização química das seis amostras de calcários (MG1, MG2, SL1, SL2, MS1 e MS2) e dos dois tipos de cimento usados (32.5N e 42.5N), obtidos pelo método de Fluorescência de Raios X, em termos de percentagem dos óxidos dos elementos principais.

Tabela 4 - Composição química das matérias primas

Fase	Calcários						Cimento	
	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2	32.5N	42.5N
CaO	28.99	25.97	49.47	48.48	54.68	54.84	61.19	57.76
SiO <sub>2</sub>	26.79	22.54	5.00	5.61	1.98	2.85	13.90	19.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.33	4.21	1.14	1.05	0.70	1.02	2.80	6,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.19	2.00	0.77	3.65	0.35	0.55	3.10	2.67
MgO	4.49	11.47	0.63	0.67	0.29	0.28	0.93	1.84
SO <sub>3</sub>	0.04	0.14	0.04	0.02	<0.01	0.01	3.28	4.30
Na <sub>2</sub> O	0.36	0.29	0.18	0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.03
K <sub>2</sub> O	0.83	0.53	0.40	0.56	0.18	0.18	0.67	0.59
PR	28.75	32.99	40.29	39.27	41.98	41.65	12.06	5.27

A tabela 5 apresenta os resultados da determinação semi-quantitativa das fases presentes nas amostras de calcários, obtidos pelo método de Difraccção de Raios X.

Tabela 5 - Composição mineralógica semi-quantitativa dos calcários

Fase	Resultados (%)					
	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
Calcite	33.00	3.86	95.71	94.58	98.24	98.70
Montmorilonite	1.74	0.31	-	-	-	-
Quartzo	11.82	8.95	4.29	5.42	1.16	1.30
Dolomite	43.60	80.06	-	-	-	-

Apresenta-se na figura 10, o espectro da amostra MG1, onde se observa um pico intenso que mostra que estes calcários contêm uma maior percentagem de dolomite, tendo outros minérios presentes em quantidades mais baixas. Os restantes espectros de Difração de Raios X referentes as outras amostras estudadas são apresentados nas figuras em anexo.

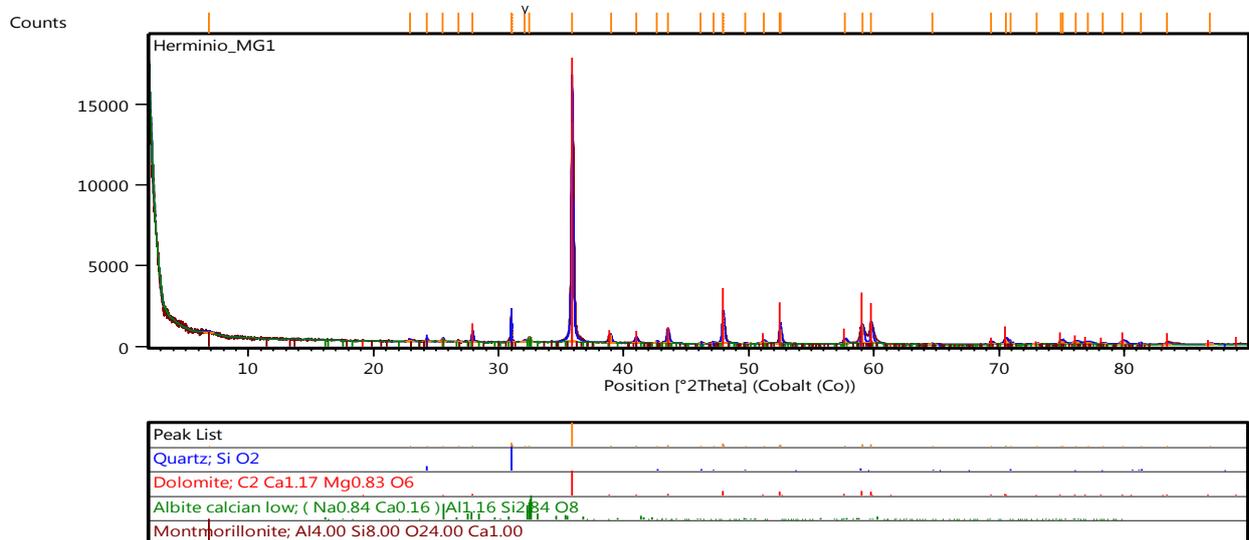


Figura 10 - Espectro de raios X da amostra MG1

#### 4.2 Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio

O ensaio destina-se a determinar a alteração sofrida por um agregado devido as condições de baixas temperaturas, simulado através da cristalização de uma solução saturada de sulfato de sódio. A tabela 6 apresenta os resultados quantitativos obtidos no ensaio das amostras MS1, MS2, SL1 e SL2, após os cinco ciclos de imersão na solução saturada de sulfato de sódio e secagem.

Tabela 6 - Perda total de massa das amostras MS1, MS2, SL1 e SL2

Referência das Amostras	Perda total de massa (%)
MS1	8.30
MS2	10.97
SL1	15.89
SL2	16.40
<b>Perda total de massa admissível</b>	<b>≤ 12%</b>

As amostras MG1 e MG2 degradaram-se por esfarelamento durante a imersão na solução saturada de sulfato de sódio e provou-se que se tratava de calcários não consolidados contendo impurezas argilominerais. Por esta razão, os valores da perda de massa das amostras MG1 e MG2 não são apresentados na tabela 6.

### 4.3 Reactividade potencial aos alcális

Durante a formação da presa de betões, os agregados aplicados devem ser não reactivos (inertes) em contacto com os alcalis resultantes da hidrólise dos óxidos constituintes do cimento. Na determinação da reactividade potencial aos alcális, trabalhou-se com as amostras que deram resultados satisfatórios no ensaio de alteração pelo sulfato de sódio (MS1 e MS2).

Para a determinação da reactividade potencial aos alcális determinou-se a redução da alcalinidade e a concentração em sílica, cujos resultados são apresentados na tabela 7, para de seguida se marcar no gráfico da figura 11 os pares de valores “redução da alcalinidade versus concentração em sílica”, para a localização de cada amostra. As amostras a esquerda da linha contínua no diagrama da figura 11 são consideradas como agregados não reactivos e os pontos localizados a direita como agregados reactivos.

Tabela 7 - Resultados da reactividade potencial aos álcalis nas amostras MS1 e MS2

<b>Identificação das amostras</b>	<b>Redução de Alcalinidade</b> (milimoles/dm <sup>3</sup> )	<b>Concentração em Sílica</b> (milimoles/l)	<b>Observações</b>
MS1	315.00	17.98	Agregado não reactivo
MS2	245.00	18.32	Agregado não reactivo

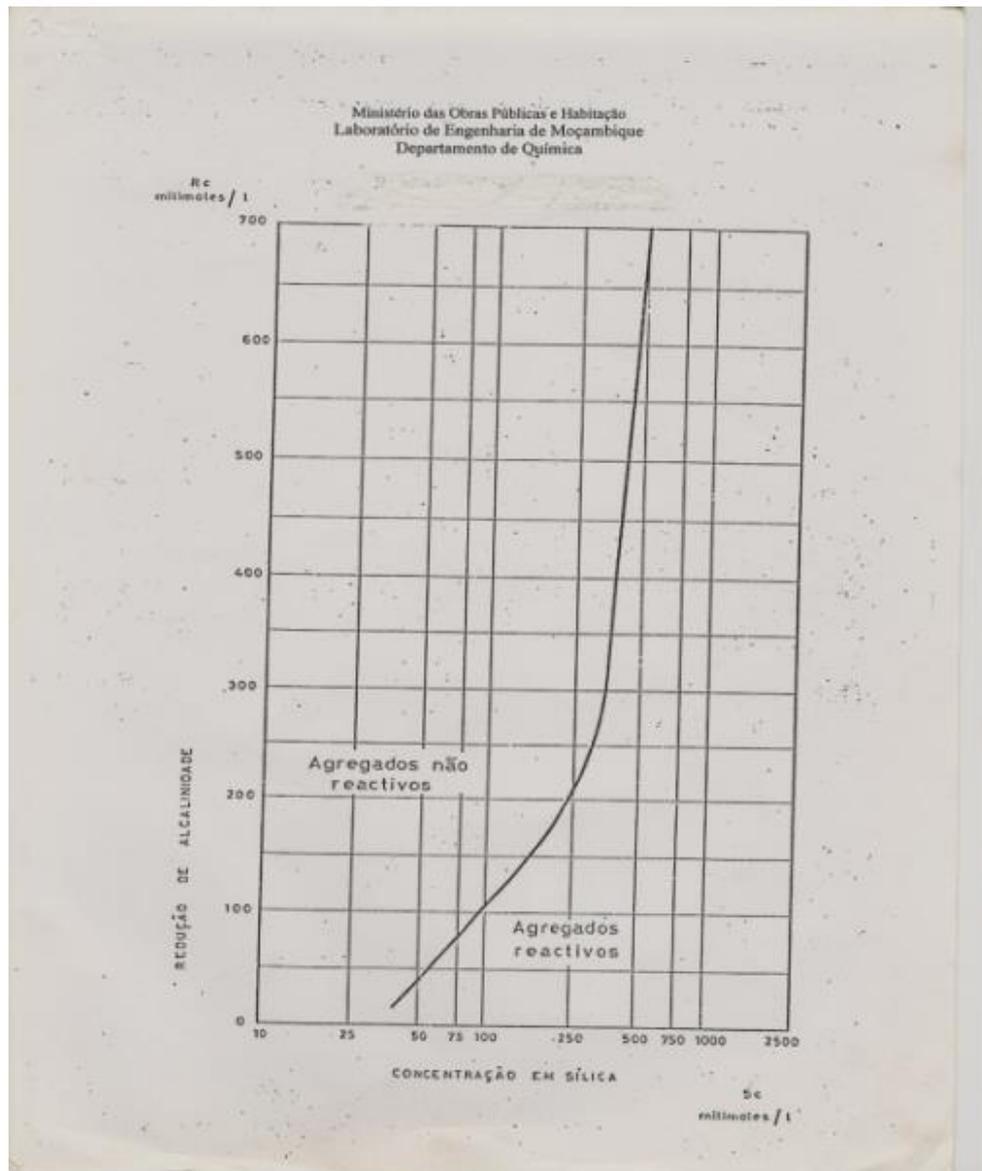


Figura 11 - Gráfico para a determinação da reactividade potencial

#### 4.4 Distribuição granulometria da areia

A tabela 8 apresenta os resultados da análise granulométrica da areia usada na preparação das argamassas. Observa-se que as partículas do inerte apresentam uma dimensão máxima de 2.36mm e mínima de 0.03mm com módulo de finura de 3.40%. O módulo de finura é a média ponderal do inerte que dita se o inerte é: grosso, médio ou fino. Para o caso da amostra analisada neste estudo pode-se concluir que trata-se de uma areia grossa, recomendável para preparação de argamassas de cimento. Estes dados são apresentados na forma gráfica na figura 12.

