



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise e Caracterização de Resíduos Cerâmicos para Integrar em Argamassas de Reabilitação

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

Estrela Maria Pinto Simões

Orientador

Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

**Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria
Rodrigues**

Colaboração Institucional



Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço:

- ✓ Às minhas orientadoras, Professora Doutora Isabel Torres e Professora Doutora Paulina Faria, pela orientação, disponibilidade, apoio e conhecimentos transmitidos ao longo da realização deste estudo;
- ✓ À Eng.^a Gina Matias, técnica superior do ITeCons, pela dedicação, disponibilidade e conhecimentos transmitidos durante todo o período de trabalhos;
- ✓ Ao Professor Doutor António Tadeu, pela permissão de acesso às instalações do Instituto da Universidade de Coimbra - ITeCons, bem como a todos os equipamentos, utensílios, materiais e informação necessários à realização do presente trabalho experimental;
- ✓ A todas as Empresas que contribuíram, através da sua disponibilidade em me receber nas suas instalações, na cedência graciosa de resíduos e de informação necessária ao presente estudo sobre os produtos e resíduos por elas produzidos;
- ✓ À Biblioteca do DEC, nas pessoas da Dra. Isabel França e da Sra. Anabela Reis, pela ajuda na realização das diversas pesquisas que efetuei, no âmbito do presente estudo;
- ✓ À Dra. Ana Melo, dos Serviços Médicos da UC, e à Dra. Luísa Sales, pelo apoio prestado.

Agradeço ainda à minha família (aos meus tios, irmãos, cunhadas e sobrinhos) e a todos os meus amigos, que de forma direta ou indireta me ajudaram ao longo da vida.

Aos MEUS PAIS, pelo seu amor incondicional, que abdicando de si, sempre estiveram ao meu lado. Pelo seu apoio e incentivo que, mesmo nos momentos mais negativos da minha vida académica, nunca me deixaram desistir deste meu objetivo que hoje espero concretizar. Pela vossa paciência, compreensão e amizade.

UM MUITO OBRIGADA!

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projeto “EXPL/ECM-COM/0928/2012”.

RESUMO

Este estudo foi desenvolvido no âmbito da reciclagem de resíduos cerâmicos, com vista a encontrar soluções alternativas viáveis à sua valorização.

Assim, a presente dissertação teve por objetivo principal fazer o levantamento e analisar resíduos cerâmicos, produzidos em fábricas de cerâmica da região de Coimbra, que tenham um volume de desperdícios significativo e que poderão trazer benefícios quando incorporados na composição de argamassas de reabilitação.

Tendo presente o objetivo principal acima descrito, este estudo desenvolveu-se em três fases. Numa primeira fase procedeu-se à: identificação e seleção das empresas da região produtoras de resíduos cerâmicos, cujo volume de resíduos produzidos fosse significativo e não fossem valorados pelas próprias empresas, no âmbito da sua reciclagem; recolha de amostras de resíduos (cacos) e de informação necessária sobre os produtos produzidos nas empresas selecionadas; análise da informação recolhida; seleção dos resíduos cerâmicos a estudar.

A segunda fase consistiu na caracterização dos resíduos recolhidos após transformação em partículas de dimensão máxima de 4,75mm, com vista à sua introdução em argamassas, através da determinação de algumas propriedades consideradas essenciais ao estudo.

Na terceira fase, e com base na caracterização anterior, realizou-se a avaliação dos resíduos estudados tendo em conta os benefícios que possam induzir quando incorporados na composição das argamassas de reabilitação.

Este estudo contempla ainda a obtenção de informação para um futuro estudo de viabilidade económica do processo de transformação de resíduos cerâmicos em agregados cerâmicos reciclados com dimensão para a sua introdução em argamassas como componentes pozolânicos e/ou agregados.

ABSTRACT

This study was conducted in the context of ceramic residue recycling, in order to find out about viable alternative solutions for its use.

As such, the main objective of this dissertation was to map and analyze ceramic residue produced in ceramic factories in the region of Coimbra, which possess a significant waste volume and can bring greater benefits when incorporated in the constitution of rehabilitation mortar.

Bearing in mind the aforementioned main objective, this study followed three stages. The first stage consisted in: the identification and selection of firms in the region producing significant volumes of ceramic residue, not being recycled by the companies themselves; the gathering of residue samples (shards) and necessary information about the products produced by the selected companies; the analysis of the collected information; the selection of the ceramic residue to be studied.

The second stage involved the characterization of the collected residue (after being transformed into recycled aggregates of maximum 4,75 millimeters in order to incorporate them into mortar) through the determination of some properties considered essential to the study.

In the third stage, the residue under study were assessed taking into consideration the benefits they can generate when incorporated in the constitution of rehabilitation mortar.

Additionally, this study also sought to gather information for a future study on the economic viability of the transformation process of ceramic residue (shards) into recycled ceramic aggregates with the required dimensions for their insertion into mortars as pozzolanic components and/or aggregates.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE QUADROS	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo e metodologia	2
1.3. Organização do Texto	3
2 ESTADO DA ARTE	4
2.1. Breve nota histórica sobre argamassas.....	4
2.2. Intervenção com argamassas em edifícios antigos.....	8
2.3. Constituintes das argamassas	10
2.4. Pozolanas e reatividade das pozolanas artificiais resultantes de tratamento térmico.....	11
2.5. Cerâmica e produtos cerâmicos.....	12
2.6. Reciclagem de resíduos	14
2.7. Resíduos cerâmicos industriais, reciclagem em agregados e agregados reciclados para argamassas	14
3 RESÍDUOS ESTUDADOS.....	17
3.1. Identificação das empresas a laborar na região e recolha de resíduos	17
3.2. Análise dos dados recolhidos	18
3.3. Seleção dos resíduos a analisar	22
4 CAMPANHA EXPERIMENTAL	24
4.1. Considerações comuns à determinação das propriedades dos agregados	24
4.2. Propriedades mecânicas e físicas dos agregados.....	28
4.3. Propriedades geométricas dos agregados	45
4.4. Caracterização adicional dos agregados.....	52
4.5. Análise de Resultados	60
5 CONCLUSÕES.....	64
5.1. Conclusões finais.....	64
5.2. Desenvolvimentos futuros	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cronograma da evolução dos materiais usados em argamassas (Martinelli, F. A. e Helene, P., 1991)	4
Figura 2.2 Abrigos temporários executados pelas tribos seminômadas da Namíbia (Alvarez, J.A.S., 2007)	5
Figura 2.3 Tipos de fornos utilizados no fabrico de materiais cerâmicos (Silva, J., 2006).....	13
Figura 2.4 Ciclo de vida do produto cerâmico (Silva, J., 2006).....	15
Figura 2.5 Produção de resíduos industriais por distrito e resíduos diretamente resultantes do processo produtivo (Andrade, I., 2004).....	15
Figura 4.1 Resistência à fragmentação - processo de moagem das amostras.....	29
Figura 4.2 Resistência à fragmentação - preparação do provete de ensaio	32
Figura 4.3 Resistência à fragmentação - procedimento de ensaio.....	33
Figura 4.4 Massa volúmica e absorção de água - amostra inicial recolhida	35
Figura 4.5 Massa volúmica e absorção de água - preparação do provete de ensaio	36
Figura 4.6 Massa volúmica e absorção de água - procedimento de ensaio	38
Figura 4.7 Baridade e volume de vazios - procedimento de ensaio	43
Figura 4.8 Curvas granulométricas das amostras de agregados cerâmicos estudadas	51
Figura 4.9 Requisitos adicionais - Preparação das amostras	53
Figura 4.10 Análise mineralógica - preparação do provete de ensaio.....	54
Figura 4.11 Análise mineralógica - procedimento de ensaio	54
Figura 4.12 Análise mineralógica - exemplo de um dos espectros obtidos	54
Figura 4.13 Análise térmica simultânea (STA) - procedimento de ensaio.....	55
Figura 4.14 Termogramas obtidos para uma das amostras de agregados analisadas	56
Figura 4.15 Avaliação da pozolanicidade - preparação das amostras ensaiadas.....	57
Figura 4.16 Avaliação da pozolanicidade - Procedimento de ensaio (preparação dos provetes)	58
Figura 4.17 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (reagentes e soluções)...	59
Figura 4.18 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (filtração)	59
Figura 4.19 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (titulações)	60
Figura 4.20 Pozolanicidade das amostras analisadas	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 Informação recolhida nas empresas, sistematizada	21
Quadro 3.2 Definição das amostras de resíduos.....	23
Quadro 4.1 Equipamento e/ou utensílios correntes	24
Quadro 4.2 Moinho de maxilas	27
Quadro 4.3 Máquina de Los Angeles	29
Quadro 4.4 Resistência à fragmentação - massa das amostras laboratoriais.....	30
Quadro 4.5 Resistência à fragmentação - massa que cada componente da amostra B.3.....	30
Quadro 4.6 Resistência à fragmentação - massa que cada componente da amostra B.4.....	30
Quadro 4.7 Resistência à fragmentação - massa do provete para ensaio	31
Quadro 4.8 Massa total da carga abrasiva	32
Quadro 4.9 Limite máximo e mínimo da massa total da carga abrasiva.....	32
Quadro 4.10 Massa retida no peneiro de 1,6mm e Coeficiente LA	34
Quadro 4.11 Massa volúmica e absorção de água - equipamentos e utensílios utilizados.....	35
Quadro 4.12 Massa volúmica e absorção de água - temperaturas da estufa ventilada.....	38
Quadro 4.13 Massa volúmica e absorção de água - massas registadas durante o ensaio	38
Quadro 4.14 Valores da massa volúmica da água para a temperatura de ensaio	39
Quadro 4.15 Valores da massa volúmica	40
Quadro 4.16 Verificação dos cálculos das massas volúmicas.....	40
Quadro 4.17 Valor da absorção de água, em percentagem da massa seca, após a imersão durante 24 horas	40
Quadro 4.18 Baridade e volume de vazios - equipamento e utensílios necessários.....	41
Quadro 4.19 Baridade e volume de vazios - massas dos provetes ensaiados.....	42
Quadro 4.20 Baridade e volume de vazios - registo dos valores obtidos nas pesagens das massas m_1 e m_{2i}	43
Quadro 4.21 Valores da baridade	44
Quadro 4.22 Valores da baridade (Ferreira, T., 2011)	44
Quadro 4.23 Valores da percentagem de vazios.....	45
Quadro 4.24 Análise granulométrica - massa seca dos provetes.....	47
Quadro 4.25 Percentagem e percentagem cumulativa do material retido	49
Quadro 4.26 Percentagem cumulativa do material passado até ao peneiro de 0,063mm.....	49
Quadro 4.27 Percentagem de finos que passa no peneiro de 0,063mm	50
Quadro 4.28 Validação dos resultados	50
Quadro 4.29 Módulo de finura das amostras de agregados em estudo	52

Quadro 4.30 Equipamentos e utensílios necessários à preparação das amostras	53
Quadro 4.31 Identificação mineralógica por difração de raios X, Análise qualitativa	55
Quadro 4.32 Análise térmica simultânea (STA)	56
Quadro 4.33 Parâmetros analíticos obtidos na análise pozolânica dos agregados ensaiados...	60
Quadro 4.34 Parâmetros mais relevantes sobre os materiais recolhidos.....	61
Quadro 4.35 Quadro síntese com os resultados compilados	63

1 INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O presente estudo desenvolve-se no âmbito da valorização de resíduos cerâmicos, tendo em vista encontrar soluções alternativas viáveis à sua reintrodução no sistema produtivo, através da sua inserção em argamassas de reabilitação.

Assim o seu interesse deve-se sobretudo à conjugação da necessidade de conservação e valorização do nosso património edificado, reabilitando-o quando necessário, à necessidade de preservação dos recursos naturais existentes e de gestão de resíduos industriais produzidos, reutilizando o material antes desperdiçado, diminuindo assim o volume conduzido a aterro, por forma a se assegurar um desenvolvimento sustentável.

À crescente consciencialização da importância e potencialidades existentes no nosso património edificado, atendendo à atual conjuntura económica e à insustentabilidade de continuar a construir edificado novo (quer pelo excesso de oferta, quer pela escassez de locais urbanizáveis), a reabilitação e requalificação adquiriu uma maior relevância, podendo tornar-se um sector de mercado a expandir.

A existência de resíduos cerâmicos, na forma de caco cozido, corresponde, na Europa, a 3% a 7% da produção global (Silva, H., 2012) e, segundo Andrade (Andrade, I., 2004), em Portugal, no ano de 2003, estes correspondiam a 37% dos resíduos industriais produzidos pelas indústrias de cerâmica, sendo no distrito de Coimbra de 13,6%. Na maior parte dos casos o tratamento dado a estes resíduos é a deposição em aterro.

Na política europeia e portuguesa de gestão de resíduos industriais, a reciclagem/valorização deste tipo de resíduos é uma alternativa a ter em conta com vista à diminuição de resíduos em aterro, diminuição da exploração de recursos naturais (areias, etc.) e energéticos.

A introdução de componentes pozolânicos em argamassas é um procedimento aplicado na construção desde a antiguidade. Constatou-se que: a) grande parte do edificado antigo, onde foram aplicadas argamassas contendo material pozolânico, apresenta-se ainda hoje em muito bom estado de conservação; b) as reabilitações de edifícios antigos, onde foram executadas reparações com materiais atuais, revelaram-se muitas vezes inadequadas, motivadas por reparações mal sucedidas devido a incompatibilidades diversas entre os materiais existentes e

os novos, bem como à deficiente execução, devido à falta de mão-de-obra especializada e a acabamentos desadequados.

Na reabilitação de edifícios e visando a mínima intervenção, a opção mais correta de intervenção é a conservação. A substituição total ou parcial de argamassas interiores ou exteriores deterioradas só deve ser efetuada se necessário, o que obviamente também depende do valor (estético, artístico, cultural) do revestimento. No caso em que são necessárias novas argamassas, estas devem ser definidas de modo a que apresentem características físicas, químicas e mecânicas compatíveis com as dos seus suportes e propriedades que satisfaçam os requisitos necessários à reabilitação pretendida, promovendo assim uma maior durabilidade do conjunto. A sua principal função é a de proteção dos suportes, pelo que devem ser previstas de modo: a que seja garantida a funcionalidade do elemento; que este mantenha uma apresentação (visual e de textura) enquadrada na arquitetura existente; que não seja indutora de novas patologias ou potencializadora do agravamento de patologias existentes; que seja possível a sua eventual remoção sem causar danos nos materiais existentes.

Estudos realizados a argamassas antigas, resíduos cerâmicos e argamassas atuais (Velosa, A., 2006), (Faria-Rodrigues, M.P., 2004) e (Tomás, A.L., 2012) evidenciaram a importância das adições de material pozolânico nas argamassas antigas e no eventual potencial da adição de material cerâmico atual em novas argamassas, com vista à obtenção de argamassas com diferentes propriedades adequadas à finalidade pretendida.

Da diversidade de materiais pozolânicos, naturais e artificiais, possíveis de serem aplicados em argamassas, uns mais acessíveis do que outros, circunscreve-se o presente estudo aos resíduos cerâmicos de barro vermelho, existentes na região.

1.2. Objetivo e metodologia

O presente estudo teve por principal objetivo a identificação e caracterização de resíduos cerâmicos, produzidos por empresas da região, que quando incorporados na composição das argamassas de reabilitação lhes possam conferir benefícios.

Assim, procedeu-se, numa primeira fase, à seleção dos resíduos cerâmicos a estudar, tendo sido constituídas sete amostras de resíduos cerâmicos - quatro amostras de resíduos de telhas cerâmicas de pasta vermelha (amostras A.1, B.1, B.2 e B.3), uma amostra de resíduo de telha cerâmica de pasta branca (amostra B.4), uma amostra de resíduos de tijolo cerâmico de alvenaria (amostra C.1) e uma amostra de resíduos de vasos cerâmicos (amostra D.1).

Numa segunda fase, realizou-se a caracterização dos resíduos selecionados e transformados em agregados reciclados de dimensão (em milímetros) de 0/4 (inferior a 4,75mm). Visando a concretização deste propósito, foram definidas, para as amostras de agregados em estudo, as propriedades a determinar (geométricas, mecânicas e físicas) e as análises a realizar (mineralógica qualitativa e térmica e a avaliação da pozolanicidade).

A determinação das propriedades, análises e avaliações dos agregados reciclados foram baseados em normas ou procedimentos que no seu âmbito de aplicação não contemplavam este tipo de agregado, uma vez que as normas existentes referem-se a agregados correntes.

Os ensaios para determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas foram realizados nas instalações do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ItCons, da Universidade de Coimbra, que permitiu acesso da autora às suas instalações e disponibilizou todos os equipamentos, utensílios, materiais e informação necessários à realização trabalho experimental. Os restantes ensaios foram realizados pelo Laboratório de Análise de Materiais do CTCV em Coimbra.

Numa terceira fase, procedeu-se à análise dos resultados obtidos e identificaram-se os resíduos cerâmicos mais propícios a, quando incorporados na composição das argamassas de reabilitação, lhes conferirem maiores benefícios.

Para a obtenção de informação para estudos futuros, foi realizado o ensaio para a determinação da resistência à fragmentação pelo método de referência.

1.3. Organização do Texto

O texto da presente dissertação está organizado em cinco capítulos, para além das referências bibliográficas. No primeiro capítulo é feita a introdução, que consiste no enquadramento ao tema, seguido da exposição dos objetivos, bem como das metodologias seguidas, com vista à sua concretização, e a uma descrição da forma como o estudo está organizado ao longo do texto.

No segundo capítulo é abordado o estado da arte. No terceiro capítulo são definidas as amostras de resíduos reciclados objeto de análise no presente estudo. O quarto capítulo é dedicado à campanha experimental, onde se faz a explanação de todo o trabalho experimental, bem como uma análise aos resultados obtidos. O quinto capítulo é dedicado às conclusões finais e desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1. Breve nota histórica sobre argamassas

As argamassas são utilizadas na construção desde a antiguidade. O seu aparecimento deveu-se sobretudo à necessidade dos povos construírem abrigos e outras construções, por forma a terem uma melhor qualidade de vida. Assim, as argamassas foram sendo desenvolvidas a partir dos materiais disponíveis e como resposta aos desafios construtivos impostos ao longo da história da humanidade (Alvarez, J.A.S., 2007). Na Figura 2.1 é apresentado um cronograma da evolução dos materiais usados em argamassas.

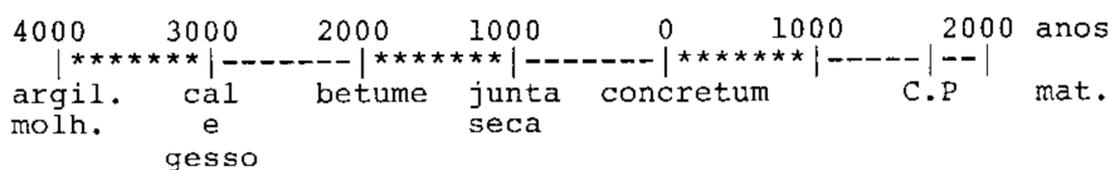


Figura 2.1 Cronograma da evolução dos materiais usados em argamassas (Martinelli, F. A. e Helene, P., 1991)

As primeiras argamassas surgiram com a necessidade do homem se proteger do meio envolvente, em zonas de escassez de cavernas, construindo abrigos temporários com os materiais disponíveis. As estruturas eram executadas com troncos de árvores ou ossos de animais e cobertos com folhagem e ramos de arbustos, argamassa de terra argilosa, colmo. Na zona da Mongólia e Sibéria foram encontrados vestígios de construção de abrigos em que a estrutura era executada em osso de mamute cobertos por ramos de arbustos, terra amassada e colmo. Ainda hoje se pode encontrar na Namíbia este tipo de construção temporária, onde as tribos seminómadas, que vivem do pastorício, constroem cabanas cuja estrutura é executada com troncos vegetais revestidos por uma argamassa de areia, bosta de vaca e palha (Figura 2.2) (Alvarez, J.A.S., 2007).



Figura 2.2 Abrigos temporários executados pelas tribos seminómadas da Namíbia (Alvarez, J.A.S., 2007)

Pelo facto de o homem se ter tornado um ser sedentário, desenvolveu-se em termos civilizacionais. Consequentemente, as suas necessidades de edificação tornaram-se mais exigentes, a par da evolução das respetivas técnicas construtivas e da utilização dada à matéria-prima disponível (Alvarez, J.A.S., 2007).

