

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO FINO EM PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO

Célia Marisa Almeida Resende

TESE DE MESTRADO – ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor Paulo Barreto Cachim

Co-Orientador: Professora Doutora Ana Maria de
Magalhães Ribeiro Sarmento Teixeira Bastos

JANEIRO DE 2009

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



mec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

"Hoje em dia, o ser humano apenas tem ante si três grandes problemas que foram ironicamente provocados por ele próprio: a super povoação, o desaparecimento dos recursos naturais e a destruição do meio ambiente.

Triunfar sobre estes problemas, vistos sermos nós a sua causa, deveria ser a nossa mais profunda motivação."

Jacques Yves Cousteau (1910-1997)

Agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Quero realçar o apoio fundamental dos que me são mais próximos como o meu marido e os meus pais. Se não sentisse a sua confiança no meu trabalho, a concretização deste projecto não teria sido abraçado com a serenidade necessária para se tornar numa experiência tão proveitosa e enriquecedora o quanto foi.

Resumo

A escória de cobre é um sub-produto da produção do cobre muito utilizado como material abrasivo dada a sua forma granular e elevada dureza, ao qual se dá o nome de granalha de cobre. Depois desta utilização as suas propriedades de abrasão são diminuídas sendo armazenado em depósito e constituído como resíduo. A granalha de cobre tem um aspecto físico idêntico ao da areia natural mas a dureza e massa volúmica são superiores, propriedades que sugerem a sua aplicabilidade na indústria da construção como substituto da areia natural. O presente trabalho tem como objectivo o estudo da viabilidade de incorporação deste resíduo como substituto parcial da areia em produtos da construção de matriz cimentícia. São assim comparados e analisados os resultados de ensaios de caracterização mecânica de argamassas de referência produzidas com areia natural como agregado fino, com os correspondentes obtidos em argamassas em que se substituiu parcialmente a areia por granalha de cobre, nas percentagens de 25%, 50% e 75%, em volume. Verificam-se, de um modo geral, diminuições de resistência à medida que se aumenta a percentagem de granalha na constituição das argamassas bem como redução no tempo de presa, comportamento que pode estar directamente relacionado com a origem da granalha estudada. Contudo, as argamassas produzidas com 25% de substituição de areia por granalha apresentam comportamento mecânico satisfatório o que indica a viabilidade da incorporação deste resíduo em percentagens reduzidas no fabrico de materiais de construção tais como betão de média resistência; blocos de betão para alvenaria; blocos de betão para pavimentos, entre outros pré-moldados. A utilização de granalha de cobre no betão de fabrico de pedras de grua é também uma aplicação de muito interesse uma vez que a massa volúmica do betão é incrementada.

Palavras-Chave: granalha de cobre, escória de cobre, resíduos, argamassa, produtos de construção.

Abstract

Copper slag is a copper industry waste that is essentially used as an abrasive in metal surfaces to remove coatings or paintings, due to its hardness, sieve distribution and angular grain shape, mainly in the naval industry, being denominated blasted copper slag. After the wearing process, its abrasive properties are reduced and then dumped in landfills becoming a residue, and remained an environmental problem. Blasted copper slag has identical physical look as natural sand, but hardness and density are superior, properties that suggest its appliance in construction industry as partial replacement for natural sand. The main objective of the presented work is to find out the viability of its incorporation on construction products as partial substitute of natural sand. The results of mechanical characterisation tests in reference mortars produced with natural sand as fine aggregate are compared with those obtained in mortars where natural sand was partially substituted by blasted copper slag, in percentages of 25%, 50% and 75%, by volume. In a general way, strength reduces as the blasted copper slag content increases in mortars composition, and so is delayed the time of hardening process, behaviour that may be directly related with the copper slag origin. However, mortars produced with 25% of blasted copper slag in substitution of natural sand shows a satisfactory mechanical behaviour which indicates the viability of incorporation of this residue in reduced percentages on the manufacturing of construction materials such as concrete; concrete masonry blocks, concrete blocks for pavements, between other light pre-cast products. The utilisation of blasted copper slag in the production of concrete blocks for cranes is also an interesting application once concrete density is increased.

Keywords: blasted copper slag, copper slag, residues, mortar, construction products.

Índice

Resumo.....	VII
--------------------	------------

Abstract	IX
-----------------------	-----------

1. Introdução.....	1
---------------------------	----------

1.1	Objectivo	2
1.2	Origem da granalha de cobre a estudar.....	2
1.3	Estruturação do Trabalho.....	3

2. Utilização da Escória de Cobre na Indústria do Cimento e do Betão – Estado da Arte.....	5
---	----------

2.1	Introdução	5
2.1.1	Escórias de alto-forno.....	6
2.1.2	Escórias de aço	7
2.2	Escória de cobre	8
2.2.1	O cobre.....	8
2.2.2	Produção do cobre e formação das escórias de cobre.....	9
2.2.3	Aplicações da escória de cobre.....	12
2.3	Caracterização da escória de cobre.....	15
2.3.1	Caracterização química.....	15
2.3.2	Caracterização mineralógica.....	17
2.3.3	Actividade Pozolânica	19
2.3.4	Impacto Ambiental	22
2.3.5	Caracterização física	25
2.4	Escória de cobre moída como substituto parcial do cimento Portland em argamassa e em betão.....	27
2.4.1	Caracterização do betão no estado fresco	29
2.4.2	Caracterização do betão no estado endurecido	31
2.4.3	Reacções de hidratação.....	38
2.4.4	Durabilidade	39
2.5	Escória de cobre como agregado fino para argamassa e betão	42
2.5.1	Caracterização do betão no estado fresco	43

2.5.2	Caracterização do betão no estado endurecido	43
2.5.3	Durabilidade	46
2.5.4	Produtos de construção pré-moldados	47
2.6	Conclusões	47
3.	Estudo Experimental	49
3.1	Introdução	49
3.2	Objectivos	50
3.3	Programa experimental	51
3.4	Metodologia	52
4.	Materiais	55
4.1	Introdução	55
4.2	Caracterização da granalha de cobre	55
4.2.1	Aspecto visual.....	55
4.2.2	Dureza.....	63
4.2.3	Composição granulométrica	64
4.2.4	Massa volúmica e absorção de água.....	68
4.2.5	Caracterização química	69
4.3	Areia normalizada natural	69
4.3.1	Composição granulométrica	69
4.3.2	Massa volúmica e absorção de água.....	70
4.4	Areia fina natural.....	71
4.4.1	Composição granulométrica	71
4.4.2	Massa volúmica e absorção de água.....	72
4.5	Comparação das características dos agregados finos estudados.....	72
4.6	Cimento	73
5.	Resultados.....	75
5.1	Espalhamento	75
5.2	Tempo de presa.....	76
5.3	Resistência à compressão.....	77
5.4	Resistência à flexão	78
5.5	Massa volúmica	79

6. Análise dos Resultados	81
6.1 Série 1	81
6.1.1 Espalhamento	81
6.1.2 Resistência mecânica.....	82
6.1.3 Massa Volúmica.....	83
6.2 Série 2	83
6.2.1 Espalhamento	83
6.2.2 Resistência mecânica.....	84
6.2.3 Massa Volúmica.....	85
6.3 Série 3	85
6.3.1 Resistência mecânica.....	85
6.3.2 Massa Volúmica.....	86
6.3.3 Tempo de início e fim de presa.....	87
6.4 Série 4	87
6.4.1 Resistência mecânica.....	87
6.4.2 Massa Volúmica.....	88
6.5 Série 5	88
6.5.1 Resistência mecânica.....	89
6.5.2 Massa Volúmica.....	90
6.6 Série 6	90
6.6.1 Resistência mecânica.....	90
6.6.2 Massa Volúmica.....	91
6.7 Série 7	92
6.7.1 Resistência mecânica.....	92
6.7.2 Massa Volúmica.....	93
6.8 Série 8	93
6.8.1 Resistência mecânica.....	93
6.8.2 Massa Volúmica.....	94
6.9 Série 9	94
6.9.1 Resistência mecânica.....	95
6.9.2 Massa Volúmica.....	95
6.10 Influência da substituição de areia por granalha na resistência mecânica de argamassas	96
6.11 Influência da fracção granulométrica fina da granalha de cobre nas propriedades das argamassas	99
6.12 Influência da substituição de areia por granalha na massa volúmica de argamassas	101
6.13 Influência da substituição de areia por granalha no tempo presa de argamassas	102
6.14 Influência das impurezas contidas na granalha sobre as propriedades das argamassas.....	103

6.15	Evolução no tempo da resistência mecânica de argamassas produzidas com gralha	104
6.16	Influência da relação a/c nas propriedades de argamassas produzidas com gralha	105
6.17	Influência do tipo de cimento no desenvolvimento da resistência das argamassas à medida que se aumenta a dosagem de gralha	106
7.	Blocos de Betão Pré-moldados	109
8.	Conclusões.....	111
9.	Referências Bibliograficas	113

1. INTRODUÇÃO

Todos os anos grandes quantidade de subprodutos industriais são produzidas pelas mais variadas industrias. A necessidade de se encontrarem novas soluções para a enorme variedade de resíduos que se encontram actualmente em depósito é uma motivação permanente das sociedades actuais. As soluções para os resíduos mais comuns tais como o plástico, o cartão e o vidro já foram amplamente estudadas e baseiam-se nas operações simples de recolha e reutilização na própria indústria. Existem porém outros tipos de resíduos que, por não poderem ser integrados de novo na indústria que lhes deu origem, constituem uma fonte de preocupação. Um desses resíduos é a escória de cobre, resíduo resultante da produção do cobre, que é utilizado como material abrasivo e ao qual se dá o nome de granalha de cobre. Depois da sua utilização a granalha de cobre batida é armazenada em depósito porque as suas características para essa aplicação são perdidas.

A indústria da construção é provavelmente a solução ideal para milhões de toneladas de vários subprodutos industriais devido principalmente ao grande volume de matéria-prima que consome. As vantagens do uso desses resíduos como matéria-prima em produtos de construção são, a redução do consumo dos recursos naturais e também a redução do consumo de energia nos processos de extracção dessa matéria-prima e no seu processamento, o que contribui para a diminuição da libertação de gases de efeito estufa. Esta solução reduz também o depósito em aterro de grandes volumes de resíduos e ainda conduz, potencialmente, a produtos de menor custo.

A incorporação de resíduos na indústria do cimento e do betão tem sido estudada por vários investigadores e entidades, por todo o mundo. Muitos resíduos inertes podem ser activados por substâncias alcalinas, como a cal e o cimento Portland, para formarem materiais cimentícios suplementares, tais como as cinzas volantes e as escórias metalúrgicas – onde se incluem as escórias de cobre. Por outro lado a escória de cobre contém compostos como o óxido de ferro, óxido de alumínio, óxido de cálcio, óxido de sílica, entre outros, que revelam potencial actividade pozolânica se incorporada em misturas cimentícias.

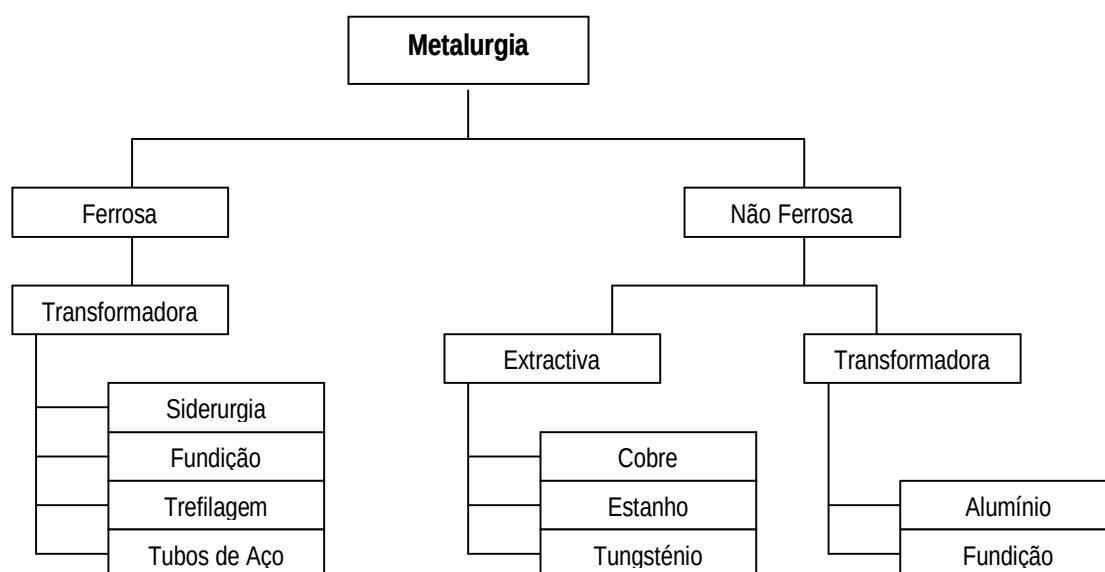
1.1 Objectivo

A temática deste estudo surgiu directamente da necessidade de se encontrar destino para a granalha de cobre, um dos vários tipos de resíduos armazenados numa empresa de recolha de resíduos industriais.

No decorrer da pesquisa bibliográfica acerca da reutilização da granalha a nível internacional, as experiências encontradas noutros países impulsionam a ideia de que uma das soluções para a granalha batida poderá ser a sua incorporação na produção de determinados materiais de construção de matriz cimentícia. Este trabalho baseia-se essencialmente nesse sentido, tendo-se elaborado um plano de estudo experimental de modo a encontrar resultados que sustentem a viabilidade ou que revelem a inviabilidade da prática desta solução. Objectivamente pretende-se caracterizar em termos mecânicos argamassas produzidas com granalha de cobre em substituição parcial da areia para, a partir dos resultados obtidos, poder prever-se a sua aptidão para produtos de construção de matriz cimentícia. A análise de algumas características físicas das argamassas é também alvo de estudo.

1.2 Origem da granalha de cobre a estudar

Em Portugal não existe indústria transformadora do cobre, como se apresenta no Esquema 1. Efectivamente o território português possui importantes jazigos de cobre, estanho e tungsténio, tendo sido durante a última década o maior produtor europeu de concentrados daqueles minérios, mas a extracção destina-se exclusivamente à exportação, não existindo qualquer transformação dos minérios, sendo mais tarde importados os produtos transformados. (Lobo, 2001).



Esquema 1. Segmentos da indústria metalúrgica em Portugal (Lobo, 2001).

De facto não existe produção de escória de cobre em Portugal, mas existem depósitos deste material depois de ser usado como abrasivo no tratamento de revestimentos metálicos – granalha de cobre, principalmente em estaleiros navais nacionais.

A granalha de cobre existente em depósito nos parques da empresa de recolha de resíduos provêm dos Estaleiros Navais de Viana do Catelo (ENVC) que importam escória de cobre de Espanha para a sua utilização como abrasivo na decapagem dos cascos dos seus navios.

A decapagem consiste no tratamento das superfícies metálicas dos navios, quer para a sua manutenção, retirando a tinta de antigas pinturas, quer na construção de novas embarcações, preparando as superfícies para a pintura. Com essa finalidade, o abrasivo (granalha de cobre) é projectado no substrato sob pressão de ar comprimido.

No final do processo, a granalha é recolhida através de silos de decapagem e/ou contentores adequados, sendo depositada num parque de armazenamento temporário. Mediante os valores conhecidos até à data os ENVC consomem cerca de 4700 toneladas deste abrasivo por ano, perfazendo uma média mensal de aproximadamente 390 toneladas. Desde o ano de 2004 que a granalha de cobre usada e armazenada nos ENVC é, depois de crivada, transportada para cimenteiras numa média de 25 toneladas por dia, onde é valorizada através da sua reutilização como matéria-prima para cimento, para colmatar défices de ferro nas margas.

O estaleiro naval de Lisboa, a Lisnave, também utiliza este material para manutenção dos seus barcos, consumindo uma média de 30 mil toneladas por ano.

A granalha recolhida depois do processo da decapagem dos cascos dos navios já não tem a mesma granulometria nem a mesma constituição química. Os seus grãos são de menores dimensões sofrendo reduções de granulometria de 2,5mm para 1mm; e quimicamente deixa de ser apenas o resíduo da produção do cobre porque passa a incorporar também uma quantidade significativa de partículas muito finas de óxido de ferro e partículas de tinta.

1.3 Estruturação do Trabalho

A apresentação deste trabalho está dividida em oito capítulos.

No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica de trabalhos em que foram estudadas várias formas de reutilização de escória de cobre e outras escórias metalúrgicas, nomeadamente na fabrico de argamassas e betões, quer como substituto parcial do ligante, quer como substituto parcial do agregado fino. As características destas escórias e os

resultados do comportamento mecânico e de durabilidade das argamassas e betões obtidos são resumidamente apresentados.

No Capítulo 3 são identificados os objectivos e enunciadas as orientações gerais do trabalho experimental que consiste na caracterização física da granalha de cobre e no estudo das propriedades mecânicas e de algumas características físicas de argamassas produzidas com granalha de cobre em substituição parcial da areia natural. São também caracterizados os outros materiais usados no estudo experimental e referidos os métodos utilizados com a indicação dos ensaios realizados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da granalha e nos ensaios mecânicos e físicos das argamassas produzidas.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos e é feita uma análise comparativa das variáveis envolvidas no trabalho experimental de modo a encontrar explicações para o comportamento das argamassas produzidas com granalha de cobre.

No Capítulo 6 é apresentada a experiência realizada numa unidade fabril onde foram produzidos blocos de betão pré-moldados para pavimento, usando granalha de cobre em substituição total da areia natural.

No Capítulo 7 são indicadas as conclusões do trabalho desenvolvido indicando os aspectos de maior necessidade de estudo futuro.

A bibliografia consultada é apresentada no Capítulo 8.

2. UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE NA INDÚSTRIA DO CIMENTO E DO BETÃO – ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

As escórias de alto-forno, as escórias de aço, as escórias de fósforo, as escórias de cobre e as escórias de chumbo, quando são bruscamente arrefecidas em água adquirem propriedades relevantes tais como: propriedades cimentícias ou pozolânicas; granulometrias específicas e níveis de dureza elevados.

O próprio Louis Vicat já tinha antevisto as propriedades de certas escórias e a possibilidade de as empregar na fabricação do cimento, dada a semelhança entre as composições químicas da escória e do cimento Portland.

Em 1865 foi lançado no mercado da Alemanha um ligante hidráulico constituído por uma mistura de cal e escória, depois de E. Langen, em 1862 se aperceber que a escória depois de moída e misturada com cal fazia presa e endurecia dentro de água.

A escória de cobre, objecto deste estudo, é extensamente usada na indústria de abrasivos, dadas as suas propriedades granulométricas e de elevada dureza, mas existem vários trabalhos que avaliam a possibilidade da sua incorporação em matrizes cimentícias. Por exemplo, um estudo realizado por Ariño et al. (1999) sobre diferentes escórias não-ferrosas tais como cobre, entre outras, indica que a escória de cobre tem potencial para aplicação como material cimentício. Também Tixier et al. (1999) utilizaram escória de cobre como substituição parcial do cimento Portland no betão, e ainda como matéria-prima para a produção de cimento. Shi et al., (2000) revela que o uso destas escórias como componente cimentício requer apenas moagem, o que exige substancialmente menos energia do que a necessária na produção de cimento Portland. Com efeito, verifica-se que a energia necessária para a moagem da escória de alto-forno granulada, por exemplo, é apenas 10% da energia necessária para a produção de cimento Portland.

A título introdutório, no início deste capítulo, são referidos alguns estudos de aplicação de outros tipos de escórias em misturas cimentícias nomeadamente a escória de alto-forno e a escória de aço, as quais já têm vindo a ser

estudadas desde há cerca de um século. Seguidamente é abordada com maior ênfase a escória de cobre e o processo que lhe dá origem durante a produção do cobre.

No desenvolvimento do capítulo são também apresentados alguns estudos experimentais realizados com o objectivo de avaliar do efeito da incorporação da escória de cobre como substituto parcial do cimento e também como agregado fino no betão, bem como os seus resultados mais relevantes. As características químicas, físicas e ambientais das escórias de cobre de várias origens usadas nesses estudos são também analisadas.

2.1.1 Escórias de alto-forno

As escórias de alto-forno, obtidas no processo de fabricação do ferro-gusa (Moura, 2000), podem ter variadíssimas aplicações tais como: agregado para betões ou para camadas de base para estradas; matéria-prima para produção de agregados leves para betão (quando as escórias são arrefecidas lentamente); na fabricação de lâ de escória para isolamentos térmicos e; finalmente, para a indústria do cimento, não só como matéria-prima para a sua fabricação (adicionada ao calcário e entrando no forno para produção do clínquer), mas também como adição ao cimento, sendo esta última a sua mais frequente aplicação.

Efectivamente, com a escória de alto-forno pode fabricar-se uma gama completa de cimentos com adições que podem chegar até 90% em substituição de cimento Portland. Porém, as propriedades deste começam a alterar-se quando a percentagem sobe acima dos 40%.

Em Portugal, o ano de 1961 marcou o início da utilização de escórias de alto-forno granuladas na produção do cimento com escória (Coutinho, 1997). A partir dessa data foram comercializados em Portugal dois tipos de cimentos de escórias: o cimento Portland de ferro (com 30% de escória) e o cimento de alto-forno 60/80 (com 70% de escória). A escória de alto-forno usada era proveniente da Siderurgia Nacional mas já desde há décadas que este tipo de cimento deixou de ser fabricado sendo que os resíduos de escórias de alto-forno foram sendo acumulados no perímetro fabril da Siderurgia Nacional. Para resolver a poluição que foi crescendo ao longo dos anos, foi constituída uma empresa que faz a moagem e ensacamento de escória granulada de alto-forno, para venda como produto para integração no betão, através da sua valorização por incorporação directa na produção de cimento (Lobo, 2001).

No final dos anos 90 surgiu a nível internacional um betão denominado de betão de elevado volume de materiais cimentícios suplementares (*high volume of supplementary cementing materials* – HVSCM), que são materiais que quando usados em conjunto com o cimento Portland, em dosagens de 30% a 40% em massa do total de materiais cimentícios, contribuem para as propriedades do betão endurecido através da sua actividade hidráulica ou

pozolânica. Como exemplos de materiais cimentícios suplementares temos a pozolana natural; a cinza volante; a sílica fumo e a escória de alto-forno granulada moída (GGBFS – *ground granulated blast furnace slag*). As principais razões para se usarem escórias estão relacionadas com a durabilidade do betão, incluindo o aumento da resistência contra o ataque dos sulfatos, o baixo calor de hidratação, e a protecção contra a reactividade álcalis-agregado. No entanto, o betão de HVSCM parece ter um elevado número de desafios técnicos, incluindo o maior tempo de presa e menor ganho de resistência às primeiras idades. Estes factos são resultados de pesquisas realizadas pela instituição EcoSmart, que estudam o desempenho destes betões.

Igualmente com a intenção de se aumentar a quantidade de escórias de alto-forno a inserir no betão sem prejudicar as suas características, têm sido publicados diversos estudos na comunidade científica, que avaliam o grau de finura ideal a que a escória deve ser moída (Mukherjee, 2004), e os activadores alcalinos, a introduzir na composição do betão, para reduzir o tempo de presa e melhorar o ganho de resistência (Fu et al., 2000), entre outros aspectos.

Nos últimos anos tem sido demonstrado que é tecnicamente viável o aumento da substituição de cimento Portland por GGBFS até 80% (Spot, 2004).

2.1.2 Escórias de aço

As escórias de aço são geradas nos processos de fabrico do aço pelo forno eléctrico ou pelo alto-forno.

Geiseler (1996) refere que já em 1880 as escórias de aço produzidas pelos processos *Basic-Bessemer* ou *Thomas*, na Alemanha, eram usadas como fertilizante fosfático.

Devido às suas características mecânicas, as escórias de aço têm vindo a ser usadas como agregado grosso para betão asfáltico, base e sub-base de pavimentos rodoviários, lastro de vias-férreas e estabilização de solos. Nos Estados Unidos, 77% da escória de aço produzida é utilizada nas aplicações referidas. Entre as vantagens que as escórias de aço apresentam comparativamente aos agregados convencionais, destaca-se o menor custo, a maior resistência ao desgaste, a maior densidade e a forma dos grãos, que confere melhor consistência e adesão às misturas asfálticas (Moura, 2000).

Desde há alguns anos têm sido publicados vários trabalhos acerca de aplicações de escórias de aço em misturas cimentícias: como agregado fino e agregado grosso para betão (Maslehuddin, 2003); como substituição parcial de cimento Portland no betão (Geyer et. al, 1997); e também associados a activadores alcalinos para melhorar as propriedades cimentícias (Shi, 2004).

Quanto à durabilidade destes betões não existem muitos trabalhos publicados. No entanto, estudos de Dongxue et al. (1997), sobre cimentos com escória de aço e escória de alto-forno na sua composição, em conjunto com o clínquer, revelam que estes oferecem maior resistência mecânica a longo prazo, boa resistência aos sulfatos, boa resistência à penetração do dióxido de carbono, e ainda diminuição da reacção álcalis-agregado, embora se observem fenómenos de expansão.

2.2 Escória de cobre

As escórias de cobre possuem características químicas, físicas e mecânicas com potencialidade para a produção de vários produtos tais como materiais de enchimento, lastro, abrasivos, ferramentas de corte, vidro e tijoleiras cerâmicas (Gorai et al., 2003).

Além destas aplicações, o uso deste resíduo como substituto parcial do cimento no betão e como agregado fino para betão seria uma solução ainda mais nobre, fazendo uso integral das suas capacidades, uma vez que, em adição às características já citadas, a escória de cobre possui características pozolânicas. Adequadamente aplicado, este resíduo pode realmente melhorar de modo significativo o desempenho dos materiais cimentícios.

2.2.1 O cobre

O cobre é um elemento químico metálico, vermelho amarelado, de símbolo Cu (do latim *cuprum*). A sua densidade é de 8,9 e funde a 1084° C. Possui dois isótopos estáveis, de massa atómica 63 e 65, e nove radioactivos, de massa atómica 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 67 e 68. Cristaliza no sistema cúbico e não possui formas alotrópicas. Apresenta-se em compostos estáveis de valência 1 (cuprosos) e 2 (cúpricos), e forma dois óxidos: o óxido cuproso (Cu_2O), e o óxido cúprico (CuO).

O cobre não é atacado pelo ar seco, mas em ambiente húmido que contenha dióxido de carbono, reage com este formando-se uma camada protectora esverdeada de carbonato, o azinhavre. Como esse composto é tóxico, os utensílios de cobre usados na cozinha devem ser estanhados ou mantidos limpos.

O cobre é um elemento que se dissolve bem no ácido nítrico, mas não é atacado a frio pelos ácidos clorídrico e sulfúrico; já a quente, produz com esses ácidos, o cloreto cuproso e o sulfato de cobre, respectivamente.

À excepção da prata, o cobre é o metal que melhor conduz electricidade. Destaca-se também pela sua elevada condutividade térmica e resistência à corrosão, o que faz com que, devido à sua resistência mecânica e

maleabilidade, seja a matéria-prima preferencial para a fabricação de cabos, fios e lâminas. É um material dúctil, podendo por meio de tratamentos metálicos, como a laminação e o chapeamento, aumentar a sua dureza. As suas propriedades eléctricas são mais elevadas no estado puro, mas as propriedades mecânicas e a inalterabilidade são melhores nas ligas com zinco, estanho, chumbo e níquel. Estas numerosas ligas de cobre são utilizadas na maioria das indústrias, em consequência da variedade das suas propriedades: o *latão* (liga de cobre e zinco), que é uma das principais ligas de cobre, é moldado e trabalhado facilmente (barras, perfilados, laminados); o *bronze* (liga de cobre e estanho) tem interessantes qualidades de fundição, associada às suas características mecânicas (fundições, peças mecânicas); e os *cuproaluminios* assim como os *cuproníqueis* que resistem bem à oxidação e a certos agentes corrosivos. Dos compostos *cuprosos*, nos quais o cobre é univalente, cita-se o óxido Cu_2O , vermelho, que serve para colorir vidros, e o cloreto CuCl . Entre os compostos *cúpricos* mais importantes, nos quais o metal é bivalente, cita-se o óxido CuO , negro, que serve também para colorir vidros (de verde), e o sulfato CuSO_4 , azul, empregue na electrometalurgia, em galvanoplastia, em pintura e em agricultura (caldas bordalesas, para a vinha).