Tabela 8 - Caracterização granulométrica da areia (NP 1379-1976)

Abertura dos peneiros (mm)	Peso retido (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem retida + acumulada (%)	Percentagem passada (%)
9.5				100
4.75	1.1	0.32	0.32	99.68
2.36	14.7	4.21	4.53	95.47
1.18	142.8	40.91	45.43	54.57
0.6	152.8	43.77	89.20	10.80
0.3	31.2	8.94	98.14	1.86
0.15	5.3	1.52	99.66	0.34
0.075	1.2	0.34	100.00	0.00
< 0.075	0	0.00	100	0
Total	349.1			
<b>Módulo de finura</b>			3.4	
<b>Classe da areia (mm)</b>			2.36/0.300	

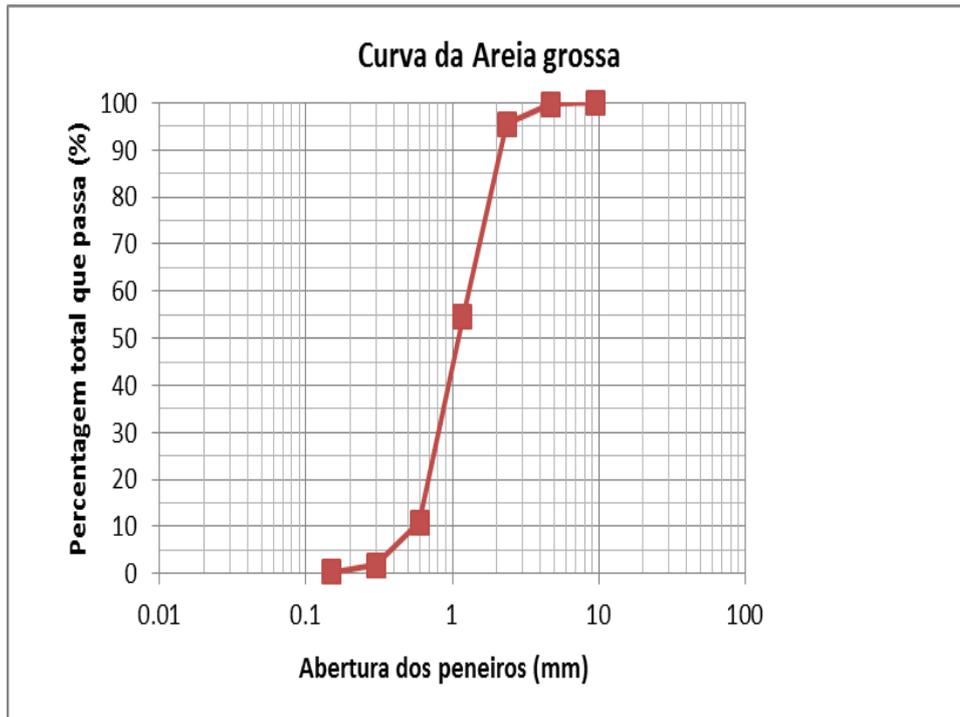


Figura 12 - Curva granulométrica da areia usada na formulação das argamassas

#### 4.5 Absorção da água, densidade, baridade e desgaste de Los Angeles

A tabela 9 apresenta os resultados da absorção de água, massa específica, baridade e desgaste a Los Angeles dos calcários e da areia. Observa-se que as amostras MS1 e MS2 apresentam valores baixos de absorção e de desgaste de Los Angeles em comparação com as restantes amostras. Nota-se também, na tabela 9 que em termos de massa específica e baridade não se verificou grande diferença entre as amostras.

Tabela 9 - Resultados de absorção da água, densidade, baridade e desgaste de Los Angeles

Referência das amostras	Absorção (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste de Los Angeles (%)
MG1	*	*	*	*
MG2	*	*	*	*
SL1	2.12	2.46	1.36	47.69
SL2	7.47	2.10	1.25	73.67
MS1	1.09	2.55	1.43	38.06
MS2	1.61	2.53	1.45	40.28
Limites especificados	≤5,0%	-	-	≤50%

\*Ensaio não realizado devido a natureza da amostra;

#### 4.6 Resultados dos ensaios tecnológicos

Os ensaios tecnológicos foram realizados com provetes com 2, 7, 14 e 28 dias de cura, para verificação de qualquer anomalia na variação da resistência à flexão, resistência à compressão e absorção de água com a idade de cura. Porque não se regista qualquer anomalia e tendo em conta que a idade de cura determinante na avaliação do comportamento dos provetes são os 28 dias, apresenta-se no capítulo 5 (sobre os resultados dos ensaios tecnológicos) apenas os resultados obtidos com o tempo de cura de 28 dias. Os resultados obtidos com os provetes após 2, 7 e 14 dias de cura são apresentados nos anexos.

##### 4.6.1 Resistência à flexão das argamassas formuladas com cimento 32.5N

A tabela 10 apresenta os resultados médios do ensaio de resistência à flexão das argamassas formuladas com substituição parcial do cimento 32.5N pelas amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1 e MS2.

##### 4.6.2 Resistência à compressão nas argamassas formuladas com cimento 32.5N

Constam da tabela 11 os resultados médios da resistência à compressão das argamassas formuladas com substituição parcial do cimento 32.5N pelas amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1 e MS2 aos 28 dias de cura.

Tabela 10 - Resistência à flexão aos 28 dias de cura com cimento 32.5N

<b>Amostra</b>	<b>Teor de substituinte (%)</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	6.37	0.30	4.66
<b>MG1</b>	10	5.64	0.56	9.94
	20	5.50	0.74	13.45
	25	4.95	0.49	9.85
	30	4.45	0.18	4.15
<b>MG2</b>	10	6.23	0.24	3.77
	20	5.80	0.24	4.19
	25	5.31	0.12	2.35
	30	4.35	0.12	2.87
<b>SL1</b>	10	6.62	0.34	5.20
	20	5.50	0.05	0.90
	25	5.15	0.28	5.41
	30	4.81	0.51	10.60
<b>SL2</b>	10	6.64	0.31	4.63
	20	6.02	0.26	4.34
	25	5.76	0.46	7.97
	30	4.93	0.27	5.38
<b>MS1</b>	10	6.47	0.40	6.12
	20	5.57	0.03	0.54
	25	5.20	0.06	1.20
	30	4.85	0.10	2.04
<b>MS2</b>	10	6.66	0.40	6.15
	20	6.07	0.47	7.79
	25	5.83	0.55	9.95
	30	5.22	0.60	11.40

Tabela 11 - Resistência à compressão aos 28 dias de cura com cimento 32.5N

<b>Amostra</b>	<b>Teor de Substituto (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	32.73	1.96	5.99
<b>MG1</b>	10	32.54	1.55	4.76
	20	31.90	2.66	8.33
	25	31.38	0.88	2.80
	30	26.78	2.55	9.52
<b>MG2</b>	10	32.76	0.74	2.27
	20	32.48	1.45	4.45
	25	31.94	1.23	3.85
	30	30.80	1.60	5.20
<b>SL1</b>	10	32.73	0.01	0.03
	20	32.48	1.45	0.96
	25	31.58	0.95	0.95
	30	30.80	1.60	1.44
<b>SL2</b>	10	32.79	0.01	0.03
	20	32.50	2.95	4.19
	25	31.98	0.01	0.03
	30	31.32	4.60	2.87
<b>MS1</b>	10	32.80	2.09	6.40
	20	32.58	1.70	5.40
	25	32.10	0.58	1.87
	30	31.20	0.61	2.07
<b>MS2</b>	10	33.46	0.56	1.69
	20	32.56	0.56	1.71
	25	32.42	1.15	3.55
	30	31.47	1.34	4.27

#### 4.6.3 Resistência à flexão das argamassas formuladas com cimento 42.5N

A tabela 12 mostra os resultados médios da resistência à flexão das argamassas formuladas com substituição parcial do cimento 42.5N pelas amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1 e MS2 aos 28 dias de cura.