No Médio Oriente e Mesopotâmia, devido à escassez de pedra e abundância de argila, surgiram as primeiras construções à base de materiais argilosos. Inicialmente, as argilas molhadas foram usadas como material de união de blocos moldados executados com o mesmo material e secos ao sol. Posteriormente, evoluíram para as construções em adobe ou em tijolo (inicialmente seco ao sol e, posteriormente, cozido), cujas argamassas de juntas e de revestimento eram à base de material argiloso que consistiam, sobretudo, na mistura de argila molhada e palha. Mais tarde, para minimizar o efeito da retração, surge a adição de areia às argamassas (Alvarez, J.A.S., 2007) e (Matias, G., 2008).

Pensa-se que a técnica de cozer tijolos se iniciou na Mesopotâmia (3500 A.C.), no vale do rio Indo, o que permitiu conferir melhores características de impermeabilidade aos tijolos e, consequentemente, construir edificações mais resistentes e de maior durabilidade (Alvarez, J.A.S., 2007).

Este conhecimento foi difundido para diversas regiões e evoluindo ao longo dos tempos em função do conhecimento adquirido (na elaboração das pastas para execução dos tijolos, do tipo de forno e no domínio das matérias-primas), da necessidade de edificações mais complexas e de maiores dimensões (que exigiam uma maior quantidade e qualidade dos tijolos) e das matérias-primas disponíveis. Os fornos acompanharam e permitiram esta evolução. Assim, ao longo do tempo, os fornos para cozedura dos tijolos tornaram-se mais elaborados. Esta evolução deveu-se sobretudo à descoberta de matérias-primas de maior carga calorífica, o que permitiu cozeduras a temperaturas mais elevadas, e à necessidade de maior número de tijolos e de melhor qualidade (Alvarez, J.A.S., 2007).

Desta forma, a evolução do fabrico de tijolos e da sua qualidade dependeram de várias condicionantes, nomeadamente do tipo de argila (qualidade e finura), do processo de moldagem e de cozedura (duração, temperaturas de cozedura e tipo de forno) e do procedimento de arrefecimento do tijolo cozido evitando a fissuração deste. Casas em adobe datadas de 6500 A.C foram encontradas em Israel (Jericó) e na Ilha de Chipre (Khiroitikia) (Alvarez, J.A.S., 2007).

Remonta ao ano de 3000 A.C. o uso de gesso e cal pelos Fenícios, Egípcios e Gregos e, posteriormente, pelos Romanos, como ligantes artificiais em argamassas. Os egípcios, no antigo Egipto e Médio Oriente, iniciam a utilização do gesso impuro como ligante artificial em argamassas. O gesso foi também usado pelos Gregos e, posteriormente, pelos Romanos em argamassas de revestimento e decorativas. A cal foi utilizada como ligante em argamassas pelos Gregos e Romanos.

Na Babilónia, por volta de 2000 A.C., surge a utilização de betume como material de assentamento de alvenaria nas edificações, cuja vantagem introduzida foi a de impermeabilização. Com a Civilização Helénica, nos anos 1000 A.C., surge a técnica de juntas secas. Este processo construtivo foi desenvolvido em função do tipo de arquitetura (estética geométrica e simétrica) vigente neste período e do material utilizando: blocos entalhados em pedra mármore de faces polidas (Martinelli, F. A. e Helene, P., 1991).

As primeiras argamassas hidráulicas, como hoje se sabe, foram desenvolvidas inicialmente pelos Gregos e posteriormente utilizadas e melhoradas pelos Romanos. Surgem da utilização de cal hidráulica (mistura de cal com pozolanas naturais) na composição das argamassas. Esta prática é oriunda das regiões onde ocorreram fenómenos naturais, tais como erupções vulcânicas, que permitiram a abundante disponibilidade de material pozolânico (cinzas vulcânicas, pedra-pomes). Na Ilha de *Santorini*, no mar Egeu, ocorreu uma erupção vulcânica (1500 A.C vulcão de *Thera*), o que permitiu a abundância de pozolanas naturais (denominadas por terras de *Santorine*), de alta qualidade nesta região (Alvarez, J.A.S., 2007) e (Marques, S.M.F., 2005). No mar Egeu, na Ilha de *Rodes*, no vale de *Messara*, na *bacia de Gortys*, devido à existência de pedra-pomes (pozolana natural de baixa densidade), os locais utilizavam-na nas suas edificações (Alvarez, J.A.S., 2007).

O *concretum* ou *caementum* é uma argamassa hidráulica desenvolvida pelos romanos no sul de Itália, na região de Nápoles e do Monte Vesúvio. Esta argamassa resultou sobretudo da mistura da cal com cinzas vulcânicas (pozolana natural) existentes em *Pozzuoli* devido à atividade do Vesúvio (Marques, S.M.F., 2005).

Assim, nestas regiões foram desenvolvidas argamassas hidráulicas de alta resistência e durabilidade, com capacidade de estabelecerem presa em contacto com a água de ambientes marinhos e fluviais (ambientes de elevada humidade relativa ou mesmo em condições de submersão e ausência de ar). Estas argamassas permitiram o desenvolvimento de obras hidráulicas (entre outras: portos, aquedutos e cisternas) (Costa, L.L., 2008).

Com a queda do Império Romano, estes saberes perderam-se, tendo sido retomado o seu desenvolvimento no século XVIII. John Smeaton, em 1758, para a construção do Farol de Eddystone, desenvolveu um cimento de excelente qualidade [utilizando na sua composição pozolana italiana (cinzas vulcânicas)]. com propriedades de resistir à ação erosiva da água do mar (Costa, L.L., 2008). James Parker, no ano de 1796, desenvolveu um novo tipo de cimento (conhecido como cimento romano), obtido pela calcinação de nódulos de calcário impuro contendo argila. O cimento Portland foi patenteado no ano de 1824, em Inglaterra, por Joseph Aspdin. O nome Portland deveu-se à semelhança do novo produto depois de hidratado com as pedras existentes na Ilha de Portland, quer na cor, quer nas propriedades hidráulicas. O processo de fabrico deste ligante hidráulico consistia na mistura de calcário e argila em quantidades bem definidas, cozida em forno giratório, obtendo assim a calcinação da mistura, que posteriormente era moída até se obter o cimento. Devido à baixa temperatura de calcinação da mistura, este cimento possuía ainda fracas propriedades. Mais tarde, William Aspdin descobriu que com temperatura de calcinação mais elevada [permitiu a fusão parcial dos materiais da mistura (criada por seu pai)], o cimento Portland obtido possuía propriedades melhoradas (Marques, S.M.F., 2005) e (Costa, L.L., 2008).

Ao longo dos tempos foram introduzidas várias alterações e descobertas novas tecnologias, o que possibilitou a obtenção do cimento Portland com as características que hoje se conhecem. Este material tornou-se o mais usado na construção, permitindo construções mais resistentes, de maior qualidade e durabilidade. Em 1893, na Europa, foi registada a primeira patente de fabrico de argamassas secas. Em Portugal, o início de fabrico de argamassas industriais remonta aos anos 90 e a sua aplicação em obra tem vindo a crescer. As vantagens destas em relação às argamassas tradicionais prendem-se, sobretudo, com a menor necessidade de espaço em estaleiro e com uma maior garantia de qualidade da argamassa obtida (mistura feita em fábrica cujo processo é controlado, possui matérias primas em quantidades adequadas, diminuindo assim a ocorrência de erros humanos) (Paulo, R.S.V.M.N., 2006), (Costa, L.L., 2008) e (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

2.2. Intervenção com argamassas em edifícios antigos

Numa obra de reabilitação de rebocos antigos, a opção mais correta de intervenção é a da conservação. Uma intervenção neste tipo de edifícios é sempre uma operação delicada, requerendo um estudo detalhado da situação em causa, que permita o desenvolvimento de estratégias de intervenção (que visem minimizar a sua extensão e maximizar a compatibilidade com o existente), obtendo-se soluções adequadas e economicamente viáveis de modo a que as reabilitações sejam duradouras, esteticamente aceitáveis e que garantam a funcionalidade dos elementos e do edifício para o fim a que se destinam (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

Para que se possa proceder a uma correta intervenção de reabilitação temos necessidade de:

1) Identificar e diagnosticar as causas da degradação, conhecer os principais agentes de degradação, avaliar as causas das patologias existentes ou passíveis de virem a ocorrer e tomar medidas mitigadoras do seu efeito no edificado e/ou soluções de reparação eficazes; 2) Conhecer os materiais existentes nas edificações e os materiais disponíveis na atualidade; 3) Conhecer as características da mão-de-obra disponível; 4) Conhecer das características dos substratos antigos, promovendo assim a compatibilização das soluções a adotar na reabilitação com os seus suportes.

Nos edifícios antigos, em função do tipo aplicação (assentamento de paredes, refechamento ou preenchimento de juntas, consolidação das paredes e substituição das argamassas de revestimento), as argamassas para a reparação das suas paredes devem ser de constituição e procedimentos de aplicação distintos. Uma má solução de reparação (escolha de materiais, formulações, preparação ou aplicação) pode ser indutora de novas patologias, comprometer a funcionalidade, durabilidade e a estética do edifício. Nas edificações antigas, um dos sistemas de revestimento (frequentemente aplicado sobre os seus suportes) consiste no reboco (constituído por várias camadas de argamassas), seguido de um acabamento (por exemplo pintura) (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

Os sistemas de revestimento (rebocos e acabamento), sempre que se justifique, devem ser conservados recorrendo a técnicas de consolidação específicas. Só em situações limite de degradação (em que não seja possível mantê-los integralmente) é que se deve proceder à sua substituição parcial ou total. Neste ponto deve-se dar particular atenção à camada de sacrifício.

A formulação mais eficiente para a composição das várias argamassas, que constituem os novos rebocos a aplicar, deve ser baseada na composição das argamassas existentes no

edificado em causa (obtida previamente pela análise sistémica dos materiais antigos e identificados pela abordagem analítica). As argamassas obtidas (elaboradas com o mesmo tipo de ligantes, agregados e outros componentes ou contemplando a substituição e/ou introdução de novos materiais existentes na atualidade) devem possuir características aproximadas às das argamassas existentes, de modo a que garantam as funções que lhes são requeridas. Estas formulações, bem como as suas especificações de aplicação, devem ser testadas através de uma avaliação experimental *in situ* e corrigidas, se necessário, a fim de definir um plano de elaboração e aplicação destas em obra. Devido ao desuso deste tipo de argamassas, a mão-de-obra disponível para a sua elaboração e aplicação em obra é escassa ou inexistente, pelo que se deve ter particular atenção neste ponto, atendendo a que a má execução dos rebocos em obra (sendo muitas vezes referida como sendo a causa de rápida degradação dos rebocos e como causa da não obtenção do acabamento estético pretendido) contribui para a diminuição da durabilidade da reparação e compromete a apresentação visual (em termos de texturas e outros efeitos visuais) da arquitetura existente no edifício. A utilização neste tipo de intervenção, de argamassas pré-doseadas (com características bem conhecidas determinadas em laboratório idóneo) pode ser boa solução quando os prazos, custos e inconvenientes de mão-de-obra o justifiquem (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

Os rebocos de substituição a aplicar, para desempenharem todas as funções que lhe são exigidas, devem apresentar características físicas, químicas e mecânicas semelhantes e compatíveis com os seus suportes. De um modo geral, um reboco deve satisfazer os seguintes critérios: 1) o seu módulo de elasticidade deve ser menor ou igual ao do suporte; 2) a sua permeabilidade ao vapor de água deve ser superior à do suporte; 3) a porometria deve ser idêntica à do seu suporte e a suficiente para permitir a cristalização dos sais transportados pela água sem que ocorra a degradação do elemento; 4) o seu coeficiente de variação dimensional deve ser similar à do suporte; 5) deve ser reversível (passível de ser removido sem causar danos aos materiais originais); 6) a sua durabilidade deve ser tão elevada quanto possível; 7) não deve descaracterizar o edifício, nem comprometer a funcionalidade deste, pois assim o reboco deve satisfazer a apresentação visual, em termos de texturas e outros efeitos visuais, da arquitetura existente no edifício; 8) as argamassas que constituem o reboco devem apresentar: i) trabalhabilidade aceitável (sem que, para tal, seja necessário adicionar água em excesso); ii) retrações baixas; iii) a capacidade de ganharem presa (em ambientes secos e húmidos) num espaço de tempo aceitável; iv) o menor teor de sais solúveis possível (Duarte, T., 2011) e (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

2.3. Constituintes das argamassas

A argamassa é uma mistura (homogênea e de cor uniforme) de materiais ativos [adição de ligante (aéreos, hidráulicos e orgânicos), aditivos (por exemplo, componentes pozolânicos) e água], agregados (que podem ser naturais, industrializados e reciclados) e adjuvantes (impermeabilizantes hidrófugos, plastificantes, aceleradores ou retardadores de presas, promotores de aderência, agentes introdutores de ar, fungicidas pigmentos e entre outros fibras) (Costa, L.L., 2008).

As argamassas são frequentemente designadas em função do tipo de ligantes. A classificação que reúne maior consenso dos autores e a mais utilizada na área divide as argamassas em função do tipo de ligante: argamassas de gesso, argamassas de cal, argamassas bastardas e argamassas de cimento ou cimentícias. O grupo das argamassas de cal pode ser subdividido em dois subgrupos, a saber: as argamassas de cal aérea e as argamassas de cal hidráulica. As argamassas hidráulicas de cal podem ser distinguidas pela forma como adquirem a hidráulicidade (tipo de hidráulicidade), através da adição de pozolanas naturais, calcinação da pedra calcária com argila ou adição de componentes pozolânicos reciclados (granulados e fragmentos de tijolo ou outras cerâmicas). A designação de argamassa bastarda é frequentemente aplicada a argamassas resultantes da introdução de dois ligantes (gesso e cal ou cal e cimento) na sua composição, visando aproveitar as propriedades mais relevantes e expectantes de cada constituinte. Assim, dependendo da composição das argamassas, as suas propriedades variam consideravelmente.

A função do ligante (cal aérea, cal hidratada, cimento e gesso) é, essencialmente de aglutinador dos vários constituintes, oferecendo coesão e resistência às argamassas. A água tem como função a promoção das reações químicas (processo de carbonatação e hidratação). A quantidade de água a utilizar na preparação das argamassas deve ser a necessária para hidratar o ligante e para garantir a trabalhabilidade e a consistência da argamassa. A função dos agregados na argamassa é: diminuir a retração da argamassa; diminuir a quantidade de ligante necessário; aumentar a resistência à compressão; aumentar a porosidade da argamassa; atribuir uma determinada coloração ao revestimento (Ferreira, T., 2011). A introdução de aditivos e/ou adjuvantes (até 5% do da massa do ligante) nas argamassas tem como função permitir alterar/melhorar determinadas características por ação física, química ou mecânica. O aspeto visual das argamassas só é alterado caso o adjuvante introduzido seja um pigmento.

2.4. Pozolanas e reatividade das pozolanas artificiais resultantes de tratamento térmico

“As pozolanas são produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reatividade para o hidróxido de cálcio mas insolúveis e inertes na água” (Sousa Coutinho, A., 1988).

As pozolanas dividem-se em pozolanas naturais, artificiais e subprodutos industriais. As pozolanas naturais são provenientes de rochas vulcânicas originadas por arrefecimento rápido de magma ácidos (ricos em sílica) e que ficaram no estado amorfo ou criptocristalino. Estas rochas podem ser alteradas por meteorização, o que lhes confere um grande aumento da sua reatividade pozolânica. As pozolanas artificiais são provenientes de determinadas rochas [principalmente de rochas siliciosas, aluminosas e argilosas (sílico-aluminosas)], que quando sujeitas a tratamento térmico adquirem características pozolânicas importantes. As pozolanas artificiais, provenientes de rochas argilosas ou sílico-aluminosas, são obtidas pela ação da temperatura, que deve ser inferior à temperatura de fusão e permitir a desidratação (geralmente entre 500°C e 900°C), que cria uma instabilidade na estrutura interna da rede cristalina dos minerais argilosos à custa da saída de iões (OH)⁻, provocando o aumento da porosidade das partículas incrementando assim a sua superfície ativa. Os minerais argilosos sujeitos ao processo acima descrito, que são mais suscetíveis de se tornarem pozolanas artificiais (este mecanismo é puramente físico), são os do grupo da caulite, da montmorilonite e ilite. Os subprodutos industriais ou cinzas volantes adquirem propriedades pozolânicas através de um processo idêntico ao das pozolanas artificiais. O surgimento destes subprodutos deveu-se há necessidade dos grandes centros industriais aproveitarem os produtos provenientes da filtragem de fumos, com vista à diminuição da poluição atmosférica (Sousa Coutinho, A., 1988), (Silva, J., 2006) e (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

As pozolanas artificiais provenientes de rochas argilosas ou sílico-aluminosas são as que se inserem no âmbito do presente estudo, visto os agregados reciclados estudados na sua maioria terem na sua origem pastas de barro vermelho.

A reatividade pozolânica traduz-se pela capacidade da sílica e da alumina amorfa dos componentes pozolânicos na presença de água se combinarem com o hidróxido de cálcio, para formarem silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. As causas da reatividade das pozolanas artificiais que surgem da calcinação de materiais siliciosos e argilosos não são bem

conhecidas. Mas sabe-se que a reatividade pozolânica: 1) deve-se à composição química das pozolanas e à sua estrutura interna (quanto mais afastadas estiver a estrutura do estado cristalino mais reativa é a pozolana); 2) está correlacionada com a superfície por unidade de volume que deve ser elevada (para um mesmo componente pozolânico a sua reatividade é tanto maior quanto maior for a superfície específica que apresenta) (Faria-Rodrigues, M.P., 2004).

2.5. Cerâmica e produtos cerâmicos

“A palavra “Cerâmica” deriva do termo grego “Keramike”, derivação de “Keramos”, que significa argila. Cerâmica é o conjunto de atividades destinadas à elaboração de todo o tipo de objetos, com barros de qualquer classe, decorados ou não, utilizando-se a propriedade que possui a argila de se moldar facilmente no estado de barro cru (húmido), adquirindo dureza à medida que avança a sua secagem ou por efeito da cozedura” (Silva, J., 2006).

Segundo Petrucci (Petrucci, E., 1976), as argilas podem classificar-se:

- 1) Quanto à estrutura, em: estrutura laminar (utilizadas na produção de produtos cerâmicos) e estrutura fibrosa;
- 2) Quanto à plasticidade, em: argilas gordas e argilas magras;
- 3) De acordo com a composição, em: puras e impuras;

As argilas a utilizar como matéria-prima na indústria cerâmica devem ter certas características que são determinadas pelas suas propriedades. Assim, as propriedades que se devem conhecer são: 1) plasticidade; 2) resistência da argila seca; 3) ações térmicas (perda de peso, variações dimensionais, absorção e libertação de calor); 4) porosidade (Petrucci, E., 1976).

No início da atividade industrial, a cerâmica era classificada em função do tipo de matéria-prima utilizada: a cerâmica de barro vermelho e a cerâmica de barro branco. A APICER publicou uma classificação em função da sua constituição, passando a designar-se por: cerâmica vermelha; materiais de revestimento; cerâmica de barro branco; materiais refratários; abrasivos; vidro, cimento e cal; e cerâmica de alta tecnologia. Em 2000, a INOFOR criou outra classificação com maior distinção das funções de cada material cerâmico, passando a designar-se por: cerâmica estrutural; cerâmica de pavimentos e revestimentos; cerâmica sanitária; cerâmica utilitária decorativa; cerâmica técnica; e cerâmica refratária (Silva, J., 2006).

De acordo com Silva (Silva, J., 2006) baseado em Oliveira (Oliveira, A., 1985), o processo de fabrico dos materiais cerâmicos, independentemente da sua opção técnica, contempla as seguintes fases: 1) extração de argila; 2) preparação da pasta; 3) moldagem; 4) secagem e 5)

cozedura. Assim, um produto cerâmico só poderá ser de boa qualidade se contemplar, em todas as fases do seu processo de fabrico, boas práticas de execução. Ressalva-se, em seguida, alguns dos pontos essenciais à boa qualidade dos produtos finais. Este processo começa pela seleção e extração das argilas que deve ser bem programada, na preparação das pastas e moldagem destas para que se obtenha um produto cuja forma se mantenha durante as fases de fabrico seguintes, pelo que destas operações dependem o êxito da laboração. O processo de secagem e cozedura também são etapas importantes neste processo. Com a cozedura, em fornos, é conferido aos produtos cerâmicos a dureza, a resistência ao choque e à carga. O tipo de fornos utilizados também influi na qualidade do produto final. Assim, na Figura 2.3 apresentam-se os tipos de fornos utilizados no fabrico de materiais cerâmicos.