2.2.2 Produção do cobre e formação das escórias de cobre

Os minérios de cobre aparecem misturados com diversos tipos de materiais rochosos sem valor comercial, a ganga, da qual devem ser separados. Embora existente em numerosos minérios sob a forma de sulfuretos (pirite e calcopirite), de óxidos (cuprite e melaconite) e de carbonatos (malaquite), é a partir da calcopirite (CuFeS_2) que o cobre é extraído. Para isso, o minério é inicialmente submetido a um processo de moagem e pulverização. Em seguida, de acordo com o tipo de minério, aplicam-se diferentes processos de tratamento do material.

As operações de refinação, seja térmica ou electrolítica, permitem atingir uma pureza superior a 99%. No caso dos sulfuretos, o método empregue é a flotação, que consiste em verter o mineral moído sobre água com resina de creosoto e um agente químico orgânico. Uma vez concentrado o metal, elimina-se o enxofre, por ustulação num forno, de onde esse elemento desaparece parcialmente em forma de gás. Acrescenta-se em seguida minério de ferro para formar escória com as impurezas.

A escória fundida é descarregada do forno a temperaturas entre os 1000 e 1300 °C. Quando a escória líquida é arrefecida lentamente ao ar, é despejada num poço, reservado simplesmente para permitir o contacto com o ar fresco, solidificando à temperatura ambiente, e formando-se assim um produto cristalino, denso e duro (Figuras 1 e 2) ((Gorai et al., 2003), [2]).



Figura 1. Escória de cobre arrefecida ao ar [3].



Figura 2. Porção de escória de cobre arrefecida ao ar, produzida na *Yorkshire Imperial Metals*, e transformada numa peça de mobília em 1765, sendo desde 1980 também uma peça do Museu de Swansea, no País de Gales [4].

Quando a mesma escória derretida é solidificada bruscamente vertendo-se o líquido em água, resulta numa escória granulada amorfa (Figura 3, 4 e 5). A escória de cobre granulada que se encontra usualmente é um silicato de ferro vítreo impuro, com pequenas proporções de cobre e sulfito de cobre e são mais vítreas e mais reactivas do que as escórias arrefecidas ao ar (arrefecimento lento) [2]. A velocidade de arrefecimento tem uma forte influência na composição mineralógica e consequentemente nas propriedades físicas e cimentícias das escórias não ferrosas.



Figura 3. Escória de cobre granulada.

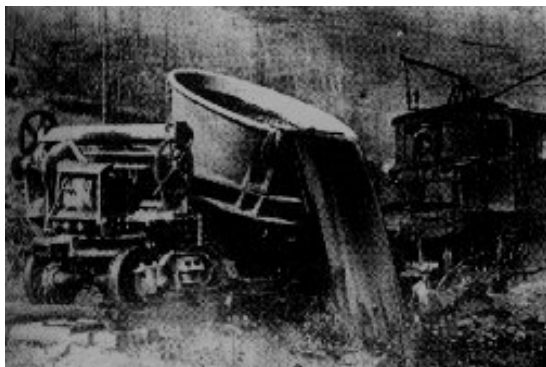


Figura 4. Formação de escória de cobre granulada por lançamento da escória líquida sobre o Granby River em Grand Forks, em 1940 [5].



Figura 5. Panorama actual de Grand Forks [5].

A composição química das escórias varia pois, com a origem do minério, o tipo de forno e o processo de arrefecimento usado.

Produção Mundial

Actualmente o cobre destaca-se como sendo um dos três materiais metálicos de maior necessidade mundial, a par do aço e do alumínio (Moura, 2000).

Noventa por cento das reservas mundiais de cobre estão localizadas em quatro regiões:

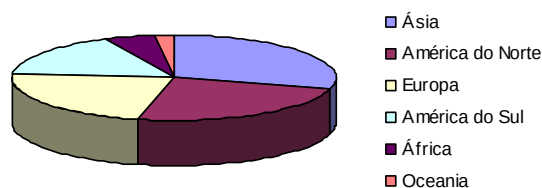
- vertente ocidental dos Andes (Chile e Peru);
- montanhas rochosas e área dos grandes lagos, nos Estados Unidos;
- planalto central africano (Zaire e Zâmbia);
- escudo pré-cambriano do centro da América do Norte (Canadá e Estado do Michigan, Estados Unidos).

As regiões mundiais que mais produzem cobre, logo escória de cobre, são as apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Regiões de maior produção de escória de cobre (Gorai et al., 2003)

Regiões	Produção de escória de cobre/ano em milhões de toneladas
Ásia	7,26
América do Norte	5,90
Europa	5,56
América do Sul	4,18
África	1,23
Oceania	0,45

Maiores regiões produtoras de cobre



Por cada tonelada de cobre produzido, são geradas cerca de 2,2 toneladas de escórias, e por ano, a produção mundial deste metal gera 24,6 milhões de toneladas de resíduo (Gorai et al., 2003).

2.2.3 Aplicações da escória de cobre

Como já referido, as escórias de cobre têm actualmente várias aplicações como materiais de enchimento e lastro, abrasivos e ferramentas de corte, material na produção de vidro e tijoleiras cerâmicas, agregados para misturas de asfalto, agregados finos para betão, substituto parcial do cimento no betão; e ainda como matéria-prima na produção de cimento, entre outros (Gorai et al., 2003), (Al-Jabri et al., 2005). De seguida apresentam-se mais detalhadamente estas aplicações.

Ferramentas abrasivas –granalha de cobre

A escória resultante da extracção do cobre é muito adequada à decapagem de superfícies metálicas, como abrasivo (Figuras 6, 7, 8 e 9), devido ao seu baixo custo, dureza e granulometria, sendo estas características comparáveis às dos materiais abrasivos tradicionais. Quando utilizada nesta aplicação, a escória de cobre é denominada de granalha de cobre. A granalha de cobre é portanto extensamente usada e comercializada na indústria de ferramentas abrasivas. Depois de usada, a granalha de cobre batida não pode ser reutilizada para o mesmo fim, sendo de novo constituída como resíduo, e o seu único destino o depósito em aterro.



Figura 6. Decapagem de superfícies metálicas [6].



Figura 7. Decapagem de superfícies metálicas [7].



Figura 8. Decapagem de superfícies metálicas [8].

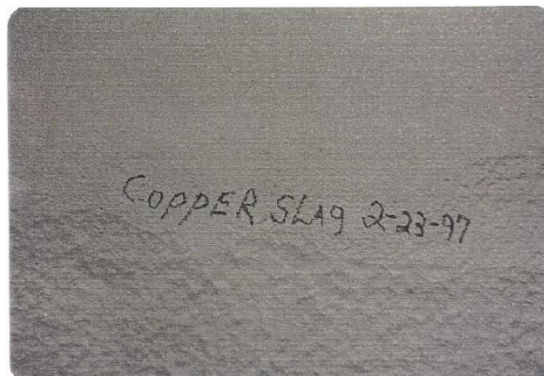


Figura 9. Superfície tratada com escória de cobre [9].

Ferramentas de corte

O uso da escória de cobre como filler em substituição do convencional filler de *lithophone*, em ferramentas de corte, foi estudado por Szyrle et al. (1988). O filler da escória de cobre (partículas de tamanho inferior a $150\ \mu\text{m}$) foi adicionado a uma mistura de um pó abrasivo, com um pó de resina *novolak*, uma resina líquida de fenol formaldeído e um pigmento vermelho de ferro, que foi compactada e endurecida durante 16 horas a temperaturas inferiores a 180°C . O disco resultante foi usado no corte de uma haste de aço de 60mm de diâmetro a 3800rpm. As propriedades de corte das ferramentas assim fabricadas revelaram-se superiores às das ferramentas de filler *lithophone* convencional (Gorai et al., 2003).

Vidro

As escórias de cobre também podem ser usadas para produzir vidros coloridos, como constataram Dongping et al. (1997) citados por Gorai et al. (2003). Estes investigadores realizaram uma mistura de escória (12 a 43 %), sílica (35 a 53 %), cal (5 a 18 %) e sódio (15 a 25 %) que foi fundida a 1300°C para se obter vidro colorido. A cor do vidro varia sequencialmente desde o verde, o amarelo esverdeado, o castanho esverdeado e o preto esverdeado com o aumento da quantidade de óxido de ferro na composição do vidro.

Telhas e tijoleiras cerâmicas

Sirajiddinov et al. (1993), estudou o uso de escória de cobre como substituto de feldspatos na produção de telhas cerâmicas. A resistência mecânica das telhas feitas com argila e escória de cobre aumentou significativamente em comparação com telhas correntes devido à formação de uma fase líquida na cozedura que tem um efeito endurecedor durante a solidificação.

Marghussian et al. (1999) estudaram a incorporação de escórias de cobre na produção de tijoleiras não vitrificadas. Realizaram diversas misturas, sendo que a que mostrou melhores resultados foi a mistura de 40% de escória de

cobre com argila e areia, cozida a 1025°C durante 1 hora. Os resultados revelaram que são respeitados os limites das normas de tijoleiras, oferecendo uma resistência à flexão de 57 MPa, um valor de absorção de água de 2% em peso, elevada dureza e uma boa resistência aos ácidos. Verificou-se que durante a cozedura, há uma difusão dos átomos das partículas que estão em contacto umas com as outras, o que é conhecido por *sintering*. Como resultado do *sintering*, as partículas diminuem de quantidade mas tornam-se maiores e os poros são eliminados. A resistência dos materiais cozidos deve-se ao imbricamento entre os cristais (Yet-Ming Chiang et al. (1997).

Agregados em misturas de asfalto

O uso de escórias de cobre como agregados em misturas de asfalto para pavimentos foi investigado pela entidade *Transportation Research Board*, em Washington. Na Califórnia, a parte fina da escória de cobre tem sido usada para esse efeito, assim como na Geórgia, com o intuito de melhorar a estabilidade dessas misturas. Embora seja raramente usada no Michigan, as especificações do Departamento de Transportes do Michigan consideram a escória de cobre como um agregado convencional para misturas asfálticas para pavimentos (Gorai et al., 2003).

Também no Canadá, já em 1996, era usada aproximadamente 45% da escória de cobre produzida nas siderúrgicas como base para construção, lastro para vias-férreas e aterros. No entanto, à mesma data, os Estados Unidos da América ainda não conduziam as suas escórias de cobre para esses fins apesar de se estimar que só o estado do Arizona produzisse 20000 toneladas de escória de cobre por ano (Tixier et al., 1999 e Mobasher et al., 1996).

As características técnicas das escórias que são avaliadas para aplicação como agregado convencional para misturas asfálticas para pavimentos, são comparadas com as características correspondentes estabelecidas para os agregados naturais e com as especificações para materiais de construção de estradas, sendo factor decisivo para tal aplicação a sua estabilidade volumétrica (Geiseler, 1996).

Cimento, Betão e Elementos Pré-fabricados

A utilização de escória de cobre como agregado e substituto do cimento em argamassas e betões, devido à sua importância no âmbito desta tese, será desenvolvida mais adiante.

2.3 Caracterização da escória de cobre

2.3.1 Caracterização química

O conhecimento da composição química da escória é de fundamental importância para se preverem as reacções que poderão suceder consoante o seu tipo de aplicação.

Apresenta-se na Tabela 2 a composição química de escórias de cobre de várias origens, obtidas por diversos investigadores.

A composição química obtida por Moura (2000) refere-se a uma escória proveniente da siderúrgica *Caraíba Metais*. É indicado um teor em óxidos $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$ de aproximadamente 84%, o que a caracteriza como pozolânica, segundo a norma brasileira, podendo ser utilizada para a produção de materiais cimentícios.

A escória de cobre do trabalho de Al-Jabri et al. (2005) é originária da *Oman Mining Company*, que produz anualmente cerca de 60.000 toneladas deste resíduo. A composição química desta escória indica um teor em óxidos $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$ de aproximadamente 89,3%, ligeiramente superior à anterior.

O estudo de escórias de cobre de várias unidades de produção nos E.U.A., realizado por Mobasher et al. (1996), revela que todas contêm um total de óxidos superior a 95%. Os autores compararam a composição química destas escórias com a de pozolanas naturais concluindo que o somatório da percentagem dos óxidos $CaO + SiO_2 + FeO$ de todas as escórias excede 70% dos exigidos pela normalização para que ocorra actividade pozolânica.

A composição química da escória de cobre usada nos estudos de Zain et al. (2004) é granalha batida, já usada como abrasivo em processos de decapagem de superfícies metálicas pintadas.

Tabela 2. Composição química de escórias de cobre de várias origens.

Compostos Químicos		Quantidade (%)								
		Moura (2000) [Brasil]	Al-Jabri et al. (2005) [Sultanato de Oman]	(Mobasher et al., 1996) [E.U.A.]						Zain et al. (2004) [Malásia]
		Caraíba Metais	Oman Mining Company	Copper Queen	Detroit	Prince	Old- Dominion	United Verde	Bisbee	Pasir Gudang
Óxido de silício	SiO ₂	26,0	33,05	24.7	34.34	27.16	27.23	35.79	28	31
Trióxido de ferro (hematite)	Fe ₂ O ₃	55,0	53,45	44.8	32.27	34.62	51.3	37.89	29	36
Tetraóxido de ferro (magnetite)	Fe ₃ O ₄	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	3,3	2,79	15.6	11.64	14.7	5.22	8.29	27	6
Óxido de cálcio	CaO	2,0	6,06	10.9	10.13	17.42	5.14	12.98	9	4
Óxido de magnésio	MgO	2,7	1,56	1.7	2.3	3.51	2.54	0.75	-	-
Óxido de sódio	Na ₂ O	1,1	0,28	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de potássio	K ₂ O	0,6	0,61	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de titânio	TiO ₂	0,5	0	-	-	-	-	-	-	-
	MnO	0,1	0,06	0.4	8.05	0.49	1.65	-	-	-
Óxido de cobre	CuO	1,4	0,46	-	-	-	3.76	2.59	-	0.5
Cobre	Cu	-	-	2.1	-	1.64	-	0.18	0.32	-
Sulfato	SO ₃	-	1,89	-	-	-	-	-	-	-
Cloro	Cl	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-
Trióxido de crómio	Cr ₂ O ₃	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de zinco	ZnO	1,0	-	-	-	-	-	-	-	1
Trióxido de arsénio	As ₂ O ₃	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SnO ₂	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Molibdénio	MoO ₃	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de chumbo	PbO	0,1	-	-	-	-	-	-	-	0.28
Perda na ignição		-	0	-	-	-	-	-	-	<1
IR		-	0	-	-	-	-	-	-	-
Total	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃	84	89,29	-	-	-	-	-	-	73
	CaO+SiO ₂ +FeO	-	-	85.1	78.25	76.38	83.75	81.97	84	-

Gorai et al. (2003), que reuniu informação da composição química de escórias de vários países tais como o Irão, a Turquia, o Chile, a Índia e os E.U.A., concluiu que a composição típica da escória de cobre é a que se indica na Tabela 3.

Tabela 3. Composição típica da escória de cobre (Gorai et al., 2003)

Compostos Químicos	Quantidade (%)
SiO ₂	35 - 40
Al ₂ O ₃	0 - 10
Fe	30 - 40
CaO	0 - 10
Cu	0,5 - 2,1

Actualmente, a tecnologia dos modernos altos-fornos, produz variabilidades muito pequenas nas composições, quer do metal quer das próprias escórias, para minérios de uma única origem (Mukherjee, 2004).

O extenso estudo sobre a composição química e avaliação do perigo ambiental de escórias de cobre realizado por Alter (2005) revela que a variabilidade das análises químicas realizadas a 28 escórias comerciais dos Estados Unidos, Canadá e Chile, produzidas por um período de 20 meses consecutivos, revelaram baixos coeficientes de variação.

Existem contudo óxidos hidratáveis que podem também estar presentes na composição de algumas escórias não ferrosas de algumas origens, onde se incluem as escórias de cobre, e que potencialmente contribuem para a instabilidade volumétrica. É de notar que também um elevado índice de ferro nestas escórias limita a sua hidraulicidade e torna difícil a moagem [2].

2.3.2 Caracterização mineralógica

Mobasher et al. (1996), recorreram à difracção quantitativa de raios X (DQRX) para a caracterização de uma escória proveniente dos E.U.A., da qual obtiveram o padrão da Figura 10, onde os picos revelam a presença de magnetite (Fe₃O₄) e de faialite (Fe₂SiO₄), sendo estas as substâncias com maior presença na escória. Algumas das diferenças entre o observado e os padrões de referência para a faialite podem ser atribuídos ao magnésio que substitui átomos férreos.

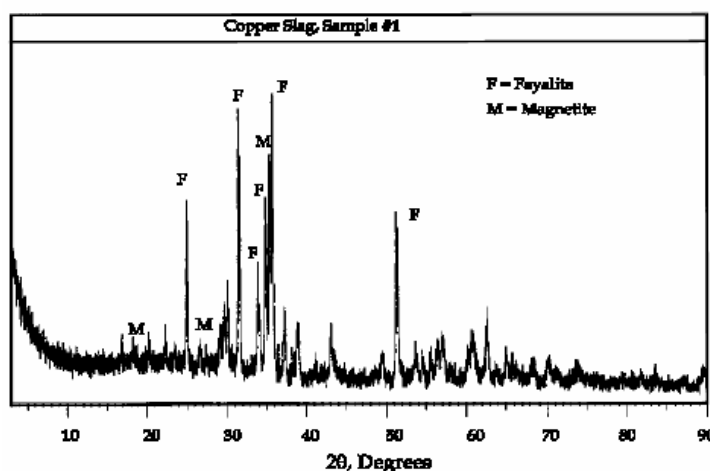


Figura 10. Difractograma de uma amostra da escória de cobre americana (Mobasher et al., 1996).

Moura et al. (2004) também recorreu à difracção de raios X (DRX) para identificar o grau de amorfização dos compostos presentes na composição química da escória de cobre. A Figura 11 apresenta o difractograma de raios X de uma amostra de escória onde se observa uma grande incidência de picos, o que indica que a estrutura da escória é predominantemente cristalina. O difractograma mostra também a presença de compostos do grupo das olivinas (faialite e faialite magnesiânica) e magnetite. De acordo com Bittencourt (1992) citado por Moura et al. (2004), a escória de cobre é, de uma maneira geral, composta por silicatos muito estáveis formados a altas temperaturas, dos quais ocorrem com maior predominância a faialite (Fe_2SiO_4), a faialite magnesiânica ($(\text{FeMg})_2\text{SiO}_4$) e a magnetite (Fe_3O_4), o que está em concordância com o observado por Mobasher et al. (1996). Por comparação das imagens dos dois difractogramas (Figura 10 e 11), constata-se a semelhança da constituição mineralógica da escória gerada nos Estados Unidos (Mobasher et al., 1996) e da gerada no Brasil (Moura et al., 2004).

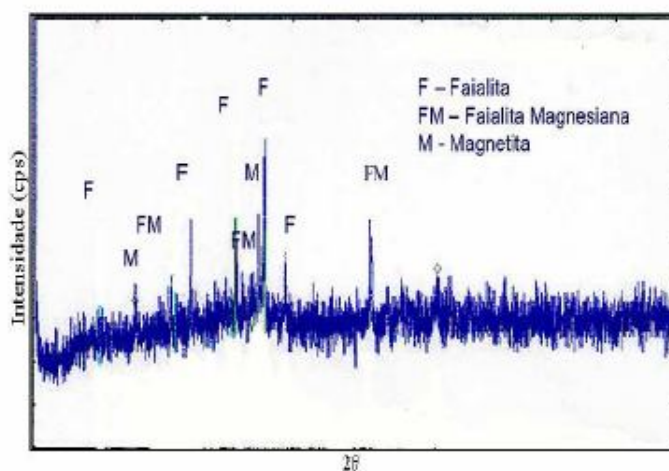


Figura 11. Difractograma de uma amostra da escória de cobre brasileira (Moura et al., 2004).

2.3.3 Actividade Pozolânica

É sabido que o principal inconveniente do cimento Portland na resistência a certas agressões de natureza química é a elevada concentração em hidróxido de cálcio que necessita de ser conservada no seu interior para que os principais componentes hidratados mantenham a sua estabilidade. Com efeito, esses componentes nobres do cimento: o silicato e o aluminato tricálcicos, quando se hidratam estão em contacto com soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio para se manterem em equilíbrio. Por outro lado, esta elevada alcalinidade é propícia à reacção expansiva dos sulfatos com os aluminatos, à reacção dos álcalis do cimento com a sílica amorfa ou mal cristalizada e conduz também a maior vulnerabilidade à dissolução pelas águas que porventura percorrem o betão (Coutinho, 1997).

Adições como pozolanas ou escórias de alto-forno modificam o equilíbrio químico no interior do cimento, promovendo a fixação do hidróxido de cálcio, combinando-se com ele e dando origem a componentes menos ricos em cálcio do que os provenientes da hidratação do cimento Portland mas com propriedades ligantes tão importantes como as daqueles. A concentração em hidróxido de cálcio é reduzida até limites em que as reacções expansivas mencionadas não são possíveis, o calor de hidratação é diminuído sem que as tensões de rotura sejam comprometidas e portanto o cimento apresenta resistências químicas largamente superiores às do Portland bem como resistências mecânicas tão boas ou até, em alguns casos ainda superiores. O mesmo sucede com a utilização de escórias de alto-forno que, quando em quantidade e qualidade adequadas, conduz a um produto final com as características dos cimentos pozolânicos e resistência química por vezes ainda superior, embora as resistências mecânicas possam não ser tão elevadas (Coutinho, 1997).

As pozolanas são produtos naturais (rochas lávicas alteradas por meteorização) ou artificiais (argilas desidratadas) constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que se combinam, em presença da água com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, como já se referiu.

Quanto às escórias de alto-forno, os seus principais componentes são os mesmos do cimento – óxidos de cálcio, silício e alumínio, embora que em proporções diferentes (Tabela 4). Dada a quantidade de cal nas escórias de alto-forno ser suficiente para permitir a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, estas podem ser utilizadas com cimentos, sem qualquer adição. O mesmo não sucede com as escórias de cobre que, como será referido adiante, deverão preferencialmente ser activadas com um composto alcalino para que essas reacções dos componentes hidratados se processem.

No entanto, apesar de isoladamente a escória de alto-forno se comportar como um verdadeiro cimento, as suas reacções são muito lentas, sendo necessário criar um meio alcalino para que se revelem as suas propriedades hidráulicas. Com isto, a diferença principal entre a pozolana e a escória de alto-forno é precisamente o facto de a

primeira não ter, por si só, propriedades hidráulicas, enquanto que a escória de alto-forno as possui. A primeira combina-se com a cal do cimento, e a segunda apenas necessita de um meio altamente alcalino (pH 12) para provocar as suas propriedades hidráulicas (aquando em misturas sem cimento).

Efectivamente a actividade pozolânica é, por si só, a capacidade do material designado por pozolana se combinar com o já citado hidróxido de cálcio. Contudo, para que a reacção aconteça é necessário que a sílica e a alumina não apresentem um elevado grau de cristalização, sendo a reacção tanto maior quanto mais afastada estiver a pozolana do estado cristalino. As escórias de cobre preenchem este requisito como é descrito de seguida.

No que concerne à sua constituição, a escória de cobre é essencialmente baseada nos mesmos compostos que a escória de alto forno, embora que em proporções diferentes, como se indica na Tabela 4. Durante a sua produção, o arrefecimento súbito que provoca a vitrificação, tipicamente no processo granulado, previne que a sílica e a alumina sejam transformados em cristais, o que é conveniente, pois adquire assim maior actividade pozolânica mediante o que já se citou anteriormente.

Tabela 4 Comparação da constituição típica da escória de cobre (Gorai et al., 2003) com a composição típica da escória de alto-forno (Coutinho, 1997)

Compostos Químicos	Escória de cobre (%)	Escória de alto-forno (%)
SiO ₂	35 - 40	25 - 34
Al ₂ O ₃	0 - 10	12 - 20
Fe	30 - 40	-
CaO	0 - 10	42 - 50

A principal disparidade nas composições apresentadas na Tabela 4 reside na quantidade de óxido de cálcio que, na escória de cobre é muito inferior à presente na escória de alto-forno. Shi et. al (2000) referem contudo que, desde que a escória de cobre tenha uma pequena quantidade de óxido de cálcio pode-se afirmar que possui propriedades pozolânicas.

Para se ultrapassar esta questão é comum recorrer-se a activadores alcalinos para activar a formação de silicatos de cálcio hidratados, estáveis e cimentícios nas misturas de escória de cobre. Como exemplo citam-se alguns trabalhos onde são referidos vários activadores que já foram usados em combinação com a escória de cobre: Mobasher et. al (1996) e Ariño et al. (1999) usaram 1,5% de cal hidratada; Al-Jabri et al. (2005) usaram 1,5% de pó da produção de cimento (*cement by-pass dust*); e Deja et al. (1994) citados por Shi et al. (2000) usaram hidróxido de sódio. Esta medida é favorável não só pela primeira razão apresentada como também pela elevada quantidade de

ferro presente na composição das escórias de cobre, que é um factor que limita a sua hidraulicidade, como também já se mencionou.

Apenas a partir das características químicas e físicas da escória de cobre, Moura (2000) apontou a possível aplicação deste resíduo como substituto parcial do cimento Portland em betão, dado que praticamente 90% da composição química é resultante do somatório $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$, podendo a escória ser considerada como potencialmente pozzolânica segundo a norma NBR 12653-1992, como indica a Tabela 5. No entanto, para se avaliar correctamente a actividade pozzolânica devem ser realizados ensaios mais específicos.

Tabela 5 Exigências químicas para materiais pozzolânicos (NBR 12653-1992) (Moura, 2000)

Característica exigida	NBR 12653, 1992	Escória de cobre
$(Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3) - \text{min. (\%)}$	70	84,3
$SO_3 - \text{max. (\%)}$	5	0
Álcalis disponíveis em $Na_2O - \text{max. (\%)}$	1,5	1,1
Perda ao fogo	6,0	-
Humidade – max. (%)	3,0	0,2

Moura (2000), determinou a relação entre resistência média à compressão axial aos 28 dias, de provetes de uma argamassa com 35% de substituição, em volume absoluto, do cimento pelo material supostamente pozzolânico, escória de cobre, e a resistência média à compressão axial de provetes de uma argamassa sem substituição. A escória foi moída e seguidamente peneirada com o peneiro de abertura 0,075mm, e a sua granulometria determinada com recurso ao granulómetro de difracção laser. O diâmetro médio obtido foi de $27,2 \mu m$. A quantidade de grãos com diâmetro inferior a $45 \mu m$ foi de 68%, o que supera os 66% estabelecidos pela norma NBR 12653 (1992). Os resultados dos ensaios, apresentados na Tabela 6 indicaram que a escória de cobre obedecia às especificações de uma pozzolana classe E, de acordo com a norma NBR 12653 (1992) (Moura, 2000).

Tabela 6 Resultados do ensaio de actividade pozzolânica da escória de cobre com cimento Portland (Moura, 2000)

Argamassa	Água (%)	Consistência (mm)	a/(c+e)	Resistência média (MPa)	Índice de actividade
65% CP I S + 35% escória de cobre	98	227	0,45	31,2	87
100% CP I S	100	226	0,50	35,8	100
Especificações NBR 12653 (1992)	<110	225 ± 5	-	-	≥ 75

Efectivamente no ensaio para determinação da pozolanicidade baseado no método químico de determinação da pozolanicidade de cimento pozolânico, norma NBR 5753 (1991), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7, que confirmam a actividade pozolânica da escória de cobre.

Tabela 7 Resultados do ensaio de determinação da pozolanicidade da escória de cobre (NBR 5753, 1991) (Moura, 2000)

Amostra	Milimoles (OH-/L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanicidade
45% CP I S + 55% escória de cobre	40,3	8,3	Sim
100% CP I S	53,7	10,2	Não

Com o mesmo objectivo de estudar a actividade pozolânica, Tixier et. al (1999) estudaram as seguintes reacções:

- Reacção da escória de cobre com a cal (Ca(OH)_2) (activador das reacções de hidratação);
- Reacção da escória de cobre com o cimento Portland.

Para o estudo da reacção a) os investigadores prepararam a escória de cobre com a pasta de cal hidratada e estudaram a evolução da hidratação do cimento por monitorização dos picos dos componentes não hidratados obtidos por difracção quantitativa de raios X (DQRX). Para o estudo da reacção b) os investigadores tomaram o mesmo procedimento mas fazendo variar a quantidade de cal na pasta de cimento com escória de cobre, verificando ainda que podem ser obtidos, por análises de termogravimetria, resultados mais exactos da quantidade de hidróxido de cálcio ainda disponível. A reactividade da escória de cobre depende, portanto, da finura até à qual esta é moída (a reactividade aumenta com a finura), da sua composição química, e ainda do seu grau de vitrificação (de modo a garantir o estado amorfo) [2].