#### 4.6.4 Resistência à compressão das argamassas formuladas com cimento 42.5N

Os resultados médios da resistência à compressão das argamassas formuladas com substituição parcial do cimento 42.5N aos 28 dias de cura constam da tabela 13.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à flexão aos 28 dias de cura, cimento 42.5N

Amostra	Teor de Substituinte (%)	Resistência à flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Argamassa de Referência	0	12.20	0.94	11.80
MG1	10	9.64	0.09	0.96
	15	8.61	0.19	2.29
	20	9.31	0.04	0.40
	25	8.40	0.05	0.62
MG2	10	10.49	0.21	1.99
	15	10.90	0.36	3.32
	20	9.35	0.12	1.31
	25	8.86	0.09	0.99

Continua

Continuação

<b>Amostra</b>	<b>Teor de Substituinte (%)</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
<b>SL1</b>	10	9.83	0.02	0.16
	15	9.22	0.46	5.01
	20	9.65	0.03	0.30
	25	9.13	0.32	3.49
<b>SL2</b>	10	10.57	0.03	0.25
	15	10.20	0.27	2.63
	20	9.70	0.20	2.26
	25	9.17	0.05	0.56
<b>MS1</b>	10	12.18	0.74	6.13
	15	11.51	0.84	7.35
	20	11.40	0.34	3.05
	25	11.20	0.11	1.04
<b>MS2</b>	10	12.47	0.09	0.73
	15	11.70	0.04	0.43
	20	11.45	0.01	0.07
	25	11.28	0.08	0.79

Tabela 13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, cimento 42,5N

<b>Amostra</b>	<b>Teor de Substituinte (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	39.00	3.84	9.86
<b>MG1</b>	10	30.18	0.73	2.44
	15	26.88	0.06	0.24
	20	24.30	0.18	0.75
	25	22.38	0.12	0.56
<b>MG2</b>	10	33.15	1.51	4.55
	15	32.57	0.29	0.89
	20	30.78	1.30	4.24
	25	24.99	2.9	11.62
<b>SL1</b>	10	35.79	0.08	0.22
	15	32.31	0.08	0.25
	20	29.91	1.17	3.94
	25	26.13	0.12	0.48
<b>SL2</b>	10	38.55	0.10	0.27
	15	35.28	0.06	0.19
	20	31.73	0.36	1.28
	25	26.20	0.17	0.72
<b>MS1</b>	10	36.97	2.80	7.58
	15	33.46	3.78	11.30
	20	34.63	4.46	12.90
	25	34.63	2.70	7.81
<b>MS2</b>	10	43.90	2.17	5.72
	15	42.73	3.05	7.15
	20	40.06	3.13	7.82
	25	39.49	2.48	6.29

#### 4.6.5 Absorção de água de argamassas

O ensaio de absorção de água serve para determinar o grau de permeabilidade de um material através da imersão em água dos provetes em condições específicas.

A tabela 14 mostra os resultados de absorção da água aos 28 dias de cura das argamassas formuladas com substituição parcial de cimento 32.5N por calcário em 10, 20, 25 e 30%.

Na tabela 15 estão ilustrados todos os resultados da absorção de água aos 28 dias de cura das argamassas formuladas com substituição parcial de cimento 42.5N por calcário em 10, 15, 20 e 25%.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura (Amostras preparadas com cimento 32.5N)

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	3.44	5.02	5.27	3.44	4.02	3.73	3.52
20	3.44	5.27	5.29	4.03	4.17	4.00	3.62
25	3.44	5.89	5.71	4.10	4.22	4.04	3.87
30	3.44	5.99	5.90	4.23	4.55	4.43	4.16

Tabela 15 - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura, cimento 42.5N

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	3.53	5.17	5.27	5.02	4.02	3.44	3.52
15	3.53	5.13	5.29	5.27	4.17	4.03	3.62
20	3.53	5.62	5.71	5.89	4.22	4.10	3.87
25	3.53	5.61	5.90	5.99	4.55	4.23	4.16

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da análise de Fluorescência de Raios-X mostram que todas as amostras de calcários apresentam maior predominância de CaO, onde MG1 e MG2 têm respectivamente 28,99% e 25,97%, cujos valores são relativamente baixos. As amostras MS1 e MS2 apresentam teores de CaO de 54,68% e 54,84% valores aproximado ao teórico de 56% para um calcário puro. As amostras MS1 e MS2, também apresentam perda ao rubro de 41,98% e 41,65%, mais altos em relação as restantes, podendo-se concluir que se trata de calcários calcíticos. Tendo em conta que a técnica de Difracção de Raios X usada na determinação da composição mineralógica fornece resultados semi-quantitativos, pode-se usar os teores de CaO e CO<sub>2</sub>, obtidos por Fluorescência de Raios X, para inferir sobre a pureza dos calcários, por comparação com os teores ideais de CaO e CO<sub>2</sub> no calcário.

As amostras MG1 e MG2, apresentaram 26,79% e 22,54%, respectivamente, valores elevados de teores de SiO<sub>2</sub> e baixas perdas ao rubro 28,75% e 32,99%. Este facto pode dever se a uma possível contaminação por argilominerais e quartzo. De acordo com os resultados da determinação da composição mineralógica, as amostras MG1 e MG2 foram as únicas onde se identificou a montmorilonite (mineral argiloso), apresentam teores de sílica da ordem dos 27 e 23 %, respectivamente, e mostram ainda quantidades consideráveis de dolomite.

O ensaio de alteração pelo sulfato de sódio serve para avaliar a solidez do agregado inerte a ser aplicado em betões quando sujeito às intepéries. As perdas de massa das amostras MS1 e MS2 foram de 8,3% e 10,97 % que estão dentro do limite máximo admissível de 12%, valor especificado na norma ASTM 88 (1976).

As amostras SL1 e SL2 apresentaram perdas de massa de 15,89% e 16,40% que estão acima do valor especificado pela norma, facto que pode influenciar na resistência do betão à penetração de agentes agressivos o que levará a degradação do betão.

Durante o ensaio de alteração por sulfato de sódio as amostras MG1 e MG2 sofreram degradação por esfarelamento, mostrando, por isso, que estes calcários não servem para a produção de betões.

O ensaio de reactividade potencial aos alcalis foi feito apenas nas amostras da MS1 e MS2 pelo facto de terem apresentado, no ensaio de alteração pela acção do sulfato de sódio,

resultados admissíveis para serem aplicados como agregados inertes em betões. Neste ensaio, as amostras MS1 e MS2 provaram que não são reactivas em contacto com álcalis.

Na caracterização mineralógica observou-se que a fase mais predominante é a Calcite, com teores que variam de 4 a 99%, atingindo os teores mais elevados nas amostras MS1 e MS2 com 94.58% a 98.70%, com excepção das amostras da MG1 e MG2 que está em teor muito baixo na ordem dos 33.0% a 3.86% respectivamente. Todas as amostras apresentam baixo teor em quartzo, excepto as amostras MG1 e MG2 que tem um teor de 11.82% e 8.95% respectivamente. Nota-se também a presença de montmorilonite e dolomite apenas nas amostras MG1 e MG2, sendo a dolomite a mais abundante com uma percentagem de 80.06% na amostra MG2, podendo-se concluir que se trata de um calcário dolomítico.

As amostras de calcários de Magude, MG1 e MG2, não foram submetidas aos ensaios de caracterização física pelo facto dos resultados da caracterização química não terem sido satisfatórios.

As amostras de calcários de Salamanga, SL1 e SL2, apresentaram o valor de desgaste de Los Angeles de 47.69% e 73.67%, respectivamente, maiores do que 50.00%, recomendado para agregados inertes pelo Regulamento de Betões e Ligantes Hidráulicos (RBLH).

As amostras SL1, MS1 e MS2 apresentaram valores de desgaste de Los Angeles de 47.69%, 38.06% e 40.28%, respectivamente menores do que 50.00%. As mesmas amostras têm valores de absorção de água de 2.12%, 1.09% e 1.61%, respectivamente, menores do que os 5.00% recomendados no RBLH. Assim, pelas características físicas, trata-se de calcários consolidados que podem ser usados no fabrico de betões.

## **5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA**

### **5.1.1 Variação da Resistência à flexão e à compressão das argamassas formuladas com cimento 32.5N**

Analisando a variação da resistência à flexão entre as argamassas dos diferentes jazigos e de referência apresentados na figura 13 verifica-se que os valores da resistência à flexão em todas as argamassas tendem a diminuir a medida que aumenta o teor de calcário que substitui parcialmente o cimento na preparação das argamassas. Pode se concluir que a incorporação

de calcário acima de 20% compromete negativamente o desempenho das argamassas nas suas propriedades mecânicas. As argamassas SL1, SL2, MS1 e MS2 apresentam valores mais elevados aos 10% de substituição em comparação com as argamassas de referência.

As argamassas MG1 e MG2, apresentam valores baixos de resistência à flexão, observando-se assim, uma correlação com os resultados obtidos no ensaio de alteração que sofreram degradação por esfarelamento.

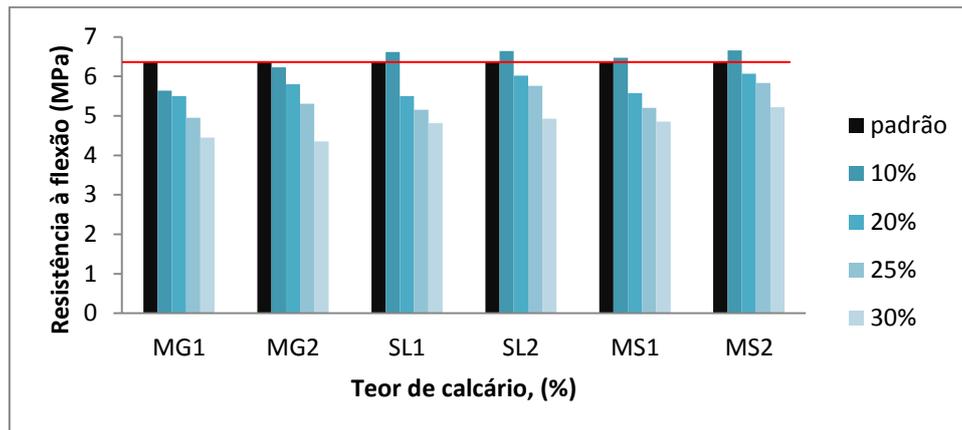


Figura 13 - Variação da resistência à flexão das composições de argamassas formuladas com cimento 32.5N, em relação ao padrão

A figura 14 mostra a variação da resistência à compressão entre a argamassa padrão e as formuladas com calcários de diferentes jazigos, onde nota-se a mesma tendência detectada na figura 13. A redução da resistência é considerável a medida que o teor de calcário incorporado nas argamassas aumenta, atingido o seu valor mínimo aos 30% de substituição. A partir dessa percentagem, para além do calcário preencher os espaços vazios entre o aglomerante e o ligante, passa actuar como agregado inerte, comprometendo em grande medida as propriedades mecânicas das argamassas. Até os 20% de substituição as argamassas de todos jazigos apresentam resistência muito próxima a da argamassa de referência. Nota-se também que as argamassas MS1 e MS2 apresentam valores mais elevados comparados com as outras argamassas de substituição.