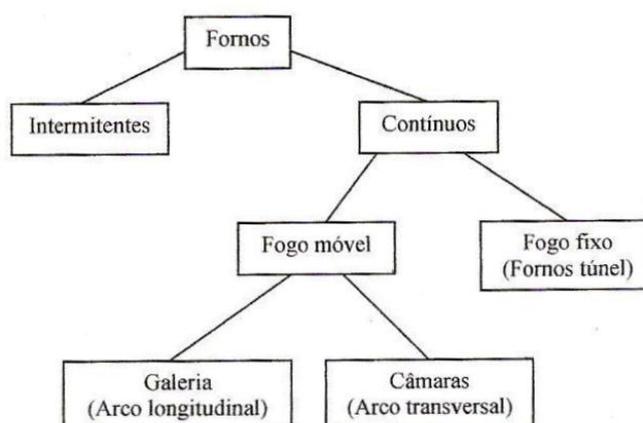


Figura 2.3 Tipos de fornos utilizados no fabrico de materiais cerâmicos (Silva, J., 2006)

Constata-se que os fornos existentes são de dois tipos, fornos intermitentes e fornos contínuos. Os fornos intermitentes são fornos em desuso, visto causarem irregularidades de cozedura promovendo o surgimento de produto não conforme, devido a deformações ou fendidos, aumentando assim o volume de resíduos produzidos. Outra das desvantagens apresentada é a necessidade de muita mão-de-obra para a realização das operações de enforma e desenforma. Os fornos contínuos permitem a obtenção de produtos de melhor qualidade e com rendimentos elevados, visto a necessidade de mão-de-obra ser reduzida e permitirem elevados níveis de automatização e menores consumos de energia. A sua utilização é vantajosa para grandes volumes de produção (Silva, J., 2006).

Atualmente, os fornos e estufas deixaram de ser alimentados a fuel e passaram a ser alimentados a gás natural permitindo reduzir as quantidades de CO₂ emitidas durante o processo de queima. Verifica-se, neste sentido, que nos dias de hoje, as unidades produtivas têm instalados mecanismos de recuperação de calor produzidos pela laboração do forno que

são introduzidos nas estufas e estas só são alimentadas a gás natural quando os requisitos de temperatura não se encontrem totalmente satisfeitos pela sua alimentação a partir do calor produzido pelo forno.

2.6. Reciclagem de resíduos

A reciclagem é um procedimento que deve ser implementado em todos os setores produtivos geradores de significativas quantidades de resíduos e/ou consumidoras de recursos não-renováveis, visando a gestão racional dos recursos e resíduos, por forma a permitir um desenvolvimento sustentável com o objetivo de satisfazer as necessidades atuais e não comprometer as futuras. A reciclagem apresenta sempre aspetos positivos e negativos. De facto, deve-se fazer um estudo prévio (minimizando as desvantagens) sempre que se procurem novas soluções que devem ser alternativas de mercado, ambientalmente seguras (Silva, J., 2006).

Silva (Silva, J., 2006), baseado em Angulo (Angulo et al, 2001), apresenta uma metodologia, para orientação de atividades de investigação e de desenvolvimento de reciclagem de resíduos, orientadora de estudos prévios, visto ser um processo complexo que envolve conhecimentos multidisciplinares. Assim, um estudo prévio deve compreender os seguintes tópicos: 1) identificação e quantificação dos resíduos disponíveis; 2) caracterização dos resíduos; 3) custos associados aos resíduos; 4) seleção das aplicações a serem desenvolvidas; 5) avaliação do produto; 6) análise do desempenho ambiental; 7) desenvolvimento do produto; 8) transferência de tecnologia. Numa perspetiva económica, a reciclagem só é justificável se o novo produto/solução for competitivo em termos de quantidade e custo (Silva, J., 2006).

2.7. Resíduos cerâmicos industriais, reciclagem em agregados e agregados reciclados para argamassas

O setor da indústria cerâmica e da construção, no desenvolvimento da sua atividade produtiva, é uma ameaça para o meio ambiente, nomeadamente pela quantidade de subprodutos e resíduos produzidos, a sua deposição em aterro, o desperdício energético e a agressão provocada pelo consumo de matérias-primas finitas (Silva, J., 2006).

Na Figura 2.4 apresenta-se o ciclo de vida do produto cerâmico. Da sua análise constata-se que existem várias fontes produtoras de resíduos cerâmicos (resíduos limpos e resíduos com impurezas). As principais fontes produtoras deste tipo de resíduos são a indústria da construção e a indústria cerâmica (Silva, J., 2006).

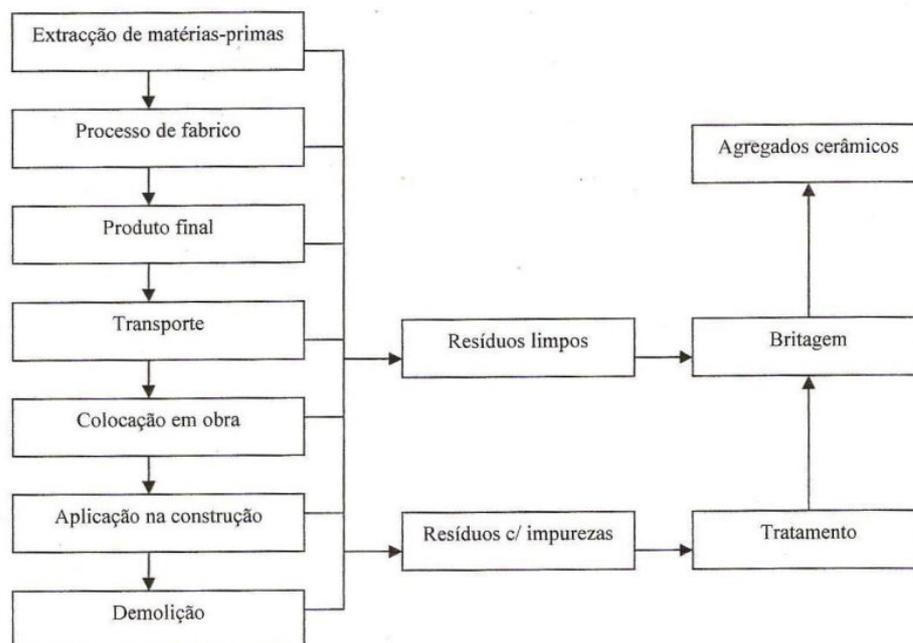


Figura 2.4 Ciclo de vida do produto cerâmico (Silva, J., 2006)

No âmbito do presente estudo, os resíduos cerâmicos estudados enquadram-se nos resíduos produzidos pelas indústrias cerâmicas, ao qual se dará maior atenção neste ponto.

Do relatório de Andrade (Andrade, I., 2004) sobre a produção de resíduos industriais na indústria cerâmica em 2003, conclui-se que no distrito de Coimbra são produzidos 13,6% dos resíduos industriais cerâmicos produzidos e que os distritos de Aveiro (51,0%) e Leiria (34,4%) são os que mais resíduos produzem (Figura 2.5). Os resíduos cerâmicos (cacos cozidos) correspondem a 37% dos resíduos industriais produzidos pelas indústrias de cerâmica (Figura 2.5).

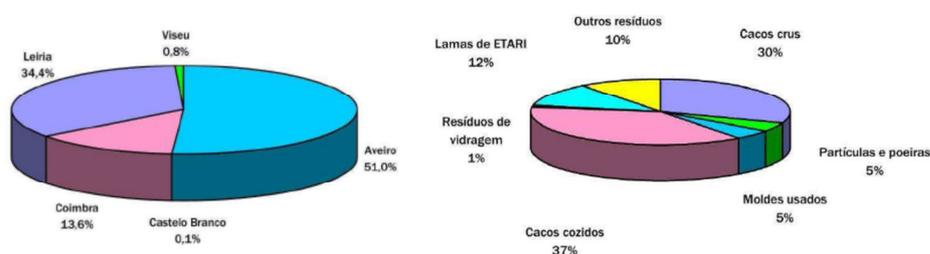


Figura 2.5 Produção de resíduos industriais por distrito e resíduos diretamente resultantes do processo produtivo (Andrade, I., 2004)

Os agregados reciclados para introdução em argamassas podem ser caracterizados segundo a sua: 1) composição geral (caso seja heterogénea); 2) composição mineralógica e química (permite conhecer as características intrínsecas aos agregados, por forma a eliminar todas as possibilidades de incompatibilidade e contaminações); 3) origem; 4) forma; 5) granulometria (a curva granulométrica e o módulo de finura devem ser entendidos como indicadores da trabalhabilidade da argamassa); 6) porosidade (propriedade está diretamente associada a características como à massa volúmica, a absorção de água, resistência, dureza ou módulo de elasticidade) (Silva, J., 2006).

3 RESÍDUOS ESTUDADOS

3.1. Identificação das empresas a laborar na região e recolha de resíduos

Para se proceder à identificação das empresas implantadas na região criou-se uma base de dados organizada por atividade de produção de telhas, tijolo, abobadilha, cerâmica decorativa, contendo ainda informação genérica sobre empresas. Contudo, numa primeira análise, concluiu-se, de imediato, que várias empresas constantes nessa base de dados já tinham cessado atividade.

Definida uma primeira listagem, procedeu-se ao contacto telefónico, tendo-se verificado que algumas das empresas, embora agradecendo a abordagem, se mostraram indisponíveis para colaborar com o presente estudo, invocando, ora a conjuntura económica que atravessa o país, ora o encerramento temporário dos locais de produção, sedeados na região em estudo.

Com a informação recolhida neste primeiro contacto, procedeu-se à atualização da base de dados, tendo como critérios a disponibilidade de participação no estudo e o volume de resíduos produzidos anualmente, tendo-se selecionado as empresas com significativa produção.

Agendou-se uma visita às instalações de cada uma das empresas selecionadas a fim de se proceder à recolha de informação mais detalhada sobre os resíduos produzidos, bem como à recolha de amostras desses resíduos.

Para facilitar a recolha de informação foi concebida uma ficha, a ser preenchida em cada uma das empresas visitadas, tendo por objetivo a sua identificação (nome, morada, contacto telefónico, e-mail, web, identificação do colaborador da empresa a contactar e a atividade desenvolvida) e a identificação dos resíduos aí recolhidos (origem do resíduo, fotografia do resíduo, data da sua recolha, composição do produto que lhe deu origem, sua granulometria aproximada, processo de fabrico, fluxograma do processo de fabrico, temperatura de cozedura, quantidade de resíduo produzido anualmente, tratamento que a empresa dá aos seus resíduos de produção e um campo para observações).

Nesta fase constatou-se que algumas das empresas, embora tivessem um volume anual significativo de resíduos produzidos, os tratavam integralmente na própria empresa,

reintroduzindo-os na sua linha de produção. Estas empresas foram excluídas do estudo, em virtude de não produzirem efetivamente resíduos.

3.2. Análise dos dados recolhidos

Da análise dos dados recolhidos verificou-se que a maioria das empresas produtoras de produtos cerâmicos, aquando do processo de escolha do material produzido, regista perdas de produção, consubstanciadas em peças dadas como perdidas, ou devido a defeitos, ou a quebras. Por regra, estes resíduos são armazenados num contentor e, posteriormente, levados para um local das instalações onde são amontoados ao ar livre. O tratamento dado a estes resíduos pelas empresas consiste na sua aplicação em caminhos dentro das próprias instalações fabris, sendo o excedente transportado para barreiros, igualmente propriedade da empresa e, também aí, aplicados nos seus caminhos e parques.

A empresa de cerâmica decorativa que se disponibilizou a participar no presente estudo informou não dar qualquer tratamento interno aos seus resíduos decorrentes da sua atividade produtiva (cacos cerâmicos e moldes de gesso utilizados no processo produtivo), pelo que são diretamente entregues a destinatário gestor de resíduos.

Todas as empresas demonstraram recetividade à abordagem de alternativas a dar ao tratamento dos seus resíduos, evidenciando os benefícios de carácter ambiental, mas sempre ressalvando o carácter económico das soluções.

Algumas das empresas disponíveis para participar no estudo possibilitaram uma visita à linha de produção, enquanto outras deram uma informação mais sucinta sobre a respetiva linha de produção. Constatou-se, assim, que a maioria das empresas já tinha e/ou estava a implementar soluções na linha de fabrico, por forma a se tornarem mais limpas e mais amigas do ambiente, bem como na procura de soluções ao nível das fontes de energia usadas no processo de laboração, com vista a diminuir o consumo de combustíveis fósseis. Uma das soluções salientadas foi a otimização dos recursos em que a alimentação de ar quente à estufa (utilizada no processo de secagem) provém da recuperação de ar quente do forno (utilizado no processo de cozedura), só recorrendo a combustíveis fósseis para alimentação de ar quente à estufa, quando a temperatura do ar recuperado do forno for inferior à temperatura necessária na estufa. Da análise às temperaturas de cozedura dos produtos cerâmicos verificou-se que estas têm uma amplitude que varia entre os 900°C e os 1100°C.

Em seguida, apresenta-se uma abordagem mais detalhada sobre a informação recolhida em quatro das empresas contactadas.

A atividade principal desenvolvida pela empresa A é a fabricação de telhas cerâmicas e acessórios de telhados de pasta vermelha, sendo um produto de qualidade normal (designação aqui definida para produtos que satisfazem exigências de mercado em produtos de qualidade e baixo custo). A empresa B dedica-se à produção de telhas cerâmica e acessórios de telhados: de pasta vermelha, com duas linhas de qualidade de produtos produzidos, de modo a satisfazerem as exigências de mercado - uma linha de qualidade normal e outra de alta qualidade; de pasta branca, cuja linha de qualidade do produto é de alta qualidade. A empresa C dedica-se exclusivamente à produção de tijolos cerâmico de alvenaria, cuja qualidade de produto produzido se enquadra num produto de qualidade normal. A empresa D desenvolve a sua atividade na área da cerâmica decorativa na produção de vasos cerâmicos.

O volume de resíduos cerâmicos de pasta vermelha produzidos anualmente pela empresa A é de 740 toneladas, enquanto a empresa B produz anualmente 6000 toneladas (sendo 2000 ton/ano resíduos provenientes da linha de produção de qualidade normal e 4000 da sua linha de produção de alta qualidade). O volume de resíduos de cerâmica de pasta branca não foi disponibilizado pela empresa, visto a produção deste tipo de telha ser efetuada de acordo com as necessidades de mercado (atualmente produzem-na de 2 em 2 anos). O volume de resíduos cerâmicos de tijolo de pasta vermelha produzidos pela empresa C é de 730 toneladas por ano e a empresa D produz anualmente 100 toneladas de resíduos de vasos cerâmicos decorativos.

As empresas A e B, produtoras de telhas cerâmicas, apresentam uma organização nas suas instalações produtivas em tudo idênticas. Assim, apresentam:

- 1) Zona de parques cobertos e descobertos, onde se armazenam as matérias-primas, provenientes de barreiros próprios ou adquiridas a entidades externas necessárias à produção (areias, argilas magras e argilas gordas, promovendo nas argilas a sua homogeneização e “apodrecimento”). O referido “apodrecimento” consiste na colocação das argilas em parque, por um período de tempo suficiente, promovendo-se a decomposição da matéria orgânica existente, bem como a oxidação de alguns compostos das argilas;
 - 2) Zona de pré-preparação - consiste num circuito de processamento inicial das matérias-primas. Este circuito de processamento inclui várias operações: uma operação de doseamento (fazendo passar a matéria-prima através de um doseador), seguindo-se a operação de destorroamento (que consiste em passar a matéria-prima por destorroadores) e a de laminagem (em que a matéria-prima passa por laminadores). A operação seguinte é a de mistura das matérias-primas e verificação da adição de água (em amassadores). Após o processamento destes materiais, estes são armazenados em parques cobertos (promovendo o repouso e homogeneização do material processado), constituindo um *stock* intermédio;
 - 3) Zona onde se faz a preparação da lastra e moldagem - consiste numa linha onde a movimentação dos materiais é realizada de modo contínuo e automático, constituída por um doseador (que contém material do *stock* intermédio e alimenta a linha), seguindo-se
-

laminadores montados em série, amassadores/raladores filtro (nesta operação existe a verificação da adição de água) e um silo doseador que alimenta uma fiação extrusora. Nesta operação de extrusão há adição de vapor de água e o produto final chama-se lastra. Esta é encaminhada para a mesa de corte (onde ocorre a operação de corte da lastra), seguindo para um conjunto de prensas em série, onde ocorre a modelagem do material através da operação de prensagem;

4) Zona de secagem e cozedura dos produtos cerâmicos produzidos - consiste numa parte da linha automatizada em que as telhas ou acessórios de telhado, após a operação de moldagem, são colocados em vagonetas ou vagonas e transportadas para um secador túnel (onde permanecem um determinado período de tempo a uma determinada temperatura constante, promovendo a remoção de humidade das peças para valores definidos pelos fabricantes);

5) Após esta operação, o produto em produção é transportado automaticamente (em vagonas ou gazetes) para o forno alimentado a gás natural, onde se procede à cozedura por um período de tempo e temperatura determinados pelos fabricantes. O produto cozido é depois deixado arrefecer gradualmente;

6) Zona de escolha e embalagem – consiste numa parte da linha de produção em que, após a operação de cozedura, os produtos são automaticamente descarregados das vagonas ou gazetes para tapetes rolantes industriais, seguindo-se a operação de escolha. O produto conforme é agrupado e paletizado;

7) Finalmente, as paletes são encaminhadas para a zona do parque de produto acabado, onde são armazenadas para expedição.

A empresa B possui o circuito de produção todo monitorizado.

A empresa C não nos proporcionou qualquer informação sobre a sua linha de produção (fluxograma de fabrico) e, aquando da recolha de resíduos, não nos foi facultada visita às instalações produtivas.

A empresa D informou, através do seu fluxograma, que o processo de fabrico consiste na preparação da pasta e moldes, seguindo-se as operações de prensagem e de cozedura em forno; após a cozedura procede-se à pintura e, por fim, as operações de embalagem e expedição.

Apesar das limitações impostas pelas empresas, dado o carácter sigiloso da informação solicitada, foi possível, ainda assim, recolher as informações sobre o processo de fabrico dos produtos, disponibilizados pelas empresas A, B, C e D, sistematizadas no Quadro 3.1 abaixo, e que sustentam o presente estudo.

Quadro 3.1 Informação recolhida nas empresas, sistematizada

Empresa e Material recolhido	Descrição
<p>Empresa A</p> 	<p>– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade normal</p> <p>A composição da pasta é uma mistura de argila magra e sílica, com mistura de argila gorda e areia e água.</p> <p>A secagem dá-se à temperatura máxima de 60°C, num ciclo de duração média de 60 horas, e a cozedura à temperatura de 920°C, num ciclo de duração média de 73 horas.</p> <p>A quantidade de resíduos cerâmicos produzidos é de 740 toneladas por ano.</p> <p>Os resíduos cerâmicos são maioritariamente tratados pela própria empresa, aplicados nos caminhos das instalações e barreiros propriedade da empresa.</p>
<p>Empresa B</p>    	<p>– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade normal</p> <p>A composição da pasta é uma mistura de uma argila magra, de uma argila gorda, de areia branca e de água.</p> <p>A secagem é efetuada à temperatura máxima de 60°C a 70°C, num ciclo de duração média de 36 horas, e a cozedura à temperatura de 1050°C, num ciclo de duração média de 17 horas.</p> <p>A modelagem e prensagem são executadas em moldes de borracha.</p> <p>A quantidade de resíduos cerâmicos produzidos é de 2000 toneladas por ano.</p> <p>– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade superior</p> <p>A composição da pasta é uma mistura de uma argila magra, de duas argilas gordas, de areia branca e de água.</p> <p>A secagem é efetuada à temperatura máxima de 60°C a 70°C, num ciclo de duração média de 36 horas, e a cozedura à temperatura de 1050°C, num ciclo de duração média de 17 horas.</p> <p>A modelagem e prensagem são executadas em moldes de gesso.</p> <p>A quantidade de resíduos cerâmicos produzidos é de 4000 toneladas por ano.</p> <p>– Telhas cerâmicas de pasta branca de qualidade superior</p> <p>A pasta é comprada a uma entidade externa.</p> <p>A secagem é efetuada à temperatura máxima de 60°C a 70°C, num ciclo de duração média de 36 horas, e a cozedura à temperatura de 1050°C, num ciclo de duração média de 17 horas.</p> <p>A modelagem e prensagem são executadas em moldes de gesso.</p> <p>As pastas da empresa B poderão conter alguns aditivos, em percentagens muito pequenas, para controlo de sais solúveis (dolomite e carbonato de bário). As colorações são executadas recorrendo a pigmentos e os vidrados são executados com recurso à bicozedura.</p> <p>Os resíduos cerâmicos são tratados pela própria empresa, aplicados nos caminhos das suas instalações e nos seus barreiros.</p>

Quadro 3.1 Informação recolhida nas empresas, sistematizada (Continuação)

Empresa e Material recolhido	Descrição
 Empresa C	– Resíduos de tijolo cerâmico de alvenaria A composição da pasta é uma mistura de “barro” amarelo da Aguada (60% a 65%), de “barro” vermelho de Bustos (30% a 35%), de areia (10%) e de água. A temperatura de cozedura é de 900°C. A quantidade de resíduos cerâmicos produzidos é de 730 toneladas por ano. Os resíduos cerâmicos são tratados pela própria empresa, aplicados nos caminhos das suas instalações e nos seus barreiros.
 Empresa D	– Resíduos de vasos cerâmicos decorativos A composição da pasta é uma mistura de caulino, “barro” e água. A temperatura de cozedura é de 1100°C. A quantidade de resíduos cerâmicos produzidos é de 100 toneladas por ano. Os resíduos cerâmicos são diretamente entregues a empresa de gestão de resíduos.