2.3.4 Impacto Ambiental

As análises de composições químicas e mineralógicas são essenciais mas não suficientes para uma avaliação de impacto ambiental das escórias (Geiseler, 1996). Note-se que o principal impacto ambiental que a reutilização de materiais secundários pode ter é a lixiviação de substâncias perigosas para o solo e para as águas superficiais e subterrâneas, tais como sais, metais, e substâncias orgânicas (Hartlén, 1996).

Tem-se constatado, nos últimos anos, que os resultados de ensaios de lixiviação dependem de vários factores, sendo preponderante o facto de o resíduo estar isolado ou incorporado num outro material. Assim, a metodologia dos ensaios de lixiviação e a interpretação dos seus resultados para a avaliação do impacto que um resíduo terá numa determinada circunstância, deverá atender à aplicação futura a que se destina (Hartlén, 1996). Como

exemplo, se o resíduo vai ser incorporado em betão, e se este, por sua vez, for aplicado na construção de elementos de fundação de uma construção, deve ser dada uma certa atenção na escolha do líquido lixiviante. Note-se que as águas subterrâneas e as águas das chuvas não têm geralmente um pH alcalino. Na verdade, as águas das chuvas são ligeiramente ácidas, e portanto a composição do lixiviante escolhido deverá ser neutra a ácida (Glasser, 1996).

No que se refere ao procedimento de um ensaio de lixiviação, de um modo geral, é indicado que se emerja o provete num líquido lixiviante padrão, e que periodicamente a composição deste líquido seja analisada. No entanto existem diferenças entre os diversos métodos de ensaios lixiviação de vários países, que divergem significativamente (Glasser, 1996) nos procedimentos utilizados, pelo que se deve ter alguma prudência na interpretação e generalização dos resultados.

Moura (2000) caracterizou ambientalmente a sua escória de cobre e os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilidade estão apresentados na Tabela 8 e 9 respectivamente.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de lixiviação (Moura,2000)

Elemento (mg/l)	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Fenóis *	0,05	-
Fluoreto *	0,16	150,0
Arsénio *	<0,002	5,0
Cádmio *	<0,01	0,5
Chumbo *	<0,01	5,0
Cobre	0,69	-
Cromo total *	<0,05	5,0
Mercúrio *	<0,0001	0,1
Prata	<0,05	5,0
Vanádio	0,04	-
pH inicial = 5,6		
pH final = 5,0		

* Substância considerada tóxica

Tabela 9. Resultados dos ensaios de solubilidade (Moura,2000)

Elemento (mg/l)	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Cloreto *	<1	250
Nitrogénio nitrato	0,05	10
Cianeto *	<0,01	0,1
Fenóis *	<0,001	0,001
Fluoreto *	0,22	1,5
Sulfato	11	400
Alumínio	<1	0,2
Arsénio *	<0,002	0,05
Bário *	<1	1,0
Cádmio *	<0,001	0,005
Chumbo *	0,01	0,05
Cobre	0,5	1,0
Cromo total *	<0,05	0,05
Ferro	0,75	0,3

Mercúrio *	<0,0001	0,001
Manganês	<0,05	0,1
Zinco	0,62	5
Prata *	<0,05	0,05

* Substância considerada tóxica

O investigador observou que não foi lixiviada nem solubilizada, acima dos limites, nenhuma substância considerada tóxica concluindo que a escória de cobre não apresenta risco para a saúde humana nem para o meio ambiente. No entanto, como foi solubilizado um teor de ferro acima dos limites da norma brasileira, a escória de cobre neste estudo foi considerada como sendo de Classe II – não inerte (Moura, 2000).

Alter (2005) fez a avaliação do perigo ambiental de 28 escórias de cobre comerciais dos Estados Unidos, Canadá e Chile, produzidas por um período de 20 meses consecutivos. Os resultados revelaram que as concentrações de metais pesados tóxicos nas escórias eram baixas e a distribuição de frequências dos valores era pouco alargada. As quantidades de metais pesados extraídos por um procedimento lixiviação com um ácido agressivo, também foram baixas e ainda inferiores aos níveis regulamentares dos E.U.A. para a água potável. A partir destes resultados, a *U.S. Environmental Protection Agency* determinou que as escórias de cobre não são, efectivamente, resíduos perigosos.

Quando se trata de escória de cobre batida (granalha) está implícito que este resíduo incorpora também resíduos de tinta resultantes da decapagem de superfícies metálicas pintadas. Na opinião de Zain et al. (2004), o difundido uso de chumbo e outros metais pesados em pinturas protectoras de superfícies, faz com que aumente também a quantidade de metais pesados presentes na granalha batida. Este facto conduz a que a granalha possa ser considerada como um resíduo perigoso para o ambiente. Estes investigadores trabalharam com este tipo de escória de cobre, e realizaram ensaios de lixiviação em provetes cúbicos de 25x25x25mm e em fragmentos de provetes, realizados com argamassa de 10% de escória de cobre em substituição do cimento Portland. O líquido lixiviante usado foi ácido acético de pH 2,88, aproximadamente. Os resultados mostraram quantidades lixiviadas de cobre, níquel, chumbo e zinco abaixo dos limites da norma. No entanto verificou-se que a concentração de zinco lixiviado aumentava à medida que aumentava também a idade dos provetes, embora esses valores ao fim de um ano de lixiviação se mantivessem igualmente abaixo dos limites estabelecidos. Os resultados destes ensaios permitem concluir que mesmo a escória de cobre com resíduos de tinta, pode ser aplicada em percentagens moderadas em misturas cimentícias sem preocupações para o ambiente.

2.3.5 Caracterização física

Composição granulométrica

De um modo geral, as dimensões da escória de cobre granulada variam entre 4.75mm (Peneiro 3/4) e 0.075mm (Peneiro Nº 200) [2].

As características físicas originais da escória de cobre estudada por Moura (2000), revelavam a granulometria apresentada na Tabela 10, dimensão máxima de 4,8 mm e módulo de finura de 3,4. Após moagem para a utilização como substituição parcial do cimento Portland, as mesmas partículas de escória apresentavam um diâmetro médio de $27,2 \mu\text{m}$, sendo de 68% a quantidade de grãos com diâmetro inferior a $45 \mu\text{m}$ (Tabela 11).

Tabela 10. Composição granulométrica da escória de cobre estudada por Moura (2000)

Abertura da malha (mm)	% Retida acumulada
9,5	-
6,3	1
4,8	3
2,4	18
1,2	51
0,6	84
0,3	92
0,15	96
<0,15	100
Dimensão máxima (mm)	4,8
Módulo de finura	3,4

O módulo de finura da escória de cobre originária do Japão, usada no trabalho de Shoya et al. (1999) é de 2,2 e apresenta uma curva granulométrica muito semelhante à da areia natural usada no betão de controlo.

A granulometria da escória de cobre, depois de moída, avaliada por Tixier et al. (1999) através do *sonic sifter* apresentava 40% das partículas inferiores a $45 \mu\text{m}$ e 10% inferiores a $20 \mu\text{m}$, podendo ser consideradas de granuladas a finas com dimensão máxima de 55 a $60 \mu\text{m}$. Na escória de cobre de Ariño et al. (1999) 50% das partículas eram inferiores a $50 \mu\text{m}$ e 70% eram inferiores a $100 \mu\text{m}$. Estas características estão resumidas na Tabela 11.

Tabela 11. Resumo das características das escórias, depois moídas, estudadas por vários autores

	Moura (2000)	Tixier et al. (1999)	Ariño et al. (1999)	Zain et al. (2004)
Diâmetro médio (μm)	27,2	-	-	-
Dimensão máxima (μm)	-	55 a 60	-	-
% partículas de diâmetro inferior a 45 μm	68	40	50	80

Finura

A influência da finura da escória de cobre é preponderante em misturas cimentícias, principalmente quando esta substitui parcialmente o cimento Portland, uma vez que o aumento da finura se reflecte sempre numa maior actividade pozolânica. É fundamental encontrar o valor óptimo da finura para se beneficiar ao máximo das suas potencialidades pozolânicas, devendo, pelo menos, ser próxima da do cimento.

Ao trabalhar com as escórias de cobre, Moura (2000) observou que a resistência à compressão axial aumentava com a diminuição do tamanho médio dos grãos. Nos trabalhos de Ariño et al. (1999) e Tixier et al. (1999), a superfície específica da escória de cobre usada como substituição parcial do cimento era de 270 m²/kg e a do cimento Portland Tipo I era de 346 m²/kg. Os investigadores admitiram que a escória de cobre era tão fina quanto o cimento. Nos estudos de Al-Jabri et al. (2005) a superfície específica da escória de cobre obtida foi de 126,1 m²/kg e a do cimento bem como a do pó de cozedura do cimento, que foi usado como activador das reacções de hidratação, foram de 335,7 m²/kg e de 482,4 m²/kg, respectivamente. Zain et al. (2004) moeram a escória até obter um pó em que 80% das partículas tivessem diâmetro inferior a 45 μm (Tabela 11.), procurando que a sua finura fosse próxima da finura do cimento.

Quando se usa a escória de cobre como agregado fino no betão, a sua finura não é tão relevante, sendo de maior interesse a sua granulometria uma vez que nesta aplicação não se pretende à partida tirar proveito das suas propriedades pozolânicas, mas sim das suas propriedades de dureza e abrasão, entre outras.

Massa volúmica

Como regra geral, pode-se afirmar que a massa volúmica da escória de cobre aumenta com a quantidade de ferro na sua composição, sendo correntes valores entre 2800 a 3800 kg/m³, superior portanto à dos agregados convencionais para betão. Consoante o processo de arrefecimento da escória, esta apresenta-se com uma massa volúmica maior (arrefecida ao ar) ou menor (arrefecida bruscamente – granulada [2]. Como exemplo citam-se os

valores encontrados por Moura (2000): 3870 kg/m³; Mobasher et al. (1996): 3500 kg/m³; Al-Jabri et al. (2005): 3450 kg/m³; Zain et al. (2004): 3500 kg/m³; e Shoya et al. (1999): 3630 kg/m³.

Outras características

A escória arrefecida ao ar tem cor preta, aspecto vítreo e brilhante e uma forma regular, embora as suas superfícies sejam tipicamente angulares (Figura 12) ([2], Zain et al. (2004)).



Figura 12. Partículas de escória de cobre (x50) Zain et al. (2004).

Quanto à abrasão, as escórias de cobre, de uma maneira geral apresentam cerca de 22% de perda de material por abrasão de Los Angeles; o ângulo de atrito interno é de 40°; e a dureza é de 6 a 7 na escala de Mohs [2].

2.4 Escória de cobre moída como substituto parcial do cimento Portland em argamassa e em betão

Os primeiros estudos sobre a utilização das escórias de cobre nas composições de argamassas e betões datam de 1996 (Mobasher et al., 1996). Foram avaliadas as características mecânicas e os fenómenos de hidratação em misturas de argamassa e betão, contendo 5, 10 e 15%, em peso, de escória de cobre moída em substituição do cimento Portland, e ainda 1,5% de cal hidratada para a activação das reacções pozolânicas. A relação água/cimento usada foi de 0,4 e a dosagem média de cimento foi de cerca de 450 Kg/m³. Os resultados da resistência à compressão obtidos até aos 90 dias de cura indicaram um aumento significativo face às misturas de referência. Com o objectivo de compreenderem a contribuição da escória de cobre na hidratação das misturas os investigadores realizaram dois ensaios distintos: (i) medição do tempo de presa em pastas de cimento com 15% deste material, em peso de cimento, e com 1,5% de cal, tendo observado um atraso quer no tempo de início quer no tempo final de presa; (ii) monitorização das reacções de hidratação recorrendo à DQRX, conseguindo identificar um

aumento do pico referente aos produtos de hidratação. A porosidade destas misturas foi também avaliada com recurso à técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), que permitiu detectar diminuições da porosidade capilar, reflectindo uma maior densificação da microestrutura das misturas com escória de cobre relativamente às misturas de referência. De um modo geral estes investigadores concluíram que o uso de escórias de cobre tem diversos benefícios quer como material pozolânico, quer quando conjugado com o uso de cal, activador das reacções de hidratação, para melhorar o ganho de resistência mecânica.

Tixier et al. (1999) incorporaram escória de cobre moída na composição de betão por substituição parcial do cimento Portland. Observaram também um aumento da resistência à compressão, associada a uma menor porosidade; maior resistência às reacções álcalis-sílica; e melhoria da durabilidade do betão pela maior resistência ao ataque dos sulfatos. De um modo geral, os resultados obtidos indicam ser favorável o efeito das escórias de cobre como adição mineral ao betão.

Ariño et al. (1999) estudaram também o efeito da utilização de escória de cobre moída em três tipos de misturas: pasta de cimento Portland, argamassa e betão contendo até 15% de escória de cobre moída como substituição do cimento. Sendo o principal objectivo estudar o efeito da escória de cobre no comportamento mecânico do betão, analisaram a resposta tensão-deformação em ensaios de provetes cilíndricos dos betões à compressão, por meio de equipamento adequado para o efeito; ensaiaram provetes prismáticos à flexão analisando o padrão de fendilhação em ciclos de carga e descarga, recorrendo também a instrumentação específica.

Nos estudos de Moura (2000) e Moura et al. (2004) foram igualmente avaliadas as possibilidades do uso de escórias de cobre como substituição parcial do cimento Portland no betão. A escória de cobre foi caracterizada química, física e mineralogicamente, tendo sido também estudada a sua actividade pozolânica. Quanto ao risco ambiental, verificaram, por meio de ensaios de lixiviação e solubilização, que a escória de cobre não apresentava risco à saúde humana nem ao meio ambiente, sendo classificada como não inerte. Para a avaliação das características mecânicas, realizaram provetes de betão com 20% de escória de cobre como substituição do cimento, e com as relações a/c de 0,4, 0,5 e 0,6. Estudaram ainda a influência da substituição parcial de cimento por escória de cobre nas características relacionadas com a durabilidade do betão: a absorção por imersão e por capilaridade, a profundidade de carbonatação e a resistência ao ataque dos sulfatos. A análise dos resultados permitiu concluir que a substituição de 20% de cimento Portland por escória de cobre na composição do betão proporcionou um melhor desempenho em relação a todas as características estudadas.

Al-Jabri et al. (2005) realizaram um extenso estudo sobre o efeito da escória de cobre associada a um activador alcalino, nas características mecânicas do betão. O activador alcalino em causa foi o pó da produção do cimento (*cement by-pass dust* – CBPD ou *cement kiln dust* – CKD). Além do betão de referência foram produzidas duas misturas com diferentes proporções de escória de cobre e de pó da produção do cimento: uma constituída apenas

por 5% de escória de cobre em substituição do cimento Portland; e outra composta por 13,5% de escória de cobre e 1,5% de pó da produção do cimento. Para cada uma delas estudaram três relações a/c distintas: 0,5, 0,6 e 0,7. Foram produzidos provetes cúbicos e cilíndricos para avaliarem aos 7 e 28 dias a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. Os resultados mostraram que a mistura com 5% de escória de cobre em substituição do cimento Portland apresentavam resistências idênticas à da mistura de referência. A mistura com maior percentagem de substituição de escória de cobre (13,5%) revelou menores valores de resistência e, quanto aos valores do módulo de elasticidade do betão, não se verificaram efeitos significativos, especialmente para baixas quantidades de substituição.

Nos trabalhos de Zain et al. (2004) igualmente sobre a incorporação de escórias de cobre em misturas cimentícias, foi usada escória de cobre batida (granalha), acompanhada de resíduos de tinta como resultado do seu uso como abrasivo em processos de decapagem de superfícies metálicas pintadas. Foram produzidos provetes de argamassa com substituições até 10% desta escória de cobre moída, em peso de cimento, a partir dos quais realizaram ensaios para a avaliação, por lixiviação, da quantidade de metais pesados e também para a análise da resistência à compressão. Os resultados indicam que as quantidades de iões metálicos pesados lixiviados da matriz de cimento foram baixas e não excedem os valores limite indicados, podendo-se considerar ambientalmente segura a incorporação de quantidades de escória de cobre até 10% em misturas cimentícias. Os valores da resistência à compressão das argamassas com escória de cobre apresentaram-se inferiores à da argamassa de controlo, tendo sido observado os maiores valores de resistência para as argamassas com 5% de escória de cobre.

2.4.1 Caracterização do betão no estado fresco

Trabalhabilidade

De um modo geral, a trabalhabilidade parece não ser muito afectada com o aumento da percentagem de substituição de cimento por escórias de cobre no betão. Moura et al. (2004) revela que apesar dessa adição implicar um maior volume de finos na mistura, não houve influência na trabalhabilidade para percentagem de escória de cobre usada (20%).

Massa volúmica

A massa volúmica do betão está directamente relacionada com a massa volúmica de cada um dos seus constituintes e das suas proporções na mistura. A determinação desta propriedade do betão tem bastante importância quando um dos materiais apresenta, massa volúmica bastante superior à dos convencionais, como é o caso da escória de cobre. Contudo, na aplicação da escória de cobre no betão como substituição parcial do

cimento, esta questão parece não necessitar de grande preocupação, uma vez que no trabalho de Moura (2000) a massa volúmica do betão produzido com 20% de escória de cobre aumentou apenas 1,2% face ao betão de referência.

Tempo de início de presa

Ensaio realizados por Mobasher et al. (1996) indicaram que a escória de cobre atrasa quer o tempo de início, quer o tempo de final de presa da pasta de cimento. Estes efeitos retardantes são característicos dos materiais pozolânicos, podendo estes tempos ser reduzidos adicionando-se activadores alcalinos, como por exemplo cal hidratada.

O mesmo sucede para betões com substituição parcial do cimento Portland por escória de alto-forno. A sua presa final pode atrasar-se significativamente dependendo da temperatura ambiente e da quantidade de escória. As temperaturas baixas atrasam igualmente a presa inicial e, tem sido verificado que a 18°C, betão com substituição de 25% de cimento por escória de alto-forno, atrasa o tempo de presa até 3,5 horas (Mukherjee, 2004).

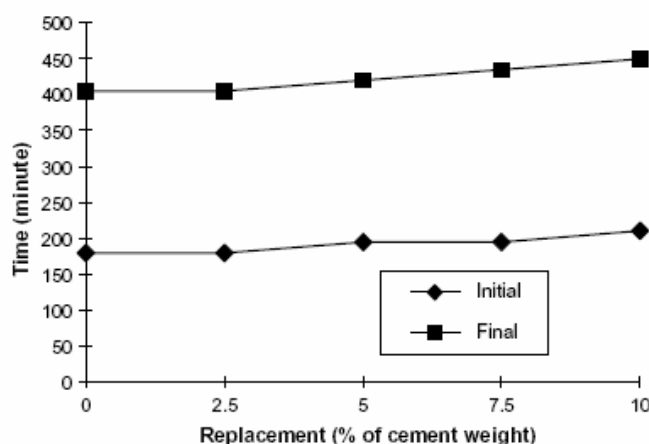


Figura 13. Tempo de presa de argamassas de escória de cobre batida (Zain et al., 2004).

Zain et al. (2004) constataram também que a escória de cobre batida também retarda a hidratação do cimento. Os tempos de início e final de presa foram medidos para quatro níveis de substituição de cimento Portland pela escória, como se apresenta na Figura 13, onde se pode observar que o tempo de presa aumenta com a quantidade de escória de cobre.

2.4.2 Caracterização do betão no estado endurecido

Resistência à compressão axial

No seu trabalho, Moura (2000) obteve valores da resistência à compressão do betão com 20% de escória de cobre como substituição do cimento, superiores aos valores do betão de referência, para todas as idades e para todas as relações a/c usadas (Figura 14). O maior aumento da resistência foi de 30% face ao betão de referência, verificado na relação a/c de 0,60.

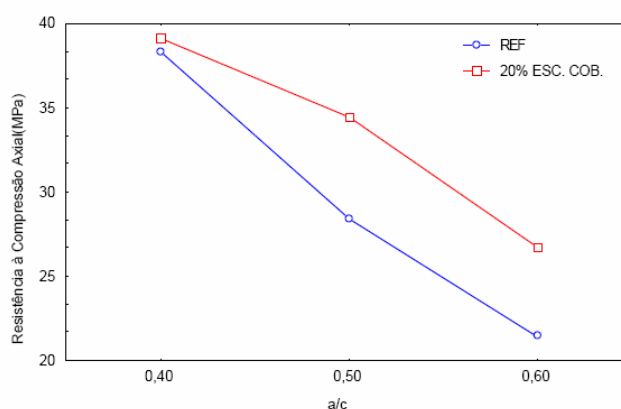


Figura 14. Resistência à compressão do betão em função da percentagem de escória de cobre e da relação a/c (Moura 2000).

O investigador atribui este comportamento à actividade pozolânica apresentada pela escória de cobre usada (87% - Tabela 6) e às dimensões reduzidas da escória (efeito *filler*), que proporcionaram uma maior densificação da matriz.

Mobasher et al. (1996) estudaram o desenvolvimento da resistência no tempo para três percentagens de escória de cobre moída: 5, 10 e 15% como substituição do cimento Portland, comparando-os com provetes de argamassa de referência. Os resultados da resistência à compressão aos 1, 7, 28 e 90 dias de cura estão apresentados na Figura 15 (média de três provetes por idade). Pode observar-se que o uso de escória de cobre reduz a resistência às primeiras idades enquanto que aumenta a partir dos 7 dias de cura até aos 90 dias de cura para todas as percentagens de substituição de escória estudadas.

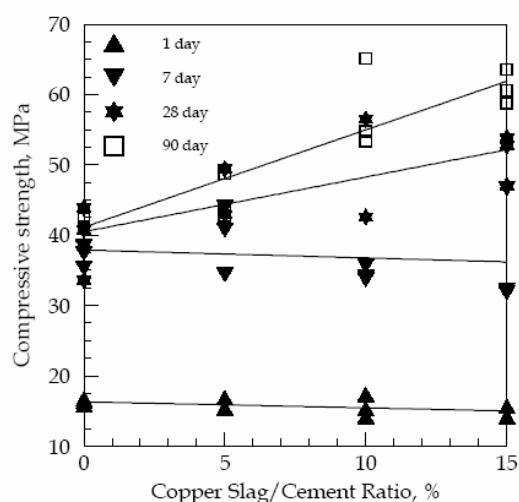


Figura 15. Efeito da escória de cobre na resistência à compressão de provetes de argamassa (Mobasher et al., 1996).

Note-se que os valores da resistência das misturas de escória de cobre são significativamente superiores aos correspondentes valores das misturas de referência. Com a adição de cal na mistura que contém a maior percentagem de escória de cobre (15% de escória de cobre e 1,5% de cal como activador), a resistência à compressão aumentou de 30 MPa ao 28º dia para 61 MPa ao 90º dia, reflectindo um aumento de 100% na resistência com o tempo. Esta tendência é também verificada em misturas sem uso de cal como activador, embora a adição de cal promova um maior ganho de resistência.

No entanto, os valores da resistência à compressão obtidos por Zain et al. (2004) em argamassas com quatro percentagens de substituição de cimento Portland por escória de cobre batida (granalha de cobre), representados na Figura 16, são sempre inferiores aos valores de resistência da argamassa de controlo, para várias idades de argamassas estudadas.

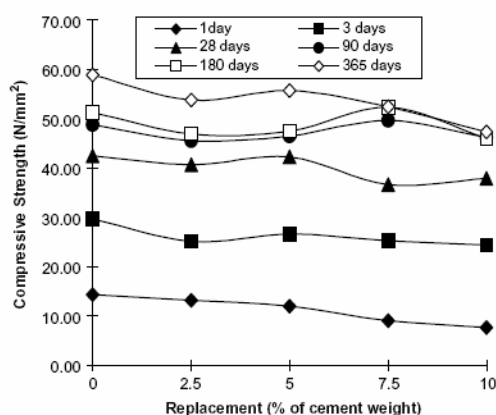


Figura 16. Resistência à compressão de argamassas com vários níveis de escória de cobre (Zain et al. 2004).

Os resultados da resistência à compressão de Al-Jabri et al. (2005) indicam que a adição de pequenas quantidades de escória de cobre, por exemplo 5%, tem um efeito na resistência do betão que pode ser negligenciável. Para as mais baixas relações água/cimento: 0,5 e 0,6, e 5% escória de cobre (mistura 2) obtiveram valores da resistência à compressão iguais ou até um pouco superiores aos do betão de referência (mistura 1). No entanto, quando se aumenta a quantidade de escória de cobre para 13,5% (mistura 3), existe uma redução considerável da resistência à compressão do betão em comparação com o betão de referência. Estes resultados estão apresentados nas Figuras 17 e 18 para os 7 dias de cura e 28 dias de cura, respectivamente.

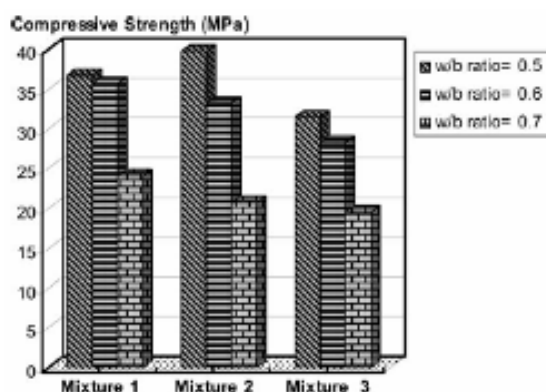


Figura 17. Média da resistência à compressão de cubos de betão aos 7 dias para as diferentes as misturas e relações a/c (Al-Jabri et al. 2005).

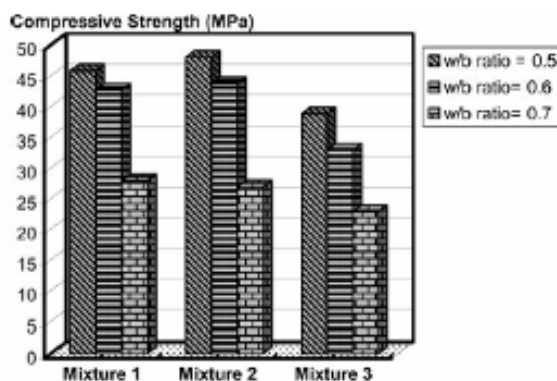


Figura 18. Média da resistência à compressão de cubos de betão aos 28 dias para as diferentes as misturas e relações a/c (Al-Jabri et al. 2005).

Al-Jabri et al. (2005) observou ainda que a resistência à compressão aos 28 dias da mistura 3, é aproximadamente comparável com a resistência à compressão aos 7 dias da mistura 1. Isto permitiu aos investigadores especular que, o uso de uma pequena quantidade de pó da produção de cimento (1,5%) como activador pareceu não exercer nenhum efeito na evolução da resistência à compressão do betão no período de 28 dias. Estes resultados contradizem os já obtidos em trabalhos anteriores (Al-Jabri et al. (2002)), os quais indicavam que a adição de 5% de escória de cobre nas argamassas, originava uma diminuição de resistência. No entanto, usando 1,5% de pó da

produção de cimento como ativador e 13,5% de escória de cobre a resistência à compressão vinha aumentada, conseguindo até superar o valor da resistência da argamassa de referência.

O efeito da introdução de escória de cobre no comportamento à deformação das misturas foi analisado por Ariño et al. (1999) em ensaios à compressão axial de provetes de argamassa com 10% de escória moída em substituição do cimento (com relações a/c de 0,4 e 0,5), que foram comparados com argamassas de referência, sem escória (Figura 19). Nos ensaios foram medidas as deformações axiais e transversais por meio de um equipamento adequado para o efeito, que descreve integralmente a resposta tensão-deformação até à rotura. Observou-se que os provetes com escória de cobre apresentam um acréscimo de 5% na resistência face aos provetes de argamassa de controlo.

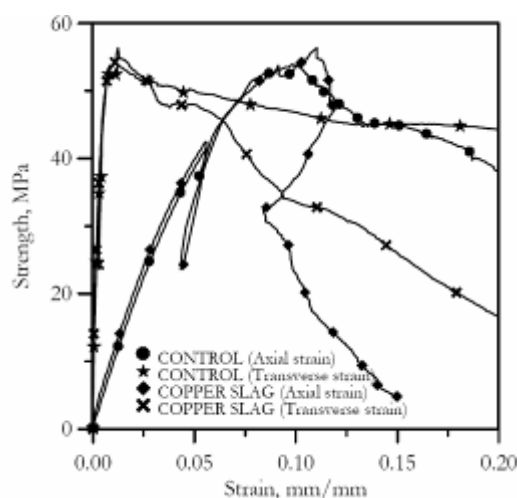


Figura 19. Comparação de curvas de tensão-deformação de provetes de argamassa de controlo e de provetes de argamassa de escória de cobre com relações água/produtos cimentícios de 0,5 (Ariño et al., 1999).