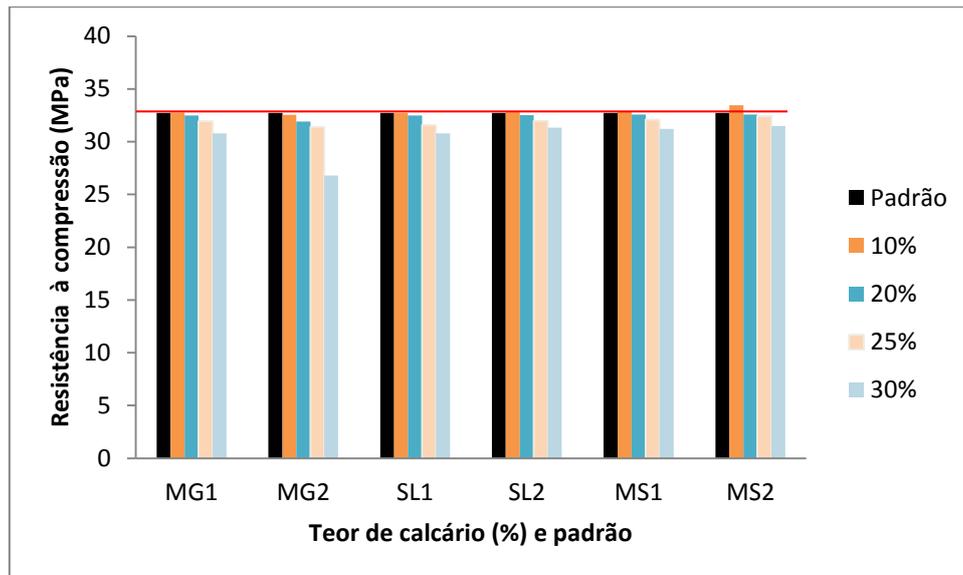


Figura 14 - Variação da resistência à compressão das composições das argamassa formuladas com cimento 32.5N, em relação ao padrão

### 5.1.2 Variação da resistência à flexão e à compressão das argamassas formuladas com cimento 42.5N

A figura 15 apresenta a variação da resistência à flexão de argamassas de todos jazigos e do padrão produzidos com cimento 42.5N. Nota-se que com a incorporação do filler de calcário nas argamassas ocorre uma redução nas propriedades mecânicas da resistência à flexão, onde a argamassa de referência apresenta valor mais elevado em comparação com as restantes argamassas. As argamassas MS1 e MS2, de calcários consolidados, apresentam os valores muito próximos com os do padrão aos 10% de substituição.

A figura 16 apresenta a variação da resistência à compressão entre as argamassas de todos jazigos e da argamassa de referência. Nota-se na figura que a medida que a percentagem de calcário incorporado nas argamassas aumenta, o valor da resistência à compressão diminui, influenciando negativamente nas propriedades mecânicas, uma vês que até os 25% atinge-se os valores mais baixos.

Constatou-se também que a argamassa de referência apresenta valor de resistência superior em relação as restantes MG1, MG2, SL1, SL2 e MS1. A amostra MS2 apresenta maiores valores de resistência em relação a todas, incluindo a argamassa de referência, facto que mostra que a incorporação deste calcário causa um maior incremento nas propriedades mecânicas devido as suas óptimas características físicas e químicas.

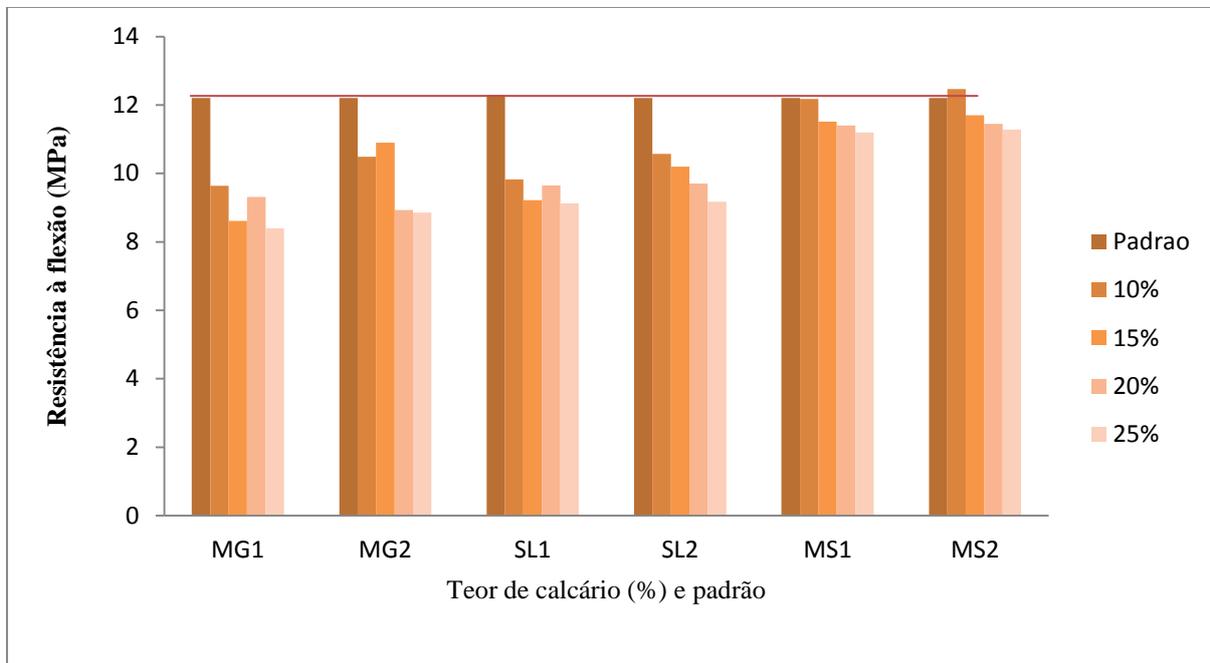


Figura 15 - Variação da resistência à flexão das composições de argamassas formuladas com cimento 42.5N, em relação ao padrão

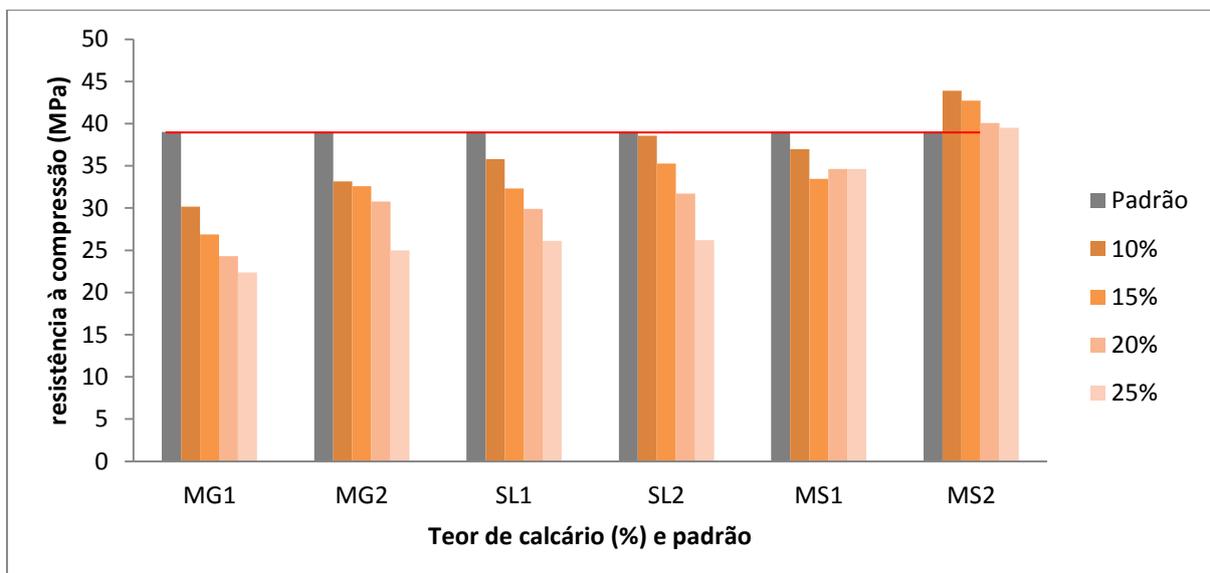


Figura 16 - Variação da resistência à compressão das composições de argamassas formuladas com cimento 42.5N, em relação ao padrão

### 5.1.3 Variação da absorção de água nas argamassas com cimento 32.5N

Através da figura 17 nota-se que ocorreu um aumento na absorção de água em todas as argamassas formuladas com teores de calcário em relação a argamassa de referência. Este comportamento pode estar relacionado com facto dos finos de calcário presentes, contribuirem para a formação de poros de maiores diâmetros. As amostras MG1e MG2 apresentaram maior absorção de água porque tinham tendência de se degradarem como foi evidenciado no ensaio de alteração com sulfato de sódio.

