



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



TRABALHO DE LICENCIATURA

*Incorporação de resíduos de cerâmica vermelha como adição pozolânica na substituição parcial do cimento em argamassas*

Autor: Dias, António Teixeira



Maputo, Julho de 2013



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



TRABALHO DE LICENCIATURA

*Incorporação de resíduos de cerâmica  
vermelha como adição pozolânica na  
substituição parcial do cimento em  
argamassas*

**Autor:** Dias, António Teixeira

**Supervisor:** Prof. Doutor Carvalho Madivate

**Co-supervisor:** Doutor Arão Manhique

Maputo, Julho de 2013

## **DEDICATÓRIA**

À memória dos meus pais, Manuel António Dias e Joana Fernando,

Com eterna saudade!

À memória da minha tia, Júlia José João Teixeira e do meu grande amigo Nuno Ribeiro Patreque Chamussa,

Que Deus vos abençoe onde quer que estejam...

Ao meu primo, dr. Jaime Carlos António Teixeira Dias

Obrigado! Por ter acreditado em mim, que Deus lhe ilumine...

À minha família, especialmente aos meus irmãos, dr. Carlitos Manuel Teixeira Dias e Carlotinha Manuel Teixeira Dias, aos meus sobrinhos, Yolanda Júlia Teixeira Dias, dr. Carlos da Júlia Teixeira Dias, Virgínia Teixeira Dias, Inocêncio Teixeira Dias e ao meu primo António Carlos Teixeira Dias.

Aos meus amigos, Marcos Mário Landani, Edite Chirindza, Álvaro Ribeiro, Mafumbo Silvestre Cuco, Issufo Carlos Machava, Carlos Fato, dr. Titos Albino Lilandoma, Felisberto Gabriel Muanito, Felisberto Jaime Gomes, António João Mungone, Arlindo Paulo, Alberto Sambo, Jaime Joaquim, dr. Terêncio Renato Culpa, Stelio Maeira e Pedro Cantiole.

## AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho foi indispensável a cooperação, o apoio e o estímulo de muitas pessoas. Cabe, portanto, agradecer a todos que, directa ou indirectamente, colaboraram para tal, em especial,

- A Deus, por tudo;
- Ao Prof. Doutor Carvalho Madivate e ao Doutor Arão Manhique, por terem aceite supervisionar este trabalho e, por outro lado, pela sua orientação segura e valiosa no desenvolvimento do trabalho, além do apoio e estímulo constantemente dispensados;
- Ao Sr. Abel Alberto Simão, da empresa **Promac**, por ter disponibilizado os resíduos de cerâmica vermelha;
- A todos os funcionários do Laboratório de Engenharia de Moçambique **LEM**, especialmente aos da Secção de Materiais de Construção e de Química, um muito obrigado pelo apoio;
- Ao Engenheiro Rodrigues Salvador Manjate, ao Engenheiro António Júnior, ao Sr. Rogério Benzane, ao Sr. Arsénio Nhalucué, á Eng. Luizete Patrício, ao dr. Moisés Mabui, á dra. Carla Macie e ao Sr. Macuácuá, pela orientação durante a realização da parte experimental da pesquisa;
- Aos meus colegas, King Cafandame, dr. Nelson Daniel Siteo, dr. Fijamo Lourenço Geraldo, Emília Duarte, Eanes Victor Supaer, dr. Flávio Chicumule, Carlos Célio Sevene, dr. Silva Benedito Condoeira, dr. Jossias Bartolomeu Magandane, Ângela Zandamela, por terem compartilhado comigo maus e bons momentos durante o curso;
- A todos os funcionários e estudantes do Departamento de Química, especialmente ao Sr. Ramiro, ao Sr. Macuácuá, ao Sr. Hognério e ao Sr. Américo, pelo apoio;
- Ao dr. Pedro Horácio Massinga e ao dr. Hermínio Muiambo, um especial agradecimento pelo ensinamento transmitido e pelas análises da amostra deste trabalho. Que a nossa amizade prevaleça;
- A Prof. Doutora Tatiana Kouleshova e ao dr. Eugénio Banze, pelo seu incentivo, carinho e amizade;
- E por fim aos meus familiares e amigos, pelo carinho, compreensão, estímulo e apoio dispensado ao longo da minha caminhada estudantil.

## **DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA**

Eu, António Teixeira Dias, candidato à conclusão do Curso de Química, declaro sob compromisso de honra que o presente trabalho de licenciatura foi por mim elaborado, unicamente com base nos recursos a que ao longo do mesmo faço referência, e que não existe nenhuma outra versão igual a esta, editada anteriormente.

Maputo, Julho de 2013

O autor

.....  
(António Teixeira Dias)

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

*Albert Einstein*

## RESUMO

O volume de resíduos gerados a cada ano vem crescendo em todo o mundo e apresenta um dos maiores problemas à sociedade moderna. Este trabalho tem como objectivo analisar a incorporação dos resíduos de cerâmica vermelha, gerados durante a produção e transporte de blocos cerâmicos da empresa Promac como material alternativo para a produção de argamassas.

De forma a avaliar a viabilidade da sua utilização os resíduos foram antes triturados, peneirados por meio de uma peneira porus de 75 µm de diâmetro, foi determinada a sua composição química e mineralógica por fluorescência e difracção de raios X.

Foi determinado o índice de actividade pozolânica com cimento. Para tal foram formuladas argamassas substituindo parcialmente o cimento pelos resíduos na proporção de 20, 25, 30 e 35%, e foram moldados os corpos de prova prismáticos. Os corpos de prova foram curados por 28 e 45 dias e, em seguida, foi determinada a resistência à compressão simples.

Verificou-se pelo ensaio índice de actividade e absorção de água que a mistura contendo 20% de resíduo cerâmico após 45 dias, pode ser recomendada como adequada para substituição parcial de cimento na preparação de argamassas.

Foram formuladas argamassas para blocos de concreto substituindo parcialmente o cimento pelos resíduos na proporção de 20, 25 e 30%, e foram moldados os corpos de prova cúbicos. Os corpos de prova cúbicos foram curados por 7 e 28 dias e, em seguida, foi determinada a resistência à compressão simples dos corpos de prova cúbicos, que foi de 16,2, 14,3 e 12,6 MPa para as proporções de 20, 25 e 30%, respectivamente.

Estes resultados são satisfatórios, visto que a norma NBR 6136 (1994) exige que a resistência à compressão simples seja superior a 4,5 MPa após 28 dias, para a argamassa ser usada para produção de blocos.

Os resultados obtidos mostram-se promissores quanto à utilização dos resíduos como adições pozolânicas.

Palavras-chave: Resíduos de cerâmica vermelha, Argamassas, Cimento Portland

# INDICE

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA .....	iii
RESUMO .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJECTIVOS.....	2
1.1.1 Objectivo geral .....	2
1.1.2 Objectivos específicos .....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
2.1 POZOLANA .....	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA POZOLANAS .....	5
2.3 INTERACÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND .....	6
2.3.1 Composição e Processos químicos de hidratação do cimento Portland .....	6
2.3.2 Hidratação do cimento.....	8
2.4 REACÇÃO POZOLÂNICA .....	11
2.5 ARGAMASSAS DE CIMENTO E A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NAS SUAS PROPRIEDADES .....	12
2.5.1 Cimento Portland.....	12
2.5.2 Agregado .....	13
2.5.3 Água.....	13
2.5.4 Adições minerais .....	14
2.6 BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA .....	14
2.6.1 Comportamento mecânico dos blocos de concreto .....	14
3 PARTE EXPERIMENTAL.....	16
3.1 COLECTA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA .....	17
3.2 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO .....	18
3.3 MÉTODOS.....	18
3.3.1 Fluorescência de Raios X .....	18

3.3.2	DIFRACÇÃO DE RAIO-X .....	19
3.4	ENSAIO DE ÍNDICE DE ACTIVIDADE .....	19
3.4.1	Índice de Actividade com Cimento Portland.....	19
3.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	23
3.6	ARGAMASSA DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA .....	24
3.6.1	Determinação da quantidade de água necessária a adicionar à argamassa para blocos de concreto .....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1	RESULTADOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (XRF) .....	27
4.2	RESULTADOS DE DIFRACÇÃO DE RAIOS X .....	27
4.3	ENSAIO DE ÍNDICE DE ACTIVIDADE .....	28
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	30
4.5	TENSÃO DOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS (ARGAMASSAS PARA BLOCOS DE CONCRETO).....	31
4.6	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS .....	32
5.	CONCLUSÕES.....	34
	BIBLIOGRAFIA.....	35
	ANEXOS.....	I

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágios do processo de hidratação do cimento.....	8
Figura 2: Fluxograma da parte experimental .....	16
Figura 4: Fragmento de tijolo antes de beneficiamento (a), pó de fragmento de tijolo (resíduo de cerâmica vermelha) após beneficiamento (b). .....	17
Figura 5: Triturador manual (a) e peneira de 75µm (b).....	18
Figura 6: Misturador mecânico (a) e compactador mecânico (b) usado para preparação da argamassa.....	21
Figura 7: Corpos de prova prismáticos na sala de cura .....	22
Figura 8: Pressas usadas para ensaios à flexão (a) e compressão (b) dos corpos de prova prismáticos .....	23
Figura 9: Aparelho Ultrax usado na determinação da quantidade de água necessária a ser adicionada à argamassa .....	24
Figura 10: Provetes cúbicos em cura.....	25
Figura 11: Prensa para determinação de resistência à compressão de blocos .....	25
Figura 12: Espectro de difração de Raios X do resíduo cerâmico moído: Q-quartzo (SiO <sub>2</sub> ); K-Caulite (Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> ); A-albite (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ); M-microlina (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ); H-hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ); R-rútilo (TiO <sub>2</sub> )....	27
Figura 13: Resultados dos ensaios à compressão aos 28 e 45 dias de idade .....	29
Figura 14: Resultados do índice de actividade pozolânica aos 28 e 45 dias .....	30
Figura 15: Resultados da absorção de água das misturas aos 28 e 45 dias .....	31
Figura 16: Resultados dos ensaios à compressão aos 7 e 28 dias de idade .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das pozolanas em classes de acordo com a sua composição química.....	5
Tabela 2: Classificação das pozolanas em classes de acordo índice de actividade pozolânica.....	5
Tabela 3: Óxidos compostos do cimento Portland e suas abreviações. ....	6
Tabela 4: Principais compostos do cimento Portland.....	7
Tabela 5: Principais características dos produtos de hidratação do cimento Portland .....	10
Tabela 6: Valores de resistência à compressão de blocos de concreto.....	15
Tabela 7: Proporção dos materiais para produção de argamassas para o ensaio de Índice de Actividade com cimento .....	21
Tabela 8: Proporção dos materiais para produção de argamassas para blocos de concreto .....	25
Tabela 9: Composição química do resíduo de cerâmica vermelha .....	27
Tabela 10: Resultados da resistência à compressão mecânica dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias.....	28
Tabela 11: Resultados da resistência à compressão mecânica dos corpos prismáticos aos 45 dias..	29

Tabela 12: Resumo da comparação múltipla da resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 e 45 dias .....	33
---	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

C-S-H	Silicato Hidratado de Cálcio
H	Água
CH	Hidróxido de cálcio
IA	Índice de Actividade
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado
C <sub>4</sub> AF	Ferro aluminato de Cálcio
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato de Cálcio
C <sub>2</sub> S	Silicato di-cálcico
µm	Micrómetro
MPa	Mega Pascal
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
LEM	Laboratório de Engenharia de Moçambique
NM NP EN	Norma Moçambicana adoptada da Norma Portuguesa e Europeia
NBR	Norma Brasileira

## 1 INTRODUÇÃO

No último século, grandes mudanças sociais decorrentes da revolução tecnológica, evolução industrial, crescimento populacional e urbanização mundial, resultaram em um acentuado consumo de matérias-primas e fontes de energia não renováveis, poluição do meio ambiente e geração incontida de resíduos (Pinheiro, 2008).