Analisando a região do diagrama após o pico de resistência observa-se que os provetes com escória de cobre têm um comportamento mais frágil que os provetes de referência. Isto é evidenciado pelo rápido declínio da capacidade de carga após a carga de pico, o que é típico de materiais de alta resistência. Como indica a área abaixo da curva de tensão-deformação, a argamassa de controlo exibe uma maior capacidade de absorção de energia que a argamassa com escória de cobre. A Figura 20 compara os comportamentos de provetes de argamassa com escória de cobre para as duas relações água/materiais cimentícios: 0,4 e 0,5. Como esperado, relações água/materiais cimentícios mais baixas correspondem a maiores resistências.

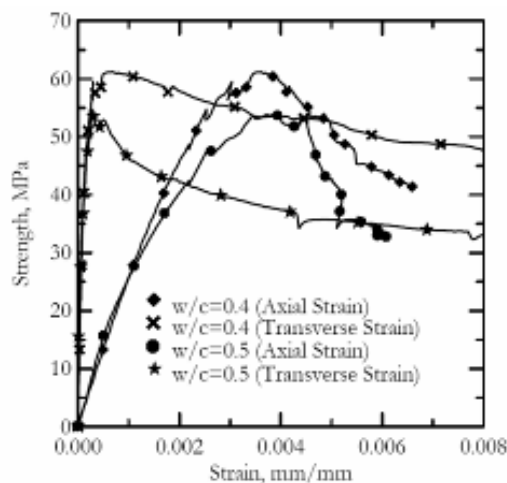


Figura 20. Comparação de curvas de tensão-deformação de provetes de argamassa de escória de cobre para as duas relações água/produtos cimentícios estudadas: 0,4 e 0,5 (Ariño et al., 1999).

Os resultados da resistência à compressão ao longo da idade, para os provetes de argamassa produzidos com escória de cobre estão representados na Figura 21. Verifica-se a mesma tendência do crescimento da resistência com a idade, idêntico ao observado para os provetes de referência. Nas primeiras idades (dois meses ou menos) a relação água/materiais cimentícios tem um grande efeito na resistência, tendo também sido aqui verificada essa tendência. À medida que a idade aumenta, os provetes de argamassa com escória de cobre continuam a apresentar crescimento de resistências mesmo até para o maior valor da relação água/ materiais cimentícios.

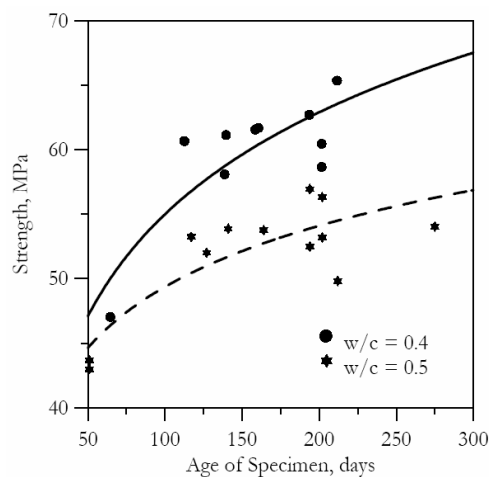


Figura 21. Resultados da resistência à compressão dos provetes de argamassa de escória de cobre para as duas relações água/produtos cimentícios estudadas: 0,4 e 0,5 (Ariño et al., 1999).

Resistência à tracção por flexão

No trabalho de Moura (2000) a adição de 20% de escória proporcionou um melhor desempenho do betão na resistência à tracção por flexão, em todas as idades (Figura 22). A influência foi mais significativa para as relações a/c mais elevadas, em que o maior crescimento observado foi de 18%.

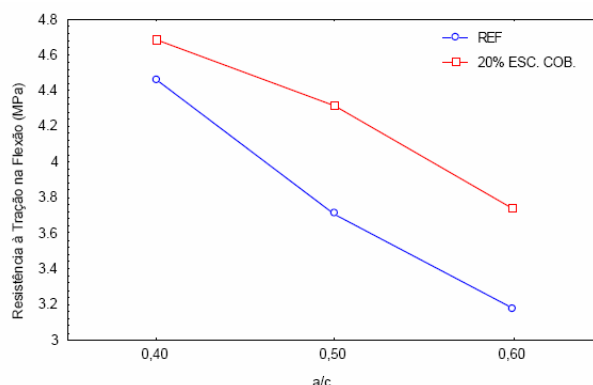


Figura 22. Resistência à tracção por flexão do betão em função da percentagem de escória de cobre e da relação a/c, aos 28 dias (Moura 2000).

Os ensaios de resistência à tracção por flexão realizados por Al-Jabri et al. (2005), revelaram valores iguais ou ligeiramente superiores aos do betão de referência (Figura 23).

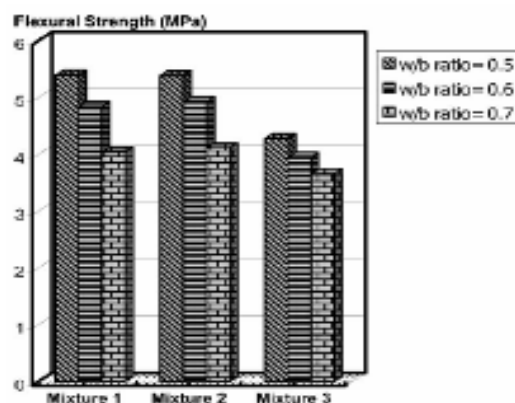


Figura 23. Média da resistência à flexão aos 28 dias realizados pelo ensaio de tracção em flexão, para todas as misturas e todas as relações a/c (Al-Jabri et al. 2005).

O mesmo não foi verificado por Ariño et al. (1999) que analisaram o comportamento para ciclos de carga e descarga (Figura 24) de provetes prismáticos solicitados à flexão, de betão com 0%, 5% e 10% de escória de cobre moída em substituição parcial do cimento. Pelos diagramas da Figura 24 é possível constatar que o betão com maior percentagem de escória de cobre (15%) apresentou menor resistência à tracção por flexão que o betão com 10% de escória.

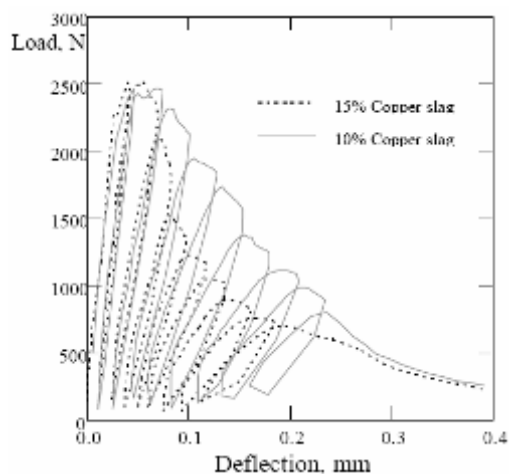


Figura 24. Resposta carga/descarga do ensaio à flexão de provetes prismáticos de escória de cobre (Ariño et al., 1999).

Nos diagramas de comportamento ao ensaio cíclico, observa-se uma fase inicial linear, seguida de uma fase não linear após se atingir a carga máxima. A curva pós pico (*softening zone*) representa o crescimento da fendilhação sob condições de carga aproximadamente constante. Nos betões com maior volume de escória de cobre, o ramo descendente (descarga) é mais íngreme.

A heterogeneidade devida ao tamanho dos agregados altera o percurso da fendilhação ao longo do material. Devido à densificação da zona da interface, o percurso da fendilhação torna-se menos tortuoso e a rigidez da fractura diminui para os provetes de escória de cobre. Em comparação com os resultados da resistência à compressão, os resultados do ensaio à flexão, obtidos por estes investigadores indicam que um aumento da capacidade do betão à compressão não traduz necessariamente um aumento da capacidade de flexão do mesmo betão.

Resistência à tracção por compressão diametral

Nos estudos de Moura (2000) verificou-se que a introdução de escória de cobre na composição do betão se traduz num aumento da sua resistência à tracção por compressão diametral, tendo-se observado 17,6% de aumento de resistência face ao betão de referência. No estudo de Al-Jabri et al. (2005) o aumento foi mais ligeiro, sendo apenas verificado na mistura de 5% de escória (Figura 25).

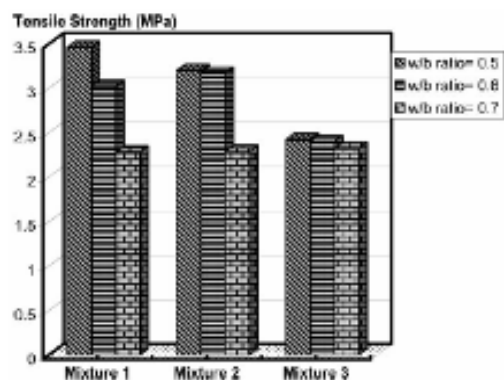


Figura 25. Média da resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias para todas as misturas e todas as relações a/c (Al-Jabri et al., 2005).

Módulo de elasticidade

A incorporação de escória de cobre na composição do betão, genericamente não se fez sentir no valor do módulo de elasticidade, segundo os resultados obtidos por Al-Jabri et al. (2005) (Figura 26). O mesmo é observado na Figura 19 (Ariño et al., 1999) onde a inclinação das rectas da fase de carga é praticamente a mesma para o betão com 10% de escória de cobre e para o betão de referência.

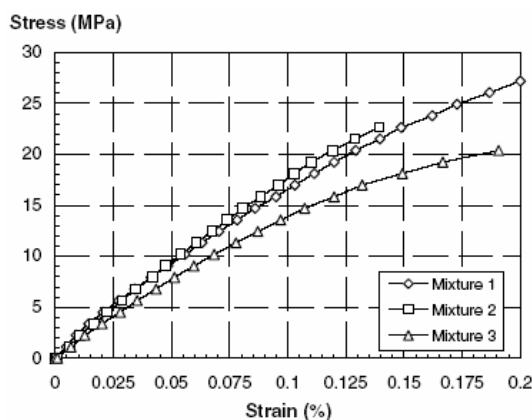


Figura 26. Média dos diagramas tensão-deformação aos 28 dias para as diferentes misturas de betões, para a relações a/c de 0,6 (Al-Jabri et al., 2005).

2.4.3 Reacções de hidratação

Para analisar os produtos de hidratação, Mobasher et al. (1996) interromperam, usando acetona, as reacções de hidratação de dois provetes, um de referência e outro com 10% de escória, às idades de 1, 7 e 28 dias. Estes provetes foram posteriormente analisados por DQRX. Os resultados indicaram a presença de portlandite CH,

etringite C2S, C3S, C3A e gesso CHS2. A formação do pico de CH no provete de referência foi usada como uma referência para a medida da hidratação. Em comparação com o provete de referência, foi observado um ligeiro aumento no pico de CH no provete de 10% de escória de cobre, bem como um aumento de intensidade no pico de etringite, C2S e C3A.

2.4.4 Durabilidade

Porosidade

Mobasher et al. (1996) estudaram a porosidade das misturas por porosimetria por intrusão de mercúrio. Esta técnica foi usada para comparar a distribuição do tamanho dos poros da pasta com 10% de escória de cobre, com a pasta de referência.

O gráfico que relaciona o volume de mercúrio introduzido com a pressão aplicada em ambos os provetes está representado na Figura 27. O volume total de mercúrio introduzido no provete de referência foi menor que o introduzido no provete de 10% de escória de cobre em substituição do cimento, indicando uma maior porosidade total na pasta com escória de cobre.

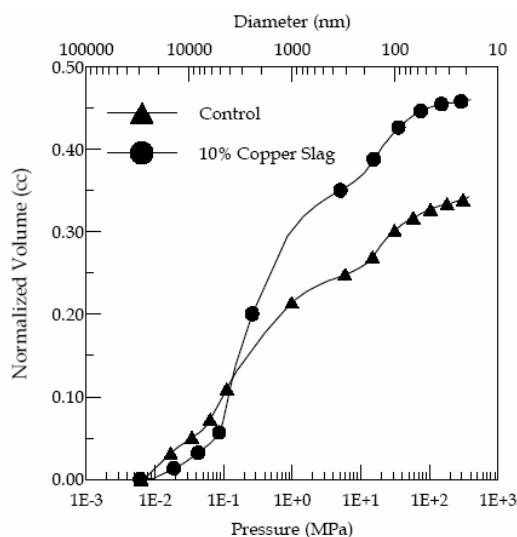


Figura 27. Volume de mercúrio introduzido como uma função da pressão aplicada em provetes de referência e em provetes com escória de cobre (Mobasher et al. 1996).

Absorção por imersão

Os resultados de Moura et al. (2004) mostram que houve um melhor desempenho dos betões de escória de cobre face aos betões de referência, tendo sido registado um menor índice de vazios para todas as relações a/c; e que a

maior influência da escória na redução dos poros se verifica para as maiores relações a/c, chegando a reduzir a absorção por imersão em 13,5%, para a relação a/c de 0,60. A forma e textura dos grãos associadas à massa volúmica mais elevada, são os parâmetros que justificam a maior densidade do betão.

Absorção por capilaridade

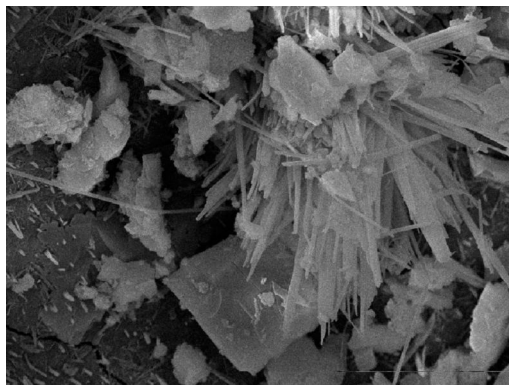
A absorção por capilaridade também foi estudada por Moura et al. (2004), e os resultados obtidos mostram que houve um melhor desempenho dos betões com escória de cobre. A taxa de absorção diminuiu até 24% para a relação a/c de 0,60. Esse facto está relacionado com o melhor preenchimento e distribuição dos vazios no betão com escória de cobre e também com a forma das partículas e a massa volúmica mais elevada que favorecem uma maior densidade do betão.

Quanto à resistência capilar, observa-se que houve um melhor desempenho dos betões com escória de cobre: a substituição de 20% de cimento por escória de cobre no betão proporcionou um aumento de 17%, em média, na resistência capilar. Esse comportamento está também relacionado com a porosidade do betão, que por sua vez é influenciada pelo teor de escória de cobre. Isso significa que betões com substituição parcial de cimento por escória de cobre oferecem maior resistência à passagem de líquidos. Por outro lado, a resistência capilar diminui quando aumenta a relação a/c.

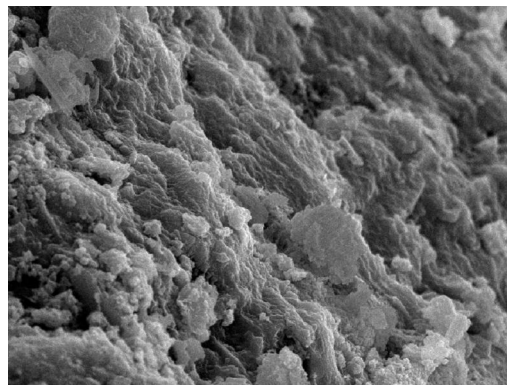
Ataque por sulfatos

Nas análises que realizaram, Moura et. al (2004) verificaram que há influência significativa da percentagem de substituição de escória de cobre por cimento e da relação a/c na resistência do betão ao ataque por sulfatos. Observaram que os betões com escória de cobre apresentavam melhores resultados, principalmente para maiores relações a/c.

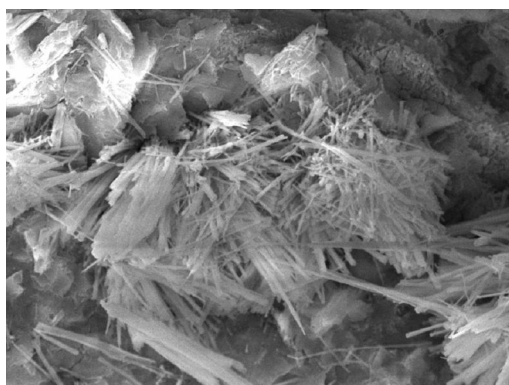
Pode-se observar, na sequência de imagens da Figura 28, que há ocorrência de etringite nas amostras de betão sem escória de cobre para todas as relações a/c. Nas amostras de betão com 20% de escória de cobre, para as relações a/c de 0,41 e de 0,50, não se verificou a presença de etringite. Nota-se maior incidência de etringite nas imagens (e) e (f) (amostras de relação a/c de 0,60), inclusive no betão com escória de cobre. Na amostra de betão sem escória (imagem (e)), a grande incidência de etringite foi observada no interior de uma fissura, perpendicular à superfície. Essa pode ser uma evidência de que a fissura foi provocada pela acção expansiva por parte da etringite. Na imagem (f) verifica-se uma grande formação de agulhas em forma de pacotes no interior do poro. Nota-se que ainda existe espaço entre os pacotes de etringite, não sendo geradas, ainda, tensões no interior desses poros. As imagens confirmam que, quanto maior for a relação a/c, maior será a facilidade de penetração dos fluídos, devido à maior porosidade do betão. Em suma, a presença da escória de cobre melhora o desempenho do betão pela redução da porosidade e do teor de etringite.



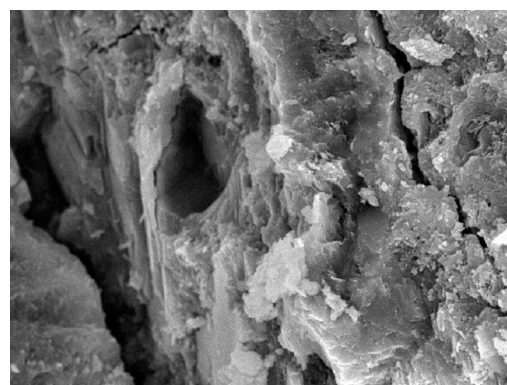
(a)



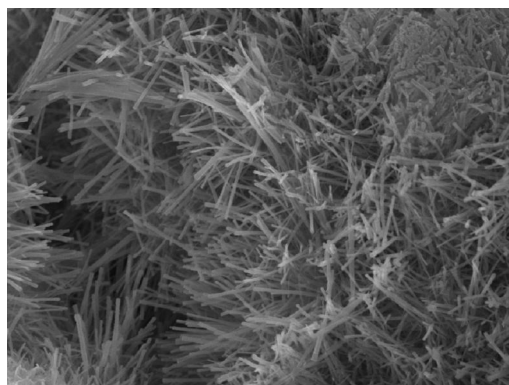
(b)



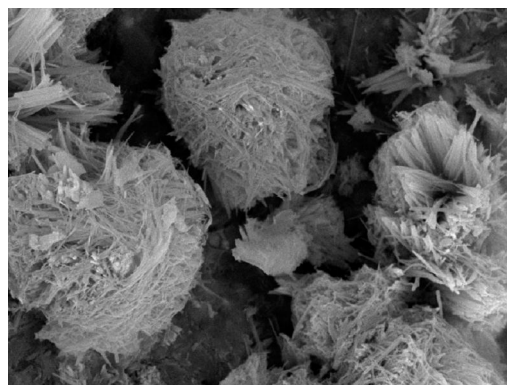
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 28. Fotografias pelo MEV (3500x) em betão: (a) sem escória, a/c de 0,4; (b) 20% de escória de cobre, a/c 0,41; (c) sem escória, a/c de 0,5; (d) 20% de escória de cobre, a/c de 0,50; (e) sem escória, a/c de 0,60; (f) 20% de escória de cobre, a/c de 0,60.

Carbonatação

Resultados de ensaios realizados por Moura et al. (2004) indicaram que a substituição parcial de cimento por escória de cobre melhora o desempenho do betão no que se refere à carbonatação. Aos 180 dias de exposição, os betões já apresentavam diferença de comportamento, tendo-se a carbonatação manifestado apenas nos provetes de betão sem escória, para a relação a/c de 0,60. A partir dos 210 dias, os provetes de betão com escória já

apresentavam carbonatação. Aos 240 dias de exposição, o melhor comportamento foi também o dos betões com escória, chegando a reduzir a espessura da camada carbonatada em 80% para relação a/c de 0,50, e em 36% para relação a/c de 0,60. A influência escória de cobre na carbonatação está associada à porosidade do betão (menor porosidade, diminuição do tamanho e melhor distribuição dos poros), que dificultou a difusão do CO₂. Os resultados dos ensaios de absorção, referidos anteriormente, reforçam esse argumento.

2.5 Escória de cobre como agregado fino para argamassa e betão

Com base em alguns dos trabalhos já realizados que utilizaram escória de cobre como agregado fino em betão (Akihiko e Takashi (1996) e Toshiki et al. (2000) citados por Al-Jabri et al. (2005)) pode concluir-se que os betões obtidos são, de um modo geral, mais resistentes.

Silva (1994) citado por Moura (2000) usou escória de cobre batida (granalha), utilizada como abrasivo em estaleiros no Rio de Janeiro, como agregado fino em argamassa, betão e elementos pré-fabricados de betão. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com a granalha como agregado fino apresentaram um melhor comportamento em relação às argamassas convencionais, chegando a aumentar em 7% a resistência à compressão. O desempenho deste resíduo no betão também foi comparável ao da areia. No que se refere à utilização da granalha na fabricação de elementos pré-fabricados, os resultados satisfizeram as exigências das normas brasileiras.

Moura (2000) também estudou o efeito da escória de cobre como agregado fino em argamassas. Os seus resultados revelaram valores de resistência à compressão, em argamassas com 100% de escória de cobre como agregado fino, 25% superiores à da argamassa de referência com areia normalizada. Este investigador também estudou a influência destes resíduos como agregado fino em betões. Realizou misturas betões com 30, 40 e 50% de escória de cobre.

Shoya et al. (1999) estudaram as propriedades de betão auto-compactável produzido com escórias de cobre e escórias de níquel, em percentagens de substituição de 0, 50 e 100% do agregado fino. Pelas propriedades mecânicas e de durabilidade estudadas, em que observaram a semelhança de desempenhos entre estes betões e o betão de referência, consideraram estas escórias não ferrosas como promissoras na aplicação em betão auto-compactável durável.

2.5.1 Caracterização do betão no estado fresco

Trabalhabilidade

Neste tipo de aplicação de escória de cobre no betão, Moura (2000) constatou que a trabalhabilidade do betão aumentava significativamente com a utilização de escória de cobre, com certeza devido à massa volúmica mais elevada que contribuía para um maior abaixamento do cone de Abrams. Além disso, os betões com 50% de escória de cobre, apresentaram exsudação devido também à elevada massa volúmica da escória.

Dos vários ensaios que Shoya et al. (1999) realizaram para avaliarem a trabalhabilidade do betão como betão auto-compactável, observaram o bom comportamento destes, tendo sido mínima a exsudação verificada, pelo que concluíram que a escória de cobre tem grande potencial na aplicação deste tipo de betão.

Massa volúmica

Moura (2000) também observou que a massa volúmica do betão aumentava com a substituição parcial da areia fina por escória de cobre, como seria expectável uma vez que a referida escória tem maior massa volúmica que os restantes constituintes do betão, como já foi referido inúmeras vezes. O maior valor desse aumento foi de 8,8% para o betão com 50% de escória, o que pela análise deste investigador é um betão que ainda pertence aos betões convencionais, não sendo considerado como um betão pesado.

Tempo de início de presa

À semelhança do efeito da escória de cobre em misturas em que se substitui parcialmente o cimento por estas, também quando se usa a escória de cobre como substituto da areia fina são verificados atrasos no tempo de presa, sendo estes tanto maiores quanto maior a percentagem de escória usada. Este comportamento foi observado por Shoya et al. (1999), no seu estudo de betões auto-compactáveis.

2.5.2 Caracterização do betão no estado endurecido

Massa volúmica

Moura (2000) observou que quanto maior a percentagem de escória de cobre usada em substituição da areia, maior o valor da massa volúmica do betão. O maior aumento foi de 10,3% para o betão com 50% de escória de cobre. Os valores da massa volúmica do betão comum estão entre 2200 e 2600 kg/m³. O investigador verificou então que este

betão pode ser considerado como um betão pesado, pois a massa volúmica do betão com 50% de escória ultrapassa os valores desse intervalo. Este facto pode ser uma restrição em certas aplicações, mas existem situações onde a massa volúmica elevada do betão é um requisito fundamental, como por exemplo para construção de estruturas de contenção de terras por gravidade, construção de salas de radiologia, construção de equipamentos de armazenamento e transporte de substâncias perigosas, entre outros.

Resistência à compressão axial

No trabalho de Moura (2000) a resistência à compressão axial do betão aumentou com a substituição do agregado fino por escória de cobre para percentagens de substituição até 40%, tendo sido de 31% o maior aumento da resistência face ao betão de referência. No entanto, a partir de 50% de substituição a resistência diminui para todas as relações a/c e para todas as idades do betão (Figura 29). Este comportamento pode estar associado à exsudação verificada neste betão de 50% de escória.

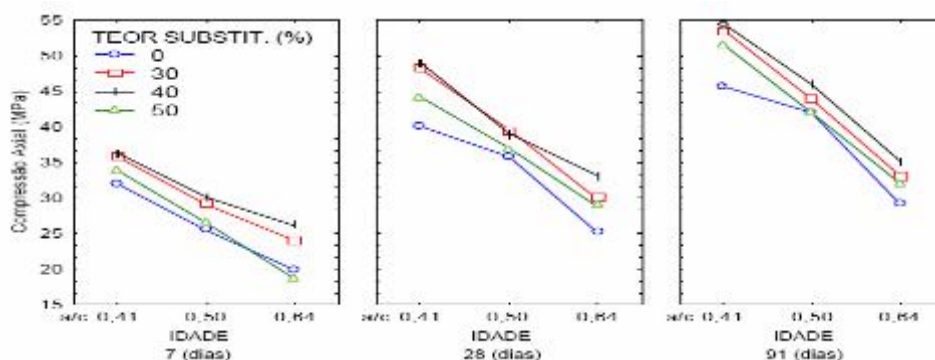


Figura 29. Resistência à compressão dos betões com várias percentagens de substituição de escória de cobre em função da relação a/c e da idade (Moura 2000).

Por outro lado, após ensaios de resistência à compressão, o investigador analisou a secção rompida dos provetes e verificou que as partículas de escória se encontravam aparentemente bem distribuídas (Figura 30).



Figura 30. Aspecto das secções rompidas de provetes com 30, 40 e 50% de substituição de areia fina por escória de cobre, respectivamente (Moura 2000).

Shoya et al. (1999) obteve também resultados da resistência à compressão, nos seus betões de 50 e 100% de escória de cobre como areia fina, um pouco superiores aos do betão de referência. O betão com 100% de escória apresentou 6,3% mais resistência que o betão de referência.

Resistência à tracção por flexão

A resistência à tracção por flexão dos betões produzidos por Moura (2000) aumenta com a percentagem de substituição da areia fina por escória de cobre. No entanto este comportamento muda a partir dos 50% de escória incorporados no betão, onde se observam reduções de resistência (Figura 31). O betão de 40% de escória foi o que maior ganho de resistência obteve face ao betão de referência (10%).

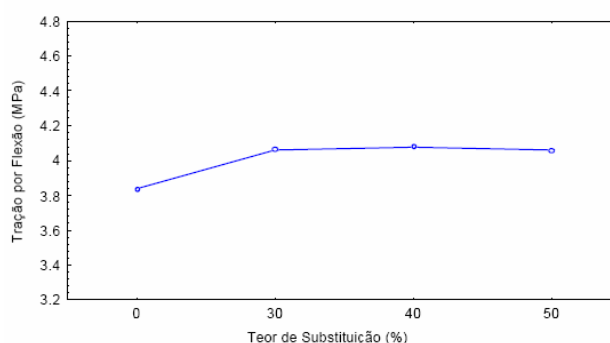


Figura 31. Resistência à tracção por flexão dos betões com várias percentagens de substituição de escória de cobre (Moura 2000).