Da informação recolhida constatou-se que os pontos-chave das características dos produtos produzidos concentram-se na seleção das matérias-primas, na preparação das pastas (a composição e percentagens das misturas), no processo de obtenção da lastra (granulometrias finais), na modelagem e prensagem (material dos moldes usados) e na secagem e cozedura (controlo de humidade e temperaturas definidos pela empresa, e o número de produtos por suporte).

3.3. Seleção dos resíduos a analisar

A seleção dos resíduos recolhidos a estudar/analisar, por forma a obter a identificação daqueles que poderão vir a trazer benefícios, aquando da sua incorporação na composição das argamassas de reabilitação, teve por base:

- Escolha de três tipos de resíduos de produtos cerâmicos: telhas, tijolos e vasos cerâmicos decorativos, cujo volume anual de resíduos produzidos é significativo e a sua valoração, por parte das empresas, não contempla a reciclagem destes pelos próprios;
- Temperatura de cozedura.

Foram constituídas sete amostras de resíduos a analisar (Quadro 3.2), sendo quatro de resíduos de telhas cerâmicas de pasta vermelha, uma de resíduo de telha de pasta branca, uma

de resíduo de tijolo e uma de resíduo de vasos cerâmicos. As amostras de resíduos de telhas de pasta vermelha foram definidas com os seguintes propósitos:

- Realizar a comparação entre produtos de qualidade semelhante, ainda que produzidos por empresas diferentes;
- Analisar comparativamente os produtos produzidos pela mesma empresa, mas de qualidade diferente;
- Comparar produtos com a mesma qualidade, ainda que com tipos de acabamento diferentes, simples ou pintado e/ou vidrado.

Quadro 3.2 Definição das amostras de resíduos

Amostra N.º	Descrição
Amostra A.1	– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade normal, produzida pela empresa A.
Amostra B.1	– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade normal, produzida pela empresa B.
Amostra B.2	– Resíduos de telha cerâmica de pasta vermelha de qualidade superior, produzida pela empresa B.
Amostra B.3	– Mistura de resíduos de telhas cerâmicas de pasta vermelha de qualidade superior e acabamentos diferentes, produzida pela empresa B. Esta mistura é composta por 50% de resíduos de telha com acabamento a vidrado, 33,33% de resíduo de telha pintado de castanho e vidrada e 16,67% de resíduo de telha pintada a azul e vidrada.
Amostra B.4	– Mistura de telhas cerâmicas de pasta branca de qualidade superior, produzida pela empresa B. Para esta mistura considerou-se 1/3 de telha sem pintura ou vidrado, 1/3 de resíduos de telha de acabamento pintado e 1/3 de resíduos de telha com acabamento vidrado.
Amostra C.1	– Resíduos de tijolo cerâmico de alvenaria, produzido pela empresa C.
Amostra D.1	– Resíduos de vasos cerâmicos decorativos, produzidos pela empresa D.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados, de forma pormenorizada, os ensaios realizados, visando a caracterização dos resíduos recolhidos e transformados em agregados reciclados para incorporação em argamassas de reabilitação. São apresentados os resultados e é realizada a sua análise e discussão.

4.1. Considerações comuns à determinação das propriedades dos agregados

No presente subcapítulo é apresentado todo o equipamento e/ou utensílios de uso corrente, procedimentos e considerações comuns aos vários ensaios de determinação das propriedades dos agregados.

4.1.1. Considerações gerais

Para os ensaios realizados, de acordo com as suas normas de ensaio, foi necessária a utilização de diverso equipamento e/ou utensílios correntes, de uso comum, quer para a preparação das amostras, quer dos provetes, quer para a própria realização do procedimento de ensaio. Desta forma, far-se-á, de seguida no Quadro 4.1, a descrição dos equipamentos e utensílios de uso comum aos vários ensaios. Os equipamentos e/ou utensílios adicionais, específicos a cada ensaio, são explicitados no subcapítulo correspondente. Os utensílios e equipamentos usados são pertença de laboratórios acreditados para o efeito, pelo que as exigências de calibração se encontram satisfeitas

Quadro 4.1 Equipamento e/ou utensílios correntes

Equipamento	Descrição
	- Balança de 10,20kg x 0,01g , capaz de garantir a exatidão de $\pm 0,1\%$ da massa do provete. - Balança de 6,20kg x 0,01g , capaz de garantir a exatidão de $\pm 0,1\%$ da massa do provete.

Quadro 4.1 Equipamento e/ou utensílios correntes (Continuação)

Equipamento	Descrição
	<p>- Estufa ventilada com termostato capaz de manter temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.</p> <p>- Pá adequada.</p> <p>- Escovas (Pincel).</p> <p>- Tabuleiros, de tamanhos adequados, próprios para serem aquecidos em estufa ventilada, sem variação de massa.</p> <p>- Recipientes em vidro (em substituição de tabuleiros devido à indisponibilidade pontual destes).</p> <p>- Peneiros de ensaio (conformes com a norma NP EN 933-2:1999); Os peneiros utilizados são ASTM e BS/ISO 3310 (série normal), têm um diâmetro de 200mm e aberturas de formato quadrado (malha quadrada) em chapa perfurada ou em teia de arame. Assim, os peneiros, com dimensão nominal de abertura da malha foram:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ASTM: 14mm, 11,2 (12,6)mm, 10mm, 4,75mm e 1,6mm; • BS/ISO 3310 da série normal: 2mm, 1mm, 0,500mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm; <p>Devido à indisponibilidade de peneiros de 4mm (BS/ISO 3310) da série normal, foi utilizado um peneiro ASTM de 4,75mm em sua substituição.</p> <p>- Tampa adaptada aos peneiros;</p> <p>- Recipiente de fundo, adaptado aos peneiros de ensaio.</p>

Para alguns dos ensaios realizados, de acordo com as suas normas de ensaio, foi necessário proceder à peneiração das amostras.

Tendo presente a norma NP EN 933-1:2000 e o aditamento EN 933-1:1997/A1:2005, em vigor à data da elaboração dos ensaios, no processo de preparação das amostras a estudar dos provetes a ensaiar e sempre que o procedimento de preparação o permita, é aplicada:

- A peneiração a seco, uma vez que se considera estar na presença de agregados que se apresentam isentos de partículas aglomeradas. Em caso de dúvida, a norma aconselha a aplicação do método geral (lavagem, secagem em estufa até massa constante e seguindo-se a peneiração). A opção pela peneiração a seco prende-se, de igual forma, a questões ambientais, nomeadamente a poupança de água própria para consumo;
- A peneiração manual, que consiste em montar a coluna de peneiros constituída por uma tampa, seguida do número de peneiros necessários à preparação da amostra, encaixados e dispostos de cima para baixo, por ordem decrescente das suas dimensões de abertura da malha e, por fim, na base coloca-se o recipiente de fundo. Em seguida,

faz-se passar o material pela coluna de peneiros, agitando-a manualmente. Após esta operação procede-se à peneiração individual de cada peneiro da coluna, começando pelo de maior abertura, agitando manualmente, colocando a tampa e o recipiente de fundo de forma a garantir que não há perda de material. A peneiração pode considerar-se concluída quando durante um minuto de peneiração a massa de material retida no peneiro não se alterar mais de 1%. Reserva-se o material retido no peneiro num tabuleiro e transfere-se todo o material retido no recipiente de fundo para o peneiro seguinte da coluna, repetindo este procedimento para cada peneiro da coluna até chegar ao fundo.

Seguindo Sousa Coutinho (Sousa Coutinho, A.,1988), a agitação dos peneiros executa-se com movimentos em todas as direções, para a frente e para trás, para a direita e esquerda e com movimentos circulares no sentido horário e anti-horário, para que cada partícula de material tenha a possibilidade de passar através da malha do peneiro.

Para a verificação da não ocorrência da sobrecarga dos peneiros no fim da peneiração (conforme norma acima referida) foi calculada a massa máxima retida no peneiro, em gramas (norma NP EN 933-2:1999 e o aditamento EN 933-1:1997/A1:2005). Sempre que ocorra a sobrecarga dos peneiros, o procedimento a aplicar é o de dividir a fração retida no peneiro em porções de massa inferiores ao máximo especificado e peneirá-las, umas após as outras, colocando o material retido de cada porção num único tabuleiro.

Vários ensaios requerem, no procedimento de preparação dos provetes e/ou no procedimento de ensaio, a secagem do material em estufa a uma temperatura constante de 110 ± 5 °C até atingir massa constante. Ao estar-se na presença de agregados reciclados sensíveis à temperatura, optou-se por se diminuir a temperatura de secagem em estufa para valores de temperatura inferiores aos estabelecidos pelas normas de ensaio em vigor à data da realização dos ensaios. As temperaturas adotadas para os vários ensaios situaram-se entre os 60°C e 80°C, dependendo da temperatura a que as estufas disponíveis se encontravam. Atualmente, existem normas em vigor (NP EN 933-11:2011 e NP EN 1097-2:2011) que permitem, na sua aplicação a agregados reciclados grossos e se estes agregados reciclados forem sensíveis à temperatura, a utilização de uma temperatura de secagem em estufa ventilada inferior, de 40 ± 5 °C. O procedimento a adotar, sempre que é exigida a secagem de material em estufa até atingir massa constante, contempla as seguintes etapas: 1) a pesagem das amostras e registo das suas massas, antes da colocação em estufa; 2) a secagem em estufa, a uma temperatura constante por um período de 24 horas; 3) pesagens sucessivas, hora a hora, e o registo das massas obtidas, até que a diferença entre pesagens seja inferior a 0,1%. Refira-se ainda que, a fim de diminuir a influência da temperatura nas pesagens, deve ser colocada sobre a balança uma placa de cortiça é só depois o tabuleiro contendo a amostra.

4.1.2. Moagem dos resíduos

Quando as amostras de resíduos analisadas são misturas (B.3 ou B.4), o material sujeito à transformação é todo o material do provete utilizado na realização do ensaio de Los Angeles, com vista a garantir as percentagens dos componentes de cada mistura e aproveitamento do material recolhido, destinado à produção de argamassas realizadas com estes resíduos. Aquando da realização dos ensaios destas amostras deve ter-se em conta que este material já esteve sujeito a uma temperatura de 80°C, durante a secagem em estufa, até atingir massa constante. Quando as amostras de resíduo não são mistura, o material sujeito a transformação em agregado reciclado é o material partido para a preparação da amostra inicial do ensaio de Los Angeles e não utilizado na referida amostra.

O processo de transformação dos resíduos consiste na moagem do material num moinho de maxilas (Quadro 4.2), com um crivo de fundo de furação redonda de 10mm de abertura, seguido de peneiração a seco, de modo a obter um agregado reciclado, com granulometria inferior a 4mm (mais propriamente passado no peneiro 4,75mm).

Quadro 4.2 Moinho de maxilas

Equipamento	Descrição
	<p>O moinho de maxilas tem um peso aproximado de 58kg e as dimensões seguintes: largura - 560mm; altura - 1150mm; profundidade - 700mm. A trituração do material dá-se por efeito de percussão, impacto e cisalhamento. O moinho, em muitos casos, permitirá obter, num único ciclo de moagem, dependendo do tipo de material a moer e da abertura do crivo utilizado, material com finura inferior a 100µm. Este é constituído por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moinho: possui uma carcaça em alumínio fundido, é alimentado através de uma tremonha, fixa à porta de fecho rápido, que permite a entrada direta do material no centro da câmara de moagem. Esta configuração impede o ricochete do material em moagem e não permite intervenções com o equipamento em funcionamento. A porta de fecho rápido permite o fácil e rápido acesso à câmara de moagem e à saída da tremonha, facilitando assim a limpeza e manutenção em segurança destes locais, visto o moinho possuir um dispositivo de paragem automática do motor em caso de abertura da porta ou caso se encontre mal fechada. Na câmara de moagem encontram-se o crivo de fundo, cuja forma acompanha a superfície interna da câmara e é facilmente removível, o mecanismo de trituração, composto por cruzetas de impacto onde estão fixas as placas de precursão, e o elemento moedor dentado cuja forma acompanha a superfície interna da câmara e que se encontra fixo a esta. As cruzetas de impacto captam o material que entra na câmara e este é moído entre as placas de precursão e o elemento moedor dentado, quando o material adquire uma finura inferior à das aberturas do crivo de fundo, este é expulso da câmara, impulsionado pelo ar aspirado pelos martelos através da tremonha, pelo crivo de fundo para o balde atravessando o filtro de pó. O mecanismo de trituração pode ser de diversos materiais dependendo do material a triturar. O que oferece melhores resultados em moagens comuns é o de aço temperado. Existem Crivos de fundo com várias dimensões de abertura e tipo de furação. - Motor: de 50Hz e cuja rotação de é 2.85r.p.m, que permite o movimento das cruzetas de impacto.

Quadro 4.2 Moinho de maxilas (Continuação)

Equipamento	Descrição
	- Filtro de pó: constituído por uma manga têxtil removível que deve ser fixa através de braçadeiras ao moinho e ao balde. Esta manga assegura um processo de trituração não agressivo, acelera a passagem do material entre o moinho e o balde e drena a corrente de ar gerada pelo motor e contém os finos volantes.
	- Balde: em aço inox com capacidade de 5 litros. - Suporte.

Este procedimento foi aplicado, de forma sequencial, a todas as amostras analisadas, tendo-se procedido à limpeza a seco de todo o equipamento e utensílios, aquando da mudança de amostra de resíduo, a fim de se diminuir a contaminação das amostras, obtendo-se amostras de agregados reciclados que foram armazenadas, individualmente, em sacos de plástico.

4.2. Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

4.2.1. Resistência à fragmentação

A resistência à fragmentação foi determinada pelo método de Los Angeles, tendo por base a norma NP EN 1097-2:2002 aplicável a agregados naturais e artificiais, utilizados na construção civil e obras públicas. Posteriormente à realização deste ensaio, a presente norma foi anulada e substituída pela NP EN 1097-2:2011, aplicável a agregados grossos naturais, artificiais ou reciclados, utilizados na construção civil e obras públicas.

4.2.1.1. Princípio de ensaio

Este ensaio consiste em fazer rolar uma amostra de agregado com uma carga de esferas de aço num cilindro rotativo, tendo por objetivo a avaliação da quantidade de material retido num peneiro de 1,6mm, após o ensaio.

4.2.1.2. Equipamento e utensílios

De acordo com o exigido pela presente norma, o equipamento e/ou utensílios de uso corrente (Quadro 4.1) necessários são: balança de 10,20kg x 0,01g; estufa; peneiros de ensaio (14mm, 11,2 (12,6)mm, 10mm e 1,6mm); tampa e fundo; e o equipamento adicional: Máquina de Los Angeles (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 Máquina de Los Angeles

Equipamento	Descrição
	<p>Máquina de Los Angeles, composta por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cilindro em chapa de aço de construção, fechado nas duas extremidades, com uma abertura sobre todo o comprimento do tambor, para facilitar as operações de colocação e extração da amostra, após ensaio. Apoiado em dois suportes fixados às paredes de topo que não penetram no interior e à base do equipamento. Montado de forma a rodar em torno de um eixo horizontal. - Tabuleiro para recuperar o material e as esferas depois do ensaio. - Motor capaz de imprimir ao tambor uma velocidade de rotação entre 31r.m^{-1} a 33r.m^{-1}. - Conta rotações capaz de fazer a paragem automática do motor depois de efetuado o número de 500 voltas. - Tampa amovível em aço igual ao do tambor e que respeite a forma cilíndrica da superfície interna, a fixar sobre a abertura que deve estar hermeticamente fechada durante o ensaio. - Placa de projeção saliente, fabricada no mesmo aço ou num de grau superior ao do tambor, de secção retangular, fixa rigidamente na superfície interna do cilindro num plano diametral e ao longo de uma geratriz, situada entre 380mm e 820mm do lado mais próximo da abertura, sendo a medida ao longo do interior do cilindro e no sentido do movimento de rotação. Esta placa deve ser substituída quando a sua largura em qualquer ponto for inferior a 86mm e a sua espessura em qualquer ponto da face frontal for inferior a 2mm. - Carga abrasiva constituída por 11 esferas de aço. As esferas de aço usadas não são novas, assim os requisitos exigidos para a carga abrasiva são: <ul style="list-style-type: none"> • para cada esfera, o seu diâmetro deverá estar compreendido entre 45mm e 49mm e a sua massa entre 400g e 445g; • a massa total da carga abrasiva deverá estar compreendida entre 4690g e 4860g, incluindo uma tolerância de +20g, para cobrir irregularidades de fabrico, e uma de -150g que cobrirá o desgaste das esferas com o uso.

4.2.1.3. Preparação do provete

As amostras para este ensaio foram obtidas a partir de resíduos recolhidos nas empresas, partidos manualmente (Figura 4.1), com um martelo sobre uma superfície dura, procedendo-se à limpeza do local e do martelo, de modo a minimizar a possibilidade de contaminação da amostra obtida.



Figura 4.1 Resistência à fragmentação - processo de moagem das amostras

A presente norma refere que os provetes a ensaiar devem ter uma massa de 5000 ± 5 g, obtida a partir de uma amostra inicial de agregados de 15kg de massa da fração granulométrica de 10mm a 14mm, cuja curva granulométrica deve satisfazer o requisito de 30% a 40% passados no peneiro de 11,2mm e 60% a 70% passados no peneiro 12,5mm.

Devido à dificuldade e morosidade na obtenção de 15kg de agregado reciclado, satisfazendo o requisito da curva granulométrica através do processo manual de moagem, definiu-se que a amostra inicial, de agregados reciclados a obter, seria igual à amostra laboratorial e seria preparada de modo a ter um provete com a massa de 5000 ± 5 g da fração granulométrica 10mm a 14mm e cuja curva granulométrica teria que satisfazer a condição de 35% de passados no peneiro de 11,2mm (35% de retidos da fração granulométrica 10mm a 11,2mm e 65% de retidos da fração granulométrica 11,2mm a 14mm), valores apresentados nos Quadros 4.4 a 4.6.

Quadro 4.4 Resistência à fragmentação - massa das amostras laboratoriais

Massa (g)	Limite mínimo	A considerar	Limite máximo
Fração 10/11,2mm	1748	1750	1752
Fração 11,2/14mm	3247	3250	3253
Fração 10/14mm	4995	5000	5005

Quadro 4.5 Resistência à fragmentação - massa que cada componente da amostra B.3

Componentes da mistura	% de cada componente	Fração (g) 11,2/14mm	Fração (g) 10/11,2mm
Telha de pasta vermelha pintada a castanho e vidrada	33,33	583,33	1083,33
Telha de pasta vermelha pintada a azul e vidrada	16,67	291,67	541,67
Telha de pasta vermelha e vidrada	50,00	875,00	1625,00
Fração da amostra		1750,00	3250,00

Quadro 4.6 Resistência à fragmentação - massa que cada componente da amostra B.4

Componentes da mistura	% de cada componente	Fração (g) 11,2/14mm	Fração (g) 10/11,2mm
Telha de pasta branca	33,33	583,33	1083,33
Telha de pasta branca pintada	33,33	583,33	1083,33
Telha de branca vidrada	33,33	583,33	1083,33
Fração da amostra		1750,00	3250,00

Cada amostra laboratorial foi obtida através de peneiração a seco, de acordo com a norma NP EN 933-1:2000 e a EN 933-1:1997/A1:2005 utilizando-se uma coluna de peneiros de malha quadrada da série ASTM, constituída por tampa, peneiro de 14mm, peneiro de 11,2mm, peneiro de 10mm e fundo.