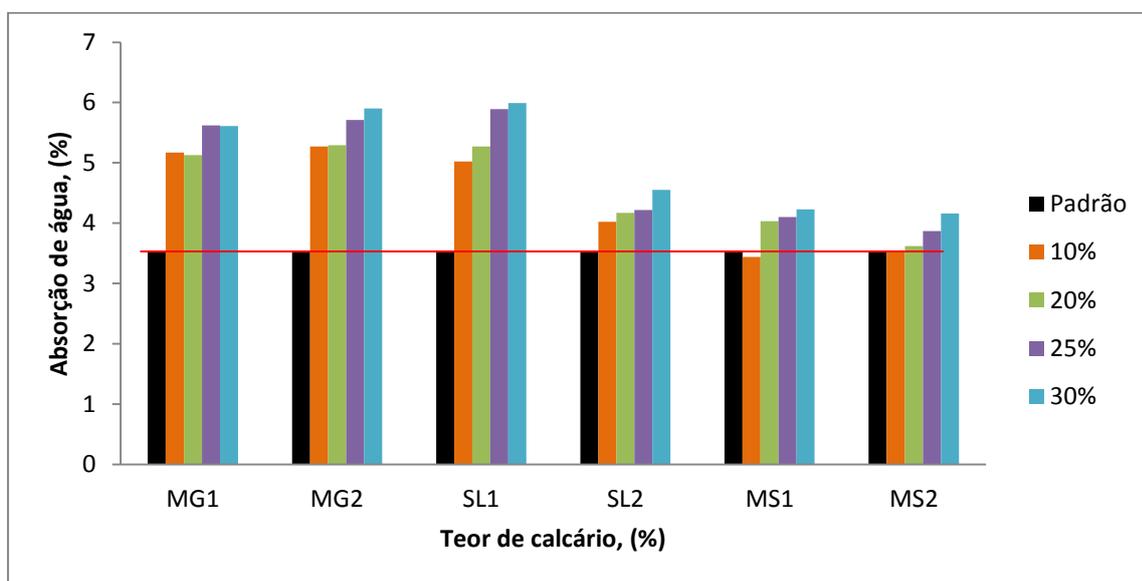


Figura 17 - Variação da absorção de água entre as argamassas formuladas com amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1, MS2 usando cimento 32.5N e argamassa padrão

### 5.1.4 Variação da absorção de água nas argamassas com cimento 42.5N

A figura 18 apresenta a variação da absorção de água das argamassas preparadas substituindo parcialmente o cimento 42.5N por calcário, com argamassa de referência. Nota-se que a argamassa de referência apresenta menores valores de absorção de água em relação as restantes argamassas, facto que nos leva a constatar que a medida que aumenta o teor do substituinte na formulação das argamassas, aumenta a absorção de água em relação a argamassa de referência.

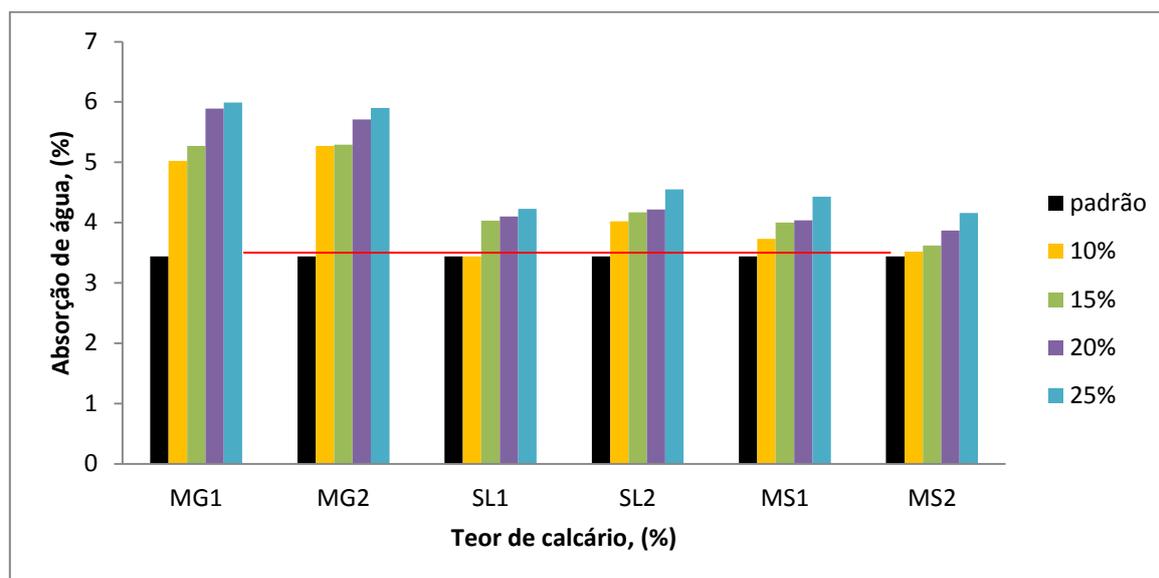


Figura 18 - Variação da absorção de água entre as argamassas formuladas com amostras MG1, MG2, SL1, SL2, MS1, MS2 usando cimento 42.5N e argamassa padrão

## 6 CONCLUSÕES

Os calcários de Salamanga com 95,71 e 94,58% de calcite e de Massinga com 98,24 e 98,70%, de calcite, em geral, mostraram melhores resultados tecnológicos, quando comparados com o calcário dolomítico de Magude 3.06 e 33,0% de calcite, avaliados apenas com base na composição mineralógica. Os resultados obtidos com o calcário dolomítico contrariam os resultados descritos em (Mikhailova *et.al.*, 2013), que apontam para o efeito benéfico do calcário dolomítico nas propriedades mecânicas de argamassas, em composições com teores de calcário dolomítico até os 25%. O calcário dolomítico obteve neste estudo resultados relativamente baixos em relação aos calcíticos.

As amostras MS1 e MS2, da Massinga, apresentam melhor resistência à compressão e à flexão, e têm valores mais baixos de absorção de água aos 28 dias, quando comparados com as demais calcários e, ainda, os menores desvios em relação a argamassa de referência.

Em geral, as adições de 10 a 25% de *filler* de calcário dão, para o cimento 32.5N, bons resultados de resistência à compressão, com cerca de 32MPa, para todas as amostras. Acima dos 25% de Adições notou-se um decréscimo da resistência à compressão (em média 30MPa) porque o *filler* de calcário passa a ter efeito diluente reduzindo a ação de ligante. Os resultados obtidos neste estudo são comparáveis aos obtidos por Ramezani pour et al. (2009) e Beixing et al. (2009). Estes mostram-se ligeiramente melhor que os obtidos por Bederica *et al.* (2011), que obteve resultados benéficos para a substituição parcial do cimento até os 5%.

Os resultados das argamassas produzidas com cimento 42.5N, com os calcários analisados não atingiram o valor de referência (42.5MPa) e, apenas a amostra MS2, Massinga, teve um bom desempenho acima dos 42.5MPa nas adições de até 15%. A amostra MS2, da Massinga, mostra de forma clara e inequívoca viabilidade da sua utilização na produção de argamassas, como substituinte parcial do cimento.

Os resultados obtidos são indicativos da potencial aplicação destas argamassas na produção de materiais de construção, colocando-se contudo a necessidade de realização de estudos adicionais para a produção e caracterização dos diferentes materiais.

## 7 RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se a realização de estudos das propriedades das argamassas no estado fresco bem como a realização de mais ensaios de caracterização no estado endurecido tais como a elasticidade, a retracção, a aderência, a permeabilidade e a durabilidade e,
- Que se realizem estudos sobre o comportamento das argamassa produzidas com substituição parcial de cimento por calcário, em ambientes agressivos de solução de sulfato de sódio ou de magnésio.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, R. S. e Marques, J. M. (1993): Recursos Minerais da República de Moçambique. Instituto de Investigação Científica Tropical de Lisboa, pág. 88-91

Algin, H.M. e Turgut, P. (2008): Cotton and Limestone poeder wastes as brick material. *Construction and Building Materials*. **22**: 1074–1080

Araújo, R. C. L.; Rodrigues, E. H. V.; Freitas, E. G. A. (2000): Materiais de construção. *Editora Universidade Rural*. V.1 Rio de Janeiro

ASTM. (1977). Concrete and Mineral Aggregates. Part 14. American Society for testing and Materials. Philadelphia

Bederina, M., Makhloufi, Z. e Bouziani, T., (2011): Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia*. **21**: 28 – 34

Beixing,L., Jiliang, W.e Mingkai, Z. (2009): Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low- and high-strength concretes. *Construction and Building Materials*. **23**: 2846–2850

Boke, H.; Cizer, O.; Ipekoglu, B.; Ugurlu, E.; Serifaki, K.; Toprak, G., (2008): Characteristics of lime produced from limestone containing diatoms. . *Construction and Building Materials* **22**. 866-874

Chang, Z.-T.; Song, X.-J.; Munn, R. & Marosszeky, M. (2005): Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research* 35, 1486-1494

Colak, A. (2008): Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with white Portland cement. *Construction and Building Materials*. **22**: 2276–2280

Coutinho, A. (2012). *Fabrico e Propriedades do Betão*, Volume I. 5ª Edição. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa

Galetakis, M.; Alevizos, G. e Leventakis, K. (2012): Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements – An experimental approach. *Construction and Building Materials*. **26**. 122–130

Gonçalves, J.P. (2000): Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como Adição para produção de concretos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Brasil.

Gozde, I. S., (2012): Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials*. **26**, 613-618

LENC – E – 237 (1970): Agregados. Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles

Magaia, L. T., (2010). Contribuição para o conhecimento de potenciais aplicações e qualidade dos calcários de Moçambique: Projecto científico, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências - Departamento de Geologia.