Resistência à tracção por compressão diametral

O comportamento à tracção por compressão diametral dos betões produzidos por Moura (2000) foi muito semelhante ao observado para as outras características mecânicas já referidas: quanto maior a percentagem de substituição da areia fina por escória de cobre, maior é o incremento na resistência.

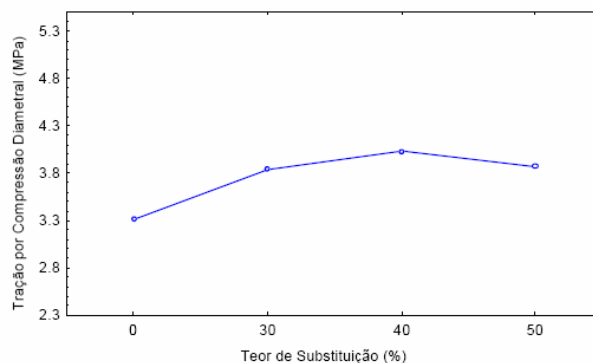


Figura 32. Resistência à tracção por compressão diametral dos betões com várias percentagens de substituição de escória de cobre (Moura 2000).

Este é o comportamento que se verifica até 40% de substituição, porque para a percentagem de 50% de escória a resistência diminui, como se apresenta na Figura 32. O maior aumento de resistência foi de 27% aos 28 dias de cura, para o betão de 40% de escória de cobre.

Os resultados de Shoya et al. (1999) da resistência à tracção mostraram um comportamento dos betões de escória muito semelhante ao betão de referência.

Módulo de Elasticidade

Shoya et al. (1999) verificaram que a relação entre o valor do módulo de elasticidade e o volume de agregados finos na mistura de betão era um pouco superior do que para a resistência à compressão. Os investigadores atribuem o facto à maior dureza das partículas de escória de cobre em comparação com as partículas de areia fina.

2.5.3 Durabilidade

Absorção por imersão e absorção por capilaridade

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão (Figura 33) e por capilaridade (Figura 34) obtidos por Moura (2000) apresentaram a mesma tendência do comportamento observado para as características mecânicas.

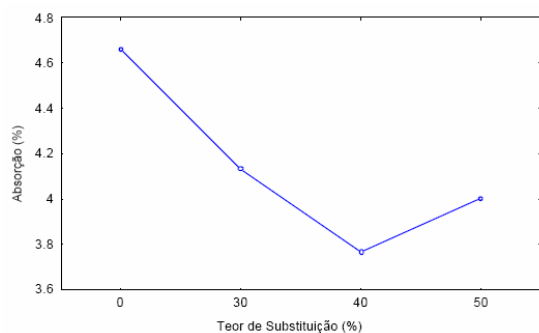


Figura 33. Comportamento dos betões quanto à absorção por imersão (Moura 2000).

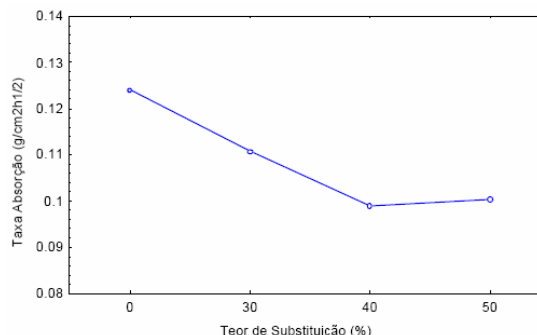


Figura 34. Comportamento dos betões quanto à absorção por capilaridade (Moura 2000).

A absorção dos betões com escória de cobre é menor que a dos betões de referência. No entanto, a absorção dos betões com 50% de escória de cobre apresentou-se maior que a dos betões com 40% de escória. O investigador refere a exsudação verificada no betão com 50% de escória como a causa para a maior absorção constatada. Os betões com 40% de escória são os que apresentam melhores resultados quanto à absorção. A menor absorção de água por parte dos betões com escória de cobre permite prever uma possível maior durabilidade destes em comparação com o betão de referência.

2.5.4 Produtos de construção pré-moldados

Quanto à aplicação na pré-fabricação, Moura (2000) usou escória de cobre como agregado fino na composição de argamassas e betões no fabrico de elementos pré-moldados. Além do bom desempenho à compressão, estes elementos pré-fabricados apresentaram um óptimo aspecto visual (Figura 35).



Figura 35. Elementos pré-fabricados com escória de cobre como agregado fino (Moura 2000).

2.6 Conclusões

A elevada composição em óxido de alumínio, óxido de ferro e óxido de sílica, que as escórias de cobre usadas pelos estudos citados apresentam, garante-lhes actividade pozolânica, que é tanto maior quanto maior a sua finura e o seu grau de vitrificação (estado amorfo). A aplicação como substituição parcial do cimento apresenta, de um modo geral, atrasos no tempo de presa que podem ser atenuados com o uso de activadores alcalinos. Efectivamente, apesar de a resistência dos betões produzidos com esses activadores não apresentarem valores significativos às primeiras idades, face ao betão de referência, o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo é maior do que o verificado em betões sem escória e sem activadores. Porém, existem estudos que observaram uma menor resistência à tracção destes betões e um comportamento mais frágil, face aos de referência. Os estudos de durabilidade verificaram que a escória de cobre dá origem a matrizes mais densas, menos porosas e mais resistentes aos sulfatos e à carbonatação. Dentre os parâmetros que necessitam de mais estudo está a quantidade óptima de escória de cobre a substituir pelo cimento; o activador mais indicado a usar bem como a sua finura ideal, para que se tire o maior partido das potencialidades da escória de cobre.

A granulometria original da escória e a sua elevada dureza propiciam também o seu uso como agregado fino no betão e argamassas. Dos estudos analisados neste trabalho pode dizer-se que a resistência mecânica é melhorada até um determinado nível de incorporação de escória, a partir do qual se verifica um decréscimo na resistência devido, aparentemente, à exsudação do betão fresco que se verifica num dos estudos. Encontra-se também a referência deste resíduo como aplicação em betão auto-compactável, sendo considerado que satisfaz igualmente as funções de um agregado fino neste tipo de betão, não se tendo verificado exsudação significativa.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

O estudo experimental levado a cabo comporta várias fases de trabalho laboratorial tais como a caracterização dos materiais; a produção de provetes; e a realização de ensaios mecânicos e físicos dos provetes produzidos, entre outros ensaios.

A definição dos objectivos e o planeamento dos ensaios a realizar são as premissas que marcam o arranque de qualquer estudo mas, na verdade, são itens que nunca estão completamente definidos, sofrendo várias alterações com o decorrer do trabalho. As respostas que vão sendo obtidas com os resultados de determinados ensaios podem orientar o trabalho de modo diferente do definido inicialmente, pela razão de se querer compreender os comportamentos observados, e de forma a dar resposta a questões que entretanto passam a integrar a lista dos objectivos.

Na perspectiva de estudar a viabilidade de incorporação de granalha de cobre como agregado fino em produtos de construção de matriz cimentícia (tais como blocos de betão pré-moldados para alvenaria e pavimentos), desenvolveu-se um programa experimental de argamassas produzidas com granalha de cobre em substituição parcial da areia natural. A avaliação da influência deste resíduo nas propriedades mecânicas de misturas de cimento é menos laboriosa e tecnicamente mais simplificada pelo seu estudo em argamassas, devido ao menor volume de materiais envolvidos, entre outras razões. Considera-se que numa primeira abordagem esta analogia é aceitável. As relações retiradas do estudo deste material em argamassas facultam linhas orientativas para uma definição mais acertiva de programas experimentais em betão que entretanto deverão surgir, para dar continuidade à definição de soluções para esta problemática.

3.2 Objectivos

Para planificar o trabalho experimental da melhor forma tentou-se discretizar o mais possível o objectivo principal em objectivos mais específicos, que se passam a enunciar:

- o avaliar as principais propriedades físicas da granalha de cobre comparando-as com as da areia natural normalizada e areia natural comum;
- o avaliar a resistência à compressão e flexão das argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição da areia natural por granalha de cobre e comparação dos resultados com os obtidos nas argamassas de referência em que é usada apenas areia natural;
- o avaliar a evolução no tempo das propriedades mecânicas das argamassas produzidas;
- o quantificar o incremento percentual da massa volúmica das argamassas produzidas à medida que se aumenta a dosagem de granalha, quando comparada com a massa volúmica da argamassa de referência, produzida apenas com areia natural;
- o determinar a percentagem de substituição de areia natural por granalha de cobre mais favorável para a produção de produtos de construção cimentícios;
- o avaliar a influência da lavagem da granalha de cobre, para eliminação de impurezas, nas características físicas e nas propriedades de argamassas assim produzidas;
- o avaliar a influência da eliminação da fracção granulométrica mais fina da granalha de cobre, nas características físicas e nas propriedades de argamassas assim produzidas;
- o avaliar a resistência à compressão e flexão das argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição da areia natural por granalha de cobre e comparação dos resultados com os obtidos nas argamassas de referência em que é usada apenas areia natural;
- o comparar as características físicas da granalha de cobre com as da escória de cobre original, antes do seu uso como abrasivo; e comparar o comportamento mecânico das argamassas produzidas com estes dois materiais;
- o avaliar a influência da relação a/c nas propriedades de argamassas produzidas com granalha de cobre;

- o identificar as características físicas de granalhas de cobre de dois fornecimentos diferentes e comparar o comportamento mecânico das argamassas produzidas com estes dois materiais;
- o avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades de argamassas produzidas com granalha de cobre;
- o avaliar o aumento do tempo de presa nas argamassas com granalha de cobre;
- o avaliar a capacidade de absorção de água e a resistência à abrasão de argamassas produzidas com granalha de cobre em substituição parcial da areia natural;
- o comparar as características físicas da granalha de cobre usada neste trabalho com as características das escórias de origens diferentes estudadas nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica; e comparar os resultados das características mecânicas da argamassa com granalha de cobre com os obtidos nos estudos semelhantes referidos na revisão bibliográfica;
- o avaliar a influência da substituição de total de areia natural por granalha de cobre na produção de blocos de betão para pavimentos.

3.3 Programa experimental

Para concretizar os objectivos propostos foram produzidas nove séries de argamassas com variantes nas características da granalha de cobre, no tipo de areia natural ou no tipo de cimento usado. Em cada uma das séries foram usadas percentagens de substituição da areia natural pelo resíduo de cobre de 25%, 50% e 75%, e moldados em número suficiente para os ensaios mecânicos aos 7, 28, 60 e 90 dias de idade. Foram igualmente produzidas argamassas de referência com 100% de areia natural para ensaio às mesmas idades. A excepção figura para a Série 8 e para a Série 9: na Série 8 foram apenas realizados ensaios mecânicos para as idades de 7, 28 e 60 dias de cura; e na Série 9 foram testadas as propriedades mecânicas somente aos 28 dias de cura.

Com o primeiro fornecimento de escória de cobre foram produzidas as argamassas das Séries 1, 2, 3, 4, 5, 8 e 9.

Na primeira série de argamassas produzidas, a Série 1, a dosagem de água foi mantida constante e na Série 2 foi mantido constante o espalhamento da argamassa tendo-se variado a dosagem de água.

A Série 3 foi produzida com os mesmos parâmetros da Série 1, para verificação da consistência dos seus resultados.

Nas restantes séries de argamassas produzidas (exceptuando a Série 9) foi sempre mantida a mesma dosagem de água que foi usada para as Séries 1 e 3. Os parâmetros que se variaram nessas argamassas foram certas características da granalha de cobre.

Assim, na Série 4, a granalha de cobre foi previamente lavada na tentativa de remoção das partículas de sujidade que possui; e na Série 5 foi retirada a fracção fina da sua composição granulométrica.

Na Série 6 foi usada granalha de cobre de um segundo fornecimento, que aparentemente apresentava menor quantidade de óxido de ferro que a granalha do primeiro fornecimento.

Na Série 7 foi usada escória de cobre original, ou seja, sem ter sido usada como abrasivo no processo de decapagem, logo ausente de todos os resíduos inerentes ao tratamento.

A Série 8 distingue-se das Série 1 e 3 apenas no tipo de cimento usado – CEM 32,5 Tipo II.

A série 9 assenta nos mesmos parâmetros da Série 2, com a diferença de ter sido usada areia natural comum, em vez da areia natural normalizada.

A produção de blocos de betão para pavimentos foi realizada numa unidade de produção industrial de produtos de construção pré-moldados. A granalha usada no fabrico destes blocos foi a granalha do segundo fornecimento.

3.4 Metodologia

Para a caracterização dos agregados finos usados no estudo experimental foi determinada a composição granulométrica, a massa volúmica e a absorção de água. A análise granulométrica foi realizada com base na norma [NP EN 933-1 2000] – Análise granulométrica de agregados. Foi usada a série base de peneiros e a peneiração foi feita sem lavagem do material. Os procedimentos usados na determinação da massa volúmica e da absorção de água foram os recomendados na norma [NP 954].

As argamassas foram produzidas de acordo com a norma europeia NP EN 196 -1 (1996).

Para as argamassas de referência usou-se como composição base, uma parte de cimento, três partes de areia e meia parte de água, em massa, que correspondem a 450 g de cimento Portland, 1350 g de areia e 0.225l de água, para cada amassadura.

As argamassas foram amassadas num misturador, segundo o procedimento indicado na norma: a água é misturada com o cimento durante 30 segundos; depois a areia e a granalha é adicionada com o misturador em funcionamento, e novamente misturadas durante o mesmo intervalo de tempo. Em seguida é retirada, com a ajuda de uma espátula, a argamassa aderente às paredes do misturador e deixa-se a mistura em repouso durante 30 segundos. No final deste período a amassadura é misturada durante mais 60 segundos. Em cada amassadura foram moldados três provetes prismáticos com 40mm×40mm×160mm segundo os procedimentos de compactação indicados na norma. Após a desmoldagem os provetes foram imergidos em água e guardados numa câmara de cura até à data do ensaio.

A resistência à flexão foi determinada pelo método da carga concentrada a meio vão dos provetes prismáticos; e a resistência à compressão foi obtida por ensaio de compressão dos meios prismas resultantes dos ensaios de flexão, sob as faces laterais de moldagem, numa secção de 40mm×40mm (NP EN 196 -1 (1996)).

A resistência à flexão e à compressão foram avaliadas aos 7, 28, 60 e 90 dias de idade.

Para cada idade e série de argamassa, os resultados da resistência à flexão das argamassas resultam da média de resultados de 3 provetes ensaiados; e os resultados da resistência à compressão resultam da média de resultados de 6 meios provetes ensaiados.

Os ensaios que se realizaram em argamassas no estado fresco foram a determinação da consistência das argamassas, com base na norma ASTM C 109-1998, e a medição o tempo de início e fim de presa das argamassas. Para a realização deste último ensaio foram seguidas as orientações da norma NP EN 480-2 1998, destinada ao ensaio de adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção.

A resistência à abrasão por desgaste foi realizada com base na especificação do LNEC E 396 (1993).

A porosidade livre das argamassas foi determinada com base numa metodologia proposta pelo Laboratoire de Petrophysique du Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg (Hammcker, 1993), e que será descrita mais adiante.

4. MATERIAIS

4.1 Introdução

Os materiais usados como agregado fino nas argamassas produzidas neste trabalho foram a areia normalizada, a areia fina natural, a granalha de cobre e a escória de cobre. A empresa de recolha de resíduos forneceu duas cargas de granalha de cobre em momentos temporais distintos e uma carga de granalha de cobre antes de ser usada nos processos de decapagem, a qual se denominou de escória de cobre original. Com a granalha do primeiro fornecimento foram produzidas sete séries de argamassas distintas, sendo em cinco delas o resíduo usado como substituto parcial da areia natural exactamente nas condições em que foi recebido; e nas outras duas séries de argamassas a granalha foi, numa delas, previamente lavada na tentativa de remoção da sujidade e, na outra série, foi removida a fracção fina da sua composição granulométrica.

Para a caracterização da areia natural e dos vários tipos de granalha foram realizados ensaios para determinação da composição granulométrica, e ensaios de determinação da massa volúmica e absorção de água.

4.2 Caracterização da granalha de cobre

4.2.1 Aspecto visual

Granalha do primeiro fornecimento

Da análise visual da granalha do primeiro fornecimento identifica-se um material granular fino de cor escura e com algum brilho, combinado com poeiras, resíduos metálicos grossos oxidados, grumos de partículas de pó fino endurecidas e pequenos resíduos de tinta (Figura 36 e Figura 37).



Figura 36. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento.



Figura 37. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento.

Ao manusear este material, as partículas de pó mais finas e acastanhadas espalham-se no ar em forma de poeira e libertam um cheiro apimentado – são partículas de óxido de ferro resultantes do tratamento de superfícies oxidadas (Figuras 38 e 39).



Figura 38. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento.



Figura 39. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento.

São também identificadas nessa parte fina do material, partículas finas de cor preta que constituem a fracção fina da granalha de cobre propriamente dita e não formam poeira como as partículas acastanhadas, precisamente porque têm massas volúmicas distintas. Quanto aos resíduos de tinta pode dizer-se que sua presença aparece em pequena escala quando se compara com o volume de outros resíduos que a granalha contém, principalmente o óxido de ferro.

Granalha do primeiro fornecimento lavada

Para a produção das argamassas da Série 4 pretendeu-se eliminar, dentro do possível, a sujidade que a granalha incorpora depois do processo de decapagem, ou seja, as partículas de óxido de ferro de cor castanha, resíduos de tinta, entre outros. Para isso a granalha foi lavada segundo um procedimento que se julgou adequado e de modo a não perder as partículas finas de granalha.



Figura 40. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento, lavada e seca.



Figura 41. Aspecto da granalha do primeiro fornecimento, lavada e seca.

O processo de lavagem da granalha inicia-se com a peneiração do material usando o peneiro de abertura de 2mm, de modo a recolher e rejeitar os resíduos grossos que não são granalha de cobre mas sim resíduos tais como partículas grossas metálicas oxidadas e grumos de partículas de pó fino endurecidas. O material peneirado é colocado num recipiente com água em pequenas porções não superiores a um quilograma e agitado com uma vareta de vidro durante 25 segundos. Depois de repousar durante 50 segundos verte-se a água com as partículas

finas castanhas em suspensão para um peneiro de malha larga protegido com um filtro de papel. Este procedimento é repetido mais uma vez, ao fim do qual o material lavado é colocado a secar na estufa a 60°C, até se manter constante o seu peso e poder ser usado na produção de argamassa. O peneiro e o filtro foram usados apenas para se perceber o tipo de partículas que foram removidas com a lavagem. As Figuras 40 e 41 apresentam o aspecto final da granalha lavada, depois de seca. A Figura 42 mostra o peneiro e um dos filtros usados neste processo de lavagem, depois de seco em estufa em conjunto com o material lavado.



Figura 42. Peneiro e um dos filtros usados na lavagem da granalha do primeiro fornecimento, depois de seco em estufa.

No filtro ficou retido o material rejeitado no processo de lavagem. Percebe-se que, em conjunto com a sujidade, foi também eliminado algum material que constitui a própria granalha, que são os grãos escuros que se vêem na Figura 42. Na verdade existiram dificuldades durante a lavagem porque a sujidade que se pretendia eliminar, concretamente as partículas de óxido de ferro, não se dispersavam na água da mesma forma que acontece com a matéria orgânica quando se faz a lavagem de uma areia comum, por exemplo.

Granalha do primeiro fornecimento sem fracção fina

Para a produção das argamassas da Série 5 pretendeu-se retirar toda a fracção fina da granalha, ou seja, rejeitar o material que atravessava o peneiro de abertura 0,063mm e que fica retido no recipiente do fundo da Série Base de peneiros utilizados na análise granulométrica segundo a NP EN 933-1 2000. O procedimento adoptado foi a peneiração manual de porções de granalha com o peneiro de abertura de 0,063mm, até deixar de atravessar material, sendo este último rejeitado. Para tal recorreu-se também a um sistema de extracção de ar por ventilação forçada que se colocou sob a área de trabalho e que aspirava as partículas finas de óxido de ferro que se espalhavam no ar durante a peneiração, com se pode observar nas Figuras 43 e 44.



Figura 43. Peneiração manual da granalha para remoção dos finos com auxílio de um extractor de ar por ventilação forçada.



Figura 44. Imagem da libertação do pó de óxido de ferro durante a peneiração da granalha.

As Figuras 45 e 46 mostram o resultado da peneiração. Foram rejeitados cerca de 555g de material fino de um total de 13 kg de granalha peneirada, o que perfaz aproximadamente 4,3% de material.



Figura 45. Peneiração manual da granalha e retenção do material fino.



Figura 46. Material fino rejeitado da granulometria da granalha do primeiro fornecimento.

Granalha de cobre do segundo fornecimento

Pelo seu aspecto e manuseio percebe-se que a granulometria da granalha dos dois fornecimentos é muito idêntica, mas a granalha do primeiro fornecimento apresentou-se menos brilhante e com maior quantidade de óxido de ferro sob a forma de partículas finas pulverulentas do que a granalha da segunda carga (Figura 47). Além disso a primeira apresenta resíduos grossos tais como grumos de granalha envolvidos com pó de óxido de ferro, e partículas metálicas oxidadas em maior quantidade do que na segunda granalha recebida.



Figura 47. Aspecto da granalha do segundo fornecimento (à esquerda) e do segundo fornecimento (à direita).

Para além das argamassas da Série 6, a granalha deste fornecimento foi também usada para a produção de blocos de betão pré-moldados.

Escória de cobre original

A escória de cobre original é um material granular muito brilhante, ausente de qualquer tipo de resíduos (Figuras48).



Figura 48. Escória de cobre original.

A sua granulometria é mais grossa do que a da granalha batida e apresenta uma quantidade de fracção fina residual, como se pode observar pelas Figuras 49 e 50. A forma dos seus grãos é angulosa e as suas arestas são muito cortantes.



Figura 49. Escória de cobre original.



Figura 50. Escória de cobre original.

4.2.2 Dureza

Não foram realizados ensaios de determinação da dureza da granalha de cobre, mas com base nas especificações recebidas do fornecedor de escória de cobre dos Estaleiros Navais de Viana do Castelo, a dureza original deste material é de 6 a 7 na escala de Mohs, superior à dureza da areia natural.

4.2.3 Composição granulométrica

Granalha do primeiro fornecimento

Ao manusear a granalha do primeiro fornecimento verifica-se que a sua granulometria é semelhante à da areia fina natural, mas com maior quantidade de partículas finas. A composição granulométrica é a apresentada na Tabela 12. O seu módulo de finura é 2,1 e apresenta cerca de 4,6% de finos.

Tabela 12. Composição granulométrica da granalha do primeiro fornecimento.

Composição granulométrica – granalha do primeiro fornecimento			
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000] Série base Peneiração sem lavagem	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
	4,000	0	0
	2,000	0	0
	1,000	55,1	4,7
	0,500	445,4	42,3
	0,250	371,3	73,6
	0,125	177,2	88,6
	0,063	80	95,3
	Resto	53,9	99,9
	Máxima dimensão (D)	1,000	
	Mínima dimensão (d)	0,063	
	Percentagem de finos	4,6	
	Módulo de finura	2,1	

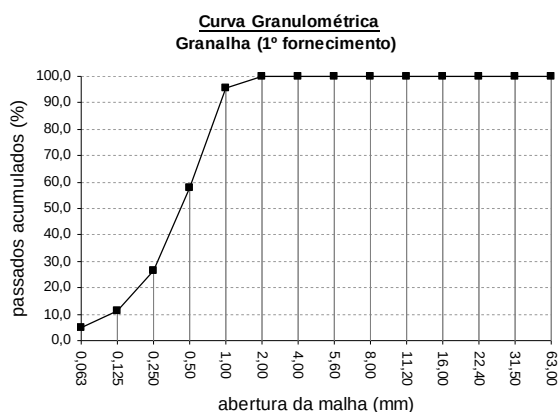


Figura 51. Curva granulométrica da granalha do primeiro fornecimento.



Figura 52. Frações resultantes da análise granulométrica da granalha do primeiro fornecimento.

Note-se que a granalha contém resíduos de dimensões superiores a 2mm mas que não fazem parte da sua constituição como material mas apenas como resíduo. Esses resíduos são, como já se referiu, pequenos fragmentos de metais oxidados e grumos de pó de óxido de ferro endurecidos, e podem ser observados no canto superior direito da Figura 52. Por essa razão foram rejeitados da granalha com que se produziram as argamassas e foram também excluídos do volume de granalha peneirada para a obtenção da curva granulométrica deste material.

Granalha do primeiro fornecimento lavada

Para verificação da eficácia do processo de lavagem da granalha do primeiro fornecimento foi realizada uma análise granulométrica no final do período de secagem, e a sua composição é apresentada na Tabela 13. O seu módulo de finura é 2,1, como seria de esperar, mas a percentagem de finos reduziu apenas para 2,8%.

Tabela 13. Composição granulométrica da granalha do primeiro fornecimento lavada.

Composição granulométrica – granalha primeiro fornecimento lavada			
	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000]	4,000	0	0
	2,000	0	0,0
	1,000	37,2	3,2
	0,500	429,6	40,5
	0,250	388,6	74,3
	0,125	179,3	89,9
Série base	0,063	84,0	97,2
	Resto	31,8	100,0
Peneiração sem lavagem			
	Máxima dimensão (D)	1,0	
	Mínima dimensão (d)	0,063	
	Percentagem de finos	2,8	
	Módulo de finura	2,1	

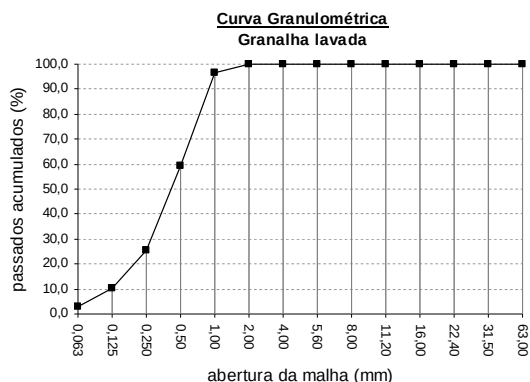


Figura 52. Curva granulométrica da granalha do primeiro fornecimento lavada.



Figura 53. Frações resultantes da análise granulométrica da granalha do primeiro fornecimento, lavada.

Percebe-se que com a lavagem não foi conseguida a remoção total da sujidade da granalha do primeiro fornecimento. É certo que parte da fracção fina deste resíduo é também composta por partículas de granalha muito finas e que não era de interesse a sua eliminação. Mas é ainda visível, na Figura 53, a presença de partículas finas acastanhadas a acompanhar a porção do material que ficou retida no fundo do último peneiro usado.

Granalha do primeiro fornecimento sem fracção fina

Para a produção das argamassas da Série 5 foi removida a fracção fina da granalha do primeiro fornecimento através de um processo já descrito em 4.2.1.. A análise granulométrica à granalha de cobre peneirada é apresentada na Tabela 14. O seu módulo de finura é 2,2 e apresenta cerca de 0,7% de finos.

Tabela 14. Composição granulométrica da granalha do primeiro fornecimento depois de removida a fracção fina.

Composição granulométrica – granalha do fornecimento sem fracção fina			
	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000]	4,000	0	0
	2,000	0	0
	1,000	89,5	9,6
	0,500	302,0	42,0
	0,250	345,9	79,2
	0,125	124,9	92,6
	0,063	62,8	99,3
	Resto	6,3	100,0
Série base Peneiração sem lavagem	Máxima dimensão (D)	1,0	
	Mínima dimensão (d)	0,063	
	Percentagem de finos	0,7	
	Módulo de finura	2,2	

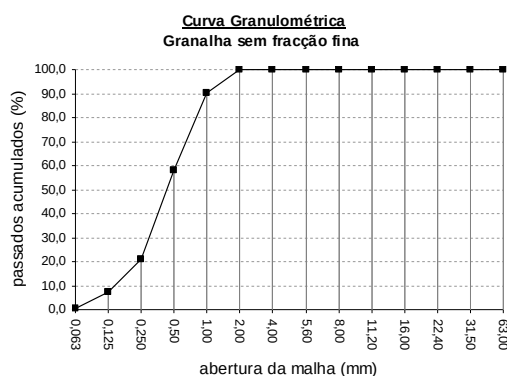


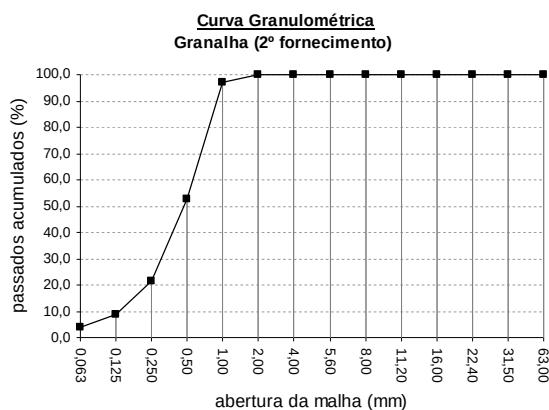
Figura 54. Curva granulométrica da granalha do primeiro fornecimento sem fracção fina.