Esses problemas aumentam quando as únicas alternativas dadas aos resíduos são as incinerações e aterros, enquanto, quando devidamente comprovado o seu potencial, podem ser destinados como insumos na construção civil para produção de concretos e argamassas.

A indústria cerâmica, no seu processo de fabricação de revestimentos, tijolos e telhas, gera grande quantidade de resíduos. Esses resíduos cerâmicos, geralmente, são provenientes dos processos de queima e transporte dentro da própria indústria. Quando não destinados à reciclagem primária, acarretam em perdas económicas e problemas ambientais.

Vários estudos mostram que estes resíduos possuem propriedades cimentícias quando misturados com cimento Portland, pela sua capacidade de reagirem com hidróxido de cálcio da pasta hidratada do cimento, proporcionando a concretos e argamassas propriedades como baixo calor de hidratação, diminuição de permeabilidade, resistência ao ataque por iões sulfato e agentes agressivos no meio ambiente, diminuição das reacções álcali-agregado.

Por exemplo, Vieira (2005) avaliou os resíduos de cerâmica vermelha como substitutos parciais do cimento Portland na produção de argamassas e concretos, tendo concluído que para as misturas contendo 40% de resíduos de cerâmica a resistência foi de 89% em relação à da argamassa de controlo. Pinho (2003) estudou a substituição de 35% de cimento por resíduos de cerâmica vermelha em argamassas e concretos, tendo obtido o índice de actividade pozolânica de 78%, superior ao mínimo exigido pelas normas. Nascimento Jr. (2011) avaliou a resistência à compressão de concretos produzidos pela adição de resíduos de cerâmica, tendo concluído que a substituição de 10% de cimento por resíduos resultou numa resistência à compressão mecânica superior da argamassa de controlo. Ünal e Ay (2000) usaram os mesmos resíduos na produção de cimento e verificaram que estes poderiam ser adicionados até 35 % no cimento durante o processo de fabrico, reduzindo os custos de produção relativamente á matéria-prima.

Estes estudos mostram que a utilização destes resíduos pode ser satisfatória de forma a oferecer uma maior quantidade e variedade de materiais de construção de baixo custo, com qualidades superiores. Estes promovem eventuais reduções de custos na construção de habitações, além de minimizar o impacto ambiental. Para além disso, mais da metade da população Moçambicana vive abaixo da linha da pobreza e o custo de materiais de construção (cimento) aumentou nos últimos anos.

Portanto pozolanas de baixo custo (naturais ou industriais) devem ser exploradas para beneficiar a indústria de construção civil, assim como as pessoas com menos rendimentos. Perante esta conjuntura é de suma importância o estudo da incorporação destes resíduos em argamassas atendendo aos requisitos de qualidade, durabilidade, economia e do ambiente.

Este trabalho visa estudar a aplicabilidade do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico a ser utilizado como substituto parcial do cimento na produção de argamassas. Espera-se que a durabilidade melhore em resultado desta adição, proporcionando um duplo benefício ao meio ambiente, imobilizar este resíduo industrial agregando-lhe valor e reduzir o consumo de cimento, que certamente irá reduzir o consumo de recursos naturais.

## **1.1 OBJECTIVOS**

### **1.1.1 Objectivo geral**

Estudar o efeito da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha, gerados durante o processo de produção e transporte de blocos cerâmico, com vista à aplicação como adição pozolânica, na substituição parcial do cimento em argamassas e na produção de blocos de alvenaria.

### **1.1.2 Objectivos específicos**

- a) Determinar o índice de actividade pozolânica (IA) com cimento dos resíduos de cerâmica vermelha através do ensaio de resistência mecânica por compressão;
- b) Verificar a influência destes resíduos na impermeabilidade da pasta de cimento através do ensaio de absorção de água;

- c) Verificar a possibilidade de incorporação destes resíduos na substituição parcial do cimento Portland para a produção de blocos de concreto para alvenaria, através do ensaio de resistência mecânica por compressão;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 POZOLANA

Pozolana é um material silicioso ou silício-aluminoso que, por si só, não possui apreciável poder aglomerante hidráulico, mas que, em forma finamente dividida e na presença de humidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio, a temperaturas próximas à ambiente, para formar compostos que possuem poder aglomerante (Nita, 2007; Christófolli, 2010).

A aplicação destes materiais advém da antiguidade, desde os impérios Grego e Romano, onde grandes obras foram feitas, tendo algumas sobrevivido até hoje, como é o caso do Panteão na cidade de Roma e as estruturas Minoanas na Ilha de Creta, construídas entre 1500 – 2000 a.C., contendo fragmentos de cerâmica (argila calcinada) em argamassas de cal (Lima, 2004; Pontes, 2011).

Pozolanas são materiais naturais ou artificiais que, sendo adicionados a argamassas ou concretos, obtém-se um produto de baixo custo com características tecnológicas iguais ou superiores á desses produtos sem a adição. Em geral, caracterizam-se por terem na sua constituição elevado teor de sílica e alumina, por apresentarem elevado teor de fase amorfa e grande superfície específica (Christófolli, 2010; Pinho, 2003; Habert *et al.*, 2008).

O uso de pozolanas em adição ao cimento confere ao concreto e argamassa características como:

- Menor calor libertado durante a hidratação do cimento, devido à troca de reacções exotérmicas provenientes da hidratação do cimento, por reacções atérmicas (que não absorvem nem libertam calor, isto é, não são afectadas pela temperatura) provenientes da inserção destes materiais na pasta hidratada de cimento;
- Melhor resistência à compressão mecânica e ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento Portland, durante a reacção pozolânica com formação de silicato hidratado de cálcio (C-S-H);
- Maior durabilidade e impermeabilidade, contribuindo na inibição da reacção álcali-agregado e na diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos;
- Aumento da resistência à fissuração devido à redução da reacção álcali-agregado.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS

As pozolanas de acordo com a sua origem podem ser classificadas em naturais (materiais com teor de SiO<sub>2</sub> acima de 65%) e artificiais ou subprodutos industriais (argilas calcinadas, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e outros) (Pinheiro, 2008; Habert *et al*, 2008)

Quanto à sua composição química e de acordo com o índice de actividade pozolânica com cimento Portland e cal podem ser classificadas em três classes N, C e E (Tabelas 1 e 2).

Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de carácter petrográfico ácido, “cherts”<sup>1</sup>silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Os da Classe C são cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeléctricas. O material da Classe E é qualquer pozolana cujas características diferem das apresentadas pelas classes anteriores.

**Tabela 1:** Classificação das pozolanas em classes de acordo com a sua composição química

	Classe de materiais pozolânicos		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín	70	70	50
SO <sub>3</sub> , % máx	4	5	5
Teor de humidade, % máx	3	3	3
Perda ao fogo, % máx	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1.5	1.5	1.5

Fonte: ASTM- C 168 (1992)

**Tabela 2:** Classificação das pozolanas em classes de acordo o índice de actividade pozolânica.

Propriedades	Classe de materiais pozolânicos		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
<b>Índice de actividade pozolânica</b>			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controlo, % mín.	75	75	75
Com a cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: ASTM- C 168 (1992)

<sup>1</sup>Cherts silicosos -rochas sedimentares que se formam a partir de materiais de origem orgânica, materiais de deposição simples ( argilas calcinadas naturalmente).

## 2.3 INTERACÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND

O conhecimento acerca dos compostos químicos do cimento, dos processos químicos que ocorrem durante a sua hidratação, bem como dos compostos resultantes, é necessário na medida em que se pretende compreender o processo de reacção dos materiais pozolânicos, quando usados junto ao cimento.

Cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água (Coutinho, 2006; Teng Jr, 2011).

### 2.3.1 Composição e Processos químicos de hidratação do cimento Portland

O cimento Portland consiste de vários compostos de cálcio, mas que são expressos em termos dos óxidos dos elementos presentes, como resultado de análises químicas. Os óxidos são expressos segundo suas abreviações, conforme a Tabela 3:

**Tabela 3:** Óxidos compostos do cimento Portland e suas abreviações.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
$\text{SiO}_2$	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
MgO	M	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
$\text{SO}_3$	s	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
$\text{H}_2\text{O}$	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$

Fonte: (Netto, 2006)

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), uma certa quantidade de magnésia (MgO) e uma pequena percentagem de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) e ainda em menores quantidades os óxidos de sódio e de potássio, e outras substâncias de menor importância ( Teng Jr 2011; Netto, 2006).

Quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes deste ligante, os quais se encontram discriminados na Tabela 4:

**Tabela 4:** Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviações
Silicato tri cálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato di cálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tri cálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferro aluminato tetra cálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fonte: (Vieira, 2005)

O silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), conhecido também como alite, é normalmente preponderante, aparecendo como pequenos grãos equidimensionais incolores, compondo entre 60% e 67% do cimento Portland. A sua hidratação apresenta desprendimento de calor médio, e é o maior responsável pela resistência mecânica nas primeiras idades nos concretos e argamassas (Netto, 2006).

O silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), também conhecido como belite, apresenta grão arredondado, geralmente geminados, constituindo usualmente entre 17% e 25% na composição do cimento Portland. A sua hidratação ocorre lentamente, apresentando baixo desprendimento de calor, sendo responsável pela resistência mecânica nas idades mais avançadas (Netto, 2006).

O terceiro composto é o aluminato de cálcio ( $\text{C}_3\text{A}$ ), conhecido como aluminato, forma cristais rectangulares, aparecendo entre 3% e 8% na composição do cimento Portland. A sua hidratação é extremamente rápida, cristalizando em poucos minutos, contribuindo especialmente para a resistência mecânica ao primeiro dia.