Mahrous, A. M., Tantawi, M. M. e El-Sageer, H. (2010): Evaluation of the engineering properties of some Egyptian limestones as construction materials for highway pavements. *Construction and Building Materials*. **24**. 2598–2603

Meddah, M.S.; Lmbachiya, M.C. & Dhir, R.K. ( 2014): Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production. *Construction and Building Materials* **58**, 193-205

Menadi, B.; Kenai, S. Khatib, J. & Aït-Mokhtar, A. (2009): Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials* **23**, 625-633

Mendoça, B. de V. (2007): Estudo do Desempenho de Argamassas Hidráulicas – Influência do ligante. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Lisboa

Menezes, R. R.; Melo, L. R.; Fonsêca, F. A. S.; Souto, P.M.; Neves, G.A. e Santana, L.N.L. (2010): Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos. *Revista da Escola de Minas*. **6** : 3070 – 4467

Mikhailova, O.; Yakovlev, G.; Maeva, I. e Senkov, S. (2013): Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete. *Procedia Engineering* **57**, 775-780

Moura, R.; D.; Sousa, N.; L. e Luís, R. M.; M.; (2014). Classificação do Calcário da região de Carriri Oriental Paraibano usado na produção de carbonato de cálcio. Universidade Estadual da Paraíba - Brasil

Nassar, R.U.D. & Soroushian, P. (2012): Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials* 29, 368-377

Neville, A.M. (1997): *Propriedades do Concreto*. São Paulo: PINI.

NBR 9778 (1987): Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

NM NP EN 197-1 (2000): Métodos de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

NP I – 882 (1968): Inertes para Betões – Determinação da Reactividade Potencial.

NP EN 196-3:1996 - Métodos de ensaios de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade.

NP EN 197-1 (2001): Requisitos mecânicos e físicos expressos com valores característicos especificados.

NP 581 (1969): Ensaio para determinação da absorção de água em agregados

NP 954 (1973): Ensaio para determinação do peso específico

NP 1379 (1976): Inertes para argamassas e betões – Ensaio para determinação da Análise granulométrica.

Othman, A. G. M.; Abou El-Maaty, M. A. e Serry, M. A. (2001): Hydration-resistant lime refractories from Egyptian limestone and ilmenite raw materials. *Ceramics International* . **27** 801–807

Pipilikaki, P.; Katsioti, M. e Gallias, J. L. (2009): Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment. *Construction and Building Materials*. **23**. 1042–1049

Pires, V.; Silva, Z. S. G.; Simão, J. A. R.; Galhano, C. e Amaral, P. M. (2010): “Bianco di Asiago” limestone pavement – Degradation and alteration study. *Construction and Building Materials*. **24** : 686–694

Pontes, I. F.; Vidal, F. W. H.; (2005), Valorização de resíduo de cerrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicação/CTs/CT2005-101-00.pdf>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2013

Ramezani pour, A. A.; Ghiasvand, E.; Nickseresht, I.; Mahdikhani, M. e Moodi, F. (2009): Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement & Concrete Composites*. **31**: 715–720

Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (2005): Calcário e Dolomito – *Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações*. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro. Cap.15. Pág. 327 a 350

Santos, M. L. L. de O. (2008): Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para construção civil. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciências Exatas e de Terra, Brasil

Silva, N. G.; Buest, G. e Campiteli, V. C. (2005): Argamassa com areia britada: Influência dos finos e da forma das partículas. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Florianópolis,. P. 12-22.

Silva, G. A. (2012): Diagnóstico do sector de agregados para construção civil na região metropolitana de Natal - RN, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências, Barsil

Skalny, J.; Marchand, J. e Odler, L. (2002): Sulfate attack on concrete. New York: Spon Press

Souza, P. A. M. e Pipper, T. (1998): Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI

Sua-Iam, G. & Makul, N. (2013): Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production* 57, 308-319

Torkaman, J.; Ashori, A. & Momtazi, A.S. (2014): Using wood fiber waste, rice husk and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials* 50, 432-436

Tsivilis, S.; Chaniotakis, E.; Kakali, G. e Batis, G. (2002): An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. *Cement & Concrete Composites*. 24 : 371–378

Turgut, P. e Algin, H. M. ( 2007): Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and Environment*. 42. 3399 – 3403

## 9 ANEXOS

## 9.1 Provetes preparados com cimento 32.5N

### 9.1.1 Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 7 de cura

Tabela 1 - Resistência à flexão aos 7 dias de cura

Amostra	Teor de substituinte (%)	Resistência à flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Argamassa de Referência	0	5.21±0.85	0.34	6.60
MG1	10	5.22±0.49	0.20	3.77
	20	4.93±0.75	0.30	6.11
	25	4.25±0.54	0.21	5.13
	30	4.08±0.66	0.26	6.48
MG2	10	5.34±0.14	0.06	1.03
	20	4.84±0.81	0.32	6.70
	25	4.46±0.32	0.13	2.92
	30	4.15±0.23	0.09	2.24
SL1	10	4.79±1.54	0.62	12.96
	20	4.21±0.29	0.12	2.78
	25	4.03±0.48	0.20	4.84
	30	3.55±0.36	0.14	4.06
SL2	10	5.42±0.35	0.14	2.61
	20	4.64±0.56	0.23	4.90
	25	4.53±0.19	0.08	1.66
	30	3.80±0.62	0.25	6.49
MS1	10	5.80±0.42	0.17	2.93
	20	5.19±0.46	0.19	3.58
	25	4.77±0.57	0.23	4.83
	30	4.05±0.42	0.17	4.21
MS2	10	4.67±0.68	0.27	5.83
	20	3.54±0.23	0.09	2.62
	25	2.90±0.26	0.11	3.63
	30	2.47±0.16	0.07	2.63

Tabela 2 - Resistência à compressão aos 7 dias de cura

<b>Amostra</b>	<b>Teor de substituinte (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	22.03±1.06	1.01	4.61
<b>MG1</b>	10	17.58±1.46	1.40	7.94
	20	16.45±1.25	1.19	7.22
	25	14.85±0.99	0.94	6.32
	30	14.33±0.41	0.39	2.71
<b>MG2</b>	10	18.63±2.80	2.67	14.31
	20	15.10±1.96	1.87	12.35
	25	13.92±1.11	1.06	7.63
	30	12.98±1.93	1.84	14.15
<b>SL1</b>	10	16.83±1.25	1.19	7.05
	20	16.48±0.25	0.24	1.46
	25	13.65±0.58	0.49	3.61
	30	13.05±0.53	0.51	3.85
<b>SL2</b>	10	20.53±2.35	2.24	10.90
	20	18.95±0.39	0.38	1.98
	25	18.85±1.01	0.97	5.12
	30	14.93±1.01	0.97	6.47
<b>MS1</b>	10	20.08±1.47	1.40	6.98
	20	17.23±0.78	0.74	4.32
	25	16.35±1.17	1.11	6.82
	30	13.80±1.36	1.30	9.40
<b>MS2</b>	10	17.15±0.96	0.92	5.35
	20	14.53±0.27	0.26	1.78
	25	12.89±1.13	1.08	8.37
	30	10.80±0.53	0.50	4.65

Tabela 3 - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 7 dias de cura

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	5.33	5.04	5.68	5.59	5.31	6.45	4.99
20	5.33	5.65	5.70	5.72	5.45	6.62	4.98
25	5.33	5.35	5.97	6.04	5.64	6.82	5.35
30	5.33	5.44	6.63	6.28	6.23	7.25	5.53

### 9.1.2 Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 14 dias

Tabela 4 - Resistência à flexão aos 14 dias de cura

Amostra	Teor de substituinte (%)	Resistência à flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Argamassa de Referência	0	5.64±0.78	0.31	5.57
MG1	10	5.66±0.43	0.17	3.04
	20	4.89±0.19	0.08	1.56
	25	5.17±0.16	0.06	1.21
	30	4.22±1.05	0.42	9.99
MG2	10	5.70±0.18	0.07	1.27
	20	4.81±0.04	0.02	0.36
	25	4.51±0.63	0.26	5.66
	30	3.99±1.13	0.46	11.43
SL1	10	5.83±0.58	0.24	4.03
	20	5.70±0.86	0.35	6.08
	25	5.41±0.71	0.29	5.29
	30	4.73±0.80	0.32	6.81
SL2	10	6.29±0.74	0.30	4.74
	20	5.53±1.13	0.45	8.21
	25	5.76±0.29	0.12	2.00
	30	5.01±1.09	0.44	8.76
MS1	10	5.27±0.50	0.20	3.81
	20	5.15±0.50	0.20	3.88
	25	4.35±0.73	0.30	6.80
	30	4.01±0.52	0.21	5.25
MS2	10	5.29±0.76	0.31	5.77
	20	4.15±0.93	0.38	9.04
	25	3.79±0.82	0.33	8.68
	30	2.97±0.68	0.28	9.28

Tabela 5 - Resistência à compressão aos 14 dias de cura

<b>Amostra</b>	<b>Teor de substituinte (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	24.88±0.97	0.92	3.71
<b>MG1</b>	10	22.40±0.91	0.87	3.87
	20	17.83±0.52	0.50	2.79
	25	17.88±0.42	0.40	2.21
	30	17.05±0.92	0.88	5.15
<b>MG2</b>	10	20.83±1.54	1.47	7.05
	20	18.33±1.81	1.73	9.42
	25	17.55±0.69	0.66	3.75
	30	14.88±0.70	0.67	4.48
<b>SL1</b>	10	21.35±1.25	1.19	5.58
	20	18.50±0.65	0.62	3.35
	25	18.63±0.78	0.74	3.99
	30	16.98±0.58	0.56	3.28
<b>SL2</b>	10	24.03±1.14	1.09	4.53
	20	20.80±1.49	1.42	6.84
	25	21.30±1.03	0.99	4.63
	30	18.33±0.88	0.84	4.58
<b>MS1</b>	10	22.55±2.08	1.98	8.79
	20	20.68±1.13	1.08	5.20
	25	19.00±1.33	1.27	6.69
	30	16.85±1.35	1.29	7.65
<b>MS2</b>	10	19.78±1.41	1.34	6.77
	20	17.18±0.74	0.71	4.12
	25	15.33±0.56	0.53	3.47
	30	12.93±0.65	0.62	4.78