Granalha de cobre do segundo fornecimento

Na Tabela 15 é apresentada a composição granulométrica da granalha do segundo fornecimento recebido. O seu módulo de finura é 2,2 e apresenta cerca de 3,5% de finos.

Tabela 15. Composição granulométrica da gralha do segundo fornecimento.

Composição granulométrica – gralha segundo fornecimento			
	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000]	4,000	0	0
	2,000	0	0,0
	1,000	34,8	2,9
	0,500	541,2	47,4
	0,250	379,2	78,7
	0,125	153,1	91,3
	0,063	59,9	96,2
Série base	Resto	42,2	99,7
Peneiração sem lavagem			
	Máxima dimensão (D)	1,0	
	Mínima dimensão (d)	0,063	
	Percentagem de finos	3,5	
	Módulo de finura	2,2	

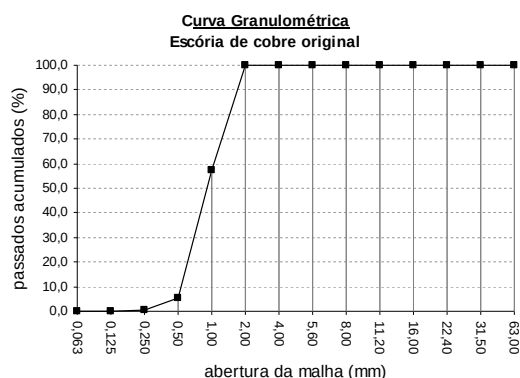
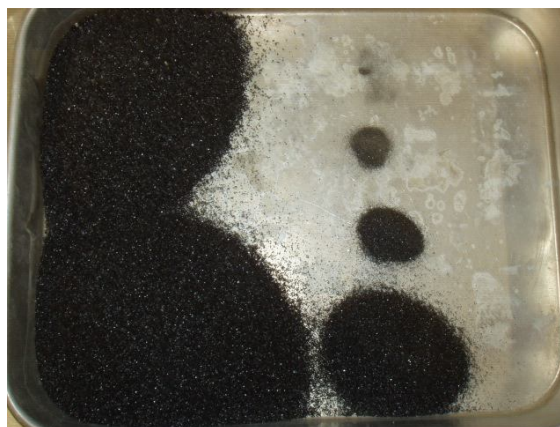
**Figura 55.** Curva granulométrica da gralha do segundo fornecimento.**Figura 56.** Fracções resultantes da análise granulométrica da gralha do segundo fornecimento.

Escória de cobre original

A escória de cobre original tem a granulometria que se apresenta na Tabela 16. O seu módulo de finura é 3,4 e não tem finos na sua composição.

Tabela 16. Composição granulométrica da escória de cobre original.

Composição granulométrica – escória de cobre original			
	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000]	4,000	0,0	0,0
	2,000	0,0	0,0
	1,000	460,5	42,8
	0,500	557,4	94,7
	0,250	52,5	99,6
	0,125	3,6	99,9
Série base	0,063	0,1	100,0
	Resto	0,0	100,0
Peneiração sem lavagem			
	Máxima dimensão (D)	1,0	
	Mínima dimensão (d)	0,25	
	Porcentagem de finos	0	
	Módulo de finura	3,4	

**Figura 57.** Curva granulométrica da escória de cobre original.**Figura 58.** Frações resultantes da análise granulométrica da escória de cobre original.

4.2.4 Massa volúmica e absorção de água

Os valores de massa volúmica e absorção de água das várias granalhas estudadas são apresentados no Quadro 1.

A capacidade de absorção de água da escória de cobre original é baixa: 0,14%. Mas, como se pode verificar pelos valores de absorção de água das diferentes granalhas, o factor responsável pelo aumento da sua capacidade de absorção é a quantidade de finos que contém, podendo incrementar este indicador em três décimas.

Quanto à massa volúmica constata-se que não existe grande variação quando se comparam os valores para a escória de cobre original com os obtidos para a granalha batida. Apenas a granalha do primeiro fornecimento em que foi retirada a fracção fina apresenta massa volúmica superior, porque foi retirado um volume ao material que era pouco significativo em termos de massa.

Determinação da massa volúmica e da absorção de água de areias [NP 954]			
	Granalha primeiro fornecimento	Granalha primeiro fornecimento sem finos	Escória de cobre original
Material impermeável (kg/m ³)	3920	3900	3870
Partículas saturadas (kg/m ³)	3870	3880	3860
Partículas secas (kg/m ³)	3850	3870	3850
Absorção de água (%)	0,43	0,23	0,14

Quadro 1. Massa volúmica e absorção de água das granalhas estudadas.

4.2.5 Caracterização química

A composição química base da escória de cobre antes de ser usada como granalha foi fornecida pela O2Ambiente e é a que se apresenta no Quadro 2.

Composição química da escória de cobre original em estudo					
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	ZnO	CuO e MgO
~30	~50	4 - 6	1 - 6	2 - 8	<1

Quadro 2. Composição química da escória de cobre.

4.3 Areia normalizada natural

Para a produção da grande parte das argamassas estudadas foi utilizada areia normalizada.

4.3.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica da areia normalizada é apresentada Tabela 17.

Tabela 17. Composição granulométrica da areia normalizada.

Composição granulométrica – areia normalizada				
		Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados	[NP EN 933-1 2000]	4,000	0	0
		2,000	3,6	0,3
		1,000	455,2	34,0
		0,500	390,1	62,9
		0,250	204,5	78,0
		0,125	229,8	95,0
		0,063	67,3	100,0
Série base		Resto	1	100,0
Peneiração sem lavagem		Máxima dimensão (D)	2,0	
		Mínima dimensão (d)	0,125	
		Percentagem de finos	0,1	
		Módulo de finura	2,7	

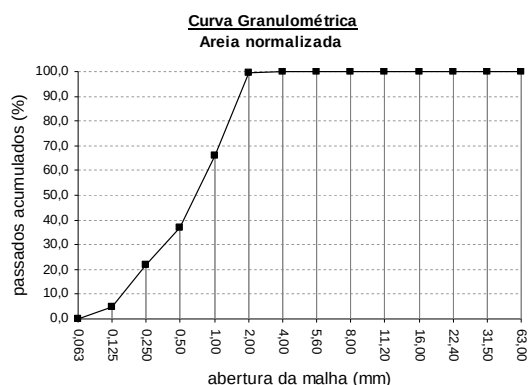


Figura 59. Curva granulométrica da areia normalizada.



Figura 60. Frações resultantes da análise granulométrica da areia normalizada.

4.3.2 Massa volúmica e absorção de água

A capacidade de absorção de água da areia normalizada é de 0,4% e a sua massa volúmica é de 2600kg/m³, conforme apresentado no Quadro 3.

Determinação da massa volúmica e da absorção de água de areias [NP 954]	
Areia normalizada	
Material impermeável (kg/m ³)	2630
Partículas saturadas (kg/m ³)	2610
Partículas secas (kg/m ³)	2600
Absorção de água (%)	0,4

Quadro 3. Massa volúmica e absorção de água da areia normalizada.

4.4 Areia fina natural

As argamassas da Série 9 foram produzidas com areia fina comum, como agregado fino natural.

4.4.1 Composição granulométrica

A Tabela 18 apresenta a composição granulométrica da areia fina natural.

Tabela 18. Composição granulométrica da areia fina natural.

Composição granulométrica – areia fina natural			
	Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (g)	Retidos acumulados (%)
Análise granulométrica de agregados [NP EN 933-1 2000]	4,000	0	0
	2,000	0,4	0,0
	1,000	26	2,2
	0,500	730,3	63,0
	0,250	405,2	96,7
	0,125	32,7	99,5
	0,063	2,3	99,7
Série base	Resto	1,2	99,9
Peneiração sem lavagem			
	Máxima dimensão (D)	1,0	
	Mínima dimensão (d)	0,25	
	Percentagem de finos	0,1	
	Módulo de finura	2,6	

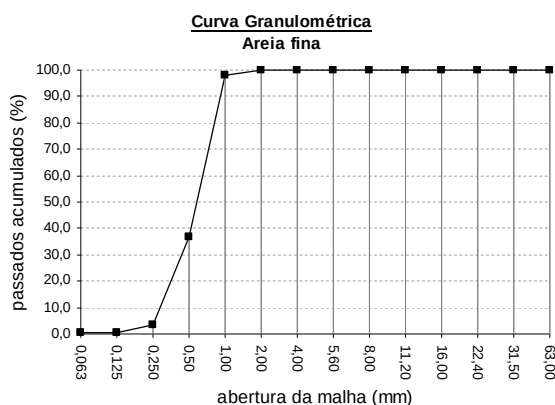


Figura 61. Curva granulométrica da areia fina natural.



Figura 62. Fracções resultantes da análise granulométrica da areia fina natural.

4.4.2 Massa volúmica e absorção de água

A capacidade de absorção de água da areia fina é de 0,2% e a sua massa volúmica é de 2650kg/m³, conforme apresentado no Quadro 4.

Determinação da massa volúmica e da absorção de água de areias [NP 954]	
Areia fina	
Material impermeável (kg/m ³)	2680
Partículas saturadas (kg/m ³)	2670
Partículas secas (kg/m ³)	2650
Absorção de água (%)	0,2

Quadro 4. Massa volúmica e absorção de água da areia fina.

4.5 Comparação das características dos agregados finos estudados

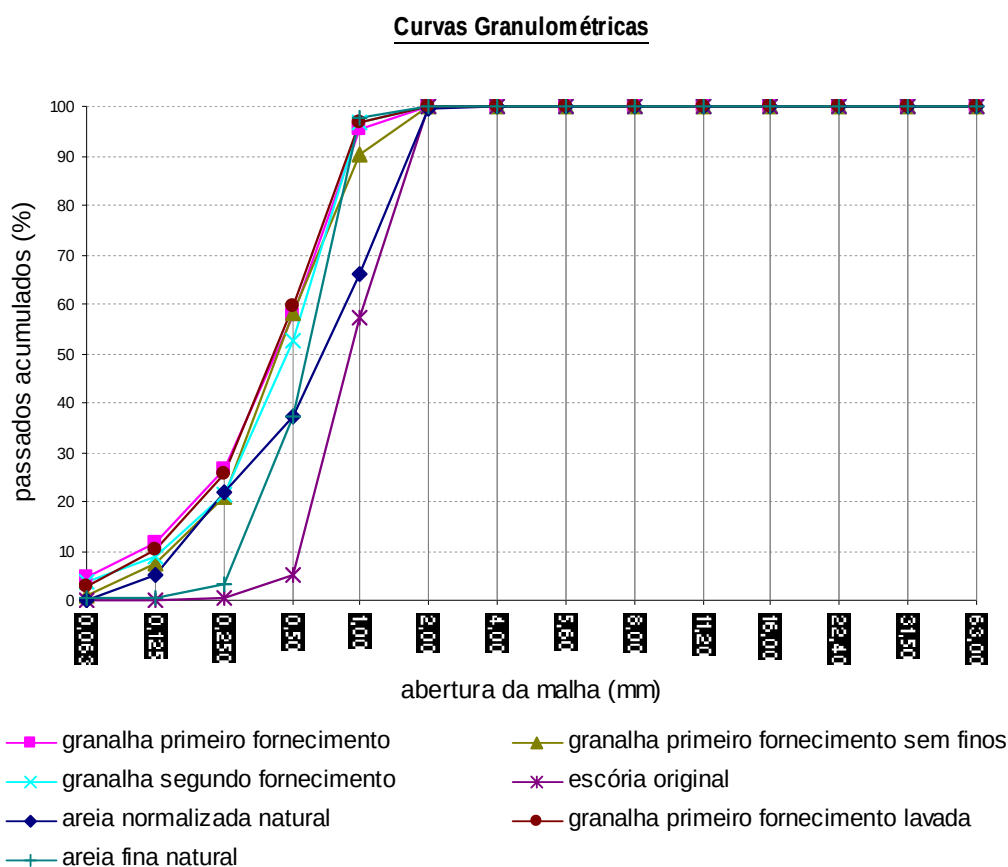


Figura 63. Curvas granulométricas dos agregados finos estudados.

4.6 Cimento

O cimento usado na produção das argamassas foi o cimento Portland Tipo I 42,5 (sem adições), à exceção da Série 8 em que foi usado o cimento Portland Tipo II 32,5.

5. RESULTADOS

5.1 Espalhamento

O espalhamento da argamassa foi medido para as Séries 1 e 2 de argamassas produzidas.



Figura 64. Ensaio do espalhamento de argamassas.

Na Série 1 a dosagem de água foi mantida constante para todas as argamassas, enquanto que na Série 2 a dosagem de água foi sendo ajustada à medida que se aumentava a percentagem de granelha, de modo a obter-se a mesma consistência em todas as argamassas da Série.

Os resultados do espalhamento das argamassas medidos são os apresentados no Quadro 5, e traduzem a média dos três valores obtidos para cada percentagem de substituição de areia por granelha de cobre.

% de substituição de areia por gralha	Série 1		Série 2		Série 9	
	Dosagem de água (ml)	Espalhamento (%)	Dosagem de água (ml)	Espalhamento (%)	Dosagem de água (ml)	Espalhamento (%)
0%	225	19,0	225	19,5	225	19,6
25%	225	17,6	235	20,1	235	20,5
50%	225	17,1	245	19,2	245	20,4
75%	225	15,8	265	20,5	265	20,8

Quadro 5. Resultados do espalhamento das argamassas da Série 1, Série 2 e Série 9.

5.2 Tempo de presa

Durante a produção das argamassas verificou-se que, à medida que se aumentava a percentagem de substituição da areia por gralha, os períodos de início e final de presa eram mais prolongados que os verificados nas argamassas de referência.

O ensaio do tempo de presa foi realizado apenas para as argamassas da Série 3.



Figura 65. Ensaio dos tempos de presa com recurso a equipamento automático.

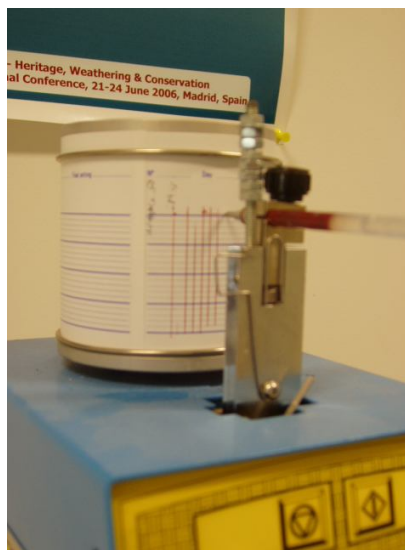


Figura 66. Ensaio dos tempos de presa com recurso a equipamento automático.

Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 6.

Início e fim de presa (horas)				
% de substituição	0 %	25 %	50 %	75 %
Início de presa (h)	2,5	4,4	7,3	4,3
Fim de presa (h)	5,3	8,0	13,3	12,0

Quadro 6. Resultados dos tempos de início e fim de presa das argamassas da Série 3.

5.3 Resistência à compressão

Os resultados da resistência à compressão obtidos nas argamassas de todas as séries produzidas estão apresentados no Quadro 7 para as idades de 7, 28, 60 e 90 dias de idade.

Resistência à compressão (MPa)					
Série 1	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	42,3	56,5	65,6	63,3
	25%	37,9	50,3	54,8	56,1
	50%	35,2	46,9	52,1	53,1
	75%	33,5	44,4	51,0	52,8
Série 2	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	42,2	57,9	63,1	63,6
	25%	37,2	48,6	53,2	53,1
	50%	33,9	44,1	49,8	52,3
	75%	28,7	41,1	47,3	49,0
Série 3	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	41,0	54,1	60,3	59,4
	25%	39,0	51,1	54,0	54,7
	50%	29,9	44,6	50,7	51,5
	75%	34,4	47,1	40,8	46,8
Série 4	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	42,8	54,6	59,8	59,7
	25%	35,8	43,6	44,6	47,9
	50%	29,6	41,7	39,3	44,1
	75%	28,0	39,9	35,9	40,0
Série 5	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	42,9	54,5	60,8	63,9
	25%	36,9	44,2	45,6	52,3
	50%	32,6	38,2	45,3	43,0
	75%	26,9	29,4	34,3	33,7
Série 6	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	43,5	55,8	55,2	59,5
	25%	37,9	44,7	51,2	48,4
	50%	28,2	41,9	45,7	44,7
	75%	30,1	37,5	41,1	42,2
Série 7	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	45,7	56,6	59,3	58,1
	25%	43,4	54,7	56,4	56,3
	50%	38,4	49,7	51,3	49,5
	75%	35,8	46,1	40,1	48,3
Série 8	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	27,1	36,7	37,0	-
	25%	22,3	29,8	32,5	-
	50%	17,8	28,0	33,2	-
	75%	13,5	26,0	24,5	-
Série 9	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	-	50,8	-	-
	25%	-	40,7	-	-
	50%	-	39,5	-	-
	75%	-	35,1	-	-

Quadro 7. Resultados da resistência à compressão das argamassas de todas as séries produzidas a todas as idades ensaiadas.

5.4 Resistência à flexão

Os resultados da resistência à flexão obtidos nas argamassas de todas as séries produzidas estão apresentados no Quadro 8 para as idades de 7, 28, 60 e 90 dias.

Resistência à flexão (MPa)					
Série 1	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	7,39	9,34	10,34	9,02
	25%	6,66	7,70	8,50	8,61
	50%	6,05	7,66	8,27	7,75
	75%	5,24	7,24	8,04	8,67
Série 2	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	6,89	9,07	9,99	9,30
	25%	6,51	8,23	9,30	8,44
	50%	6,13	7,96	8,73	7,92
	75%	5,09	7,35	7,58	8,04
Série 3	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	7,54	9,30	9,23	9,30
	25%	6,39	8,54	8,42	7,92
	50%	5,51	7,47	7,77	8,04
	75%	5,44	7,70	7,43	8,58
Série 4	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	7,77	8,65	8,96	9,19
	25%	6,70	7,35	7,73	7,89
	50%	5,47	6,81	6,93	7,12
	75%	5,24	6,74	6,89	7,85
Série 5	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	8,00	8,15	9,76	10,22
	25%	6,70	8,04	8,19	8,96
	50%	6,05	6,66	8,08	7,70
	75%	5,51	6,13	6,32	7,35
Série 6	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	7,66	8,92	8,84	9,46
	25%	7,16	7,31	7,77	8,35
	50%	6,05	6,89	7,92	7,35
	75%	5,28	6,70	7,20	7,85
Série 7	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	7,92	9,07	9,80	8,84
	25%	6,97	8,58	9,11	8,58
	50%	6,47	7,96	9,00	8,42
	75%	5,78	7,47	7,81	9,07
Série 8	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	5,44	7,08	7,20	-
	25%	4,48	5,90	6,70	-
	50%	3,98	5,44	6,51	-
	75%	3,14	4,86	5,24	-
Série 9	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	-	8,15	-	-
	25%	-	7,81	-	-
	50%	-	7,01	-	-
	75%	-	6,05	-	-

Quadro 8. Resultados da resistência à flexão das argamassas de todas as séries produzidas a todas as idades ensaiadas.

5.5 Massa volúmica

Os valores da massa volúmica obtidos nas argamassas de todas as séries produzidas estão apresentados no Quadro 9, e foram medidos em todos os provetes ensaiados às idades de 7, 28, 60 e 90 dias. Os provetes encontravam-se saturados.

Massa volúmica (kg/m³)					
Série 1	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	228	2305	2347	2302
	25%	2380	2344	2387	2379
	50%	2487	2528	2515	2546
	75%	2668	2678	2630	2684
Série 2	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2309	2310	2325	2322
	25%	2406	2422	2405	2457
	50%	2509	2536	2509	2521
	75%	2670	2655	2645,3	2668
Série 3	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2294	2320	2314	2304
	25%	2391	2393	2410	2384
	50%	2496	2521	2563	2552
	75%	2647	2704	2686	2706
Série 4	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2292	2288	2301	2316
	25%	237	2347	2390	2361
	50%	2462	2471	2492	2458
	75%	2577	2627	2602	2597
Série 5	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2325	2288	2345	2360
	25%	2417	2428	2479	2457
	50%	2492	2539	2544	2506
	75%	2554	2583	2552	2637
Série 6	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2250	2270	2301	2344
	25%	2365	2378	2376	2421
	50%	2453	2450	2474	2495
	75%	2579	2596	2583	2598
Série 7	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2352	2313	2302	2307
	25%	2428	2450	2455	2441
	50%	2577	2470	2615	2645
	75%	2713	2781	2744	2773
Série 8	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	2257	2284	2280	-
	25%	2341	2360	2340	-
	50%	2456	2436	2501	-
	75%	2466	2589	2564	-
Série 9	% substituição	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
	0%	-	2308	-	-
	25%	-	2448	-	-
	50%	-	2524	-	-
	75%	-	2742	-	-

Quadro 9. Resultados dos valores da massa volúmica medidos em todas as séries produzidas e a todas as idades ensaiadas.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos para as várias argamassas produzidas: são comparados os comportamentos mecânicos observados para os diferentes tipos de gralha e de areia, entre outras variáveis, e o seu desenvolvimento no tempo.

6.1 Série 1

Na Série 1 a gralha usada foi a gralha do primeiro fornecimento e a dosagem de água foi mantida constante em todas as amassaduras e percentagens de substituição de areia por gralha.

6.1.1 Espalhamento

Durante a produção das argamassas verificou-se que a trabalhabilidade ia sendo afectada à medida que se aumentava a percentagem de substituição da areia por gralha. Esse efeito está representado na Figura 67, que foi elaborado com os registos obtidos das medições do espalhamento das argamassas produzidas.

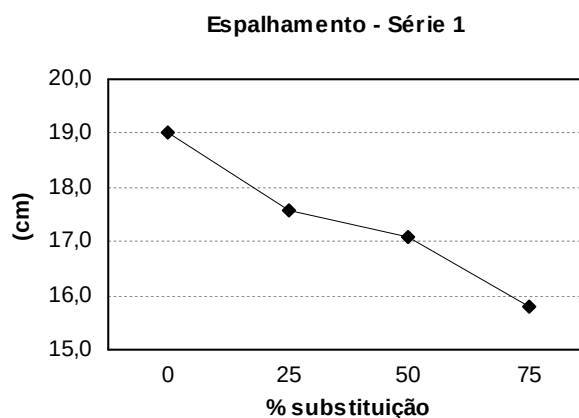


Figura 67. Resultados do espalhamento das argamassas da Série 1.

Apesar de se verificarem diminuições do valor do espalhamento, pode dizer-se que a relação água/cimento foi constante em todas as argamassas dado que a granalha não tem capacidade de absorção de água muito superior à da areia. A redução do espalhamento poderá estar relacionado por exemplo com a forma das partículas da granalha.

6.1.2 Resistência mecânica

Dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica nas argamassas da Série 1, verificam-se reduções de resistência à medida que se aumenta a percentagem de substituição de areia por granalha. As Figuras 68 e 69 apresentam graficamente os resultados da resistência à compressão e à flexão, respectivamente.

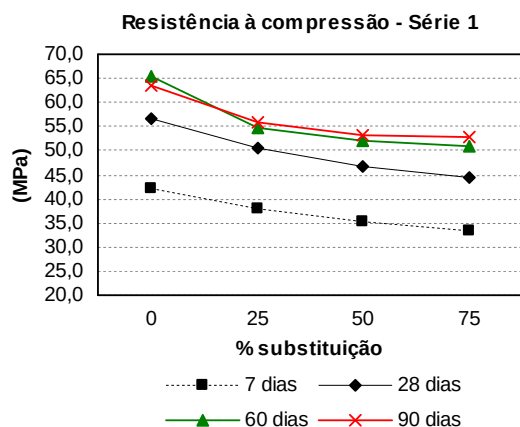


Figura 68. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 1 aos 7, 28, 60 e 90 dias.

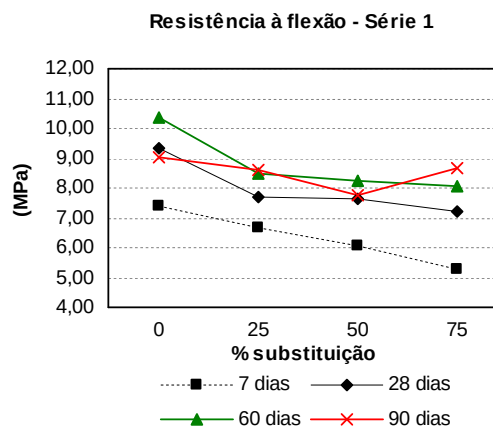


Figura 69. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 1 aos 7, 28, 60 e 90 dias.

Da análise do gráfico da resistência à compressão (Figura 68), verificam-se decréscimos de resistência na ordem dos 22% nas argamassas de 75% de granalha quando se compara com as argamassas de referência, o que ocorre para todas as idades das argamassas da Série.

Quanto à resistência à flexão (Figura 69) verifica-se que aos 7 dias as argamassas de 75% de granalha em substituição da areia natural apresentam decréscimos de 29% em comparação com a argamassa de referência. Aos 28 e 60 dias esse decréscimo diminui ligeiramente para 22%. A lei de resultados obtidos para os 90 dias não revela exactamente o mesmo comportamento. Os resultados obtidos para a argamassa de referência e para a argamassa de 50% de granalha distorcem um pouco a linearidade da queda verificada nas outras idades.

Dos 7 para os 28 dias a evolução de resistência destas argamassas foi em média de 30%, e dos 28 para os 60 dias cerca de 11%. Dos 60 para os 90 dias não se verifica evolução significativa nas propriedades resistentes das argamassas.

6.1.3 Massa Volúmica

Quanto ao valor da massa volúmica das argamassas (Figura 70), observou-se um aumento gradual como seria de esperar, sendo de 16% o aumento da massa volúmica da argamassa de 75% de granalha face à argamassa de referência.

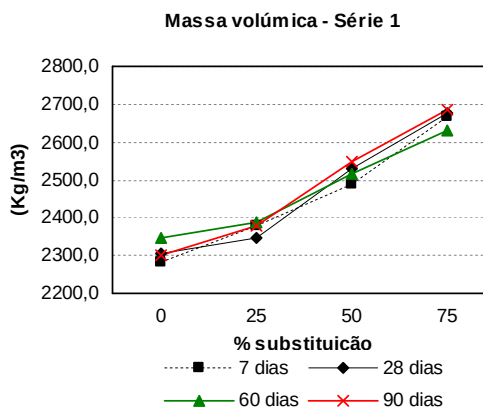


Figura 70. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 1 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.2 Série 2

Na Série 2, do mesmo modo que na Série 1, substituiu-se parcialmente a areia por granalha do primeiro fornecimento. O parâmetro fixo foi a consistência das argamassas.

6.2.1 Espalhamento

A dosagem de água usada na produção das argamassas foi sendo incrementada à medida que se aumentava a percentagem de granalha de modo a que o valor do espalhamento se mantivesse na ordem dos 19 ± 1 cm. O Gráfico 1 mostra a dosagem de água necessária para cada tipo de argamassa.

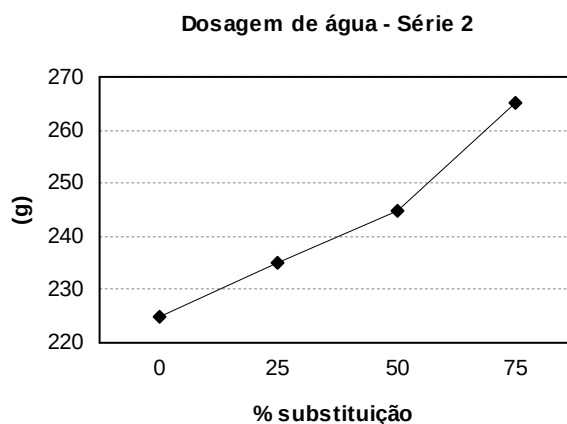


Figura 71. Dosagem de água usada nas diferentes argamassas da Série 2.