Apresenta elevado desprendimento de calor, e não promove aumento da resistência em idades posteriores. Além disso, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez da pega<sup>2</sup>, mas que pode ser controlado com a adição de sulfato de cálcio (Netto, 2006).

O quarto composto é ferro aluminato de cálcio ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) é uma solução sólida, compõe entre 0,5% e 0,6% do cimento Portland. A sua hidratação é rápida, mas não tão intensa quanto o  $\text{C}_3\text{A}$ , apresentando médio desprendimento de calor, contribuindo muito pouco para a resistência mecânica nas primeiras idades (Netto, 2006).

---

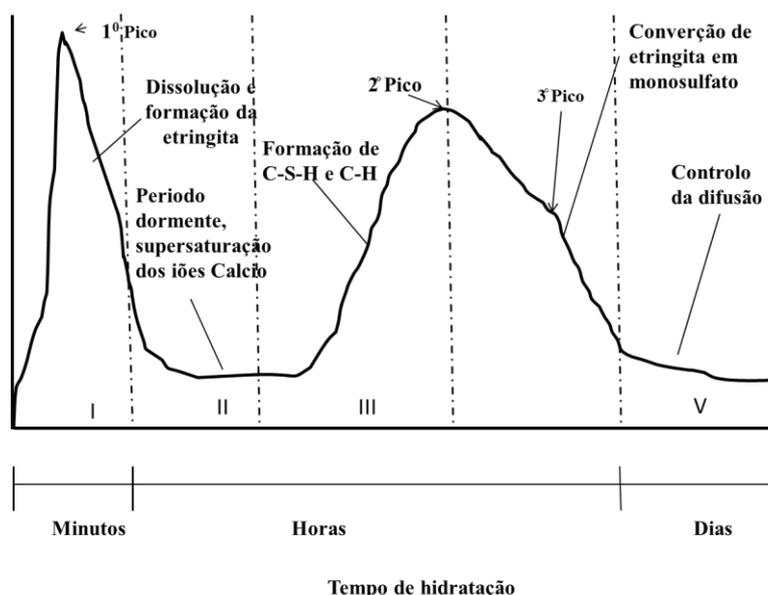
<sup>2</sup> O termo “pega” é definido como a solidificação da pasta de cimento. O início desta solidificação é denominado como início de pega e é o ponto no qual a pasta se torna não trabalhável. O tempo que leva para ocorrer a solidificação completa é o tempo de fim de pega (Coutinho, 2006).

### 2.3.2 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento pode ser analisada como a soma das reacções químicas dos vários compostos individuais do cimento em contacto com a água, que ocorrem simultaneamente.

Com a introdução de água, os componentes do cimento começam a hidratar-se, formando compostos que, em sua maioria, são silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Estes começam a formar uma rede microestrutural coesiva, desenvolvendo-se com o aumento do número de hidratos (Nita, 2007; Netto, 2006).

Essas reacções de hidratação são um processo exotérmico, e podem ser divididas em cinco estágios em relação ao tempo, como é mostrado na Figura 1.



**Figura 1:** Estágios do processo de hidratação do cimento. Fonte: (Netto, 2006)

Os estágios são descritos abaixo (Netto, 2006):

Estágio I: Nos primeiros instantes (15 a 20 minutos), o cimento começa a ser dissolvido na água formando uma suspensão de iões, dentre os quais o  $Al^{3+}$  reage instantaneamente com o gesso e a água, libertando uma grande quantidade de calor, promovendo o primeiro pico exotérmico. Desta reacção resulta uma camada chamada de etringite.

Quando os iões de cálcio e de hidróxido alcançam concentrações críticas, a cristalização de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de hidróxido de cálcio (CH) começa.

Estágio II: Chamado período dormente ou de indução (2 a 4 horas depois da hidratação do cimento). Neste período a dissolução dos minerais do cimento é concluída, aumentando a concentração de iões na solução. O hidróxido de cálcio cristaliza da solução, e o C-S-H desenvolve-se na superfície de  $C_3S$ , formando uma cobertura, o  $C_2S$  hidrata a uma taxa mais lenta porque é um componente menos reactivo.

Neste estágio ocorre uma baixa libertação de calor. Com o desaparecimento do  $SO_4^{2-}$  na solução vem a instabilidade da camada de etringite, causando a sua desintegração e dando fim ao período dormente.

Estágio III: (4 a 8 horas), é marcado pela concentração crítica de iões e a conseqüente retomada das reacções vigorosas. A taxa máxima de reacção acontece nesta fase, promovendo uma forte libertação de calor que dá origem ao segundo pico exotérmico. A pega chega ao final e inicia o endurecimento.

Estágio IV: (8 a 12 horas), ocorre a conversão da etringite em monossulfato pela sua reacção com os iões  $Al^{3+}$  não reagidos.

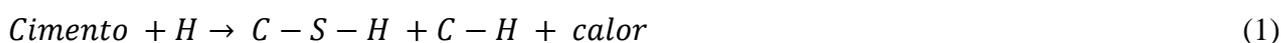
Estágio V: Chamado controlo de difusão (12 a 24 horas), os iões  $Al^{3+}$  remanescentes reagem formando novos hidratos que, juntamente com os hidratos precipitados dos iões  $Ca^{2+}$ , formam uma protecção em torno do grão de cimento, impedindo o contacto da água livre com a sua parte não hidratada.

Os principais produtos (fases sólidas principais) geralmente presentes na pasta são: Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), a Portlandite (CH) e os sulfoaluminatos. Suas quantidades e principais características estão descritas na tabela 5:

**Tabela 5:** Principais características dos produtos de hidratação do cimento Portland

Produto	Quantidade	Características
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	50 a 60% do volume de sólidos da pasta hidratada	Responsável pela alta resistência mecânica adquirida após o endurecimento;
Portlandite (CH)	20 a 25% do volume do sólido da pasta hidratada	Não contribui potencialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida; Desfavorável sobre a resistência química a soluções ácidas, em razão da sua alta solubilidade;
Sulfo-aluminatos	15 a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada	Desempenham papel menos importante na resistência mecânica; Vulneráveis ao ataque por sulfatos;

Para além destes na pasta de cimento após a hidratação pode-se encontrar espaços não preenchidos entre os grãos de cimento denominados poros capilares (Vieira, 2005). A reacção de hidratação do cimento é geralmente apresentada de forma simplificada como:



onde:

C-S-H      Silicatos de cálcio hidratado;

C-H        Hidróxido de cálcio ou Portlandite;

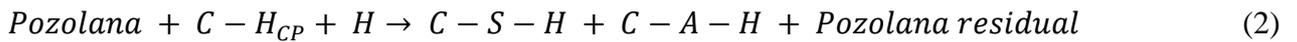
H          Água;

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que o CH é, pois, o ponto fraco da estrutura da pasta de cimento, visto que, sendo o mesmo um produto solúvel pode ser lixiviado, deixando a estrutura porosa e resultando não apenas na diminuição da resistência, mas também no aumento da permeabilidade, com consequências negativas para a durabilidade da mesma.

## 2.4 REACÇÃO POZOLÂNICA

É a capacidade que a pozolana tem, seja ela natural ou artificial, de se combinar quer com hidróxido de cálcio quer com os constituintes do cimento hidratado, tendo como produto final um material com propriedades cimentícias (silicato hidratado de cálcio – C-S-H) (Linhares, 2010; Pontes 2011).

Abaixo encontra-se representada de forma simplificada a reacção pozolânica:



onde:

$CH_{CP}$	Hidróxido de cálcio do cimento Portland;
H	Água;
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado, $CaO.SiO_2.H_2O$ ;
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado, $CaO.Al_2O_3.H_2O$ .

A pozolana reage com o CH da pasta do cimento, formando novos compostos cimentícios resistentes, como o silicato de cálcio hidratado (Ergün, 2011; Nascimento Jr, 2011).

Das reacções pozolânicas decorrem três aspectos positivos para a qualidade da pasta de cimento hidratada (Pinheiro, 2008; Pontes, 2011):

- A reacção é lenta, portanto, as taxas de libertação de calor também são lentas;
- A reacção consome hidróxido de cálcio, em vez de produzi-lo, o que tem um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos;
- Os produtos da reacção são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência à impermeabilidade.

As partículas finamente divididas da pozolana residual (que não reagem com os produtos de hidratação do cimento) e outros compostos formados durante a reacção pozolânica actuam apenas como *filler*, reduzindo a porosidade da estrutura resultante (Linhares, 2010; Pinheiro, 2008).

O *filler* é um material finamente dividido sem actividade química, cuja actuação é basicamente um efeito físico de empacotamento granulométrico ou dos espaços vazios na pasta (Coutinho, 2006).

A combinação dos efeitos pozolânico e *filler* decorrentes da reacção pozolânica representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos.

A aptidão dos materiais pozolânicos de reagir com a cal, formando compostos de propriedades aglomerantes, reside no facto de o silício e o alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atómicamente (Ergün, 2011; Pinheiro, 2008) e a instabilidade destes em meio básico (Pontes, 2011).

## **2.5 ARGAMASSAS DE CIMENTO E A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NAS SUAS PROPRIEDADES**

Argamassa é uma mistura homogénea de agregado (s) miúdo (s), aglomerante (s) inorgânico (s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento (Roque, 2012).

As argamassas possuem diversas propriedades importantes, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, dependendo da função que irão desempenhar, propriedades relacionadas as características dos materiais constituintes, a proporção entre eles e o processo de mistura empregado são importantes.

### **2.5.1 Cimento Portland**

O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica das argamassas. Em relação ao consumo de cimento, o seu aumento provoca uma maior retracção térmica e, por secagem, pode levar ao surgimento de fissuras com a consequente redução da durabilidade.

Por outro lado, baixos consumos podem reduzir a resistência à abrasão dos revestimentos, tornando-os desagregáveis (Kanning, 2010).

A finura é uma das características do cimento que tem importância com relação às argamassas. Normalmente, quanto mais fino o cimento, maior será a velocidade de reacção. Isto acontece porque quanto maior a superfície de contacto do cimento maior será a velocidade da reacção.

Outra característica que deve ser considerada é o tempo de pega do cimento. Este limita o tempo de transporte e aplicação da argamassa.

### **2.5.2 Agregado**

Os principais objectivos da incorporação de areia na argamassa são:

- Promover estabilidade dimensional (minimizando os efeitos da retracção);
- Reduzir o custo, já que é um material mais barato do que o cimento.

A areia deve ser de granulometria contínua, para que ocorra um aumento da trabalhabilidade, devido ao maior grau de empacotamento da mistura, em que os grãos de diâmetro menor preenchem os espaços entre os grãos de diâmetro superior, propiciando melhor deslizamento entre os grãos. O excesso de areia fina diminui a resistência à abrasão do revestimento, devido à insuficiência de pasta aglomerante para envolver os agregados (Kanning, 2010; Roque, 2012).