Foi rejeitado o material retido no peneiro de 14mm e o material retido no fundo (massa de passados no peneiro de 10mm). O material retido no peneiro de 11,2mm e o material retido no peneiro de 10mm foi, cada um, transferido para um tabuleiro e pesado, obtendo-se assim as massas da amostra laboratorial de fração granulométrica 11,2/14mm e 10/11,2mm. Para a obtenção destas amostras laboratoriais partiu-se entre 10kg a 15kg de cada amostra a estudar.

Em seguida, cada amostra laboratorial, composta pelas suas frações granulométricas em separado, foi seca em estufa à temperatura de 70°C (Figura 4.2) até atingir massa constante. Após atingir massa constante, as amostras laboratoriais foram retiradas da estufa e deixadas arrefecer até atingir a temperatura ambiente e procedeu-se à preparação da amostra laboratorial modificada.

A amostra laboratorial modificada de fração granulométrica 10/14mm foi obtida da mistura das duas frações granulométricas da amostra laboratorial, após atingirem a temperatura ambiente, nas proporções anteriormente indicadas (Quadros 4.4 a 4.6), satisfazendo, assim, o requisito adicional exigido pela presente.

Em seguida, preparou-se um provete para cada amostra de resíduos reciclados a ensaiar, a partir da correspondente amostra laboratorial modificada. Cada provete deve ter uma massa de 5000±5g da fração granulométrica 10mm a 14mm. As massas dos provetes ensaiados apresentam-se no Quadro 4.7 e satisfazem os requisitos exidos pela presente norma e por nós estabelecidos (Quadros 4.4 a 4.6).

Quadro 4.7 Resistência à fragmentação - massa do provete para ensaio

Massa (g)	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
Massa do provete (g)	5000,69	5000,51	5000,39	5000,60	5000,72	5000,25	4999,77



Figura 4.2 Resistência à fragmentação - preparação do provete de ensaio

4.2.1.4. Procedimento

Procedeu-se à preparação da máquina de Los Angeles para a realização do ensaio, verificando-se a limpeza do interior do seu tambor, à limpeza e colocação do tabuleiro para recolha do material e à limpeza da tampa amovível e da carga abrasiva a usar. Em seguida, foram pesadas as onze esferas de aço que constituem a carga abrasiva (Figura 4.3), registou-se a sua massa total (Quadro 4.8), em gramas, e verificou-se se a massa total da carga abrasiva satisfazia o exigido pela presente norma (Quadro 4.9). As onze esferas foram colocadas dentro do tambor sobre a placa saliente. Após esta operação, foi introduzido no tambor o provete a ensaiar (Figura 4.3) e colocada a tampa amovível sobre a abertura, fixando-a, para que o tambor ficasse hermeticamente fechado. Posteriormente, fez-se a máquina rodar 500 voltas a uma velocidade constante de 31r.min^{-1} a 33r.min^{-1} .

Quadro 4.8 Massa total da carga abrasiva

Amostra (g)	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
Massa total da carga abrasiva (11 esferas) (g)	4844,98	4844,98	4844,98	4845,11	4845,11	4845,11	4845,11

Quadro 4.9 Limite máximo e mínimo da massa total da carga abrasiva

Limite	Máximo	Mínimo
Massa total da carga abrasiva (11 esferas) (g)	4860,00	4690,00

Após a paragem da máquina de Los Angeles, aguardou-se uns minutos para que o material fino assentasse e retirou-se a tampa (Figura 4.3). Esvaziou-se todo o conteúdo do tambor (material e carga abrasiva); seguidamente, procedeu-se à limpeza do seu interior, removendo o material fino que pudesse estar agarrado e rodando o tambor removeu-se o conteúdo para o tabuleiro, evitando a perda deste material. Em seguida, removeu-se, cuidadosamente, a carga abrasiva do tabuleiro, de maneira a não perder material e procedeu-se à transferência cuidadosa de todo o material existente no tabuleiro da máquina de Los Angeles (Figura 4.3) (limpando-o cautelosamente), de modo a evitar a perda deste, para um tabuleiro mais pequeno.



Figura 4.3 Resistência à fragmentação - procedimento de ensaio

Após o ensaio procedendo-se à peneiração a seco de toda a amostra no peneiro de malha quadrada de 1,6mm de abertura. O material da amostra retido no peneiro de 1,6mm foi pesado e registada a sua massa (Quadro 4.10), em gramas.

4.2.1.5. Cálculos e resultados

A fim de se avaliar o desgaste por fragmentação dos agregados reciclados em estudo, foi calculado o coeficiente de Los Angeles, LA, que traduz a percentagem do provete que passou pelo peneiro de 1,6mm depois da conclusão do ensaio. Este coeficiente é calculado a partir da seguinte equação (Fórmula 4.1) e cujos valores são apresentados no Quadro 4.10:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (4.1)$$

onde:

m - é a massa retida no peneiro de 1,6mm, em gramas.

Quadro 4.10 Massa retida no peneiro de 1,6mm e Coeficiente LA

Amostra (g)	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
Massa retida no peneiro de 1,6mm (g)	3063,25	3337,36	3527,67	3596,13	2714,33	3067,72	3104,89
Coeficiente LA	39	33	29	28	46	39	38

4.2.2. Massa volúmica das partículas e absorção de água

Na determinação destas propriedades teve-se presente o disposto nas normas portuguesas de ensaio NP EN1097-6:2003 e NP EN 1097-6:2003/A1:2010. O método adotado foi o método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063mm e 4 mm, disposto no seu ponto 9.

A presente norma define que a água a utilizar neste ensaio (deve estar livre de qualquer impureza que possa afetar significativamente a massa volúmica) deve ser fervida e arrefecida. Todavia, a mesma ressalva a permissão da utilização de água fresca da torneira ou água desmineralizada, pelo que na realização deste ensaio foi utilizada água fresca da torneira.

4.2.2.1. Princípio de ensaio

A massa volúmica foi obtida pelo quociente entre a massa e o volume, tendo sido o volume determinado a partir da massa de água deslocada que foi obtida através de pesagens; a massa foi obtida por pesagem do provete de agregados saturado com superfície seca ao ar e do mesmo provete de agregados seco em estufa.

A absorção de água é o aumento da massa de uma amostra de agregado seco em estufa, devido à penetração da água nos poros acessíveis a água, sendo obtida pela razão entre massas; as massas são obtidas por pesagem do provete de agregados saturado com superfície seca ao ar e do mesmo provete de agregados seco em estufa.

4.2.2.2. Equipamento e utensílios

De acordo com o exigido pela presente norma, o equipamento e utensílios de uso corrente (Quadro 4.1) necessários são: balança de 6,20kg x 0,01g; estufa; peneiros de ensaio (4,75mm e 0,063mm); pá; escovas; tabuleiros e recipientes de vidro, sendo o equipamento e utensílios adicionais descrito no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 Massa volúmica e absorção de água - equipamentos e utensílios utilizados

Descrição
<ul style="list-style-type: none">- Picnómetro, frasco de vidro. Foram utilizados no ensaio dois picnómetros, com volume de 1165,7ml e de 1000,0ml, adequados à dimensão do provete de 1kg, constante a 0,5ml durante o período de ensaio, contendo uma tampa.- Funil de plástico.- Esguicho, frasco em plástico com jacto dirigido.- Banho-maria com termostato capaz de manter a temperatura de $22\pm 3^{\circ}\text{C}$.- Termómetro com exatidão de 0,1%.- Molde metálico troncocónico que satisfaz as seguintes dimensões: diâmetro da abertura superior de $40\pm 3\text{mm}$; diâmetro da abertura inferior de $90\pm 3\text{mm}$; altura de $75\pm 3\text{mm}$; e espessura mínima de 0,8mm.- Pilão metálico que satisfaz os requisitos de ter uma face de apoio plana e circular de diâmetro de $25\pm 3\text{mm}$ e massa de $340\pm 15\text{g}$.- Tabuleiro de pouca profundidade, impermeável à água, com fundo plano.

4.2.2.3. Preparação do provete

Para a preparação de cada provete recolheu-se uma amostra de resíduo (Figura 4.4), com uma massa inicial aproximada de 1,300kg.



Figura 4.4 Massa volúmica e absorção de água - amostra inicial recolhida

Em seguida, procedeu-se à lavagem individual de cada provete de resíduo a ensaiar. O procedimento de lavagem, realizado individualmente para cada amostra inicial, consistiu em: 1) verificação da limpeza de todos os utensílios e equipamentos necessários à execução deste procedimento, diminuindo assim a possível contaminação da amostra a ensaiar; 2) montagem, dentro de uma pia de lavagem, com acesso a uma torneira de água tratada e fresca, de uma coluna de dois peneiros, em que se colocou o peneiro de malha quadrada de 4,75mm (4,00mm) sobre o peneiro de malha quadrada de 0,063mm; 3) transferência, com auxílio de uma pá, de uma pequena porção da amostra a tratar para a coluna de peneiros; 4) lavagem sob um fio de água corrente e fresca, de modo a que não ocorresse transbordo e/ou entupimento dos peneiros, evitando assim a perda de material. A lavagem desta porção da amostra a tratar deu-se por concluída quando a água à saída da coluna de peneiros se apresentou límpida

(isenta de partículas finas); 5) rejeição de qualquer partícula de agregado que pudesse ter ficado retida no peneiro de 4,75mm (4.0mm), após lavagem; 6) lavagem individual da porção de agregado retido no peneiro de 0,063mm, que se deu por concluída quando a água à saída do peneiro se apresentou límpida; 7) passagem de todo o agregado retido, com o auxílio de um esguicho, para um recipiente em vidro. Os passos 3 a 7 deste procedimento foram repetidos até que todo o material da amostra inicial fosse lavado e transferido para o recipiente de vidro. (Figura 4.5).



Figura 4.5 Massa volúmica e absorção de água - preparação do provete de ensaio

4.2.2.4. Procedimento de ensaio

O equipamento e utensílios utilizados encontravam-se limpos e secos aquando da realização do ensaio a cada amostra de agregado reciclado, conforme com o procedimento que se passa a descrever. O procedimento adotado na realização deste ensaio, tendo presente o disposto na presente norma, consistiu em:

1) Imergir todo o provete, preparado de acordo com o disposto no ponto anterior, com auxílio de uma pá e de um funil de plástico, num picnómetro com água a $22 \pm 3^\circ\text{C}$; transferiram-se para o picnómetro as partículas do provete que possam ter ficado agarradas aos utensílios necessários à realização desta tarefa (recipiente de vidro, da pá e do funil de plástico), com auxílio de um esguicho (contendo água à mesma temperatura da contida no picnómetro) e procedeu-se ao seu enchimento com água até um determinado nível (Figura 4.6);

2) Eliminar o ar ocluído contido no picnómetro, agitando-o e fazendo-o rodar numa posição inclinada;

3) Colocar o picnómetro em banho-maria (fazendo coincidir o nível de água dentro do picnómetro com o nível de água do banho-maria), a uma temperatura constante de $22 \pm 3^\circ\text{C}$, durante $24 \pm 0,5$ horas (Figura 4.6);

4) Retirar o picnómetro do banho-maria e remover todo o ar ocluído no interior do picnómetro, adotando-se o procedimento descrito no ponto 2;

5) Fazer transbordar o picnómetro (com o auxílio do esguicho, contendo água a uma temperatura próxima da que se encontrava o banho-maria, quando se retirou o picnómetro),

tendo-se colocado a tampa sem deixar ar ocluído no picnómetro e procedendo-se à secagem do seu exterior com papel absorvente;

6) Pesar o picnómetro e registar a sua massa, em gramas, obtendo-se a massa M_2 , tendo-se procedido também à medição e registo da temperatura da água no interior do picnómetro, em °C, obtendo-se T_2 (Figura 4.6);

7) Decantar a maior parte da água que cobre o provete no picnómetro e, em seguida, esvaziar o seu conteúdo sobre um tabuleiro (incluindo o material removido na lavagem, com o esguicho, do interior do picnómetro);

8) Espalhar sobre a base do tabuleiro o conteúdo vertido, formando uma camada uniforme, e secagem à temperatura ambiente para que a humidade superficial do agregado evaporasse; esta secagem deve ser homogénea, pelo que o provete foi mexido em intervalos frequentes até que as partículas de agregado não aderissem umas às outras e não fosse visível humidade superficial;

9) Calibrar o picnómetro, o que consistiu em enchê-lo com água a uma temperatura próxima da temperatura do banho-maria, em retirar o ar ocluído, de acordo com descrito no ponto 2, e, em seguida, procedendo-se de forma idêntica ao disposto no ponto 5, fazendo transbordar o picnómetro, retirou-se ar ocluído, colocou-se a tampa e secou-se o picnómetro por fora; pesou-se o picnómetro cheio de água e registou-se a sua massa, em gramas, obtendo-se a massa M_3 e procedeu-se, igualmente, à medição e registo da temperatura da água no interior do picnómetro, em °C, obtendo-se T_3 (Figura 4.6);

10) Verificar a condição descrita na presente norma e que aqui se apresenta $T_2 - T_3 \leq 2$ °C;

11) Avaliar se o estado da superfície seca do agregado do provete foi atingido, o que consistiu em colocar o molde troncocónico, com a abertura maior virada para baixo, sobre a base do tabuleiro que contém o provete em secagem (ponto 7), em seguida, encheu-se livremente (com uma pá adequada) o molde com parte do provete e apiloou-se levemente com 25 pancadas sobre a sua abertura superior com o pilão metálico, desmoldou-se delicadamente e verificou-se se o cone de agregado se deformou e apresentava uma configuração conforme com o disposto no anexo F, figura c), da presente norma (caso não verificasse repetia-se o disposto neste procedimento nos pontos 8 e 11 até que o estado de superfície seca fosse alcançado) (Figura 4.6);

12) Pesar o provete saturado com superfície seca e registar a sua massa, em gramas, obtendo-se a massa M_1 ;

13) Secar o provete numa estufa ventilada a uma temperatura constante (Quadro 4.12) até atingir-se massa constante;

14) Após a sua obtenção, pesou-se o provete seco em estufa e registou-se a sua massa, em gramas, obtendo-se a massa M_4 .

Todos os valores obtidos da aplicação deste procedimento, aos provetes das amostras de agregado reciclado, encontram-se registados, conforme Quadro 4.13.

Quadro 4.12 Massa volúmica e absorção de água - temperaturas da estufa ventilada

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Temperatura (°C)	70	60	60	60	60	70	60

Quadro 4.13 Massa volúmica e absorção de água - massas registadas durante o ensaio

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
M ₂ (g)	2413,92	2367,40	2462,28	2383,39	2285,54	2370,70	2334,28
M ₃ (g)	1779,19	1728,97	1779,95	1728,63	1728,79	1730,89	1729,28
M ₁ (g)	1121,96	1082,25	1153,72	1123,13	949,85	1163,44	1055,26
M ₄ (g)	1007,86	1011,24	1097,2	1067,28	893,27	1021,41	971,80

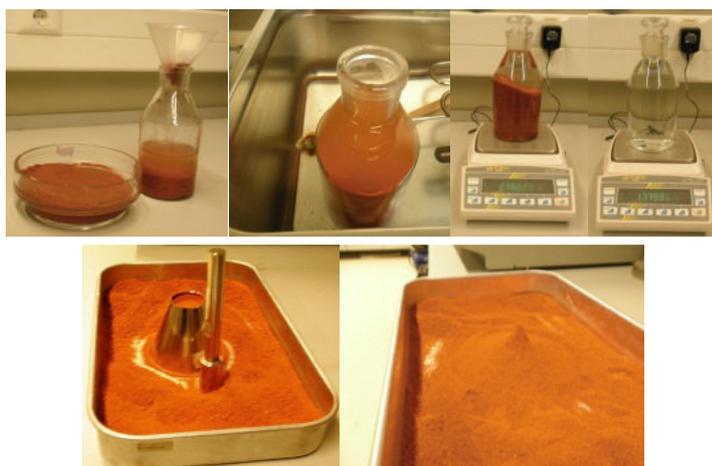


Figura 4.6 Massa volúmica e absorção de água - procedimento de ensaio

4.2.2.5. Cálculos e resultados

A fim de se determinar a massa volúmica ρ_a , ρ_{rd} e ρ_{ssd} , em Mg/m^3 , dos agregados reciclados em estudo, foi calculada: (ρ_w) - **a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em Mg/m^3** , por interpolação dos valores apresentados no Quadro D.1, do Anexo D, da norma. Os resultados deste cálculo encontram-se registados no Quadro 4.14.

Os valores das massas volúmicas são apresentados no Quadro 4.15 e foram determinados de acordo com as seguintes expressões (Fórmulas 4.2 a 4.4):

ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas, em Mg/m^3

Corresponde à relação entre a massa do provete seco em estufa e o volume que este provete ocupa dentro de água, incluindo quaisquer poros internos fechados, mas excluindo os poros acessíveis à água.

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4.2)$$

ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa, em Mg/m^3

Corresponde à relação entre a massa do seco em estufa e o volume que este provete ocupa dentro de água, incluindo quaisquer poros internos e os poros acessíveis à água.

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.3)$$

ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, em Mg/m^3

Corresponde à relação entre a massa do provete, incluindo a massa de água alojada nos poros acessíveis à água, e o volume que este provete ocupa na água, incluindo quer os poros acessíveis à água, quer os poros internos fechados.

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.4)$$

em que:

M_1 - é a massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em gramas;

M_2 - é a massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e água, em gramas;

M_3 - é a massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas;

M_4 - é a massa no ar do provete seco em estufa, em gramas;

ρ_w - é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em Mg/m^3 .

Quadro 4.14 Valores da massa volúmica da água para a temperatura de ensaio

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Temperatura de Ensaio (°C)	27,65	26,14	27,06	27,18	25,73	22,88	24,80
ρ_w (Mg/m^3)	0,9963	0,9968	0,9965	0,9964	0,9969	0,9975	0,9971

Quadro 4.15 Valores da massa volúmica

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
ρ_a (Mg/m ³)	2,69	2,70	2,64	2,58	2,65	2,67	2,64
ρ_{rd} (Mg/m ³)	2,06	2,27	2,32	2,27	2,26	1,95	2,15
ρ_{ssd} (Mg/m ³)	2,29	2,43	2,44	2,39	2,41	2,22	2,34

Estes cálculos foram verificados (Quadro 4.16), a partir da seguinte expressão (Fórmula 4.5):

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \rho_{rd}/\rho_a \quad (4.5)$$

Quadro 4.16 Verificação dos cálculos das massas volúmicas

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
ρ_{ssd} (Mg/m ³)	2,29	2,43	2,44	2,39	2,41	2,22	2,34
$(1 + \rho_{rd} - \rho_{rd}/\rho_a)$ (Mg/m ³)	2,29	2,43	2,44	2,39	2,41	2,22	2,34
Verifica?	Sim						

A absorção de água após a imersão durante 24 h (WA₂₄), em percentagem da massa seca, é apresentada no Quadro 4.17 e foi calculada de acordo com a seguinte expressão (Fórmula 4.6):

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4.6)$$

em que:

M₁ – é a massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em gramas;

M₄ – é a massa no ar do provete seco em estufa, em gramas.

Quadro 4.17 Valor da absorção de água, em percentagem da massa seca, após a imersão durante 24 horas

Amostra:	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
WA ₂₄ (%)	11,3	7,0	5,2	5,2	6,3	13,9	8,6

4.2.3. Baridade e volume de vazios

Esta propriedade determina-se, tendo por base a norma portuguesa para ensaios das propriedades mecânicas e físicas de agregados NP EN 1097-3:2002, aplicável a agregados naturais e artificiais, cuja dimensão máxima seja inferior a 63mm. Embora esta norma não

seja aplicável a agregados reciclados, estes vão ser ensaiados tendo por base a presente norma.

A Baridade foi determinada para as seguintes amostras de resíduos reciclados estudados: B.1, B.2, B.3 e B.4. Relativamente às amostras A.1, C.1 e D.1, esta propriedade foi determinada por Ferreira (Ferreira, T., 2011), cujos valores apurados se apresentam no Quadro 4.22.

A percentagem de vazios foi determinada para todas as amostras, embora se tenha tido em conta valores determinados no ensaio realizado por Ferreira (Ferreira, T., 2011).