**Tabela 6** - Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas aos 14 dias de cura

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	4.98	5.99	5.93	5.11	5.31	4.96	4.99
20	4.98	6.39	6.09	5.36	5.50	5.20	4.98
25	4.98	6.37	6.26	5.50	5.66	5.47	5.35
30	4.98	6.73	6.75	5.90	6.07	5.68	5.53

## 9.2 Provetes preparados com cimento 42.5N

### 9.2.1 Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 2 dias de cura

Tabela 7 – Resistência à flexão aos 2 dias de cura

Amostra	Teor de Substituto (%)	Resistência à flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Argamassa de Referência	0	7.06±0.10	1.96	5.99
MG1	10	5.21±0.50	1.05	4.56
	15	4.56±1.06	2.16	7.33
	20	4.07±0.97	1.08	2.10
	25	4.02±1.53	2.59	8.52
MG2	10	5.47±0.10	0.74	2.17
	15	5.38±1.80	1.45	3.45
	20	5.33±1.50	1.23	3.75
	25	5.13±2.10	1.60	5.20
SL1	10	4.57±0.10	0.01	0.03
	15	4.40±0.13	1.45	0.96
	20	4.36±0.08	0.95	0.95
	25	3.89±2.00	1.60	1.44
SL2	10	4.98±0.76	0.02	2.08
	15	3.97±0.10	2.95	4.19
	20	3.80±0.98	0.04	2.29
	25	3.78±0.18	4.60	2.87
MS1	10	5.41±1.23	2.09	6.40
	15	5.10±1.10	1.70	5.40
	20	3.44±0.98	0.58	1.87
	25	3.32±0.10	0.61	2.07
MS2	10	5.11±1.10	0.56	1.69
	15	4.59±1.90	0.56	1.71
	20	3.85±2.02	1.15	3.55
	25	3.54±2.14	1.34	4.27

Tabela 8 - Resistência à compressão aos 2 dias de cura

<b>Amostra</b>	<b>Teor de substituinte (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	10.75±1.42	1.02	4.61
<b>MG1</b>	10	13.80±1.48	1.40	7.94
	15	11.25±1.41	1.19	7.22
	20	9.97±0.99	0.94	6.32
	25	9.30±0.36	0.39	2.71
<b>MG2</b>	10	14.10±2.68	2.67	14.31
	15	12.60±1.18	1.87	12.35
	20	10.20±0.99	1.06	7.63
	25	9.90±2.40	1.84	14.15
<b>SL1</b>	10	11.70±2.70	1.19	10.90
	15	11.10±1.10	0.24	1.98
	20	10.35±1.15	0.49	5.12
	25	10.20±2.23	0.51	6.47
<b>SL2</b>	10	11.85±0.12	2.24	1.03
	15	11.11±1.80	0.38	6.70
	20	10.35±0.98	0.97	2.92
	25	7.95±0.86	0.97	2.24
<b>MS1</b>	10	15.20±1.68	1.40	6.98
	15	15.00±1.11	0.74	4.32
	20	14.10±1.46	1.11	6.82
	25	10.95±2.10	1.30	9.40
<b>MS2</b>	10	17.70±1.22	0.92	5.35
	15	15.12±0.80	0.26	1.78
	20	12.76±1.98	1.08	8.37
	25	11.00±1.00	0.50	4.65

Tabela 10 - Resultados do ensaio de absorção de água aos 2 dias de cura

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	5.33	8.30	5.93	5.59	5.31	6.45	6.56
20	5.33	8.48	6.09	5.72	5.45	6.62	6.74
25	5.33	8.64	6.26	6.04	5.64	6.82	7.11
30	5.33	8.70	6.75	6.28	6.23	7.25	7.12

## 9.2.2 Resultados do ensaio de flexão, compressão e absorção de água aos 7 de cura

Tabela 11 - Resistência à flexão aos 7 dias de cura

Amostra	Teor de Substituto (%)	Resistência à flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Argamassa de Referência	0	8.13±0.80	1.96	5.99
MG1	10	9.22±1.34	1.55	4.76
	15	9.28±2.00	2.66	8.33
	20	8.11±1.12	0.88	2.80
	25	7.37±2.12	2.55	9.52
MG2	10	8.46±0.10	0.74	2.27
	15	8.23±0.80	1.45	4.45
	20	8.09±0.67	1.23	3.85
	25	7.78±0.98	1.60	5.20
SL1	10	8.80±0.65	0.07	1.03
	15	8.18±0.98	1.45	1.96
	20	8.07±0.94	1.98	1.95
	25	7.60±0.76	1.60	1.44
SL2	10	8.93±0.50	1.01	3.23
	15	8.63±0.86	2.95	4.19
	20	8.22±0.48	0.99	2.03
	25	8.06±0.74	2.60	3.87
MS1	10	8.55±1.23	2.09	6.40
	15	8.89±1.12	1.70	5.40
	20	7.66±0.96	0.58	1.87
	25	6.81±1.03	0.61	2.07
MS2	10	10.56±0.34	0.56	1.69
	15	8.75±0.52	0.56	1.71
	20	8.34±0.76	1.15	3.55
	25	7.31±0.87	1.34	4.27

Tabela 12 - Resistência à compressão aos 7 dias cura

<b>Amostra</b>	<b>Teor de substituinte (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Argamassa de Referência	0	24.15±0.65	1.01	4.61
<b>MG1</b>	10	21.75±3.10	1.40	7.94
	15	21.00±2.90	1.19	7.22
	20	20.40±2.78	0.94	6.32
	25	18.90±1.87	0.39	2.71
<b>MG2</b>	10	23.25±5.15	2.67	14.31
	15	19.35±4.00	1.87	12.35
	20	17.85±2.10	1.06	7.63
	25	17.70±5.20	1.84	14.15
<b>SL1</b>	10	22.20±3.18	1.19	10.90
	15	21.18±1.00	0.24	1.98
	20	21.02±1.90	0.49	5.12
	25	20.22±2.30	0.51	6.47
<b>SL2</b>	10	26.10±0.96	2.24	1.03
	15	19.80±2.10	0.38	6.70
	20	18.72±1.98	0.97	2.92
	25	17.74±1.12	0.97	2.24
<b>MS1</b>	10	25.29±2.14	1.40	6.98
	15	22.02±1.10	0.74	4.32
	20	21.87±2.20	1.11	6.82
	25	19.34±3.20	1.30	9.40
<b>MS2</b>	10	26.25±2.70	0.92	5.35
	15	21.00±0.90	0.26	1.78
	20	18.15±2.89	1.08	8.37
	25	18.15±1.98	0.50	4.65

Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água aos 7 dias de cura

% de calcário	Absorção de água (%)						
	Referência	MG1	MG2	SL1	SL2	MS1	MS2
10	5.19	5.31	5.93	5.11	5.31	4.96	4.99
15	5.19	5.38	6.09	5.36	5.50	5.20	4.98
20	5.19	5.19	6.26	5.50	5.66	5.47	5.35
25	5.19	6.11	6.75	5.90	6.07	5.68	5.53

### 8.3 Composição mineralógica

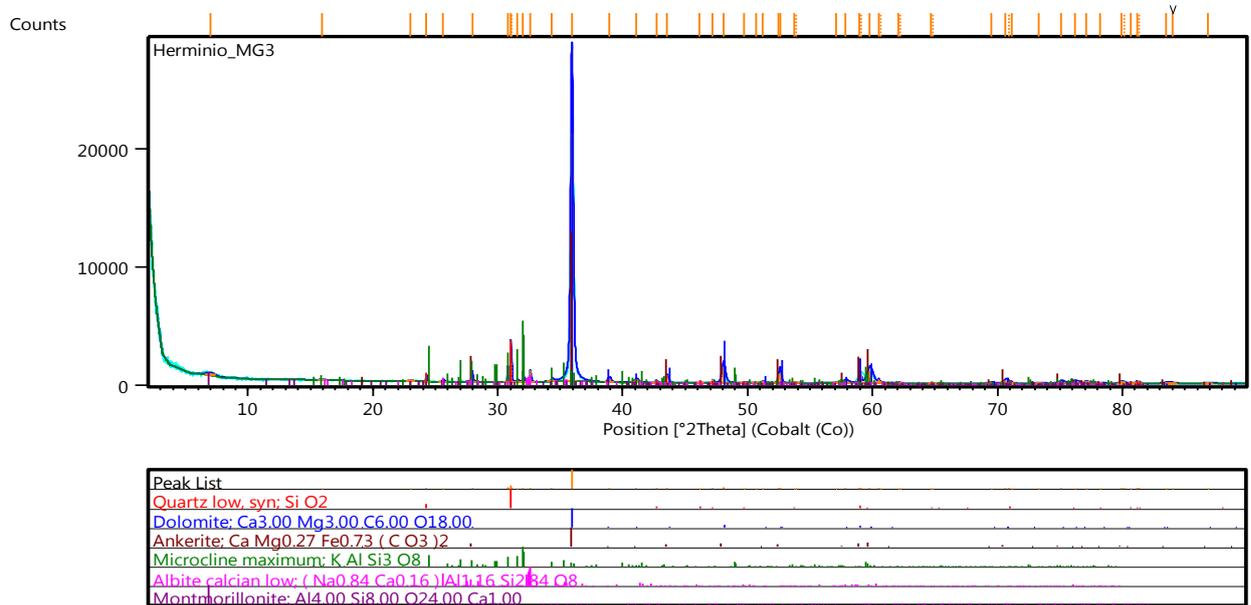


Figura 8.3.1 – Espectros de raio X da amostra MG2.