### **2.5.3 Água**

As principais funções da água nas argamassas são:

- Combinar quimicamente com o aglomerante, promovendo o endurecimento e aumento da resistência mecânica;
- Dar trabalhabilidade para a mistura.

Para obtenção de plasticidade e consistência adequadas é necessária uma quantidade óptima de água, que é definida em função da natureza e da proporção dos materiais, resultando em argamassas homogéneas e coesas, devendo-se evitar portanto seu excesso, pois o mesmo provoca uma redução no desempenho e na durabilidade da argamassa (Roque, 2012).

#### **2.5.4 Adições minerais**

Adições minerais são materiais de origem mineral que, adicionados à argamassa, modificam algumas das suas propriedades melhorando determinadas condições, por exemplo: trabalhabilidade, tempo de pega, controlo do desenvolvimento de resistência, resistência à fissuração.

Os aditivos minerais mais comumente utilizados são as pozolanas e os *filleres*. Dentre os *filleres* tem-se o pó de pedra e material carbonático (Filho, 2007; Roque, 2012).

### **2.6 BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA**

A utilização de blocos de concreto na alvenaria teve início logo após o surgimento do cimento Portland, quando se começou a produzir unidades grandes e maciças de concreto.

A partir de então surgiram diversos esforços para a modernização da fabricação de blocos de concreto, assim como da sua utilização na alvenaria.

Os materiais utilizados na fabricação de blocos de concreto são basicamente: cimento Portland, agregados graúdo e miúdo, e água. Dependendo de requisitos específicos, a dosagem do concreto poderá também empregar outros componentes, tais como adições minerais, etc.

Para se obter boas propriedades mecânicas, durante a fabricação de blocos de concreto deve-se logo de seguida fazer a cura em ambiente saturado para evitar a perda de água durante as primeiras fases do endurecimento.

A cura húmida deve ser realizada em local livre de insolação directa e de ventos, evitando-se ciclos de secagem e molhagem, e deve possuir controlo de temperatura e humidade no local (Filho, 2007).

#### **2.6.1 Comportamento mecânico dos blocos de concreto**

A resistência à compressão axial das alvenarias está directamente relacionada com a resistência à compressão das unidades que a constituem. A razão entre a resistência à compressão da alvenaria e a dos blocos define o factor de eficiência das paredes (Filho, 2007).

A NBR7173:1982 determina que a resistência à compressão mínima para os blocos de vedação é 4,5 MPa. A NBR6136:1994 estabelece as seguintes condições quanto ao uso:

- CLASSE AE – para uso geral, como paredes externas acima ou abaixo do nível do solo, que podem estar expostas à humidade ou intempéries, e que não recebem revestimento de argamassa de cimento;
- CLASSE BE – limitada ao uso acima do solo, em paredes externas com revestimento de argamassa de cimento, para protecção contra intempéries e paredes não expostas a intempéries.

Os blocos vazados de concreto, confeccionados de acordo com esta Norma, quanto a valores resistência mecânica devem ser classificados conforme a Tabela 6.

**Tabela 6:** Valores de resistência à compressão de blocos de concreto

Classe de resistência mecânica	Valores de resistência à compressão (MPa)
Classe AE	$\geq 6$
Classe BE	$\geq 4.5$

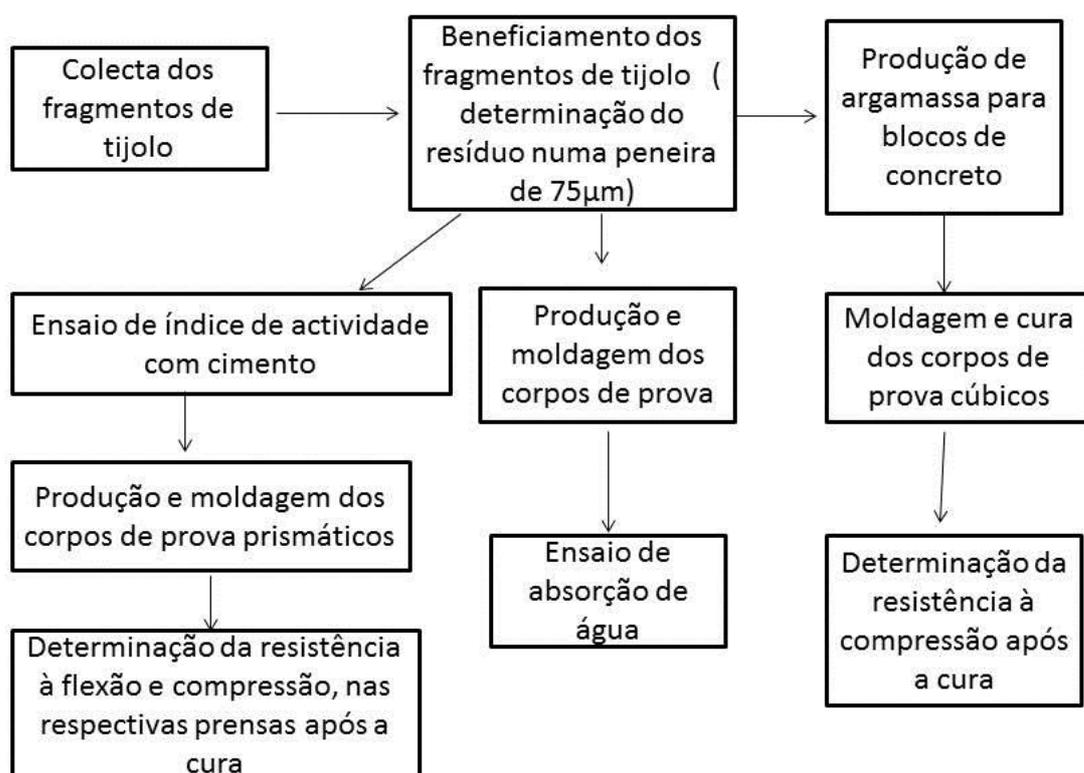
Fonte: NBR 6136 (1994)

### 3 PARTE EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento da parte experimental foi utilizado o Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas do Laboratório de Engenharia de Moçambique-LEM.

A parte experimental foi dividida em duas partes:

- A primeira parte consistiu na colecta do resíduo de cerâmica vermelha (fragmentos de tijolo) e seu beneficiamento.
- A segunda parte foi relacionada com a preparação, moldagem dos corpos de prova prismáticos e cúbicos, e, ensaios físico-mecânicos dos mesmos, conforme o diagrama de execução da parte experimental apresentada na Figura 2.



**Figura 2:** Fluxograma da parte experimental

### 3.1 COLECTA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

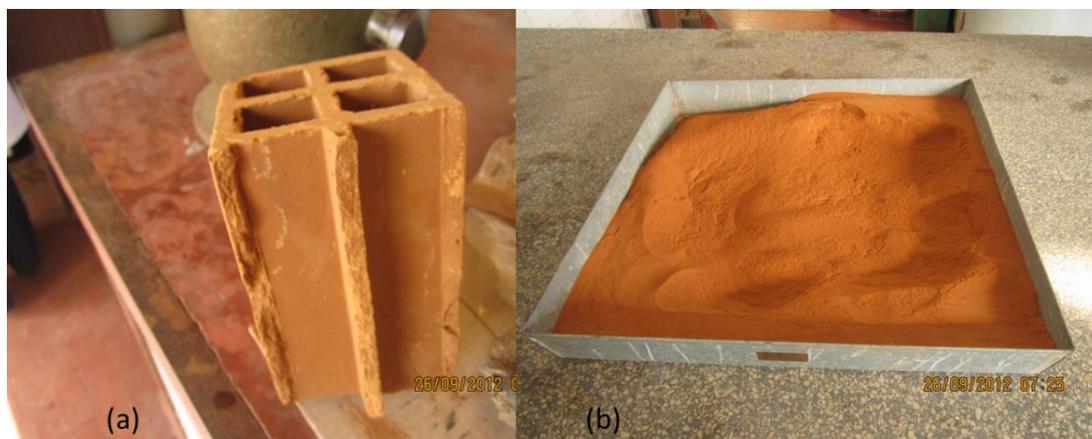
O resíduo cerâmico (RC) utilizado no presente trabalho, foi obtido da Cerâmica **Promac**, localizada no distrito de Boane, na Província de Maputo.

O mesmo consistiu de fragmentos de cerâmica vermelha (tijolos), peças que não apresentam qualidade de acabamento, conformidade dimensional (Figura 3 (a)). Estes desperdícios são provenientes de quebras no processo produtivo ou de transporte, tornando-se inadequadas ao comércio.

Os resíduos foram ensacados em sacos plásticos, etiquetados e transportados para o laboratório. Não foi permitido o registo fotográfico das actividades, espaço da indústria e o processo de produção das peças cerâmicas.

Para utilização como material pozolânico os resíduos passaram por um processo de separação de materiais, para retirada de materiais não cerâmicos, como madeira, plásticos, etc.

Em seguida o mesmo sofreu um processo de moagem, visando a obtenção de finura adequada para substituição do cimento (Figura 3 (b)).



**Figura 3:** Fragmento de tijolo antes de beneficiamento (a), pó de fragmento de tijolo (resíduo de cerâmica vermelha) após beneficiamento (b).

## 3.2 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO

Antes da moagem, os blocos foram triturados manualmente com um martelo sem controle da granulometria.

Após a trituração manual, os resíduos foram moídos em um triturador manual (Figura 4 (a)) e posteriormente foram peneirados em uma peneira de 75 micrómetros (Figura 4 (b)) para sua homogeneização.



**Figura 4:** Triturador manual (a) e peneira de 75 $\mu$ m (b)

## 3.3 MÉTODOS

### 3.3.1 Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica utilizada para identificação e quantificação relativa dos elementos químicos presentes em uma amostra, sob a forma de óxidos. Os resultados são apresentados em dados de percentagem relativa, fornecendo teores dos elementos traços até elementos maiores.

Constitui uma das mais importantes ferramentas para a análise química. Não há necessidade de uma preparação complexa das amostras e, ainda, oferecendo a vantagem de ser um método analítico não destrutivo. Em contrapartida, não indica como o elemento está combinado nem em que fase se encontra.

A técnica baseia-se na emissão de raios X que são absorvidos pelos átomos que, por sua vez, ficam momentaneamente excitados. Após esse processo praticamente instantâneo, os átomos libertam a energia recebida voltando ao seu estado fundamental e emitindo fluorescência.

A emissão é proporcionada pela ocupação da vacância electrónica por um electrão de uma camada superior. A fluorescência emitida pelos átomos possui uma energia característica para cada elemento e a intensidade dos picos presentes no espectro é proporcional à concentração do elemento na amostra (Silva, 2011).