4.2.3.1. Princípio de ensaio

Este ensaio consiste na pesagem da massa seca dos agregados reciclados que preenchem um recipiente com uma determinada capacidade. Esta capacidade do recipiente é definida na presente norma, em função da granulometria máxima do agregado, neste caso 4mm (4,75mm), sendo assim a sua capacidade deve ser um litro.

4.2.3.2. Equipamento e utensílios

Os utensílios e equipamentos necessários à realização deste ensaio são: de uso corrente (balança de 6,20kg x 0,01g; estufa; pá; escovas e tabuleiros) - (Quadro 4.1); e adicionais, descritos no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 Baridade e volume de vazios - equipamento e utensílios necessários

Descrição
- Régua em aço, suficientemente rígida para não deformar na altura do nivelamento, com comprimento superior a 50mm ao diâmetro externo do recipiente;
- Recipiente: contentor metálico em aço, estanque e de forma cilíndrica, cuja superfície interna é lisa (sem pregas) e suficientemente rígida para não deformar, mesmo em caso de choque. O bordo superior deve ser liso, plano e paralelo ao fundo. A sua capacidade mínima é de um litro. Satisfaz a condição $0,5 \leq \text{diâmetro interno} / \text{profundidade interna} \leq 0,8$, uma vez que o equipamento é pertença de um laboratório e é utilizado em ensaios acreditados.

A calibração do recipiente foi executada pelo laboratório, de acordo com o anexo B da presente norma. A capacidade do recipiente em litros foi obtida calculando a média aritmética dos valores das três últimas calibrações A capacidade do recipiente (V) a considerar, no presente ensaio, foi de 1,02984 litros.

4.2.3.3. Preparação dos provetes

A presente norma indica a criação de três provetes, mas devido ao aproveitamento do material recolhido, com vista a trabalhos futuros, optou-se pela criação de um único provete, com o qual o procedimento de ensaio foi repetido três vezes.

Os provetes foram obtidos a partir das amostras, determinadas segundo o descrito no subcapítulo 4.1.2 e cuja granulometria é inferior a 4,75mm. Estes provetes foram pesados e registada a sua massa e posteriormente secos em estufa à temperatura de 70°C até atingirem massa constante. Após atingirem massa constante, foram retirados da estufa e colocados, aproximadamente meia hora, numa campânula hermética com sílica, diminuindo assim a influência das condições de humidade do local sobre os agregados, até atingirem a temperatura ambiente, tendo a sua massa sido registada em kg.

No Quadro 4.19 é apresentada a massa dos provetes ensaiados, após atingir a temperatura ambiente, em kg.

Quadro 4.19 Baridade e volume de vazios - massas dos provetes ensaiados

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
Massa do provete (kg)	1,5652	1,60331	1,56654	1,58162

4.2.3.4. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio foi repetido três vezes para cada amostra de resíduos a analisar e foi realizado para as amostras B.1, B.2, B.3 e B.4.

O equipamento e utensílios utilizados encontravam-se limpos e secos aquando da realização do ensaio.

Procedeu-se à pesagem do recipiente vazio e registou-se a sua massa, em kg, obtendo-se assim a massa m_1 (Figura 4.7). Após esta operação, colocou-se o recipiente dentro de um tabuleiro, com uma superfície lisa, e que se encontrava colocado sobre uma superfície horizontal. Retirado o provete de ensaio da campânula, procedeu-se ao enchimento do recipiente com o material do provete, com a ajuda de uma pá, até transbordar (Figura 4.7). O enchimento do recipiente foi executado de modo a limitar a segregação. Assim, durante o enchimento do recipiente, a pá esteve apoiada sobre bordo superior do recipiente e simultaneamente, o bordo da pá nunca esteve a uma profundidade superior a 50mm do bordo

superior do recipiente. Com vista a aproximar-se o volume dos agregados à capacidade do recipiente, procedeu-se, de seguida, com o auxílio da régua, à remoção cautelosa, sem compactar, do material excedente existente no topo do recipiente, de modo a obter uma superfície visivelmente uniforme, por forma a evitar-se a segregação (Figura 4.7).

Após o término da operação acima descrita, pesou-se o recipiente cheio e a sua massa foi registada, em kg, obtendo-se assim a m_2 , (Figura 4.7).



Figura 4.7 Baridade e volume de vazios - procedimento de ensaio

Seguidamente, procedeu-se à recolha de todo o material, limpando a seco todos os utensílios e equipamento, por forma a obter a massa do provete elementar inicial, com a qual se repetiu, por mais duas vezes, o procedimento. Os valores registados na execução deste procedimento sobre os provetes acima enunciados apresentam-se no quadro 4.20.

Quadro 4.20 Baridade e volume de vazios - registo dos valores obtidos nas pesagens das massas m_1 e m_{2i}

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
Massa m_1 (kg)	1,34325	1,34325	1,34325	1,34325
Massa m_{21} (kg)	2,7635	2,80080	2,82506	2,54695
Massa m_{22} (kg)	2,7650	2,79539	2,83857	2,54277
Massa m_{23} (kg)	2,76445	2,79321	2,83118	2,53611

4.2.3.5. Cálculos e resultados

A baridade corresponde à média dos três valores da baridade de cada medição.

A baridade de cada medição é calculada pela expressão (Fórmula 4.7):

$$\rho_{bi} = \frac{m_{2i} - m_1}{v} \quad (4.7)$$

onde:

ρ_{bi} - é a baridade da medição i , em Mg/m^3 ;

m_{2i} - é a massa do recipiente e do provete elementar na medição i , em kg;

m_1 - é a massa do recipiente vazio, em kg;

V - é a capacidade do recipiente, em l.

A baridade do agregado de cada amostra de resíduo é calculada pela seguinte expressão (Fórmula 4.8):

$$\rho_b = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{bi}}{n} \quad (4.8)$$

sendo:

ρ_b - é a baridade, em Mg/m^3 ;

n - é o n.º de medições.

Os cálculos e resultados obtidos são apresentados nos Quadros 4.21 a 4.22.

Quadro 4.21 Valores da baridade

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
Volume V (l)	1,02984	1,02984	1,02984	1,02984
Massa m_1 (kg)	1,34325	1,34325	1,34325	1,34325
Massa m_{21} (kg)	2,7635	2,80080	2,82506	2,54695
Massa m_{22} (kg)	2,765	2,79539	2,83857	2,54277
Massa m_{23} (kg)	2,76445	2,79321	2,83118	2,53611
$(m_{21}-m_1)$ (kg)	1,42025	1,45755	1,48181	1,20370
$(m_{22}-m_1)$ (kg)	1,42175	1,45214	1,49532	1,19952
$(m_{23}-m_1)$ (kg)	1,42120	1,44996	1,48793	1,19286
ρ_{b1} (Mg/m^3)	1,3791	1,4153	1,4389	1,1688
ρ_{b2} (Mg/m^3)	1,3805	1,4100	1,4520	1,1647
ρ_{b3} (Mg/m^3)	1,3800	1,4079	1,4448	1,1583
n	3	3	3	3
ρ_b (Mg/m^3)	1,374	1,411	1,445	1,164

Quadro 4.22 Valores da baridade (Ferreira, T., 2011)

Amostra	Material	Baridade (Mg/m^3)			Baridade média (Mg/m^3)
		1.ª Medição	2.ª Medição	3.ª Medição	
A.1	Telha	1,17	1,17	1,17	1,17
C.1	Tijolo	1,10	1,10	1,10	1,10
D.1	Vasos	0,99	0,99	0,99	0,99

A percentagem de vazios, que corresponde à proporção volumétrica de vazios no recipiente, é determinada pela equação (Fórmula 4.9), cujos valores são apresentados no Quadro 4.23.

$$v(\%) = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100 \quad (4.9)$$

sendo:

v - é a percentagem de vazios, em %;

ρ_b - é a baridade, em Mg/m^3 ;

ρ_p - é a massa volúmica real do agregado seco em estufa, em Mg/m^3 .

A massa volúmica (ρ_p) foi obtida no ensaio anterior, correspondendo a massas volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) (Quadro 4.23).

Quadro 4.23 Valores da percentagem de vazios

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
ρ_b (Mg/m^3)	1,17	1,374	1,411	1,445	1,164	1,10	0,99
ρ_p (Mg/m^3)	2,06	2,27	2,32	2,27	2,26	1,95	2,15
v (%)	43,20	39,47	39,18	36,34	48,50	43,59	53,95

O volume de vazios é o espaço cheio de ar entre os agregados contidos no recipiente.

4.3. Propriedades geométricas dos agregados

4.3.1. Análise granulométrica pelo método de peneiração

Neste ponto apresentam-se as análises granulométricas realizadas para as amostras de resíduos reciclados estudados B.1, B.2, B.3 e B.4. Relativamente às amostras A.1, C.1 e D.1, esta propriedade foi determinada por Ferreira (Ferreira, T., 2011), após moagem dos resíduos, cujos valores apurados se apresentam no ponto cálculos e resultados.

A análise granulométrica foi efetuada tendo por base a norma portuguesa para ensaios das propriedades geométricas dos agregados NP EN 933-1:2000 e a norma europeia EN 933-1:1997/A1:2005, aplicável a agregados naturais ou artificiais, incluindo agregados leves, com dimensão nominal até 63mm, excluindo o filer, pelo método de peneiração a seco (Ponto 4.1.1).

4.3.1.1. Princípio de ensaio

Este ensaio consiste em fazer passar uma amostra inicial de agregado reciclado (cuja massa é definida na presente norma, em função da máxima dimensão e da densidade do agregado) por uma coluna de peneiros (cujo n.º de peneiros bem como a dimensão nominal das suas aberturas foram previamente definidas de acordo com a natureza da amostra e precisão exigida, montados do topo para a base por ordem decrescente das dimensões nominais das aberturas e contendo no topo uma tampa e na base um fundo adaptados aos peneiros), de modo a obter a separação dos agregados em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente. A massa das partículas do agregado reciclado retido em cada peneiro é relacionada com a massa da sua amostra inicial. As percentagens cumulativas de agregado reciclado que passa em cada peneiro são apresentadas sob a forma numérica e, quando necessário, pela representação gráfica (curva granulométrica). O método adotado para a separação dos agregados reciclados em classes granulométricas de granulometria decrescente foi o método de peneiração a seco, permitido pelas presentes normas e já descrito anteriormente.

4.3.1.2. Equipamento e utensílios

Os equipamentos e utensílios necessários à realização deste ensaio, em conformidade com as presentes normas, são: balança de 6,20kg x 0,01g; estufa; peneiros de ensaio (4,75mm (4mm), 2mm, 1mm, 0,500mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm); tampa; recipiente de fundo; pá; escovas e recipientes de vidro, apresentados no Quadro 4.1.

4.3.1.3. Preparação do provete

Na preparação do provete para o ensaio das amostras em estudo, considerou-se estar na presença de agregados reciclados em que a máxima dimensão do agregado é inferior a 4mm (4,75mm) e a sua densidade compreendida entre 2000kg/m³ e 3000kg/m³. Assim, recolheu-se uma amostra inicial de agregado reciclado de granulometria inferior a 4mm (4,75mm) e de massa aproximada de 0,300kg, por forma a garantir a massa mínima do provete de 0,2kg, exigida pela presente norma.

Em seguida, procedeu-se à secagem dos provetes de ensaio, em estufa ventilada, a uma temperatura constante de 60°C até atingirem massa constante. Após a sua obtenção, retirou-se o provete da estufa e deixou-se arrefecer. Pesou-se o provete seco em estufa e arrefecido, registando-se a sua massa seca em quilogramas, tendo-se obtido a massa M_1 (Quadro 4.24).

Quadro 4.24 Análise granulométrica - massa seca dos provetes

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
M _i (kg)	0,33139	0,26941	0,32984	0,25291

4.3.1.4. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio adotado foi o método de peneiração a seco e manual. A agitação dos peneiros e da coluna de peneiros foi executada conforme o sugerido por Sousa Coutinho (Sousa Coutinho, A., 1988). Assim, procedeu-se à peneiração manual dos provetes de ensaio das amostras estudadas que consistiu em:

- 1) Verificar a limpeza de todos os equipamentos e utensílios necessários à execução do procedimento;
- 2) Montar a coluna de peneiros constituída por uma tampa, seguida do número de peneiros necessários à preparação da amostra (Ponto 4.3.1.2), encaixados e dispostos de cima para baixo, por ordem decrescente das suas dimensões de abertura da malha e, por fim, na base coloca-se o recipiente de fundo;
- 3) Passar o material do provete de ensaio pela coluna de peneiros, agitando-a manualmente;
- 4) Proceder à peneiração individual de cada peneiro da coluna, começando pelo de maior abertura, agitando manualmente, colocando a tampa e o recipiente de fundo, garantindo que não há perda de material. A peneiração considerou-se concluída quando durante um minuto de peneiração a massa de material retida no peneiro de ensaio não se alterou mais de 1%;
- 5) Verificar a sobrecarga dos peneiros, isto é, se a massa retida no peneiro, após a conclusão da peneiração deste, não excede o valor estabelecido na presente norma. Nos casos em que se verificou sobrecarga dos peneiros, o procedimento aplicado foi o de dividir a fração retida no peneiro em porções de massa inferiores ao máximo especificado na presente norma e peneirá-las, umas após as outras, colocando o material retido de cada porção num único tabuleiro. Quanto ao material retido no recipiente de fundo, este foi transferido para o peneiro de ensaio de dimensão de abertura da malha da coluna imediatamente a seguir;
- 6) Verificar se todo o material retido no recipiente de fundo após conclusão da peneiração individual foi transferido para o peneiro seguinte da coluna;
- 7) Pesquisar o material retido em cada peneiro e registar a sua massa, em quilogramas, obtendo-se a massa R_i (sendo i=1 para o peneiro do topo da coluna de peneiros e i=n para o último peneiro da coluna);

- 8) Pesar todo o material peneirado retido no recipiente de fundo (material obtido pela reunião do material retido no recipiente de fundo, após conclusão da peneiração individual e sequencial de todos os peneiros da coluna e do material retido no recipiente de fundo, aquando da agitação da coluna de peneiros) e registar a sua massa, em quilogramas, obtendo-se a massa p.

4.3.1.5. Cálculos e resultados

Calculou-se:

- A massa retida em cada peneiro (Fórmula 4.10), como percentagem da massa seca do provete M_1 (Quadro 4.25).

$$\left(\% \frac{R_i}{M_1}\right) = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad (4.10)$$

em que:

R_i - Massa do material retido no peneiro i da coluna de peneiros, em quilogramas;

M_1 - Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas.

- A percentagem cumulativa da massa seca do provete M_1 retida em cada peneiro até ao peneiro de 0,063 mm, mas excluindo este (Fórmula 4.11). Os valores obtidos encontram-se registados no Quadro 4.25.

$$\sum_{i=1}^n \left(\% \frac{R_i}{M_1}\right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i}{M_1} \times 100\right) \quad (4.11)$$

em que:

R_i - Massa do material retido no peneiro i da coluna de peneiros, em quilogramas;

M_1 - Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas.

Quadro 4.25 Percentagem e percentagem cumulativa do material retido

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha
Dimensão nominal das aberturas da malha dos peneiros, em mm	$\left(\% \frac{R_i}{M_1}\right)$				$\sum_{i=1}^n \left(\% \frac{R_i}{M_1}\right)$			
4,75	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12	13	17	7	12	13	17	7
1	23	26	30	19	35	39	47	26
0,500	15	17	18	12	50	56	65	38
0,250	11	12	10	10	61	68	75	48
0,125	10	9	6	12	71	77	81	60
0,063	11	8	5	17				

- A percentagem cumulativa da massa seca do provete M_1 que passou em cada peneiro até ao peneiro de 0,063 mm, mas excluindo este (Fórmula 4.12). Os valores obtidos encontram-se registados no Quadro 4.26.

$$\left(100 - \sum_{i=1}^n \left(\% \frac{R_i}{M_1}\right)\right) = 100 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i}{M_1} \times 100\right) \quad (4.12)$$

em que:

R_i - Massa do material retido no peneiro i da coluna de peneiros, em quilogramas;

M_1 - Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas.

Quadro 4.26 Percentagem cumulativa do material passado até ao peneiro de 0,063mm

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
Dimensão nominal das aberturas da malha dos peneiros, em mm	$\left(100 - \sum_{i=1}^n \left(\% \frac{R_i}{M_1}\right)\right)$			
4,75	100	100	100	100
2	88	87	83	93
1	65	61	53	74
0,500	50	44	35	62
0,250	39	32	25	52
0,125	29	23	19	40

- A percentagem de finos que passa através do peneiro de 0,063mm (Fórmula 4.13). Os valores obtidos neste cálculo encontram-se registados no Quadro 4.27.

$$f(\%) = \frac{p}{M_1} * 100 \quad (4.13)$$

em que:

p - Massa do material peneirado retido no recipiente de fundo, em quilogramas;

M₁ - Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas.

Quadro 4.27 Percentagem de finos que passa no peneiro de 0,063mm

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
M ₁ (kg)	0,33139	0,26941	0,32984	0,25291
p (kg)	0,05828	0,03850	0,04581	0,05780
f(%)	17,6	14,3	13,9	22,9

Por fim, fez-se a validação dos resultados (Quadro 4.28) através da Fórmula 4.14, abaixo enunciada, sendo o ensaio válido se se verificar a condição, caso contrário repete-se o ensaio.

$$\left(\frac{M_1 - \sum_{i=1}^n R_i + p}{M_1} \times 100 \right) \% \leq 1\% \quad (4.14)$$

em que:

p - Massa do material peneirado retido no recipiente de fundo, em quilogramas;

M₁ - Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas;

$\sum_{i=1}^n R_i$ - Soma das massas retidas em cada peneiro, em quilogramas.

Quadro 4.28 Validação dos resultados

Amostra	B.1	B.2	B.3	B.4
Material	Telha	Telha	Telha	Telha
M ₁ (kg)	0,33139	0,26941	0,32984	0,25291
$\sum_{i=1}^n R_i$ (kg)	0,27202	0,22987	0,28207	0,19350
p (kg)	0,05828	0,03850	0,04581	0,05780
$\left(\frac{M_1 - \sum_{i=1}^n R_i + p}{M_1} \times 100 \right) (\%)$	0,33	0,39	0,59	0,64
Ensaio válido?	sim	sim	sim	sim

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas granulométricas de todas as amostras em estudo. As curvas granulométricas para as amostras A.1, C.1 e D.1 foram extraídas de Ferreira (Ferreira, T., 2011).

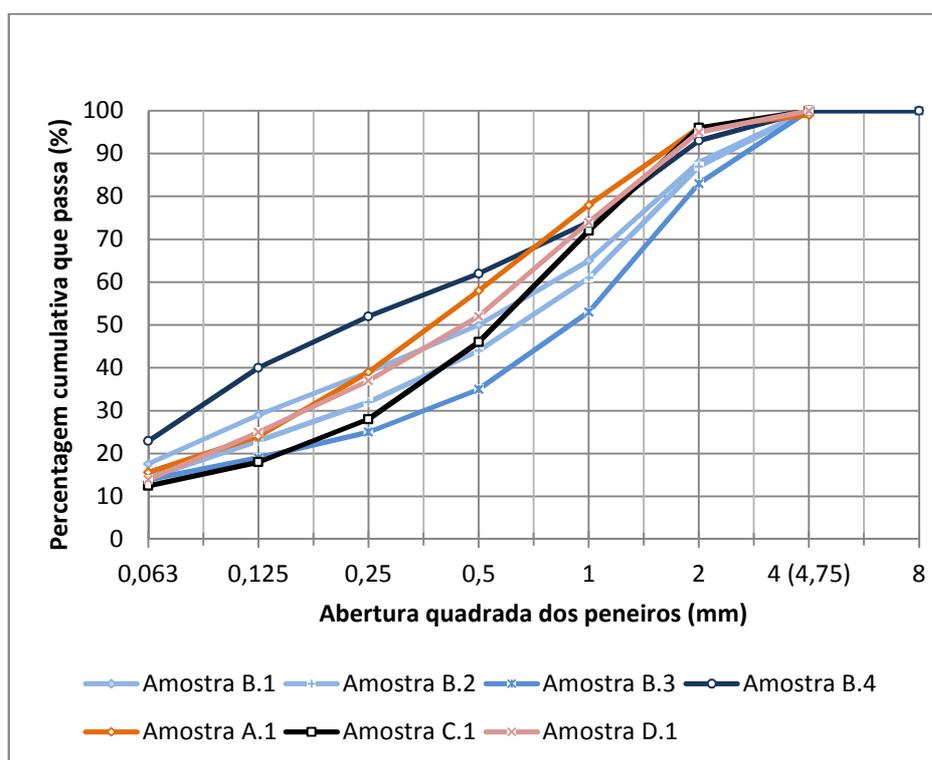


Figura 4.8 Curvas granulométricas das amostras de agregados cerâmicos estudadas

4.3.2. Módulo de finura

Procedeu-se à avaliação da finura dos agregados para as amostras de resíduos reciclados estudados: B.1, B.2, B.3 e B.4. Relativamente às amostras A.1, C.1 e D.1, esta propriedade foi determinada por Ferreira (Ferreira, T., 2011), cujos valores apurados se apresentam no Quadro 4.29.