6.2.2 Resistência mecânica

As argamassas da Série 2 também apresentam diminuição de resistência à medida que se aumenta a substituição de areia por granalha (Figuras 72 e 73). Uma vez que a relação água/cimento nesta Série é superior à da Série 1 é de esperar que os decréscimos nas propriedades resistentes sejam também superiores.

Para a resistência à compressão (Figura 72) o decréscimo observado nas argamassas de 75% de granalha, quando se compara com a resistência das argamassas de referência, é cerca de 32% aos 7 dias e de 25% para as outras idades.

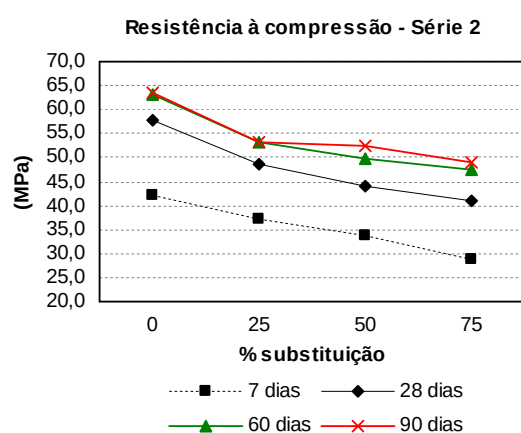


Figura 72. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 2 aos 7, 28, 60 e 90 dias.

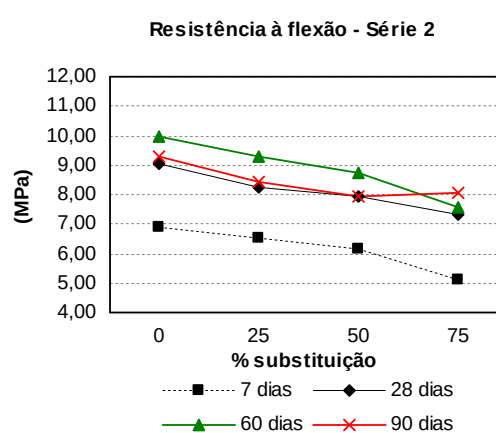


Figura 73. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 2 aos 7, 28, 60 e 90 dias.

Os valores da resistência à flexão (Figura 73) decresceram até um máximo de 26% aos 7 dias e de 19% aos 28 dias, para as argamassas com 75% de granalha, face aos obtidos para as argamassas de referência. No entanto, aos 60 dias o decréscimo verificado na resistência à flexão é de 24%, sendo superior ao obtido para os 28 dias; e de 14% aos 90 dias. Perante estes resultados não pode dizer-se que a diminuição de resistência à flexão das argamassas com maior quantidade de granalha, quando comparada com as argamassas de areia natural, vai sendo progressivamente menor ao longo do tempo.

Comparando-se a evolução dos resultados das propriedades mecânicas das argamassas dos 7 para os 28 dias, nota-se um crescimento médio de 34% observando-se um crescimento máximo de 44% na resistência à flexão da argamassa de 75% de granalha. Até aos 60 dias de cura os valores de resistência das argamassas continuam a aumentar, observando-se que dos 28 para os 60 dias as propriedades mecânicas aumentaram cerca de 10%. Aos 90 dias surge uma paragem no desenvolvimento da resistência à compressão, face aos resultados obtidos aos 60 dias; e na resistência à flexão acontece um decréscimo inesperado em cerca de 5%.

6.2.3 Massa Volúmica

O aumento da massa volúmica da argamassa de 75% de granalha face à argamassa de referência (Figura 74) foi de 15%.

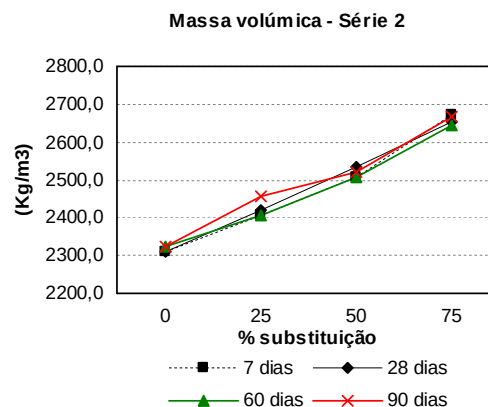


Figura 74. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 2 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.3 Série 3

Para verificação da consistência dos resultados obtidos das argamassas da Série 1 foi produzida a Série 3 com os mesmos parâmetros e nas mesmas condições em que as primeiras foram produzidas. Para esta Série não foi medido o valor espalhamento das argamassas.

6.3.1 Resistência mecânica

Em semelhança com a Série 1, na Série 3 também se verifica decréscimo das propriedades mecânicas nas argamassas (Figuras 75 e 76).

Observando os resultados da resistência à compressão apresentados na Figura 75, verificam-se decréscimos de resistência na ordem dos 13% para as argamassas de 75% de granalha face às argamassas de referência, aos 28 dias de cura. No entanto são as argamassas de 50% de granalha que, aos 7 e 28 dias, apresentam menor resistência à compressão. Este comportamento também se constata nos resultados da resistência à flexão das argamassas (Figura 76).

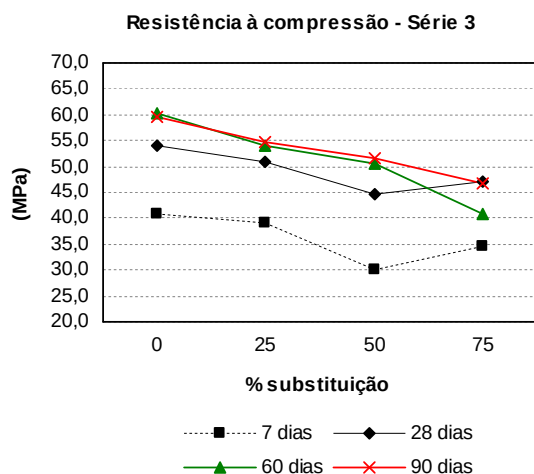


Figura 75. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 3 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

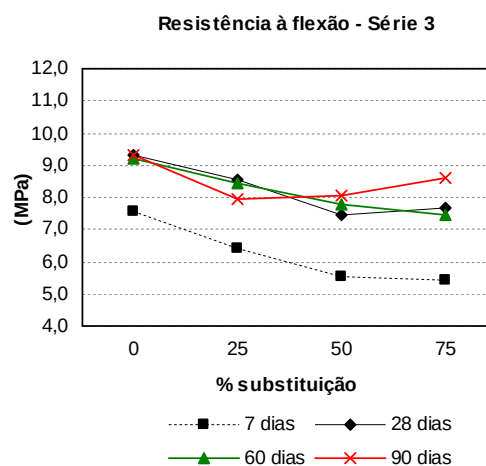


Figura 76. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 3 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

As argamassas de 75% de granalha em substituição da areia natural, aos 7 dias, apresentam decréscimos de 28% na resistência à flexão quando em comparação com a argamassa de referência. Aos 28 e 60 dias esse decréscimo diminui ligeiramente para 18%. Aos 90 dias os valores obtidos nas argamassas de 25% de granalha são inferiores aos obtidos para os 28 e 60 dias de cura, ao contrário do espectável, razão pela qual este resultado deva ser negligenciado nas curvas de resultados obtidos.

O desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas dos 7 para os 28 dias foi cerca de 35%. Nos resultados da resistência à flexão não se observam evoluções dos 28 para os 60 dias nem dos 60 para os 90 dias de cura das argamassas. Para a resistência à compressão quantifica-se ainda cerca de 4% de desenvolvimento, em média, dos 28 para os 60 dias, idade a partir da qual deixa de existir de evolução da resistência.

6.3.2 Massa Volúmica

Do mesmo modo que nas outras Séries de argamassas produzidas, na Série 3 há incremento de cerca de 16% da massa volúmica das argamassas (Figura 77) à medida que se substitui areia natural por granalha.

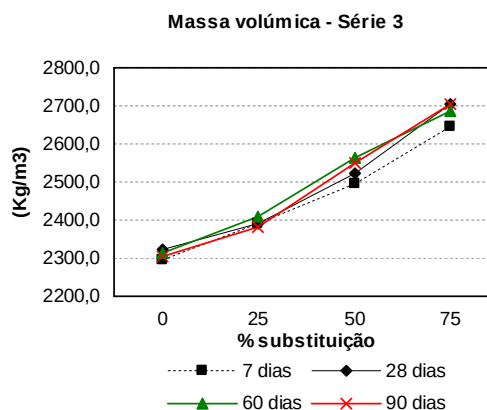


Figura 77. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 3 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.3.3 Tempo de início e fim de presa

Como já foi referido, durante a produção das argamassas verificou-se que, à medida que se aumentava a percentagem de substituição da areia por granalha, os períodos de início e final de presa são mais prolongados que os verificados nas argamassas de referência. Por este motivo foram medidos os tempos de presa para as argamassas da Série 3.

6.4 Série 4

Na Série 4 a granalha de cobre foi submetida a um processo de lavagem para remoção das partículas de óxido de ferro muito finas e pulverolentas presentes na sua constituição e que se presume serem prejudiciais no desenvolvimento das resistências das argamassas. A dosagem de água foi constante para todas as percentagens de substituição de areia natural por granalha de cobre.

6.4.1 Resistência mecânica

Os resultados das propriedades resistentes das argamassas da Série 4 revelam decréscimos de resistência, do mesmo modo que se observou nas Séries 1 e 3, em que foi usada granalha de cobre sem lavagem (Figuras 78 e 79).

Aos 7 dias de cura as argamassas de 75% de escória de cobre apresentam valores de resistência à compressão 35% inferiores aos da argamassa de referência. Essa mesma grandeza de decréscimo é verificada nas outras idades ensaiadas, com excepção para os 28 dias, em que a redução de resistência é de 26%.

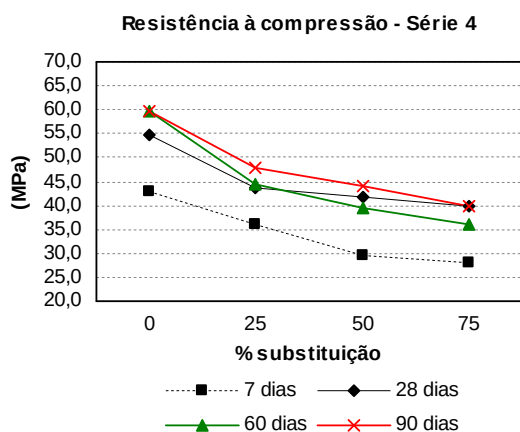


Figura 78. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 4 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

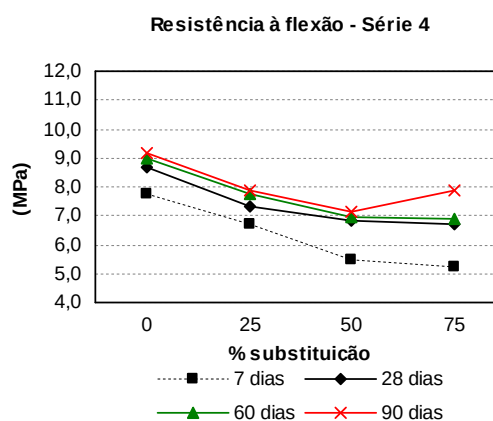


Figura 79. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 4 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

Quanto à resistência à flexão aos 7 dias os valores são idênticos: decréscimo de cerca de 33% na resistência das argamassas com 75% de escória de cobre face às argamassas de referência. Para as outras idades mantém-se a mesma tendência de decréscimo de resistência à flexão à medida que se aumenta a dosagem de granalha sem lavagem, nas argamassas.

Ao analisar os resultados, quer da resistência à compressão quer da resistência à flexão, pode dizer-se que nesta série de argamassas, ao contrário do que se verificou para as Séries 1 e 3, não houve evolução significativa nas propriedades mecânicas a partir dos 28 dias de idade.

6.4.2 Massa Volúmica

Nesta Série o aumento da massa volúmica das argamassas com escória de cobre foi de apenas 13% (Figura 80).

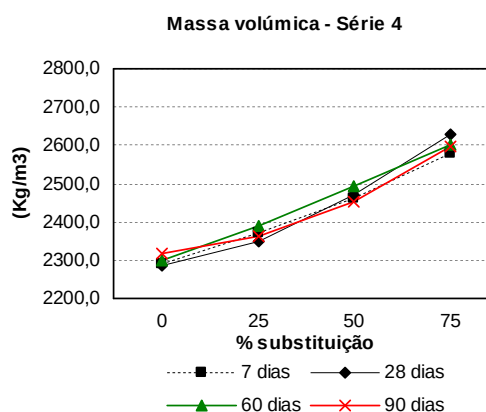


Figura 80. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 4 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.5 Série 5

Na produção das argamassas da Série 5 foi usada granalha de cobre em que se rejeitou previamente a fracção fina da sua composição granulométrica, ou seja, a parte do material que atravessa a malha do peneiro de abertura 0,063mm. Do mesmo modo que nas outras séries, a dosagem de água nas argamassas foi a mesma para todas as percentagens de substituição de areia por granalha.

6.5.1 Resistência mecânica

Os resultados da resistência mecânica das argamassas da Série 5 (Figuras 1 e 2) são os que evidenciam maiores desfasamentos entre as argamassas de 75% de granalha de cobre e as argamassas de referência, quando se compara com os obtidos em qualquer outra das outras séries testadas.

Exceptuando os resultados das argamassas ensaiadas aos 7 dias, a resistência à compressão (Figura 1) das argamassas de 75% de escória de cobre é cerca de 46% inferior à da argamassa de referência.

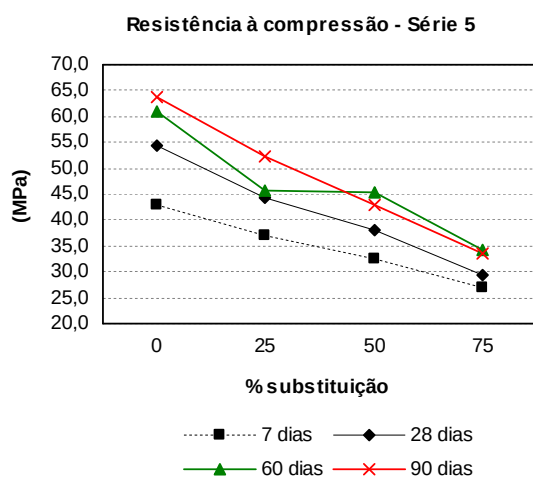


Figura 81. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 5 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

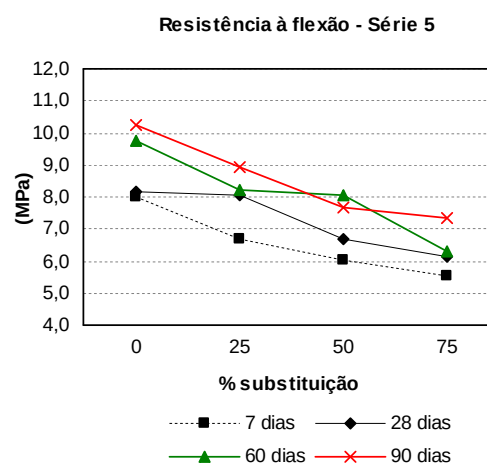


Figura 82. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 5 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

Já para a resistência à flexão (Figura 82) a queda de resistência não é tão acentuada, sendo, no pior dos casos, de 35% aos 60 dias de idade.

No que se refere à evolução de resistência no tempo, negligenciando os resultados das argamassas de 50% de granalha de cobre obtidos aos 60 dias, pode dizer-se as argamassas da Série 5 mostram desenvolvimento de resistência para além dos 60 dias de cura.

6.5.2 Massa Volúmica

Os resultados da massa volúmica das argamassas da Série 5 são inferiores aos obtidos para as outras séries. Nesta Série o aumento da massa volúmica das argamassas com escória de cobre foi de apenas 11% e, pela análise da Figura 22, estas argamassas são as que mostram maior variação nos valores de massa volúmica determinados.

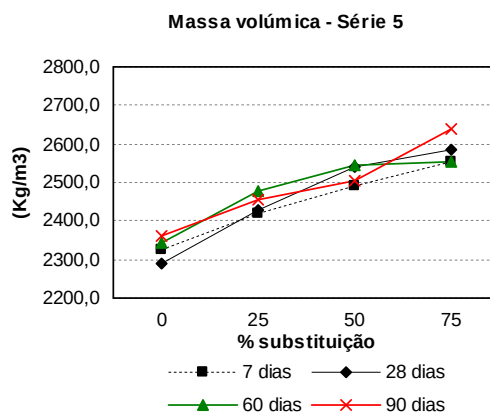


Figura 83. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 5 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.6 Série 6

As argamassas da Série 6 foram produzidas com granalha de cobre de um segundo fornecimento. A granalha recebida apresentava menor quantidade de óxido de ferro que a granalha do primeiro fornecimento, bem como menor quantidade de resíduos grossos, e foi usada na produção das argamassas sem qualquer tratamento prévio de lavagem ou remoção de poeiras. A dosagem de água foi a mesma que a usada nas outras séries e mantida constante em todas as percentagens de substituição de areia por granalha.

6.6.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica destas argamassas (Figuras 84 e 85) sofre reduções superiores às verificadas nas argamassas com a granalha da primeira carga (Série 1 e Série 3), à medida que a percentagem de granalha aumenta na composição da argamassa, ao contrário do que seria de esperar uma vez que a granalha da segunda carga se aparenta mais “limpa”.

Aos 28 dias a resistência à compressão (Figura 84) da argamassa de 75% de granalha são cerca de 33% inferiores à argamassa de referência.

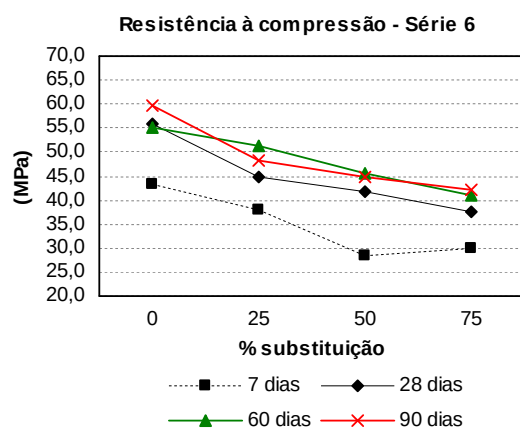


Figura 84. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 6 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

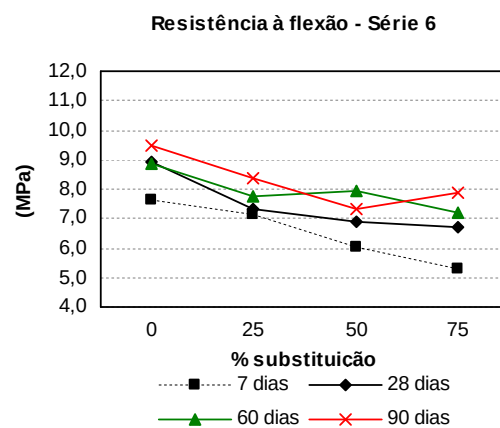


Figura 85. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 6 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

A resistência à flexão das argamassas desta série aos 28 dias de idade também decresce cerca de 25% quando se compara os resultados obtidos na argamassa de referência e na argamassa de 75% de gralha (Figura 85).

De um modo geral, aos 90 dias de cura, as argamassas não apresentam desenvolvimentos de resistência, e o desenvolvimento verificado dos 28 para os 60 dias é menor que na Série 1.

6.6.2 Massa Volúmica

Nesta Série o aumento da massa volúmica das argamassas com 75% de gralha face à argamassa de referência foi cerca de 13% (Figura 86).

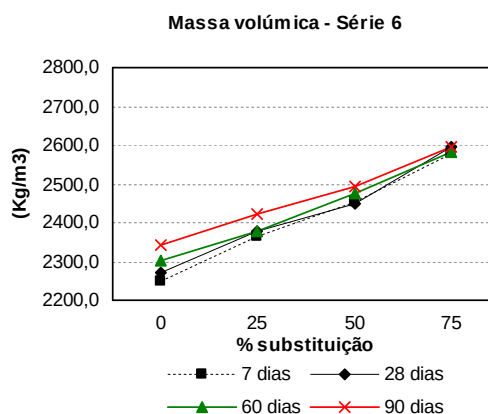


Figura 86. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 6 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.7 Série 7

As argamassas da Série 7 foram produzidas com escória de cobre original, ou seja, granalha sem ter sido usada na decapagem, e por isso ausente de qualquer resíduo ou impureza decorrente do tratamento abrasivo. A dosagem de água foi a mesma que a usada para as outras séries e manteve-se constante em todas as percentagens de substituição de areia por granalha.

6.7.1 Resistência mecânica

Os resultados dos ensaios mecânicos das argamassas de granalha original (Figuras 87 e 88) apresentam decréscimos de resistência sensivelmente da mesma ordem que as argamassas com granalha batida, quando se aumenta a percentagem deste resíduo nas argamassas.

Na argamassa de 75% de granalha original em substituição da areia, a redução de resistência à compressão (Figura 87) é cerca de 18%, quando se compara com a argamassa de referência, aos 28 dias de cura.

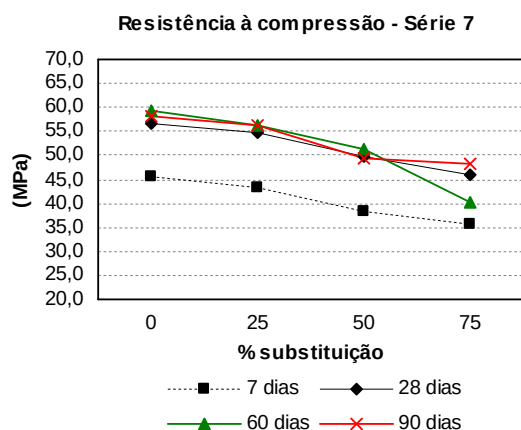


Figura 87. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 7 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

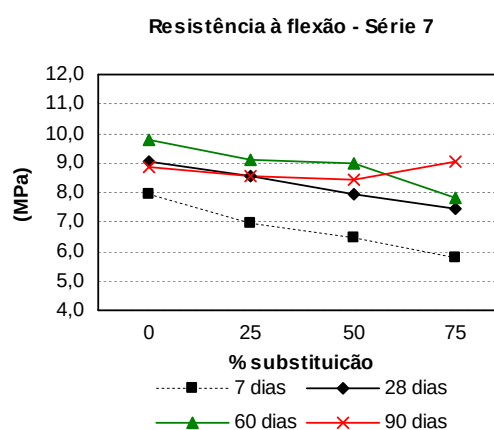


Figura 88. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 7 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

A resistência à flexão (Figura 88) aos 28 dias de idade reduziu em igual valor, 19%, semelhança que só se verificou para a Série 1.

A Figura 87 demonstra que as argamassas com granalha original para além dos 28 dias de cura sofrem um desenvolvimento de resistência à compressão muito ligeiro, apenas 4%, embora os resultados da resistência à flexão mostrem melhorias de cerca de 8% dos 28 para os 60 dias.

6.7.2 Massa Volúmica

Nesta Série com granalha original o aumento da massa volúmica das argamassas com 75% de granalha face à argamassa de referência foi de 20%, sendo o maior que se verificou para todas as séries (Figura 89).

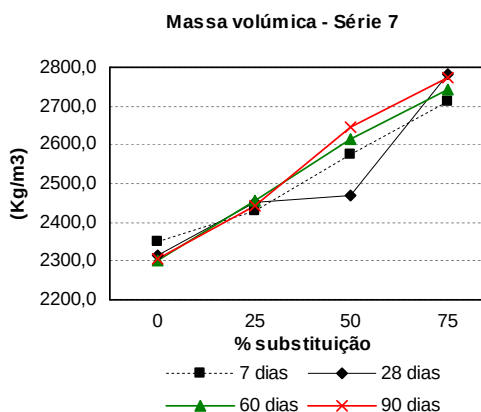


Figura 89. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 7 aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura.

6.8 Série 8

A Série 8 foi produzida com a intenção de se verificar a influência do tipo de cimento no comportamento das argamassas de granalha em substituição parcial da areia. A granalha usada foi a do primeiro fornecimento e o cimento usado foi o 32,5 Tipo II. A dosagem de água foi a mesma usada para a produção das outras séries e foi mantida constante em todas as percentagens de substituição de areia por granalha.

6.8.1 Resistência mecânica

Os resultados obtidos para esta série de argamassas (Figuras 90 e 91) também reflectem decréscimos de resistência à medida que se aumenta a dosagem de granalha. O decréscimo é gradual e atinge um máximo que ronda os 30% na argamassa de 75% de granalha em substituição da areia, aos 28 dias de cura, quer na resistência à compressão como na resistência à flexão.

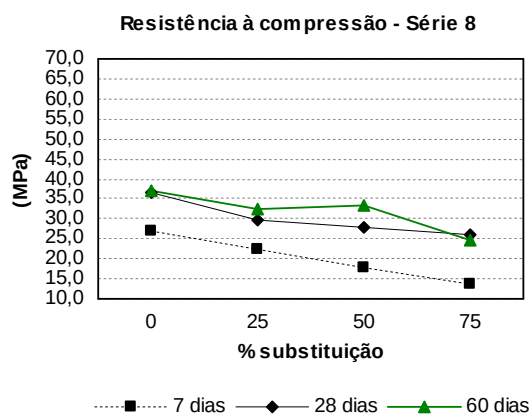


Figura 90. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 8 aos 7, 28 e 60 dias de cura.

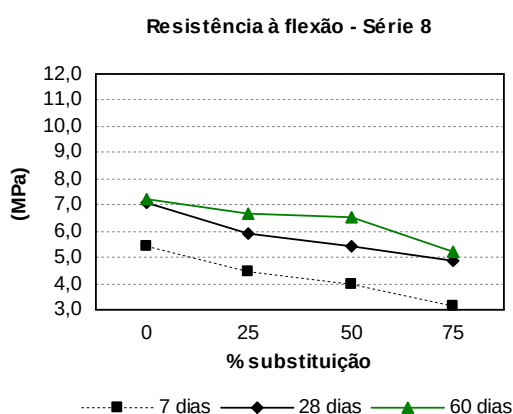


Figura 91. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 8 aos 7, 28 e 60 dias de cura.

O desenvolvimento de resistência que ocorre dos 28 até aos 60 dias é em média 8%. Nesta série não foram produzidos provetes para ensaio aos 90 dias de idade.

6.8.2 Massa Volúmica

O aumento de massa volúmica verificado nas argamassas de 75% de gralha quando comparado com as argamassas de referência, nesta série, foi de 13% (Figura 92).

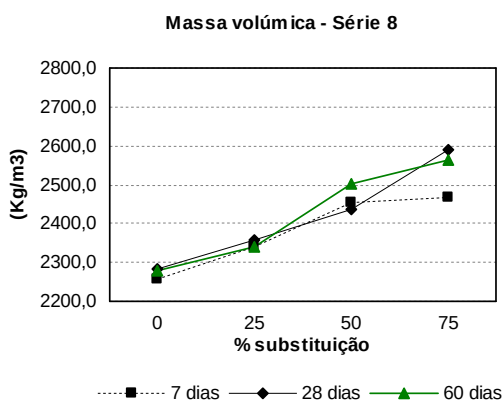


Figura 92. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 7 aos 7, 28 e 60 dias de cura.

6.9 Série 9

As argamassas da Série 9 foram produzidas nos mesmos padrões das argamassas da Série 2, em que se manteve a consistência das argamassas para todas as percentagens de substituição de areia natural por gralha, com a diferença no tipo de areia natural usada: areia fina comum. Tal como apresentado no Capítulo 5, a distribuição granulométrica da areia fina comum é mais próxima da distribuição granulométrica da gralha do que a da areia normalizada.

6.9.1 Resistência mecânica

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica realizados aos 28 dias de cura destas argamassas mostram a mesma tendência de decréscimos verificada para as outras séries de argamassas produzidas, à medida que se aumenta a percentagem de gralha na composição das argamassas (Figuras 93 e 94).

As argamassas de 75% de gralha revelam decréscimos de resistência à compressão na ordem dos 31% (Figura 93); e de 26% para a resistência à flexão (Figura 94), aos 28 dias de idade.