### **3.3.2 DIFRACÇÃO DE RAIOS X**

É uma técnica que serve para determinar a composição mineralógica de um material. A difracção de Raios X ocorre devido ao espalhamento desses raios pelos átomos da rede cristalina. Quando ocorre espalhamento dos raios, ocorre uma interferência entre os raios espalhados (tanto construtiva como destrutiva), resultando então numa figura de difracção, que é captada pelo equipamento e compara com um banco de dados, fornecendo assim um gráfico (Pinheiro, 2008).

## **3.4 ENSAIO DE ÍNDICE DE ACTIVIDADE**

### **3.4.1 Índice de Actividade com Cimento Portland**

O índice de actividade (IA) com o cimento Portland é uma das exigências físicas para a classificação de um material como sendo pozolânico e substituir o cimento, na produção de argamassas.

O ensaio tem como objectivo comparar a resistência à compressão de duas argamassas. A argamassa de controlo é preparada com areia normal, usando-se como aglomerante apenas o cimento Portland, no traço<sup>3</sup> de 1:3 (em massa). Na segunda argamassa, o volume absoluto do cimento Portland deve ser substituído em 35% pelo material pozolânico.

---

<sup>3</sup> É a indicação da quantidade dos materiais que constituem as argamassas e os concretos. Os traços são indicados da seguinte maneira: 1:3, 1:3:4, sendo que o 1º algarismo indica a quantidade de cimento a ser usado.

A quantidade de água necessária deve ser de  $(225 \pm 5)$  ml. É recomendada a moldagem de três corpos de prova prismáticos, que seguem para cura em câmara húmida durante  $(24 \pm 2)$  horas, à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. Após este período, são retirados das formas e submetidos à cura durante mais 27 dias. Depois determina-se a resistência à compressão dos corpos de prova.

Como descrito na norma ASTM C 618 (2008) o índice de actividade (IA) é definido como:

$$IA = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (3)$$

onde:

A- média da resistência à compressão de corpos de prova de argamassa com material pozolânico;

B - média da resistência à compressão de corpos de prova de argamassa de controlo.

De acordo com esta norma, IA deve ser no mínimo de 75% e 85 % em relação à argamassa de controlo nas idades de 28 dias e superiores, respectivamente.

O IA ajuda a determinar valores relativos à resistência mecânica que ajudam a elaborar as dimensões de peças de betão a usar em uma obra, a especificar traços e condições de aplicações de argamassas (Pontes, 2011).

### **Preparação dos corpos de prova prismáticos**

Para preparação dos corpos de prova utilizou-se o material e o equipamento e seguiu-se o procedimento descrito de seguida.

Utilizou-se uma misturadora de argamassa, normalizada e com temporização da marca Maurice Perrie, prensas de ensaios de resistência à flexão e compressão e moldes normalizados com dimensões 4x4x16 cm.

Utilizou-se cimento Portland 32,5N, pó de fragmentos de cerâmica vermelha moída e água destilada e areia local<sup>4</sup>.

A quantidade de materiais utilizados na preparação das argamassas para os corpos de prova prismáticos com e sem resíduo estão discriminados na Tabela 7:

---

<sup>4</sup>Esta areia está dividida em 6 classes de diferente granulometria, ver anexo D.

**Tabela 7:** Proporção dos materiais para produção de argamassas para o ensaio de Índice de Actividade com cimento

Percentagem de substituição do cimento (%)	Designação da mistura	Cimento (g)	Resíduo de cerâmica (g)	Areia (g)	Água (ml)
0	A	450	0	1350	225
20	B20	360	90		
25	B25	337.5	112.5		
30	B30	315	135		
35	B35	292.5	157.5		

Na preparação de amassadura para argamassa de referência (mistura A), pesou-se 450 g de cimento, 1350g de areia e mediu-se 225 ml de água destilada. Efectuou-se duas amassaduras para as idades de 28 e 45 dias. Colocou-se no misturador mecânico (Figura 5 (a)) na sequência: areia, cimento e água e procedeu-se à amassadura, de acordo com a norma NM NP EN 196-1:2000.

A preparação de argamassas com teor de resíduos de cerâmica vermelha em substituição parcial ao cimento Portland seguiu a mesma técnica descrita anteriormente. No entanto, a proporção de resíduo foi correspondente a 20%, 25%, 30% e 35% em relação ao cimento. Efectuou-se também duas amassaduras para as idades de 28 e 45 dias.

Após a amassadura realizou-se a moldagem. A moldagem foi feita em duas camadas (a primeira corresponde a cerca de metade da altura do molde), compactadas com 60 pancadas em compactador mecânico (Figura 5 (b)). Após a moldagem os provetes foram conservados em uma câmara de cura por 24 horas.



**Figura 5:** Misturador mecânico (a) e compactador mecânico (b) usado para preparação da argamassa

Após 24 horas em câmaras de cura a 20 °C e 90% de humidade relativa, desmoldou – se os provetes e colocou-se na sala de cura (Figura 6), para a continuação da cura até a idade em que foram testados.



**Figura 6:** Corpos de prova prismáticos na sala de cura

A cada idade dos provetes procede-se à determinação das resistências no equipamento respectivo, primeiro à flexão (Figura 7 (a)) e depois com as metades sobrantes procede-se o ensaio compressão<sup>5</sup> (Figura 7 (b)). Todos os resultados são expressos em MPa e calculados de acordo com as seguintes equações<sup>6</sup>:

Cálculo da resistência à flexão:

$$\delta = 0,001148 \times F_{média}, [MPa] \quad (4)$$

onde:

$\delta$  : Resistência à flexão (MPa);

$F_{média}$ : Carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N/mm<sup>2</sup>).

Cálculo da resistência à compressão

$$\delta = 0,000625 \times F_{média}, [MPa] \quad (5)$$

onde:

$\delta$  : Resistência à compressão (MPa);

$F_{média}$ : Carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N/mm<sup>2</sup>).

<sup>5</sup>Para o ensaio à compressão aplicou-se uma carga constante de 2400N/s, à uma velocidade de 1.5 m/s.

<sup>6</sup> Ao resultado, obtido por estas equações multiplica-se por um factor 1.2 de correcção da areia, por esta estar dividida em classes.



**Figura 7:** Prensas usadas para ensaios à flexão (a) e compressão (b) dos corpos de prova prismáticos

### 3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Este ensaio serve para testar se durante a reacção entre a pozolana e o hidróxido de cálcio proveniente da pasta de cimento hidratado, esta pode fechar espaços não preenchidos na matriz do cimento e assim ajudar na durabilidade da matriz, diminuindo a permeabilidade (Mirza *et al*, 2009).

A produção dos provetes para o ensaio de absorção de água, segue a mesma técnica de preparação de corpos de provas prismáticos descrito no ensaio de índice de actividade com cimento, efectuou-se portanto uma amassadura para todas as composições, para 28 e 45 dias de idade.

Neste ensaio, diferente do outro, os provetes depois da cura são mantidos na estufa por um período de 24 horas a 105 °C e pesados, depois são imersos na água por um período de 24 horas e pesados novamente.

A absorção de água é determinada como:

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (6)$$

onde:

$m_1$ :           Peso do provete saturado (g);

$m_2$ :           Peso do provete seco na estufa (g).

### 3.6 ARGAMASSA DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA

Para verificar a possibilidade de utilização de resíduos de cerâmica vermelha na produção de blocos de concreto foram utilizadas composições de misturas argamassas cuja à resistência à compressão durante o ensaio de índice de actividade aumentou com o tempo de cura.

#### 3.6.1 Determinação da quantidade de água necessária a adicionar à argamassa para blocos de concreto

A quantidade de água a adicionar à argamassa para produção de blocos de concreto é 10% da massa total da mistura. Esta quantidade é teórica, portanto para determinar a quantidade de água real a adicionar às misturas usou-se o aparelho UltraX (Figura 8).



**Figura 8:** Aparelho Ultrax usado na determinação da quantidade de água necessária a ser adicionada à argamassa

Para a produção de argamassa para blocos de concreto para alvenaria, obedeceu-se ao traço de 1:6 em termos de cimento e areia, por ser o traço mais usado na produção de blocos de alvenaria. Utilizou-se o material e o equipamento e seguiu-se os procedimentos descritos de seguida.

Utilizou-se moldes normalizados com dimensões 5x5x5 cm, compactador manual, pá de pedreiro e prensa de ensaio a resistência à compressão.

Utilizou-se cimento Portland 32.5N, água destilada, pó de fragmentos do resíduo de cerâmica vermelha, areia Incomáti de granulometria 5.9 mm.

A quantidade de materiais utilizados na preparação das argamassas para os corpos de prova prismáticos com e sem resíduo estão discriminados na Tabela 8:

**Tabela 8:** Proporção dos materiais para produção de argamassas para blocos de concreto

Porcentagem de substituição (%)	Designação	Cimento (g)	Resíduo (g)	Areia (g)	Água (ml)
0	E0	214.3	0	1285.7	120
20	E20	171,4	42.9		130
25	E25	160.7	53.6		140
30	E30	150.0	64.3		150

Para produção de argamassa sem substituição, pesou-se 214.3 g de cimento, 1285.7 g de areia e mediu-se 120 ml de água. Colocou-se a mistura de cimento e areia numa mesa, deitou-se água e com ajuda de uma pá de pedreiro misturou-se até ela ficar plástica e homogênea.

Após a produção das argamassas foram moldados 6 corpos de prova cúbicos (3 para 7 dias e outros para 28 dias) em moldes de 5x5x5 cm. Primeiro untou-se os moldes com óleo, de seguida encheu-se os moldes com ajuda de um compactador manual, compactou-se a pasta para garantir uniformidade, depois desmoldou-se e foram conservados por um período de 24 horas, em uma câmara húmida com temperatura aproximadamente igual a 23 °C e humidade relativa maior que 95%.

A preparação de provetes com teores de resíduos de cerâmica vermelha em substituição parcial do cimento Portland seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente, tendo-se substituído parcialmente o cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha na proporção de 20%, 25% e 30% em relação ao cimento.

Após 24 horas, colocou-se os provetes num recipiente com água para a cura (Figura 9) até à idade em que serão testados. Neste estudo, as idades de controlo escolhidas são de 7 e 28 dias.



**Figura 9:** Provetes cúbicos em cura



**Figura 10:** Prensa para determinação de resistência à compressão de blocos

A cada idade dos corpos de prova, procede-se à determinação da resistência mecânica à compressão, na respectiva prensa (Figura 10). Todos os resultados são expressos em MPa e calculados de acordo com a equação (7):

$$\tau = \frac{F}{S}, \left[ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \quad (7)$$

onde:

$S$ - Área do cubo, [cm<sup>2</sup>];

$F$ - Força aplicada ao corpo-de-prova, [kgf].

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (XRF)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, o resíduo de cerâmica vermelha usado neste trabalho, é um material pozolânico de classe N, pois ele cumpre com todos os requisitos exigidos pela Norma ASTM C168 (1992).