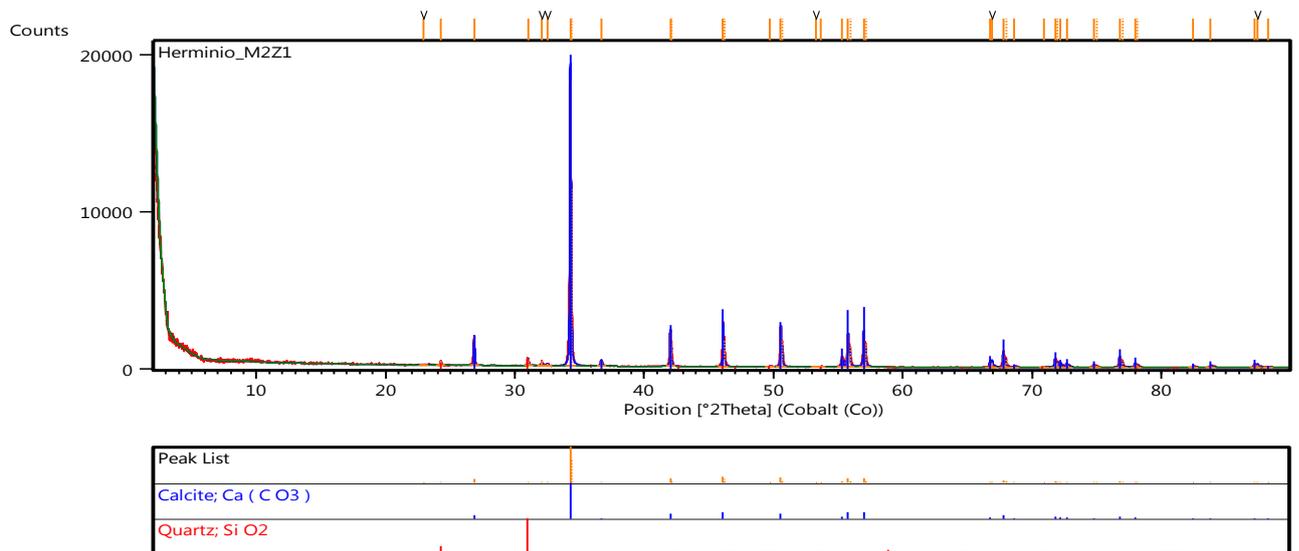
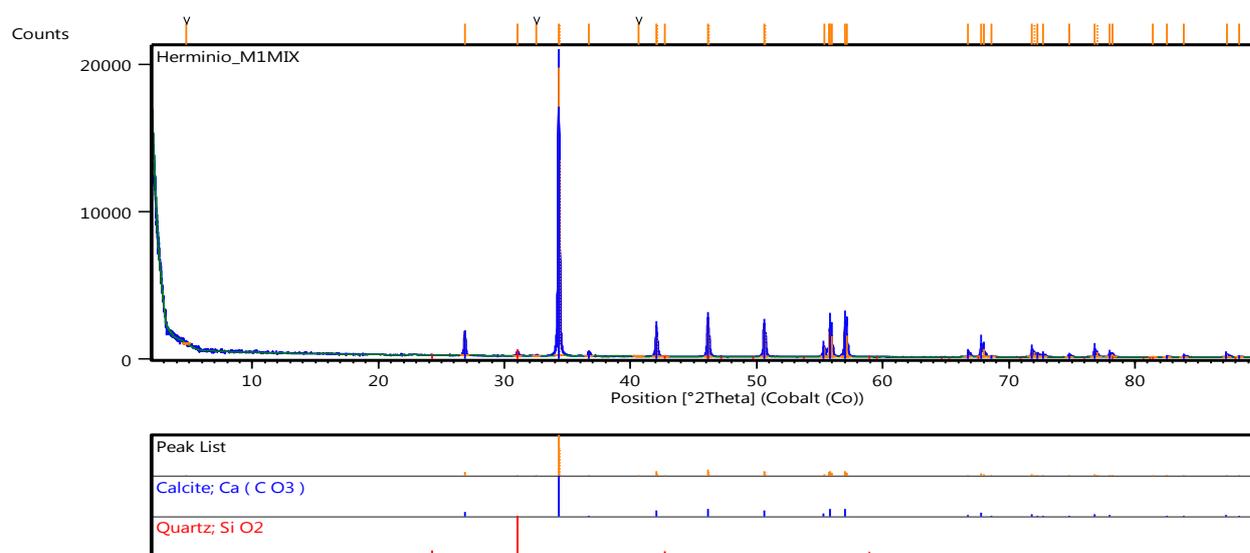
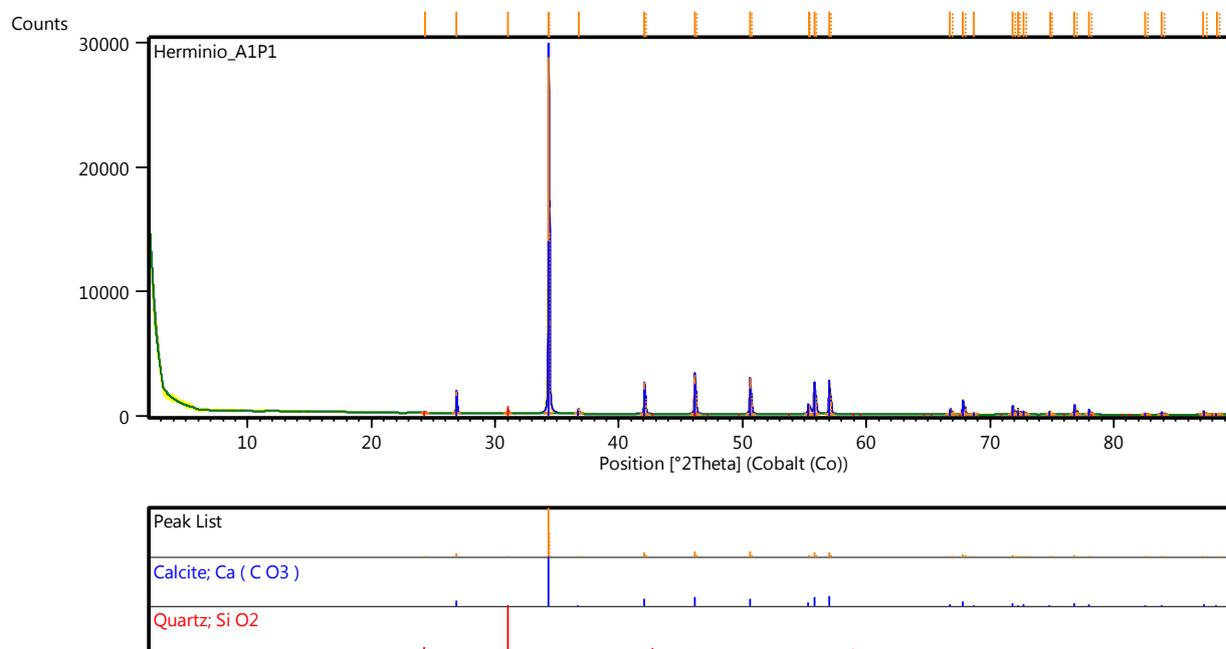


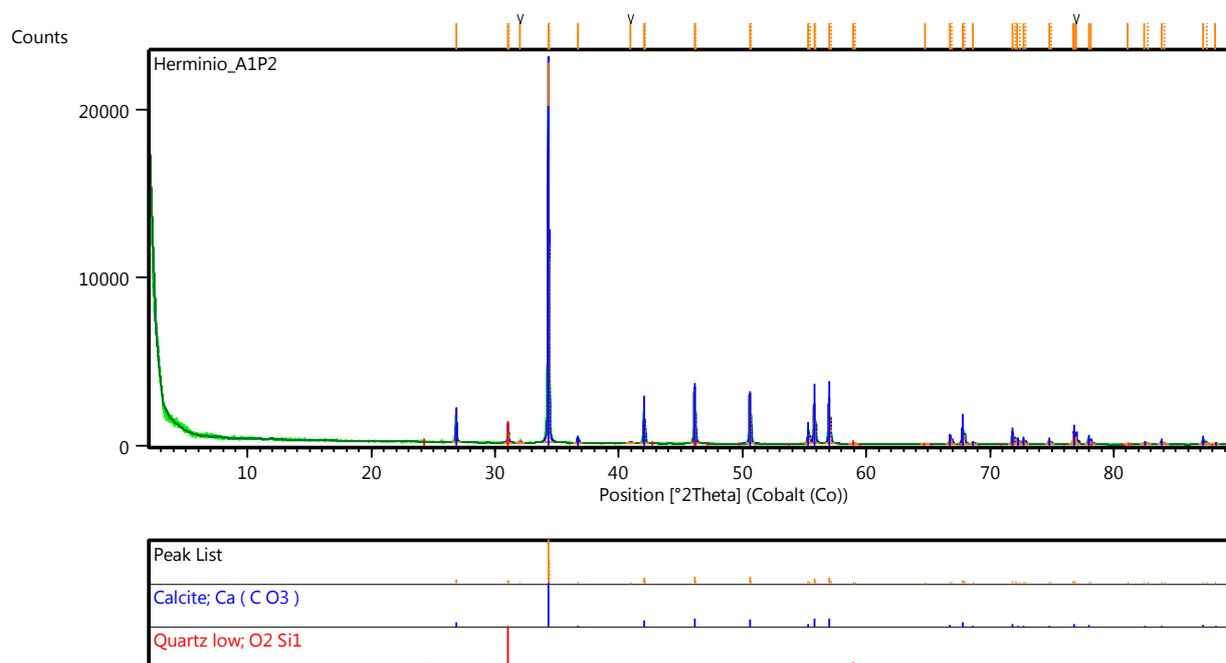
Figura 8.3.2 – Espectros de raio X das amostras SL1.



**Figura 8.3.3** – Espectros de raio X das amostras SL2.



**Figura 8.3.4** – Espectros de raio X da amostra MS1.



**Figura 8.3.5** – Espectros de raio X da amostra MS2