Na determinação da finura dos agregados teve-se presente o disposto nas normas portuguesas NP EN 13139:2005 e NP EN 13139:2005/AC:2010, aplicável a agregados naturais, artificiais ou reciclados para utilização em argamassas para edifícios, estradas e trabalhos de engenharia civil.

Atendendo ao disposto no Anexo A da referida norma, o método do módulo de finura foi o adotado para avaliar a regularidade de granulometria dos agregados das amostras em estudo e foi calculado dividindo por 100 a soma das percentagens de retidos acumulados nos peneiros da série indicada na fórmula 4.15, em mm:

$$FM = \frac{\Sigma[(>4)+(>2)+(>1)+(>0,500)+(>0,250)+(>0,125)]}{100} \quad (4.15)$$

No Quadro 4.29 são apresentados os resultados obtidos para o módulo de finura.

Quadro 4.29 Módulo de finura das amostras de agregados em estudo

Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
$\sum \left(\sum_{i=1}^n \left(\% \frac{R_i}{M_1} \right) \right)$	-	229	253	285	179	-	-
MF	2,06	2,29	2,53	2,85	1,79	2,41	2,17

4.3.3. Dimensões dos agregados (d/D)

Na avaliação das dimensões dos agregados teve-se presente o disposto nas normas portuguesas NP EN 13139:2005 e NP EN 13139:2005/AC:2010.

As dimensões do agregado (d/D) foram definidas em termos das dimensões nominais das aberturas do peneiro de ensaio em milímetros, em que **d** corresponde à dimensão do peneiro inferior e **D** corresponde à abertura do peneiro superior.

Assim, as amostras de agregados estudadas são compostas por agregados finos cuja dimensão do agregado, em mm, (0/4).

4.4. Caracterização adicional dos agregados

4.4.1. Considerações gerais comuns aos vários ensaios

Este grupo de ensaios foi realizado por uma entidade acreditada para o efeito, tendo sido a preparação das amostras de resíduos da responsabilidade da autora. Devido ao número de ensaios realizados e aos tempos de realização dos mesmos ser discrepante, foi acordada uma visita ao laboratório, em dia agendado, onde foram apresentados detalhadamente os procedimentos de ensaio e equipamentos utilizados.

As amostras dos resíduos analisados foram preparadas de acordo com os requisitos exigidos pelo laboratório e atendendo às descrições das amostras (Quadro 3.3).

O equipamento e utensílios necessários à preparação das amostras encontram-se descritos no Quadro 4.30.

Quadro 4.30 Equipamentos e utensílios necessários à preparação das amostras

Descrição
- Balança de 10,20kg x 0,01g , capaz de garantir a exatidão de $\pm 0,1\%$ da massa do provete.
- Maceta e púcaro em inox.
Coluna de peneiro constituída por:
- tampa , adaptada aos peneiros;
- peneiro de ensaio , com dimensões de abertura da malha de $125\mu\text{m}$;
- recipiente de fundo , adaptado aos peneiros de ensaio.

As amostras, para estes ensaios, foram obtidas a partir de resíduos recolhidos nas empresas, moídos manualmente, com uma maceta sobre uma superfície dura (púcaro). Em seguida, foram peneirados através de um peneiro de malha quadrada com abertura de malha de $125\mu\text{m}$, até obter a quantidade de massa exigida para a realização dos ensaios das amostras de resíduos estudados (Figura 4.9).

Para as amostras de resíduos, constituídas por misturas, procedeu-se à moagem de cada fração isoladamente e, posteriormente, misturaram-se as frações nas proporções definidas para as amostras a estudar.



Figura 4.9 Requisitos adicionais - Preparação das amostras

4.4.2. Análise mineralógica qualitativa pelo método de difração de raios X (DRX)

Para a realização deste ensaio o laboratório requereu 30g de cada amostra de resíduo.

Com este ensaio pretendeu-se obter a identificação mineralógica dos agregados reciclados estudados por difração de raios X (DRX), através de uma análise qualitativa.

As condições instrumentais dos ensaios realizados foram: difractor de raios-X da marca Panalytical e modelo X'PERT-PRO; ampola de raios X de isoladores cerâmicos e anticátodo de Cu; goniómetro vertical Θ - 2Θ ; sistema de fenda de divergência programável e fenda antiscatter automática; detector X'Celerator (informação fornecida pelo laboratório).

O procedimento de ensaio, aqui explicitado de forma sucinta, consistiu na secagem em estufa (a uma temperatura de 50°C a 60°C) da amostra de resíduo e na preparação, em seguida, do provete ensaiado, de acordo com a Figura 4.10.



Figura 4.10 Análise mineralógica - preparação do provete de ensaio

O provete foi colocado no difractor de raio X (Figura 4.11) e após fecho do difractor procedeu-se à realização do ensaio.



Figura 4.11 Análise mineralógica - procedimento de ensaio

O difractor de raio X encontra-se ligado a um terminal, onde está instalado um *software* específico que regista a informação e a apresenta sob a forma de um espectro (Figura 4.12).

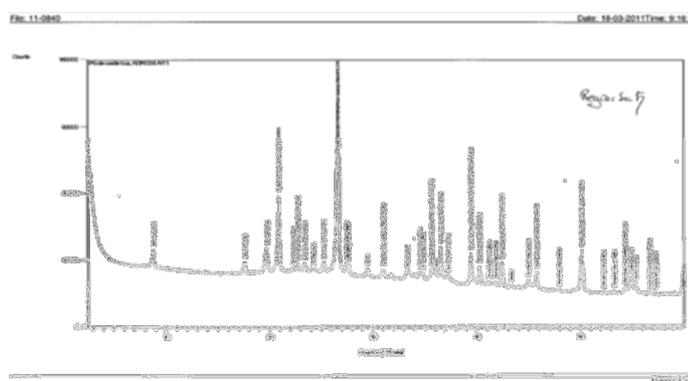


Figura 4.12 Análise mineralógica - exemplo de um dos espectros obtidos

Os resultados, da análise qualitativa, obtidos pelo laboratório para as amostras ensaiadas apresentam-se no Quadro 4.31.

Quadro 4.31 Identificação mineralógica por difração de raios X, Análise qualitativa

Amostra	Material	Fases mineralógicas identificadas/Fórmula química					
		Quartzo	Microclina	Calcite	Hematite	Ilite	Silimanite/Mulite
		SiO ₂	KAlSi ₃ O ₈	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	(K ₂ H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	Al ₂ (SiO ₄)O
A.1	Telha	✓	✓	✓	✓	✓	
B.1	Telha	✓	✓	✓	✓		✓
B.2	Telha	✓	✓	✓	✓		✓
B.3	Telha	✓	✓	✓	✓		✓
B.4	Telha	✓	✓	✓	✓		✓
C.1	Tijolo	✓	✓	✓	✓	✓	
D.1	Vasos	✓	✓	✓	✓	✓	

4.4.3. Análise térmica simultânea (STA) dos agregados

Segundo informação fornecida pelo laboratório, este ensaio foi realizado tendo como documentos de referência, as normas DIN 51006 e 51007.

Com este ensaio pretendeu-se obter a identificação das reações endotérmicas e exotérmicas (análise termodiferencial) e a determinação das perdas de peso (análise termogravítica), obtidas só com aquecimento até 1000°C.

As análises térmicas foram realizadas com o equipamento NETZSCH STA 449 C Jupiter.

Para a realização deste ensaio o laboratório requereu 10g de cada amostra de resíduo.

O procedimento de ensaio, aqui explicitado de forma sucinta, consistiu na colocação de uma fração da amostra num suporte de alumina, que foi colocada no equipamento de análise térmica juntamente com um suporte de alumina vazio que serve de referência para a análise (Figura 4.13).

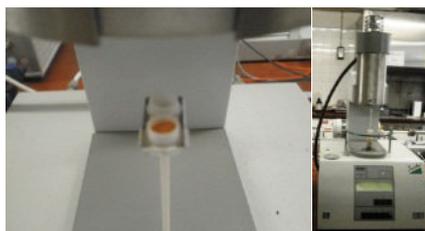


Figura 4.13 Análise térmica simultânea (STA) - procedimento de ensaio

Procedeu-se ao fecho do equipamento e iniciou-se a análise. O equipamento encontra-se ligado a um terminal, onde está instalado um *software* específico que regista a informação e apresenta-a sob a forma de termogramas (Figura 4.14).

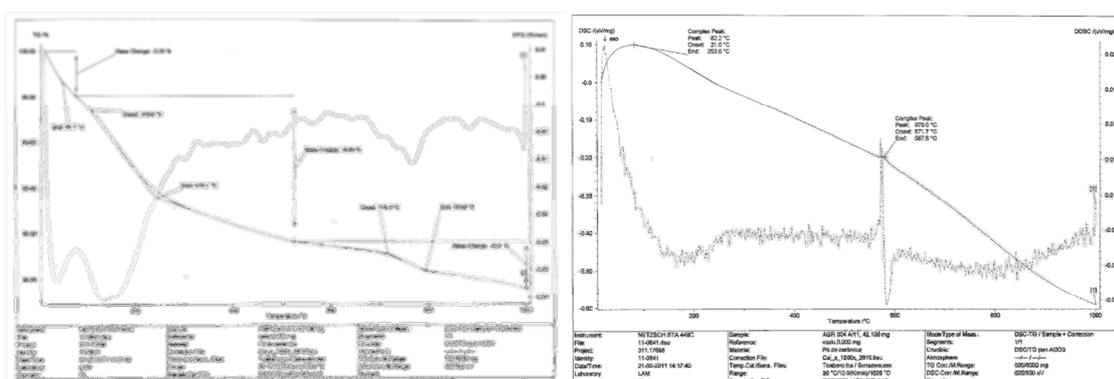


Figura 4.14 Termogramas obtidos para uma das amostras de agregados analisadas

Os resultados obtidos, pelo laboratório, nesta análise térmica das amostras ensaiadas apresentam-se no Quadro 4.32.

Quadro 4.32 Análise térmica simultânea (STA)

Amostra	Material	Análise termogravimétrica				Análise termoDiferencial		
		Gama de temperatura (°C)		Perda de peso (%)	Perda de peso total (%)	Temperatura (°C)		Tipo de reação
		Início da perda	Final da perda			Início da reação	Ponto de inflexão	
A.1	Telha	20	47	0,1	0,9	21,5	98,2	Endotérmica
		116	243	0,6		571,9	575,5	Endotérmica
		532	610	0,2				
		610	1000	0,1				
B.1	Telha	20	69	0,1	0,8	25,8	89,4	Endotérmica
		138	323	0,6		570,2	577	Endotérmica
		323	1000	0,1				
B.2	Telha	20	304	0,3	0,4	18,9	75,7	Endotérmica
		727	1000	0,1		570	576,4	Endotérmica
B.3	Telha	20	294	0,3	0,4	23,5	79,4	Endotérmica
		705	838	0,1		568,5	575,9	Endotérmica
B.4	Telha	20	49	0,1	1,1	20,5	96,3	Endotérmica
		111	235	0,9		570,4	577,3	Endotérmica

Quadro 4.32 Análise térmica simultânea (STA) (Continuação)

Amostra	Material	Análise termogravimétrica				Análise termoDiferencial		
		Gama de temperatura (°C)		Perda de peso (%)	Perda de peso total (%)	Temperatura (°C)		Tipo de reação
		Início da perda	Final da perda			Início da reação	Ponto de inflexão	
C.1	Tijolo	20	52	0,2	1,1	21	82,2	Endotérmica
		110	244	0,6		571,7	579,0	Endotérmica
		716	795	0,2				
D.1	Vasos	20	49	0,1	1,2	22	81,8	Endotérmica
		103	208	0,7		571,8	577,6	Endotérmica
		360	483	0,2				
		483	1000	0,1				

4.4.4. Avaliação da pozolanicidade dos agregados

Para a realização deste ensaio, o laboratório requereu 100g de cada amostra de resíduo ensaiado.

O laboratório informou que o ensaio teve como documento de referência a norma portuguesa NP EN 196-5 e foi realizado sobre uma amostra constituída por 75% de cimento de referência e 25% de amostra de resíduo reciclado (Figura 4.15).



Figura 4.15 Avaliação da pozolanicidade - preparação das amostras ensaiadas

Com este ensaio pretendeu-se fazer a avaliação da pozolanicidade dos agregados reciclados em estudo. Assim, o agregado reciclado será avaliado como um material pozolânico se o resultado de ensaio for positivo.

O resultado deste ensaio foi obtido pela determinação das concentrações (em mmol/l) em óxido de cálcio [CaO] e de iões hidroxilos [OH]⁻, obtendo-se assim um ponto ([OH]⁻; [CaO]), possível de ser representado num gráfico.

A representação gráfica tem na abcissa a concentração de iões hidroxilos $[\text{OH}]^-$, em (mmol/l) e nas ordenadas a concentração em óxido de cálcio $[\text{CaO}]$, em (mmol/l), pelo que nela é representada a curva de concentração de saturação em óxido de cálcio da solução em função da concentração em ião hidroxilo à temperatura de 40°C.

O ensaio é considerado positivo se a concentração de ião de cálcio na solução for inferior à da concentração de saturação, isto é, se o ponto se situar abaixo da curva de concentração de saturação em óxido de cálcio.

O laboratório realizou dois ensaios por cada amostra de agregado entregue para análise. Com o objetivo de aferir a curva de concentração, o laboratório realizou dois ensaios contendo unicamente a amostra de cimento.

O procedimento de ensaio, aqui explicitado de forma sucinta, consistiu na:

- 1) Colocação (com o auxílio de uma pipeta) de 100ml de água fervida dentro de um recipiente (de 500ml em polietileno) que foi hermeticamente fechado e colocado em estufa a 40°C (aproximadamente uma hora para estabilização da temperatura). Atingida a temperatura de estabilização, o recipiente foi retirado da estufa;
- 2) Introdução cuidadosa e rápida da amostra de cimento e da amostra de agregado (previamente preparadas nas proporções acima indicadas) no interior do recipiente (com o auxílio de um funil). Após cada introdução de amostra procedeu-se à agitação do recipiente fechado em movimentos horizontais (evitando a separação da solução durante a agitação) e enérgicos (evitando a formação de grumos) durante 20 segundos, após cada introdução. Em seguida, o recipiente hermeticamente fechado foi colocado numa base perfeitamente horizontal dentro da estufa termostaticada por um período de 15 dias, garantindo assim que o cimento se depositasse e formasse uma camada de espessura uniforme (Figura 4.16);



Figura 4.16 Avaliação da pozolanicidade - Procedimento de ensaio (preparação dos provetes)

- 3) Preparação dos reagentes e aferição das soluções de EDTA e de ácido clorídrico 0,1mol/l (Figura 4.17);



Figura 4.17 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (reagentes e soluções)

- 4) Filtração rápida (imediatamente após o retirar do recipiente da estufa), da solução contida no seu interior através de filtro e em papel para um frasco. Em seguida, procedeu-se ao seu fecho e à homogeneização do filtrado, mediante a agitação do frasco (Figura 4.18);



Figura 4.18 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (filtração)

- 5) Determinação da alcalinidade total, através da titulação com ácido clorídrico diluído 0,1mol/l de uma solução obtida pela introdução (com o auxílio de uma pipeta) de 50ml da solução e de cinco gotas do indicador alaranjado de metileno num copo. A titulação terminou quando se deu o ponto de viragem da cor amarela para laranja salmão (Figura 4.19). Calculou-se em seguida a $[\text{OH}^-]$, em mmol/l;
- 6) Aferição do pH a 13 (num medidor de pH) da solução titulada (obtida no ponto acima), através da adição de hidróxido de sódio a 10% (Figura 4.19);
- 7) Titulação, pelo método visual do ponto de viragem, da solução aferida a pH 13, com a solução de EDTA 0,025 mol/l. A titulação terminou quando se deu o ponto de viragem da cor rosa para azul (Figura 4.19). Calculou-se em seguida a $[\text{CaO}]$, em mmol/l.

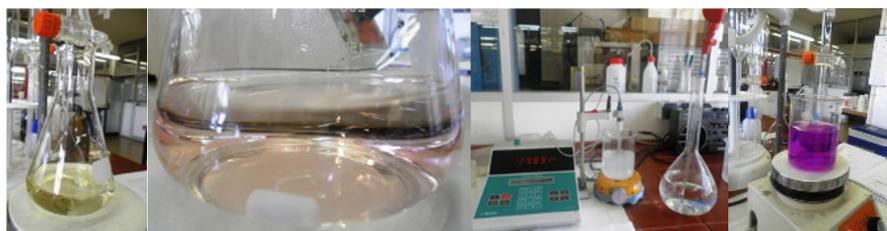


Figura 4.19 Avaliação da pozolanicidade - procedimento de ensaio (titulações)

Os resultados da análise pozolânica obtidos, pelo laboratório, para as amostras ensaiadas sistematizam-se no Quadro 4.33 e Figura 4.20.

Quadro 4.33 Parâmetros analíticos obtidos na análise pozolânica dos agregados ensaiados

Amostra		A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material		Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
Concentrações (mmol/l)	Óxido de cálcio [CaO]	3,6	3,7	4,0	3,9	4,4	4,2	4,6
	Iões hidroxilos [OH] ⁻	65,3	65,7	66,1	64,5	63,8	65,5	65,5
Resultado do ensaio positivo?		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

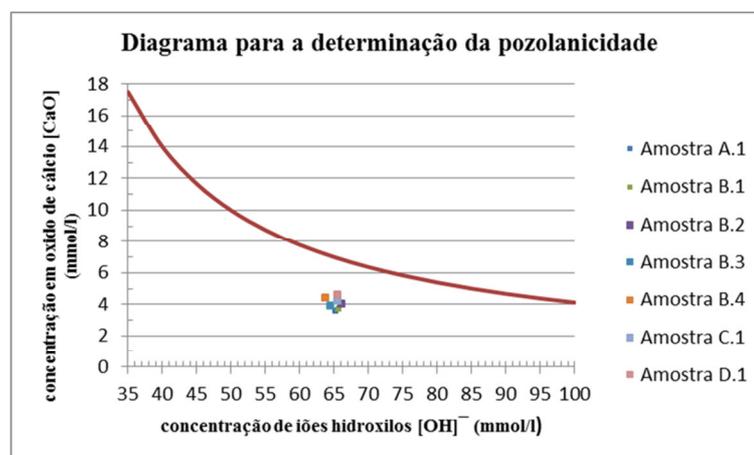


Figura 4.20 Pozolanicidade das amostras analisadas

4.5. Análise de Resultados

Os resultados obtidos na presente campanha experimental são aqui analisados de acordo com os princípios e propósitos definidos anteriormente, visando satisfazer a terceira fase do objetivo principal e que se traduz na avaliação da viabilidade dos resíduos de cerâmica em serem incorporados em argamassas de reabilitação.

A) Análise dos parâmetros recolhidos nas empresas

No Quadro 4.34 são apresentados os parâmetros mais relevantes dos dados recolhidos nas empresas e apresentados no capítulo 3 e que importa analisar nesta fase do estudo.

Quadro 4.34 Parâmetros mais relevantes sobre os materiais recolhidos

Empresa	A	B				C	D
Amostra	A.1	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	D.1
Material	Telha	Telha	Telha	Telha	Telha	Tijolo	Vasos
Temperatura de cozedura (°C)	920	1050	1050	1050	1050	900	1100
Volume anual de resíduos produzidos (ton/ano)	740	2000	4000		-	730	100

Constata-se que todos os resíduos, no seu processo de fabrico, foram sujeitos a temperaturas superiores ou iguais a 900°C, sendo que os resíduos que estremam o parâmetro em análise são os produzidos pelas empresas C (900°C) e D (1100°C). Os produtos telha, produzidos pelas empresas A e B, apresentam valores intermédios de temperaturas de cozedura, sendo a temperatura mais baixa de 920°C (empresa A) e a mais elevada de 1050°C (empresa B).

Tendo presente o volume anual de resíduos produzidos, as empresas estudadas hierarquizam-se, por ordem decrescente, do seguinte modo: B, A, C e D.