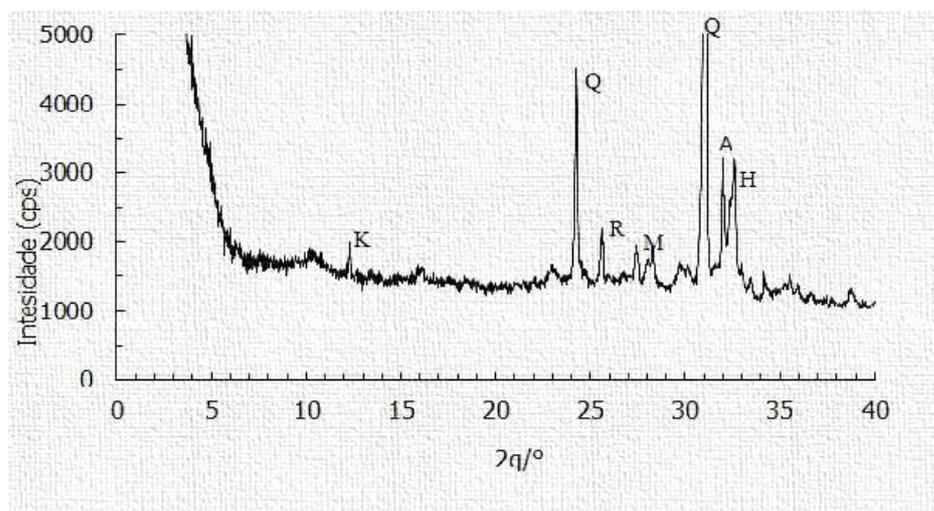
Tabela 9: Composição química do resíduo de cerâmica vermelha

Componente	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CuO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
% (massa)	15.80	7.18	1.65	< 0.01	0.07	2.38	0.13	0.02
Componente	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	ZrO <sub>2</sub>	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	LOI*
% (massa)	67.10	1.08	0.41	0.08	0.01	0.03	1.32	1.39

\*Perda ao Fogo

### 4.2 RESULTADOS DE DIFRACÇÃO DE RAIOS X

A presença de material amorfo é uma das exigências para que o material seja considerado como pozolânico, por isso, fez-se uma análise do resíduo por difração de Raios X na tentativa de verificar a presença de fases amorfas.



**Figura 11:** Espectro de difração de Raios X do resíduo cerâmico moído: Q-quartzo (SiO<sub>2</sub>); K-Caulite (Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>); A-albite (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>); M-microcline (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>); H-hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); R-rútilo (TiO<sub>2</sub>).

O difractograma de raios X (Figura 11) mostra que o resíduo cerâmico apresenta materiais cristalinos (picos intensos) na sua composição, como o caso de Quartzo, hematite, rútilo, estes cristais podem ser pouco ou não reactivos no sistema pozolana-cimento, os quais actuam apenas como filler. Observa-se também que o resíduo contém um composto amorfo, talvez metacaulite nos picos largos de  $5^\circ 2\theta$  a  $22^\circ 2\theta$ , que pode ter sido formado durante o processo de calcinação da argila (Vieira, 2005).

### 4.3 ENSAIO DE ÍNDICE DE ACTIVIDADE

Nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras 12 e 13 apresentam-se os resultados obtidos em termos de resistência mecânica à compressão e os respectivos índices de actividade referentes às misturas em estudo.

**Tabela 10:** Resultados da resistência à compressão mecânica dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias

Misturas	Resistência individual dos corpos de prova (MPa)						Média (MPa) ± erro acidental	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3	4	5	6			
A	26.25	28.20	27.36	24.75	21.00	29.55	26.18±1.23	3.02	11.54
B20	19.06	13.80	12.00	14.85	0.30*	18.00	15.54±1.31	2.93	18.88
B25	17.40	16.80	16.20	17.85	17.55	16.80	17.10±0.24	0.60	3.55
B30	18.00	18.30	15.30	14.25	18.60	21.15	17.60±1.01	2.48	14.09
B35	22.2	24.45	22.80	20.40	20.85	21.90	22.10±0.59	1.45	6.56

\* valor excluído do cálculo da média.

Na Figura 12 estão ilustrados resultados médios da resistência à compressão obtida referente às misturas em estudo.

De acordo com os dados ilustrados na Figura 12 é possível verificar o seguinte:

- Todas as misturas estudadas (B20, B25, B30 e B35) nas idades de 28 e 45 dias apresentaram valores de resistência à compressão inferiores aos da mistura padrão (A);
- Em relação a mistura padrão argamassa (A) a diminuição da resistência à compressão aos 28 dias foi de 10.6, 9.0, 8.5, 4.0 MPa e aos 45 dias foi de 3.1, 4.1, 8.2 e 7.0 MPa para as misturas com adição de 20, 25, 30 e 35 % de resíduo cerâmico, respectivamente, devido a

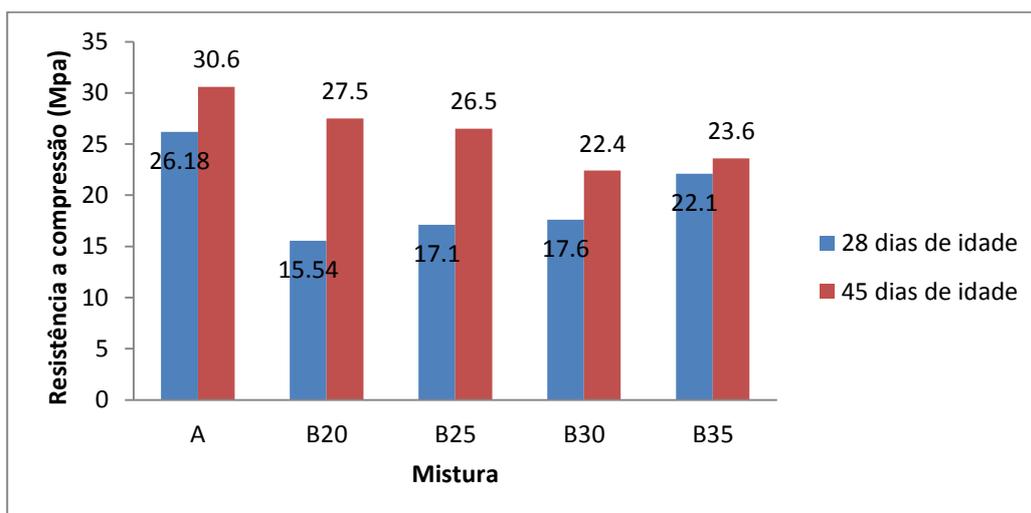
substituição do cimento pelos resíduos. Este mesmo comportamento foi verificado por Evangelista *et al.* (2006);

**Tabela 11:** Resultados da resistência à compressão mecânica dos corpos prismáticos aos 45 dias

Misturas	Resistência individual dos corpos de prova (MPa)						Médio (MPa) ± erro accidental	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3	4	5	6			
A	26.70	32.85	29.40	30.60	31.35	32.40	30.55±0.92	2.25	7.39
B20	27.60	30.15	26.25	26.10	30.45	24.60	27.50±0.96	2.35	8.54
B25	25.80	27.60	25.35	26.85	27.00	26.40	26.50±0.33	0.82	3.11
B30	22.35	22.50	24.75	20.85	21.30	22.50	22.40±0.55	1.35	6.04
B35	21.90	22.50	24.30	25.80	23.25	24.00	23.66±0.56	1.38	5.84

- Depois de 28 dias, ocorre um aumento da resistência mecânica à compressão das misturas estudadas. Isto mostra que, há um desenvolvimento da resistência com o aumento do período de cura.

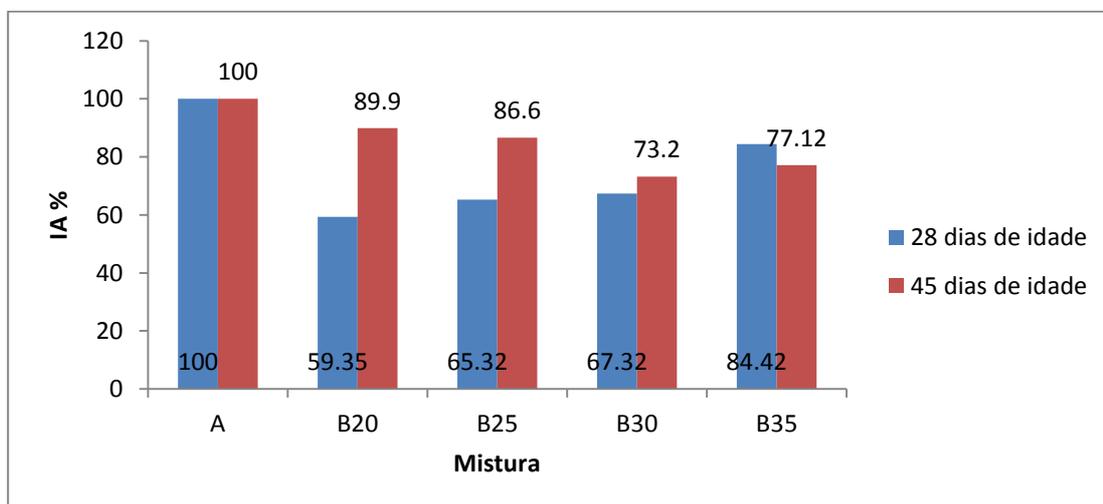
Segundo Metha (1981) e Berry (1980), a resistência à compressão de misturas com materiais pozolânicos, aumenta consideravelmente depois de 28 dias, como foi aqui observado (Figura 12).



**Figura 12:** Resultados dos ensaios à compressão aos 28 e 45 dias de idade

Os resultados do índice de actividade pozolânica estão ilustrados na Figura 13. Dos dados ilustrados as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- Só a mistura B35, aos 28 dias, apresenta IA superior a 75%, valor mínimo exigido pela norma ASTM C618 (1992);
- Aos 45 dias, só as misturas B20 e B25, apresentam valores IA superiores a 85%, aceites pela norma ASTM C618 (1992);
- O IA de todas as misturas aumenta com o período de cura, excepto para a mistura B35 que diminui de 84 para 77%. Isto pode dever-se ao facto de a mistura B35 possuir uma menor concentração de sólidos (menor consumo de cimento), visto que a relação água aglomerante mantém-se constante para todas as misturas. Gonçalves e Moura (2007) verificaram o mesmo facto.



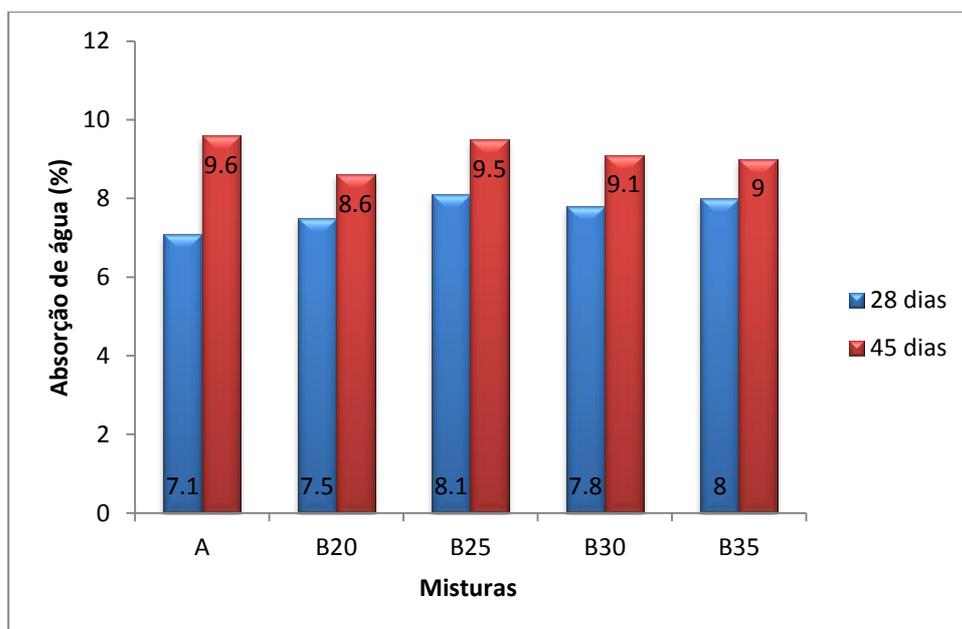
**Figura 13:** Resultados do índice de actividade pozolânica aos 28 e 45 dias

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Resultados de absorção de água estão ilustrados no gráfico da Figura 14. Dados do teste a 28 dias, mostram que a absorção de água é maior para as misturas com adição do resíduo cerâmico (B20, B25, B30 e B35) em relação a argamassa sem adição (A). Este facto demonstra que a acção pozolânica do resíduo ainda é menor nesta idade.

Aos 45 dias, é possível verificar a partir dos dados ilustrados que a absorção de água diminui, quando o cimento é substituído pelos resíduos.

A diminuição é devida primeiro, à reacção entre o hidróxido de cálcio proveniente da pasta de cimento hidratado (Mirza *et al.*, 2009) e resíduos de cerâmica, segundo, a adição destes resíduos preenchem os espaços vazios na matriz do cimento, diminuindo a permeabilidade. Isto ajuda a melhorar a durabilidade da pasta (Ali *et al.*, 2012), isto também é confirmado pelo ensaio de índice de actividade onde a resistência mecânica (Figura 12) das misturas aumentou com aumento do tempo de cura.



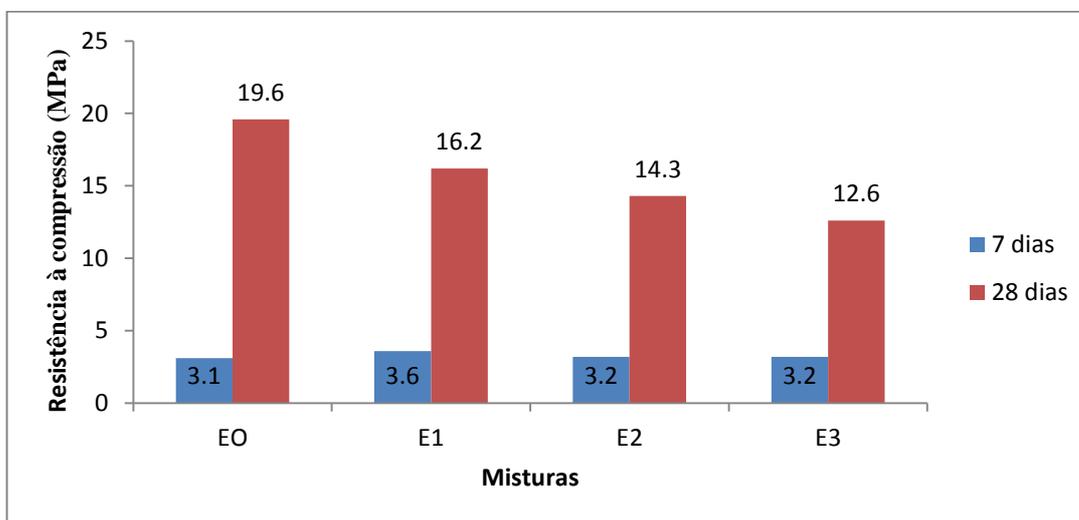
**Figura 14:** Resultados da absorção de água das misturas aos 28 e 45 dias

#### 4.5 TENSÃO DOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS (ARGAMASSAS PARA BLOCOS DE CONCRETO)

A Figura 15 apresenta resultados médios (ver anexo C) referentes aos ensaios de compressão aos 7 e 28 dias. De acordo com os dados ilustrados na Figura 15 observa-se o seguinte:

- Para todas as misturas (E1, E2 e E3) contendo resíduos de cerâmica, a resistência à compressão aos 7 dias é ligeiramente superior em relação a argamassa de controlo;
- Aos 28 dias, verifica-se que esta propriedade decresce à medida que se acrescenta teores de resíduos de cerâmica vermelha;
- Quanto à resistência à compressão dos corpos de prova as misturas E1, E2 e E3 apresentam 82.7%, 72.9% e 64.3 % do valor apresentado para mistura de controlo;

Estes resultados são satisfatórios, visto que as misturas E1, E2 e E3 apresentam boa resistência à compressão de (16,2, 14,3 e 12,6 MPa respectivamente), sendo a faixa exigida pela norma NBR 6136 (1994), entre 4,5 MPa a 16,0 MPa, para a argamassa ser usada para produção de blocos a serem usados acima e abaixo do solo.



**Figura 15:** Resultados dos ensaios à compressão aos 7 e 28 dias de idade

#### 4.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

Diversos parâmetros estatísticos foram calculados com ajuda do pacote estatístico statgraphics plus versão 5.1 de modo a validar os resultados obtidos.

Com o objectivo de avaliar se os valores da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (Figura 12) para diferentes composições são em média estatisticamente diferentes, realizou-se uma comparação múltipla dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias e 45 dias de idade (ver Tabela 10 e Tabela 11, respectivamente), com um nível de confiança de 95%. Conclui-se por ANOVA que existem diferenças estatisticamente significativas, uma vez que o valor de P é menor que o nível de significância 0.05 (ver anexo E, tabela E1 e E3).

Para verificar-se que composições diferem umas das outras usou-se o teste de Tukey a 95% (ver anexo E, tabela E2 e E4, respectivamente).

**Tabela 12:** Resumo da comparação múltipla da resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 e 45 dias

Teor de substituição do cimento	Designação da mistura (composição)	Tempo de cura			
		28 dias		45 dias	
		Difere de	Não difere de	Difere de	Não difere de
Sem RC	A	B20,B25,B30 e B35	-----	B20,B25,B30 e B35	-----
Com 20% do RC	B20	A e B35	B25 e B30	A,B30 e B35	B25
Com 25% de RC	B25	A e B35	B25 e B30	A e B30	B35 e B20
Com 30% de RC	B30	A e B35	B25 e B20	A,B20 e B25	B35
Com 35% de RC	B35	B20,B25,B30 e A	-----	A e B20	B30 e B25

RC-resíduo cerâmico

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, investigou-se a possibilidade do uso de fragmentos de cerâmica vermelha proveniente da Cerâmica Promac, localizada em Boane, na Província de Maputo na substituição parcial do cimento Portland, na produção de argamassa de alvenaria. De acordo com os dados obtidos na parte experimental e do tratamento estatístico, verificou-se que:

1. Por Fluorescência de raios X e difracção de raios X, o resíduo pode ser considerado como pozolânico, visto que contém elevados teores de óxidos de silício, alumínio e ferro, sendo a soma destes maior que 70% exigidos pela norma ASTM-C168 e possuir fases amorfas;
2. Os resíduos de cerâmica vermelha são efectivos a fechar os espaços vazios, presentes na pasta hidratada de cimento, visto que, no teste de absorção de água, esta foi menor aos 45 dias para argamassas substituídas em relação à argamassa de controlo;
3. Do tratamento estatístico dos resultados de resistência à compressão das amostras com 20% de resíduo mostra que este resultado não difere-se significativamente dos resultados obtidos com as composições B25 ao fim de 45 dias, e tendo em conta que esta composição deu os melhores resultados, recomenda-se a selecção desta composição.
4. Estes resíduos podem ser usados na substituição parcial do cimento na produção de argamassas para blocos de concreto para alvenaria, visto que as misturas apresentam valores de resistência à compressão de 16,2, 14,3 e 12,6 MPa para proporções de 20, 25 e 30% de resíduo cerâmico respectivamente, estando os resultados na faixa exigida pela norma NBR 6136 (1994) 4,5 MPa a 16 MPa;

Em resumo, é possível aplicar estes resíduos na substituição parcial de cimento na produção de argamassas de alvenaria, dados os resultados apresentados anteriormente.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ali, M. S., Rao, A., Sardar, K., e Lo, T. Y. (2012). Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete. Construction and Building Materials. **45**:237-242.
2. Berry, E. E. (1980). Strength Development of some blended-cement mortars. Cement and Concrete Research, **10**:1-11.
3. Christófolli, J. L. (2010). Estudo de argilas calcinadas para produção cimento pozolânico na região de Curitiba, Paraná-Brasil. Dissertação de mestrado (em construção civil). Universidade de Federal o Paraná.
4. Coutinho, J. S. (2006). Materiais de construção 2. Departamento de Engenharia Civil- Universidade do Porto.
5. Ergün, A. (2011). Effects of usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials, **25**: 806-812.
6. Evangelista, A. C. J., de Almeida, V. C., Cordeiro, C. A. Alves, L. S. e Rodrigues, R. A. (2006). Aplicação de resíduos de cerâmica como adição mineral na produção de argamassas e concretos. Revista brasileira de ciências ambientais, **3**: 8-12.
7. Filho, J. A. (2007). Bloco de concreto para alvenaria em construções industrializadas. Tese (doutoramento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
8. Gonçalves, J. P. e Moura, W. A. (2007). Uso de resíduos sólidos como materiais de construção: uma alternativa para redução do impacto ambiental no setor da construção civil. Revista Diálogos & Ciência, **10**: 1-15.
9. Habert, G; Choupay, N; Escadeillas, D; Montel, J. M. (2008). Clay content of argillites on cement based mortars. Applied Clay Science, **45**: 220-226.
10. Nascimento Jr., A. (2011). Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha. Monografia apresentada ao Colegiado de Engenharia Civil da Universidade Estadual e Feira de Santana.
11. Teng Jr., C. T.- T. (2011). Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades Físico-Químicas e mecânicas do cimento Portland produzido em Moçambique. Tese (licenciatura) - Departamento de Química Universidade Eduardo Mondlane.