B) Análise dos resultados visando as suas propriedades mecânicas, físicas e geométricas

Os resíduos analisados, quanto às suas propriedades geométricas, caracterizam-se por serem agregados finos de granulometria média, sendo a dimensão do agregado reciclado de 0mm a 4,75mm.

Da observação das curvas granulométricas constata-se que as amostras de resíduos apresentam uma percentagem de partículas inferiores a 0,063mm, que variam entre os 12,5% e 22,5%, e módulos de finura que variam entre o 2,06% e 2,85%.

É de salientar que, ainda que extravasando o âmbito de análise da presente investigação, uma vez que foram determinados alguns parâmetros adicionais para a avaliação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, se optou por incluí-los nesta abordagem, numa perspetiva de poderem a vir a ser úteis em estudos futuros.

Assim, os agregados reciclados em estudo são classificados como agregados de peso corrente, pois a sua massa volúmica está compreendida entre 2000kg/m³ e 3000kg/m³.

Tendo presente que a baridade é obtida pelo quociente entre a massa de agregado seco preenchendo, sem compactação, um dado recipiente e a capacidade do recipiente, verifica-se que, para um determinado volume, quanto maior for a baridade de um material, maior será a massa necessária para o encher. Depende também da granulometria dos materiais pois há uns que se inserem nos vazios deixados entre os grãos dos outros. Este parâmetro permite avaliar o rendimento das argamassas. As amostras de agregados reciclados B.3, B.2 e B.1 são as que apresentam maiores valores de baridade, seguindo-se as amostras de agregados reciclados A.1, B.3 e C.1. Em contrapartida, a que apresenta menor valor é a amostra de agregados reciclados D.1.

O coeficiente de Los Angeles foi determinado visando obter a informação necessária a um futuro estudo de viabilidade económica do processo de transformação de resíduos cerâmicos (em caco) em agregados cerâmicos reciclados com dimensão para a sua introdução em argamassas. Este parâmetro pode dar-nos uma indicação da dificuldade e dos consumos energéticos necessários para transformar os resíduos em agregados com dimensão inferior a 4mm. As amostras de resíduos cerâmicos analisadas que apresentam maior desgaste são respetivamente as amostras B.4, A.1 e C.1, D.1, B.1, B.2 e, por fim, a B.3. Depreende-se assim que a energia que é necessário despende será, por ordem crescente, das amostra B.3, B.2, B.1, D.1, C.1, A.1 e B.4.

A absorção de água e a percentagem de vazios, foram determinadas visando recolher informação para análises futuras. Estes valores encontram-se disponíveis para consulta no quadro síntese (Quadro 4.35).

C) Análise dos resultados visando as restantes características

Da análise mineralógica qualitativa por difração de raio X (DRX) constata-se que:

- As amostras A.1, C.1 e D.1 apresentam as fases mineralógicas quartzo, microclina, calcite, hematite e ilite;
- As amostras B.1, B.2, B.3 e B.4 apresentam as fases mineralógicas quartzo, microclina, calcite, hematite e silimanite/mulite;
- A análise comparativa dos espectros das amostras obtidos pela DRX permite avaliar a reatividade pozolânica dos materiais. Avaliada através da quantidade de compostos em estado amorfo, sabe-se que maior quantidade de compostos amorfos implica maior reatividade pozolânica da amostra. A análise dos espectros das amostras permite identificar a existência de uma banda indicativa da presença de compostos em estado amorfo (não permitindo definir os compostos em causa). Da sobreposição dos diversos espectros constatou-se serem muito semelhantes, sendo muito difícil, por método gráfico, identificar aquele que apresenta maior banda de material em estado amorfo.

Assim, o que se pode concluir é que todas as amostras têm potencial reativo semelhante.

Dos resultados obtidos na análise térmica simultânea (STA) constatou-se que:

- Quanto à análise termogravítica, a amostra D.1 (1,2%) é a que apresenta maior perda de peso total; as amostras C.1 e B.4 apresentam um valor de 1,1%; a amostra A.1 de 0,9%; a amostra B.1 de 0,8%; e as amostras B.2 e B.3 de 0,4%. Da análise das curvas, as perdas de peso identificadas devem-se sobretudo à perda de água contida nos materiais (curvas características desse fenómeno);
- Quanto à análise termodiferencial, todas as amostras de resíduos analisadas apresentam reações endotérmicas e é detetado o ponto de inversão do quartzo.

Da análise aos parâmetros analíticos obtidos na análise pozolânica dos agregados, verificou-se que: todas as amostras apresentam reatividade pozolânica semelhante. Todavia, a que apresenta maior potencial de reatividade pozolânica é a amostra A.1, seguidas das amostras B.1, B.3, B.2, B.4 e C.1, sendo a amostra D.1 a que apresenta menor potencial de reatividade pozolânica.

Quadro 4.35 Quadro síntese com os resultados compilados

Empresa	A	C	D	B			
Material	Telha	Tijolo	Vasos	Telha			
Amostra	A.1	C.1	D.1	B.1	B.2	B.3	B.4
Temperatura de cozedura (°C)	920	900	1100	1050	1050	1050	1050
Volume anual de resíduos produzidos (ton/ano)	740	730	100	2000	4000		-
Coefficiente LA	39	39	38	33	29	28	46
Massa volúmica: ρ_a (Mg/m ³)	2,69	2,67	2,64	2,70	2,64	2,58	2,65
Massa volúmica: ρ_{rd} (Mg/m ³)	2,06	1,95	2,15	2,27	2,32	2,27	2,26
Massa volúmica: ρ_{ssd} (Mg/m ³)	2,29	2,22	2,34	2,43	2,44	2,39	2,41
Absorção de água: W_{24} (%)	11,3	13,9	8,6	7,0	5,2	5,2	6,3
Baridade: ρ_b (Mg/m ³)	1,17	1,10	0,99	1,374	1,411	1,445	1,164
Percentagem de vazios: v (%)	43,20	43,59	53,95	39,47	39,18	36,34	48,50
Módulo de finura:	2,06	2,41	2,17	2,29	2,53	2,85	1,79
Pozolanicidade: $([CaO]_{sat} - [CaO])$ (mmol/l)	3.36	2.73	2.33	3.20	2.85	3.17	2.77
Análise mineralógica (DRX)	Quartzo, Microclina, Calcite, Hematite e Ilite;			Quartzo, Microclina, Calcite, Hematite e Silimanite/Mulite			

Da análise dos resultados obtidos para as amostras de resíduos estudadas, identificaram-se as amostras de resíduos cerâmicos A.1, C.1 e D.1 como as que poderão trazer maiores benefícios quando incorporadas na composição das argamassas de reabilitação. Estas são provenientes de resíduos de telha, tijolo e vasos.

5 CONCLUSÕES

5.1. Conclusões finais

Com o *términus* do presente estudo pensa-se ter dado um contributo na concretização de um projeto que está a ser desenvolvido no âmbito da reciclagem de resíduos cerâmicos, com vista a encontrar soluções alternativas viáveis à sua valorização, que passam pela sua inserção em argamassas de reabilitação.

Alicerçado no exposto no estado da arte e na análise de resultados da campanha experimental (incluindo os parâmetros recolhidos nas empresas), conclui-se que todos os resíduos cerâmicos analisados apresentam características passíveis de poderem vir a ser incorporados na composição de argamassas de reabilitação e de se revelarem benéficos na melhoria das propriedades pretendidas.

A determinação das propriedades, análises e avaliações dos agregados reciclados foram baseadas em normas ou procedimentos que no seu âmbito de aplicação não contemplavam este tipo de agregado (em virtude de se estar a dar os primeiros passos na inclusão destes no seu âmbito de aplicação). Procedeu-se, sempre que se revelou necessário, à sua adequação face às características do material ensaiado e/ou à disponibilidade de equipamento e utensílios necessários. Todas as considerações feitas, para consultas futuras, encontram-se registadas no Capítulo 4.

Numa primeira fase, procedeu-se à identificação e seleção das empresas da região produtoras de resíduos cerâmicos; à recolha de amostras de resíduos (cacos) e de informação necessária sobre os produtos produzidos e à análise da informação recolhida; e à seleção dos resíduos cerâmicos a estudar - resíduos de telha (amostras A.1, B.1, B.2, B.3 e B.4), resíduos de tijolo (amostra C.1) e resíduos de vasos cerâmicos (amostra D.1). Toda a informação respeitante a esta fase de estudo encontra-se disponível, para consulta futura, no Capítulo 3.

Nesta fase constatou-se que algumas das empresas contactadas mostraram indisponibilidade para colaborar com o presente estudo, alegando a conjuntura económica que atravessa o país. Outras foram excluídas devido ao encerramento temporário dos locais de produção sediados na região em estudo.

Todas as empresas selecionadas demonstraram receptividade à abordagem de alternativas a dar ao tratamento dos seus resíduos, evidenciando os benefícios de carácter ambiental, mas sempre ressaltando o carácter económico das soluções. Quanto ao tratamento dado pelas empresas (identificadas e disponíveis a colaborar no presente estudo) aos resíduos cerâmicos (caco) resultantes da sua atividade produtiva, constatou-se que:

- A maioria das empresas procede à sua aplicação em caminhos dentro das próprias instalações fabris, sendo o excedente transportado para barreiros, igualmente propriedade da empresa e, também aí, aplicados nos seus caminhos e parques;
- Algumas empresas entregam-nos a destinatário autorizado para a sua valoração ou eliminação;
- Uma minoria trata os seus resíduos integralmente na própria empresa, reintroduzindo-os na sua linha de produção.

Constatou-se, ainda, que a maioria das empresas já tinha e/ou estava a implementar soluções na linha de fabrico, por forma a se tornarem mais limpas e mais amigas do ambiente, bem como na procura de soluções ao nível das fontes de energia usadas no processo de laboração, com vista a diminuir o consumo de combustíveis fósseis.

Da análise às temperaturas de cozedura dos produtos cerâmicos analisados verificou-se que estas têm uma amplitude que varia entre os 900°C e os 1100°C, pelo que são superiores, mas pouco, às indicadas em referências bibliográficas (Faria-Rodrigues, M.P., 2004) (Matias, G., 2008) como ótimas para se obter o maior potencial pozolânico deste tipo de materiais.

Da análise da pozolanidade, constatou-se que todas as amostras apresentam reatividade pozolânica semelhante; todavia a amostra C.1 (temperatura de cozedura de 900 °C) apresenta menor reatividade pozolânica que as amostras B.1, B.2, B.3 e B.4, que registam temperatura de cozedura superior (1050 °C). Esta discrepância corrobora a teoria de que a temperatura de cozedura não é o único fator condicionante da reatividade pozolânica, pois o tipo e constituição das argilas, nomeadamente a sua composição química, a forma e superfície específica das partículas também a poderão influenciar.

Identificaram-se as amostras de resíduos cerâmicos A.1, C.1 e D.1, face às propriedades determinadas, como as que poderão apresentar melhores características, quando incorporadas na composição das argamassas de reabilitação, atendendo aos seguintes critérios: tipo de materiais a estudar (telha, tijolo e vasos); fases mineralógicas (quartzo, microclina, calcite, hematite e ilite) - para as três amostras de resíduos foram identificadas qualitativamente fases mineralógicas idênticas, o que poderá revelar-se benéfico aquando da análise de resultados de trabalhos futuros com a sua introdução na composição das argamassas; baridade - as amostras

apresentam menores valores, pelo que é expectável a obtenção de argamassas com maior rendimento; trabalhabilidade – as amostras (B.1 e D.1) apresentam módulos de finuras baixos e médio na amostra C.1, indicador da possibilidade de obtenção de maior trabalhabilidade nas argamassas; pozolanicidade – todas as amostras apresentaram semelhante potencial de reatividade pozolânica, sendo que a amostra A.1 foi a que apresentou maior valor.

De referir ainda que as amostras de resíduos A.1, C.1 e D.1 apresentaram maior desgaste, ou coeficiente de LA elevado, o que poderá ser indicador de menor dificuldade e de consumos energéticos necessários, para transformar os cacos em agregados com dimensão inferior a 4mm.

Paralelamente foram desenvolvidos diversos estudos, para cada amostra de resíduo, com vista à avaliação do comportamento de argamassas com diversas formulações (contendo na sua composição a introdução destes resíduos). Embora algumas destas avaliações estejam ainda a decorrer, os primeiros resultados revelaram melhorias em algumas das propriedades das argamassas (Matias, G. et al, 2012a); (Matias, G. et al, 2012b) e (Silva, H., 2012).

5.2. Desenvolvimentos futuros

Em termos de trabalhos futuros, poder-se-á analisar as propriedades em que cada um se revelou mais interessante e analisar composições de argamassas contemplando a mistura destes resíduos, com vista a obter melhor partido do potencial de cada um.

Quanto à caracterização de resíduos cerâmicos, em termos de trabalhos futuros poder-se-ão realizar ensaios aos resíduos que permitam avaliar a forma e a superfície específica das partículas, a sua porosidade e proceder a análises mineralógica quantitativa e químicas. Este conhecimento possibilitará uma melhor avaliação do papel deste tipo de resíduos nas propriedades obtidas nas argamassas com a sua introdução.

No âmbito da temática abordada na presente dissertação, este estudo poderá ser alargado a outro tipo de resíduos com eventual potencial pozolânico, nomeadamente de cerâmica branca, ladrilhos e azulejos de cerâmica vermelha.

Por fim, poder-se-á ainda sugerir o desenvolvimento de um estudo futuro, centrado no objetivo principal do ensaio de LA, que avalie a viabilidade económica do processo de transformação de resíduos cerâmicos (caco) em agregados cerâmicos reciclados, com dimensão para a sua introdução em argamassas como componentes pozolânicos e/ou agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albers, A., Melchiades, F., Machado, R., Baldo, J. e Boschi, A. (2002). “Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X”. *Cerâmica*, vol.48, n.305, pp. 34-37. ISSN 0366-6913. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v48n305/a0848305.pdf>>.

Alvarez, J.A.S. (2007). “Alvenarias e argamassas anteriores ao Imperio Romano”. In: APFAC (Associação Portuguesa de Fabrico de Argamassas de Construção), 2.º Congresso de Argamassas de Construção.

Andrade, I. (2004). “Produção de resíduos na indústria cerâmica - Região centro 2003”. DRAOT - Centro . Disponível em: < www.ccdrc.pt/index.php?option=com_docman>.

CEN (2005). “Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method”. EN 933-1:1997/A1:2005, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2002). “Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout”. EN 13055-1:2002, European Committee for Standardization, Brussels.

CONSTRULINK@ (2011). <http://www.construlink.com/>. Construlink S.A, Portal da Construção, Lisboa.

Costa, L.L. (2008). “ O uso de argamassas tradicionais e pré-doseadas para impermeabilização em revestimentos exteriores”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Decreto-Lei n.º 46/2008, Diário da República - 1ª série - N.º 51 - 12 de Março de 2008, pp.1567-1574.

Decreto-Lei n.º 178/2006, Diário da República - 1ª série - N.º 171 - 5 de Setembro de 2006, pp. 6526-6545.

Duarte, T. (2011). “Comportamento mecânico de argamassas de cal com resíduos cerâmicos”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de

Construções, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Faria, J., Torgal, F. e Jalali, S. (2011a). “Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 1 - Trabalhabilidade e comportamento mecânico”. Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12783>>.

Faria, J., Torgal, F. e Jalali, S. (2011b). “Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 2 – Comportamento à água”. Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12851>>.

Faria, P., Branco, T., Carneiro, J., Veiga, R. e Santos-Silva, A. (2012a). “Argamassas com base em cal para a reabilitação de rebocos”. PATORREB 2012 – 4º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Santiago de Compostela.

Faria, P., Silva, V., Grilo, J., Carneiro, J., Branco, T., Mergulhão, D. e Antunes, R. (2012b). “Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural”. CIRea2012, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Faria-Rodrigues, M.P. (2004). “Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes”. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Ferreira, T. (2011). “Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Fontes, T.I. (2013). “ Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional. Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino”. Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

GLOBALCONSTROI@ (2011). <http://globalconstroi.com/>. Globalconstroi – O Portal do Sector da Construção, Cascais.

Gomes, C. (1937). “Argilas – o que são e para que servem”. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

HOTFROG@ (2011). <http://www.hotfrog.pt/>. Diretório de empresas de Portugal, Hotfrog Portugal.

IPQ (2011a). “Métodos de ensaio de cimentos – Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos”. NP EN 196-5:2011, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2011b). “Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados”. NP EN 933-11:2011, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2011c). “Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”. NP EN 1097-2:2011, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2011d). “Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 5: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada”. NP EN 1097-5:2011, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2010a). “Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. NP EN 1097-6:2003/A1:2010, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2010b). “Agregados para argamassas”. NP EN 13139:2005/AC:2010, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2008). “Métodos de ensaio de cimentos – Parte 7: Métodos de colheita e de preparação de amostras de cimento”. NP EN 196-7:2008, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2006a). “Métodos de ensaio de cimentos – Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos”. NP EN 196-5:2006, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2006b). “Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”. NP EN 1097-2:2002/Errata Fev:2006, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2005). “Agregados para argamassas”. NP EN 13139:2005, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2003a). “Ensaio das propriedades gerais dos agregados – Parte 5: Equipamento comum e calibração”. NP EN 932-5:2003, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2003b). “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. NP EN 1097-6:2003, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002a). “Ensaio das propriedades gerais dos agregados – Parte 1: Métodos de amostragem”. NP EN 932-1:2002, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002b). “Ensaio das propriedades gerais dos agregados – Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais”. NP EN 932-2:2002, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002c). “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”. NP EN 1097-2:2002, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002d). “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”. NP EN 1097-3:2002, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2000). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”. NP EN 933-1:2000, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (1999). “Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas”. NP EN 933-2:1999, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Kanan, M.I. (2008). “Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal”. Iphan/Programa Monumenta, Cadernos Técnicos 8, Brasília.

Maliska, A. e Prates, P. (-). “Difratometria de raio X – Caracterização de fases cristalinas”. UFSC - LMC, Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <<http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-carac-II/IntroducaoRaios-X.pdf>>.

Marques, S.M.F. (2005). “Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Martinelli, F. A. e Helene, P. (1991). “Usos, funções e propriedades das argamassas mistas destinadas ao assentamento e revestimento de alvenarias”. Boletim Técnico PCC/47. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Matias, G., Faria P., Torres, I., Tomás. A, Ferreira, T. e Duarte, T. (2012a). “Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica”. APFAC2012 (Coimbra), Coimbra.

Matias, G., Faria, P. e Torres, I. (2012b). “Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica – influência da granulometria dos resíduos”. Patorreb 2012, Santiago de Compostela.

Matias, G., Torres, I. e Faria, P. (2013). “Argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos cerâmicos”. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Fortaleza, Brasil.

Matias, G., Torres, I. e Faria, P. (2010) “Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico”. APFAC 2010, Lisboa.

Matias, G. (2008). “A influência dos resíduos de tijolo no comportamento de argamassas de cal”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Oliveira, A. (1985). “Materiais de barro vermelho para construção”. Ministério da Administração Interna – Comissão de Coordenação da Região Centro. Série n.º1. Coimbra.

Paulo, R.S.V.M.N. (2006). “Caracterização de argamassas industriais”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Petrucci, E. (1976). “Materiais de Construção”. Editora Globo/MEC, 8ª edição, Rio de Janeiro.

Rosaura, P., Mexias, A., Figueira, R., Montedo, O. e Bertan, F. (2006). “Características das principais técnicas analíticas aplicadas à caracterização de materiais”. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Disponível em:<<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-102-028.pdf>>.

Silva, J. (2006). “Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias”. Dissertação de Mestrado em Construção, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Silva, H. (2012). “Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduo de cerâmica em granulometria fina”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Sousa Coutinho, A. (1988). “Fabrico e Propriedades do betão”. LNEC, vol. 1 a vol. 3, 2.^a edição, Lisboa.

Tomás, A.L. (2012). “Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos em substituição de parte do agregado”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Torgal, F. P. e Jalali, S. (2010). “A sustentabilidade dos materiais de construção”. TecMinho, 1.^a edição, Braga.

Veiga, M. R. (2009). “Conservação e reparação de revestimentos de paredes edifícios antigos: Métodos e materiais” . Programa de Investigação e de Pós-Graduação, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. R. e Aguiar, J. (2003). “Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos”. 1^o Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios.FEUP, Porto.

Veiga, M. R. e Carvalho, F. (2002). “Argamassas de Reboco para paredes de edifícios antigos: Requisitos e características a respeitar”. Caderno de edifícios n^o2, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. (1997). “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhacão”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LNEC, Lisboa.

Velosa, A. (2006). “Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade Aveiro, Aveiro.