12. Kanning, R. C. (2010). Caracterização da cinza de folha de bananeira a avaliação do potencial pozolânico. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Brasil.
13. Lima, M. J. (2004). Estudo de aproveitamento do resíduo do beneficiamento de Caulim como matéria-prima na produção de pozolana para cimentos compostos e pozzolânicos. Dissertação (mestrado) -Universidade Federal do Pará.
14. Linhares, B. T. (2010). Avaliação do desempenho de cimentos CII E e CII F com diferentes teores de pozolanas frente ao ataque de ions sulfato. Tese (licenciatura) -Escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
15. Mehta, P. K. (1981). Studies on blended Portland cements containing santorin earth. Cement and Concrete Research, **11**: 507-518.
16. Mirza, J.; Riaz, M.; Naseer, A.; Rehman, F.; Khan, A. N; Ali, Q. (2009). Pakistani bentonite in mortars and concrete as low cost construction material. Applied Clay Science, **45**: 220-226.
17. Nita, C. (2007). Materiais pozzolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Pp13.
18. Netto, R. M. (2006). Materiais pozzolânicos. Monografia-Universidade Federal de Minas Gerais.
19. Pinheiro, I. S. (2008). Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozzolânica. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
20. Pinho, D. (2003). Avaliação do comportamento térmico de argilas da Região de Passos, MG, visando sua aplicação como pozolanas. Tese de licenciatura Universidade de São Paulo.
21. Pontes, J. M. (2011). Reactividade de pozzolanas para argamassas e betões. Dissertação (mestrado) -Universidade Nova De Lisboa.
22. Roque, A. B. (2012). Influência do resíduo cerâmico nas propriedades de argamassas no estado fresco. Tese de bacharel em Engenharia Civil na Universidade Estadual de Feira de Santana. Brasil.
23. Silva, A. A. (2011). Contribuição ao estudo das bentonites do município de Boa Vista estado da Paraíba. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo.
24. Ünal, M. e Ay, N. (2000). The use of waste tile in cement production. Cement concrete research, **30**: 497-499.

25. Vieira, A. P. (2005). Estudo de aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraíba- Brasil.

#### Normas consultadas

1. NBR 7173: (1982): Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural.
2. NBR 6136 (1994): Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural: procedimento. Rio de Janeiro.
3. ASTM- International Standards. C-618 (1992): Pozzolan. United States.
4. NM NP EN 196-1 (2000): Métodos de ensaios de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E FLEXÃO DE CORPOS-  
DE-PROVA PRISMÁTICOS**

Resultados das resistências à flexão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias e 45 dias

**Tabela A 1-** Resultados da resistência à flexão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias

Misturas	Resistência individual dos corpos de prova (Mpa)			Média (Mpa) ± erro acidental	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3			
A	5.25	5.64	5.52	5.47±0.11	0.19	3.65
B20	4.38	4.38	4.30	4.35±0.02	0.05	1.06
B25	5.28	5.04	5.55	5.29±0.14	0.26	4.82
B30	3.96	5.13	5.50	4.86±0.46	0.80	16.52
B35	3.71	4.02	3.68	3.80±0.10	0.19	4.94

**Tabela A 2-** Resultados da resistência à flexão dos corpos de prova prismáticos

Misturas	Resistência individual dos corpos de prova (MPa)			Média (MPa) ± erro acidental	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3			
A	6.11	5.89	5.47	5.82±0.19	0.33	5.58
B20	6.02	5.20	5.92	5.71±0.26	0.45	7.83
B25	5.93	5.95	5.92	5.93±0.09	0.02	0.26
B30	4.24	4.84	5.73	4.93±0.43	0.75	15.19
B35	5.06	5.16	5.10	5.11±0.29	0.05	0.99

**ANEXO B - RESULTADOS DE ABSORÇÃO DA ÁGUA AOS 28 E 45 DIAS DE IDADE DOS  
CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS**

**Tabela B1-** Resultados de Absorção de água aos 28 dias

Corpo- de -prova	Peso do provete seco (g)	Peso do provete saturado (g)
A	523.80	570.46
B20	528.40	567.93
B25	509.50	550.40
B30	516.10	556.40
B35	517.10	558.53

**Tabela B2-** Resultados de Absorção de água aos 45 dias

Corpo-de -prova	Peso do provete seco (g)	Peso do provete saturado (g)
A	523.00	573.00
B20	521.00	566.00
B25	496.00	543.00
B30	516.00	563.00
B35	513.00	559.00

**Tabela B3 -** Resultados de Absorção de água aos 28 e 45 dias

Misturas	Absorção de água (%)	
	28 Dias	45 Dias
A	7,10	9,60
B20	7,50	8,60
B25	8,10	9,50
B30	7,80	9,10
B35	8,00	9,00

**ANEXO C. RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS**

**Tabela C1:** Resultados de Resistência à compressão aos 7 dias

Corpo de prova	Número de provete	Força (kgf)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa) ± erro acidental
EO	1	425	17	1.70	3.10±0.70
	2	1000	40	3.90	
	3	950	38	3.70	
E1	1	725	29	2.90	3.07±0.12
	2	850	34	3.30	
	3	775	31	3.00	
E2	1	825	33	3.20	3.23±0.03
	2	825	33	3.20	
	3	850	34	3.30	
E3	1	1050	42	4.10	3.20±0.49
	2	800	32	3.10	
	3	600	24	2.40	

**Tabela C2:** Resultados da Resistência à compressão aos 28 dias

Corpo-de -prova	Número de provete	Força (kgf)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)± erro acidental
E0	1	5025	201	19.72	19.58± 0.46
	2	4825	193	18.72	
	3	5175	207	20.31	
E1	1	3675	147	14.42	16.18±2.69
	2	3225	147	12.66	
	3	5475	219	21.48	
E2	1	3325	133	13.05	14.26±0.81
	2	3550	142	13.93	
	3	4025	161	15.79	
E3	1	3675	133	14.42	12.59±1.46
	2	2475	142	9.70	
	3	3475	161	13.64	

## ANEXO D: CLASSES DE AREIAS NORMALIZADAS

**Tabela D 1-** Classes de areia usadas

Classes de areia normalizadas	Porções (g)	Diâmetro (mm)
I	445	1.38-1.00
II	445	1.00-0.50
III	150	0.50-0.297
IV	190	0.297-0.149
V	95	0.149-0.074
VI	25	<0.074

## ANEXO E: COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DOS RESULTADOS

**Tabela E1-** Tabela de Anova da comparação múltipla das resistências dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias de idade

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor de-p
Entre grupos	439.713	4	109.928	21.39	0.000
Dentro de grupos	123.314	24	5.138		
Total	563.027	28			

SQ-soma quadrática; gl-grau de liberdade; MQ-media quadrática, F-valor calculado de F; P-probabilidade.

**Tabela E2-** Comparação múltipla dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias

-----

Method: 95.0 percent Tukey HSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
com 20% de RC	5	15.542	X
com 25% de RC	6	17.1	X
com 30% de RC	6	17.6	X
com 35 % de RC	6	22.1	X
sem RC	6	26.185	X

-----

Contrast	Difference	+/- Limits
sem RC - com 20% de RC	*10.643	4.04458
sem RC - com 25% de RC	*9.085	3.85636
sem RC - com 30% de RC	*8.585	3.85636
sem RC - com 35 % de RC	*4.085	3.85636
com 20% de RC - com 25% de RC	-1.558	4.04458
com 20% de RC - com 30% de RC	-2.058	4.04458
com 20% de RC - com 35 % de RC	*-6.558	4.04458
com 25% de RC - com 30% de RC	-0.5	3.85636

com 25% de RC - com 35 % de RC	*-5.0	3.85636
com 30% de RC- com 35 % de RC	*-4.5	3.85636

-----

\* denotes a statistically significant difference.

**Tabela E3-** Tabela de Anova da comparação múltipla das resistências dos corpos de prova prismáticos aos 45 dias de idade.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor de-p
Entre grupos	250.723	4	62.6807	20.81	0.000
Dentro de grupos	75.2958	25	3.01183		
Total	326.019	29			

-----

SQ-soma quadrática; gl-grau de liberdade; MQ-media quadrática, F-valor calculado de F; P-probabilidade

**Tabela E4-** Comparação múltipla dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 45 dias

Multiple Range Tests

-----

Method: 95.0 percent Tukey HSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
com 30% de RC	6	22.375	X
com35% de RC	6	23.6667	XX
com 25% de RC	6	26.5	XX
com 20% de RC	6	27.525	X
sem RC	6	30.55	X

-----

Contrast	Difference	+/- Limits
sem RC - com 20% de RC	*3.025	2.9433
sem RC - com 25% de RC	*4.05	2.9433
sem RC - com 30% de RC	*8.175	2.9433
sem RC - com 35% de RC	*6.88333	2.9433
com 20% de RC - com 25% de RC	1.025	2.9433
com 20% de RC - com 30% de RC	*5.15	2.9433
com 20% de RC - com 35% de RC	*3.85833	2.9433
com 25% de RC - com 30% de RC	*4.125	2.9433
com 25% de RC - com 35% de RC	2.83333	2.9433
com 30% de RC - com 35% de RC	-1.29167	2.9433

\* denotes a statistically significant difference.

## ANEXO F. DIFRAÇÃO DE RAIOS X DO RESÍDUO CERÂMICO

**Tabela F1.** Resultados de difração de Raios X do resíduo cerâmico

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.4756	75.07	9.80564	0.47
12.3035	497.71	8.35326	3.10
16.0358	149.56	6.41768	0.93
22.9965	207.38	4.49064	1.29
24.2654	3074.67	4.25905	19.18
25.6065	775.24	4.03944	4.84
27.4328	458.05	3.77517	2.86
28.2948	536.66	3.66239	3.35
29.7439	236.51	3.48771	1.48
31.0463	16032.29	3.34477	100.00
31.9911	1634.53	3.24846	10.20
32.3551	1060.08	3.21287	6.61
32.6116	1733.03	3.18828	10.81
33.0262	182.73	3.14935	1.14
33.4649	144.89	3.10922	0.90
34.1491	339.63	3.04872	2.12
35.5338	295.00	2.93353	1.84

36.6524	110.85	2.84694	0.69
38.7439	197.78	2.69869	1.23
41.6804	176.96	2.51616	1.10
42.6996	1086.65	2.45880	6.78
43.2763	88.50	2.42758	0.55
46.1671	734.31	2.28313	4.58
47.1458	371.06	2.23836	2.31
48.9836	120.70	2.15927	0.75
49.6649	512.27	2.13149	3.20
53.7233	463.36	1.98114	2.89
57.8447	49.25	1.85093	0.31
58.9493	1446.36	1.81796	9.02
59.1115	592.37	1.81736	3.69
59.4997	80.95	1.80266	0.50
60.2739	79.34	1.78164	0.49
64.6999	394.84	1.67169	2.46