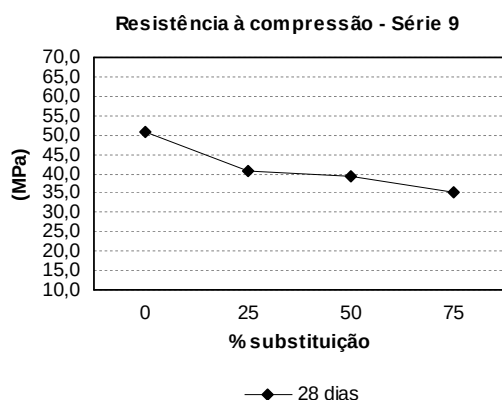


Figura 93. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 9 aos 28 dias de cura.

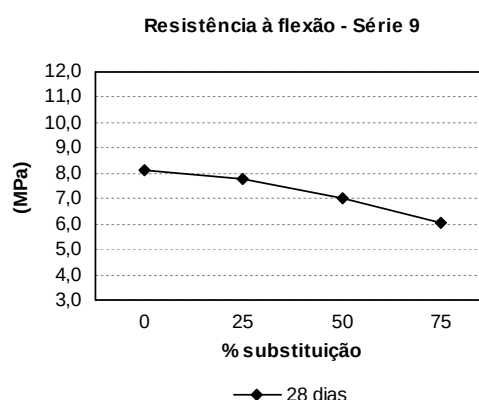


Figura 94. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 9 aos 28 dias de cura.

6.9.2 Massa Volúmica

O aumento de massa volúmica verificado nas argamassas de 75% de gralha quando comparado com as argamassas de referência, nesta série, foi de 19% (Figura 95).

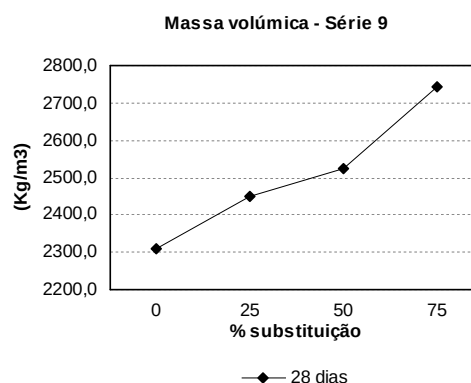


Figura 95. Resultados da massa volúmica das argamassas da Série 9 aos 28 dias de cura.

6.10 Influência da substituição de areia por gralha na resistência mecânica de argamassas

Em todas as séries de argamassas produzidas é evidente o decréscimo de resistência à medida que se aumenta a percentagem de substituição de areia natural por gralha, como se pode observar nas Figuras 96 e 97, que reúnem os resultados da resistência à compressão e à flexão, respectivamente, para todas as séries ensaiadas.

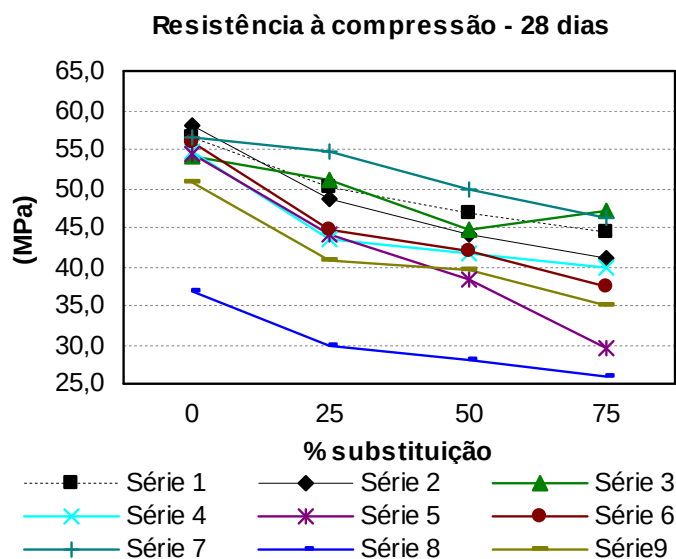


Figura 96. Resultados da resistência à compressão das argamassas de todas as séries produzidas, para a idade e 28 dias.

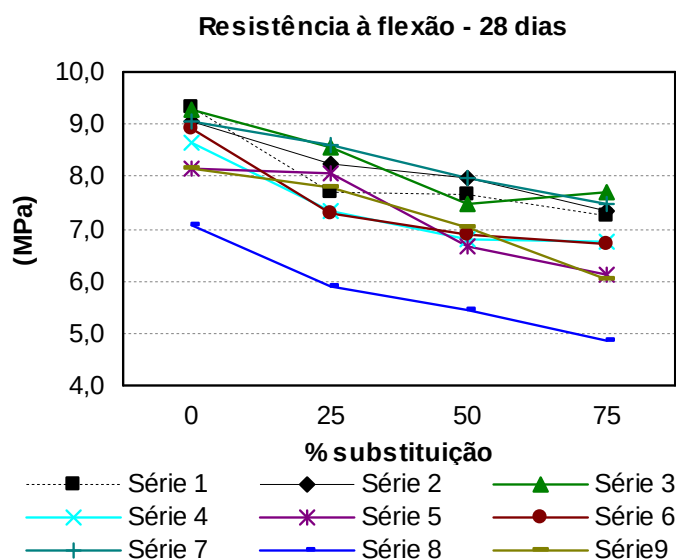


Figura 97. Resultados da resistência à flexão das argamassas de todas as séries produzidas, para a idade e 28 dias.

Dependendo do parâmetro variado em cada série de argamassas o decréscimo de resistência obtido tem maior ou menor variação, mas de um modo geral a redução de resistência que ocorre nas argamassas de 75% de granalha, quando comparada com a argamassa de referência, aos 28 dias de cura, varia desde os 13% aos 46%, para a resistência à compressão, e desde os 18% aos 35%, para a resistência à flexão.

Para as argamassas de 50% de granalha, a redução das propriedades mecânicas face às argamassas de referência aos 28 dias de idade variam entre os 17% e os 30%, para a resistência à compressão, e entre os 12% e os 23%, para a resistência à flexão.

As reduções de resistência obtidas nas argamassas de 25% de granalha em substituição parcial da areia são mais ligeiras, oscilando entre os 3% e os 20%, para a resistência à compressão, e entre os 6% e os 18%, para a resistência à flexão.

Na verdade os resultados de resistência mecânica obtidos contrariam qualquer expectativa. Numa primeira avaliação das características da granalha julgou-se que a sua granulometria, idêntica à da areia fina, e a sua elevada dureza seriam factores que favoreceriam a resistência das argamassas. Isso não se verificou, mas no mínimo eram esperados valores de resistência próximos dos obtidos nas argamassas de referência, até porque a dosagem de cimento não foi diminuída.

Contudo deve admitir-se que a granulometria da granalha é mais fina que a da areia natural, podendo influenciar de modo negativo, quando se faz a sua comparação com a resistência das argamassas de referência. Por exemplo a Série 7 em que se usou escória original, cujo módulo de finura é um pouco mais próximo do da areia natural, os decréscimos de resistência à medida que se aumentava a dosagem de escória original são inferiores aos obtidos quando se substitui a areia natural por granalha batida. No entanto, perante as figuras 96 e 97, vê-se que este factor influencia apenas a resistência à compressão e que não tem qualquer expressão nos resultados da resistência à flexão.

Para uma interpretação global mas objectiva do efeito da granalha nas propriedades das argamassas, deverá dar-se mais ênfase aos resultados obtidos nas Séries 1, 3 e 6. Nas Séries 1 e 3, como já foi referido, foi usada granalha do primeiro fornecimento e na Série 6 foi usada granalha de um segundo fornecimento em momentos temporais distintos, e esta segunda granalha apresentava menor quantidade de resíduos resultantes de processos de decapagem.

Note-se que a Série 3 foi produzida para verificação da regularidade dos resultados obtidos na Série 1, e nestas duas séries de argamassas não foi introduzido qualquer parâmetro de distinção. Efectivamente os resultados

demonstram que pode existir alguma variabilidade de resistências mesmo quando se usa granalha de cobre do mesmo fornecimento, como substituto parcial da areia natural (Figuras 98 e 99).

Já para a Série 6 e ao contrário do que seria de esperar, as argamassas cuja granalha se apresenta “mais limpa” são as “menos resistentes”, como se constata nas Figura 98 e 99.

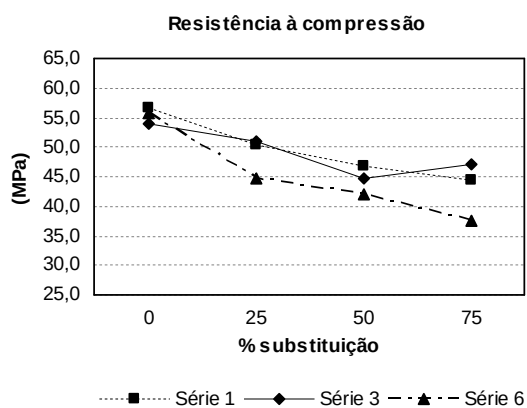


Figura 98. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 1, 3 e 6 aos 28 dias de cura.

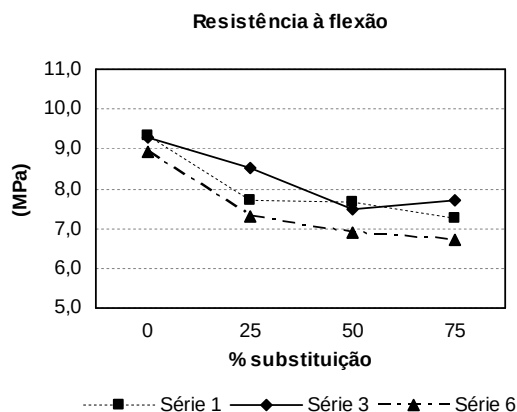


Figura 99. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 1, 3 e 6 aos 28 dias de cura.

A razão para a diferença de resultados entre as Séries 1 e 3 está na própria definição do material em estudo: a granalha. A granalha é um resíduo da produção do cobre, escória de cobre, que quando é usada como decapante é projectado em alta pressão sob superfícies metálicas ou outras para remoção de tintas antigas ou para o tratamento de superfícies metálicas atacadas pela corrosão. Os “sub-produtos” deste processo são incorporados na granalha que depois segue para depósito em aterro. A granalha adquire assim uma quantidade de resíduos de tinta e óxido de ferro indeterminada e muito variável.

A redução de resistência à compressão das argamassas das Séries 1 e 3 foi quantificada para cada percentagem de substituição de areia por granalha, e está apresentada Figura 100.

Para a argamassa de 25% de granalha a redução de resistência variou entre os 6% e os 11%. Para a argamassa com granalha de 50% a redução foi a mesma para as duas séries: 17,5%. Já para a argamassa de 75% de granalha, a redução de resistência à compressão anda no intervalo dos 13% a 22%.

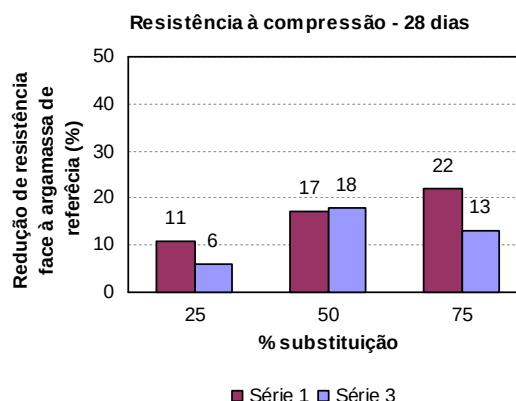


Figura 100. Redução da resistência à compressão das argamassas com granalha da Série 1 e Série 3, aos 28 dias, face às argamassas de referência das mesmas séries.

Fazendo a mesma análise aos resultados da resistência à compressão obtidos nas argamassas de granalha do segundo fornecimento, Série 6, encontram-se desfasamentos superiores entre estes e os obtidos para as argamassas de referência (Figura 101). As reduções variaram dos 20% aos 33%, respectivamente para as argamassas de 25% e 75%.

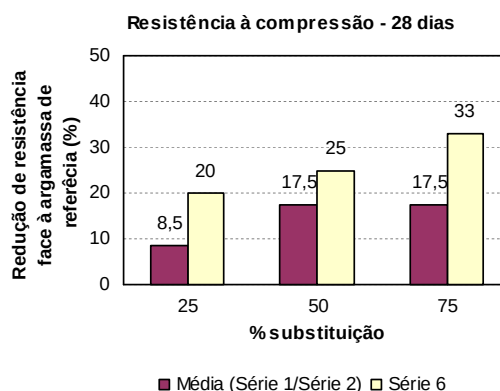


Figura 101. Comparação da redução da resistência à compressão das argamassas com granalha da Série 1 e da Série 2 com as da Série 6, aos 28 dias, face às argamassas de referência das mesmas séries.

Perante os resultados obtidos nas três séries em análise tem de se afirmar que a resistência das argamassas de granalha é tanto maior quanto maior é a quantidade de resíduos de decapagem presentes na granalha; e do mesmo modo, a diminuição de resistência que se verifica nas argamassas à medida que se aumenta a dosagem de granalha é tanto menor quanto mais suja esta estiver.

6.11 Influência da fracção granulométrica fina da granalha de cobre nas propriedades das argamassas

Quando se comparam as argamassas produzidas com granalha previamente lavada, Série 4; e granalha sem fracção fina, Série 5, com as argamassas produzidas com granalha sem tratamento prévio como as da Série 3, as reduções de resistência são evidentes. Como se pode observar pelas Figuras 102 e 103, ao contrário do esperado,

as argamassas das Séries 4 e 5 apresentam um comportamento mais fraco quer à compressão quer à flexão, quantificando-se as reduções de resistência em cerca de 10%, em média.

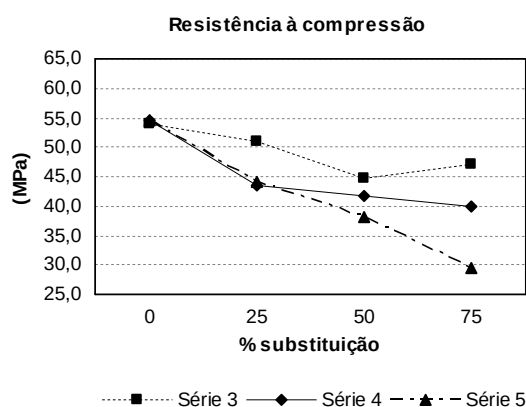


Figura 102. Resultados da resistência à compressão das argamassas das Séries 3, 4 e 5, aos 28 dias de cura.

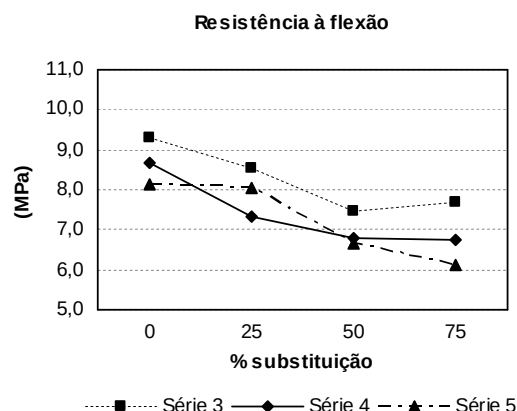


Figura 103. Resultados da resistência à flexão das argamassas das Séries 3, 4 e 5, aos 28 dias de cura.

No que se refere aos resultados obtidos para a resistência à compressão, à medida que se aumenta a dosagem de gralha nas argamassas das Série 4 e 5 a redução de resistência face à argamassa de referência é superior à verificada em todas as outras argamassas produzidas (Figura 104). As reduções variam entre os 20% e os 30%, tendo-se observado que para a Série 5 a argamassa de 75% apresentou menos 46% de resistência do que a argamassa de referência.

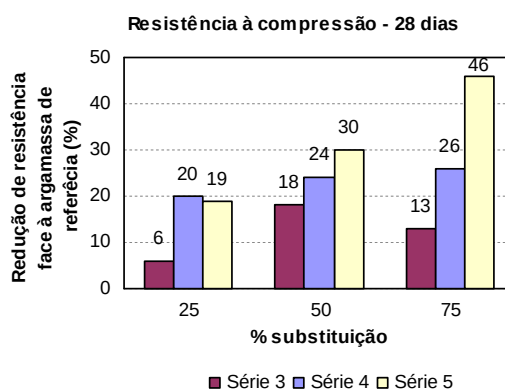


Figura 104. Redução da resistência à compressão das argamassas com gralha da Série 3, 4 e 5, aos 28 dias, face às argamassas de referência das mesmas séries.

De um modo geral, perante os resultados obtidos, pode dizer-se que o tratamento prévio da gralha, quer seja recorrendo a lavagem para remoção de poeiras quer seja eliminando a fracção fina da sua granulometria, não é favorável ao desempenho mecânico das argamassas, a contrário do que era esperado, pois é sabido que numa composição de uma mistura cimentícia quaisquer partículas finas que tenham a mesma granulometria do cimento, ou que pelo menos tenham dimensões inferiores a 0,063mm, vão actuar como “cimento”, podendo ou não ter acção ligante. Ou seja, partículas com essa dimensão fina vão interagir nas reacções de endurecimento podendo actuar de modo negativo no acontecimento destas.

6.12 Influência da substituição de areia por granalha na massa volúmica de argamassas

A massa volúmica das argamassas com substituição parcial da areia por granalha aumenta cerca de 133 kg/m^3 à medida que se faz incrementos de substituição de 25%, até um máximo de 400 kg/m^3 nas argamassas de 75% de granalha.

Na Figura 105 estão representados os padrões de aumento da massa volúmica de todas as Séries de argamassas produzidas, e consegue distinguir-se que as argamassas em que não foi feito tratamento prévio à granalha, que foram as das Séries 1, 2 e 3, são as que mostram massas volúmicas mais elevadas, próximas dos 2700 kg/m^3 . Nestas séries, a massa volúmica das argamassas de 75% de granalha em substituição da areia é 16% superior à da argamassa de referência.

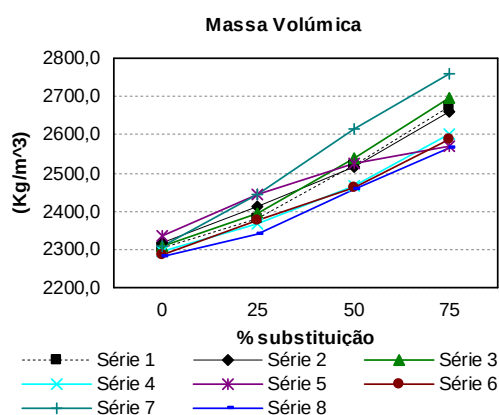


Figura 105. Resultados da massa volúmica das argamassas de todas as séries produzidas.

As Séries 4 e 5, em que foi retirada à granulometria da granalha a quase totalidade da parte fina, a massa volúmica das argamassas não ultrapassou os 2600 kg/m^3 , tendo as argamassas de 75% de granalha aumentado apenas em 13% face às argamassas de referência.

Estas constatações não reflectem as diferenças entre os valores de massa volúmica da granalha lavada e da granalha em que foi feita a tentativa de retirar a fracção fina; e os valores de massa volúmica da granalha que foi usada em substituição parcial da areia tal qual foi recebida dos estaleiros navais: 3870 kg/m^3 e 3850 kg/m^3 , respectivamente. Efectivamente a remoção da fracção fina da granalha (partículas inferiores a $0,063\text{mm}$), que se presume ser maioritariamente constituída por partículas de óxido de ferro, faz com que a sua massa volúmica seja ligeiramente aumentada mas não conduz a argamassas de massa volúmica igualmente superiores. A verdade é que as argamassas das Séries 4 e 5 apresentaram resistência mecânica inferior às da Série 3, por exemplo, em que se usou a granalha sem tratamento. Os cristais decorrentes das reacções de hidratação do cimento deverão ter sido formados em maior quantidade nas argamassas da Série 3 que nas Séries 4 e 5, o que conduz a incrementos na massa volúmica. O aumento que a massa volúmica das argamassas da Série 6 sofreu foi da mesma ordem de grandeza da das Série 4 e 5. A granalha usada na produção desta série de argamassas foi granalha de um segundo fornecimento, e apresentava uma menor quantidade de poeiras finas pulverolentas quando em comparação com a granalha do primeiro fornecimento.

As argamassas da Série 7, em que se usou granalha de cobre original sem ter sido usada como decapante, foram as que tiveram o maior incremento de massa volúmica: até 20% superior nas argamassas de 75% de granalha quando comparadas com a argamassa de referência. Neste caso pode dizer-se que a razão se prende com o valor superior de massa volúmica da granalha original face à granalha batida. Por outro lado o facto das argamassas da Série 7 apresentarem os maiores valores de resistência mecânica de entre todas as séries ensaiadas, pode admitir-se que a formação dos cristais de etringite estão presentes em maior quantidade nas argamassas de escória original do que em todas as outras argamassas.

De um modo geral pode fazer-se uma analogia entre o comportamento das propriedades mecânicas das argamassas à medida que se aumenta a dosagem de granalha e a sua massa volúmica. Verifica-se a relação directamente proporcional entre o maior ganho de massa volúmica com o melhor comportamento resistente das argamassas, ou seja, quanto maior é a massa volúmica menor é o decréscimo de resistência quando se comparam as argamassas de granalha com a argamassa de referência (Figura 106).

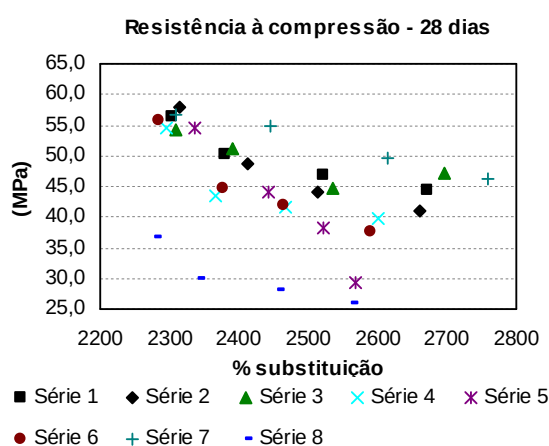


Figura 106. Correlação existente entre os resultados da resistência à compressão com os valores da massa volúmica das mesmas argamassas, para todas as séries produzidas.

6.13 Influência da substituição de areia por granalha no tempo presa de argamassas

Os tempos de início e final de presa das argamassas de todas as séries produzidas são influenciados quando se substitui a areia natural por granalha. Perante os resultados obtidos nos ensaios realizados verifica-se que o início de presa das argamassas pode ser retardada até 5 horas, e o fim de presa pode se retardado até 8 horas, em comparação com a argamassa de referência.

Esse efeito está representado na Figura 107, que foi elaborado a partir dos registos efectuados durante o ensaio de medição do tempo de início e final de presa.

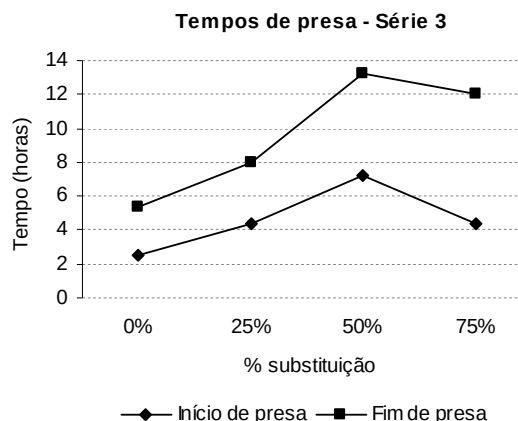


Figura 107. Resultados do tempo de início e final de presa das argamassas da Série 3.

6.14 Influência das impurezas contidas na granalha sobre as propriedades das argamassas

A realização da Série 7 de argamassas foi importante para a despistagem de variáveis que se julgavam ser responsáveis pela redução de resistência mecânica das argamassas à medida que a dosagem de granalha era aumentada. A presença de matéria orgânica e de quantidades importantes de óxido de ferro; a presença de pequenos resíduos de tintas; e a elevada percentagem de finos que a granalha apresenta (4,5%) aparentavam ser os inibidores de resistência nas argamassas, pois a percentagem de finos admissível pela normalização de agregados para betão e argamassa é de até 3%, porque é considerado prejudicial às reacções de hidratação do cimento.

Os resultados de resistência mecânica das argamassas da Série 7, ao contrário do que se esperava, também revelaram que a escória de cobre original, completamente ausente de todas as impurezas referidas presentes na granalha batida, quando usada como substituto parcial da areia natural em argamassas, dá origem argamassas menos resistentes.

Quando se comparam os resultados de resistência à compressão (Figura 108) e à flexão (Figura 109) obtidos aos 28 dias de cura das argamassas com granalha batida, Série 3, e com escória original, Série 7, verifica-se que apesar de as argamassas com escória original se apresentarem mais resistentes, a tendência de decréscimo de resistência à medida que se aumenta a dosagem de granalha nas argamassas é a mesma. Supõe-se assim que será qualquer constituinte químico da escória, o responsável pelo decréscimo de resistência nas argamassas.

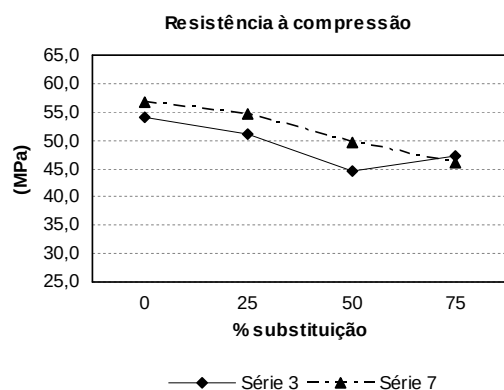


Figura 108. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 3 e 7 aos 28 dias de cura.

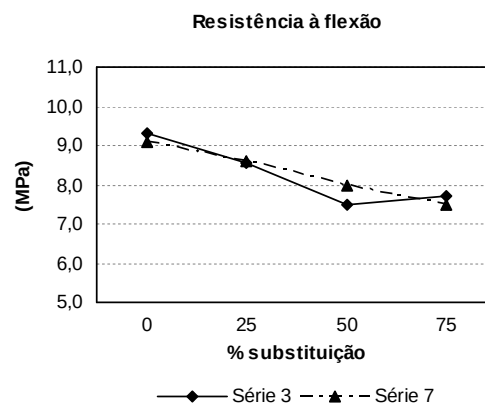


Figura 109. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 3 e 7 aos 28 dias de cura.

Foi referido anteriormente que a presença de compostos de chumbo e zinco, óxidos de ferro, sulfatos, sulfuretos e cloretos podem alterar a presa e o endurecimento das argamassas e até dar origem a reacções com o cimento prejudiciais às argamassas ou betões. Efectivamente, pelos dados fornecidos acerca da composição química da escória de cobre, existe a presença de até 8% de óxido de zinco na escória que se está a estudar. Este composto está presente quer na granalha batida quer na escória original, o que explica os atrasos na presa das argamassas e os decréscimos de resistência mecânica das argamassas assim produzidas.

6.15 Evolução no tempo da resistência mecânica de argamassas produzidas com granalha

A resistência mecânica das argamassas produzidas com granalha, de um modo geral, desenvolve-se com maior ou menor expressão até aos 90 dias de cura, como se pode analisar nas Figuras 110 e 111.

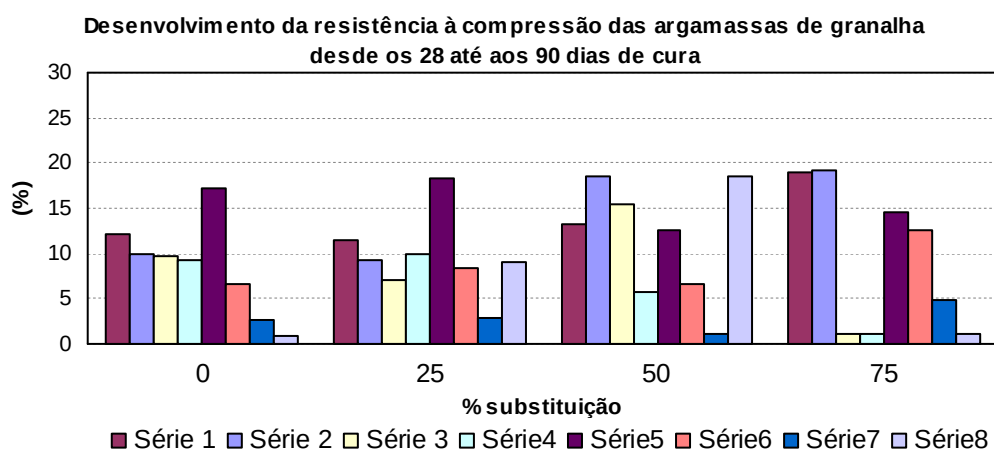


Figura 110. Desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas de todas as séries produzidas, desde os 28 aos 90 dias de cura.

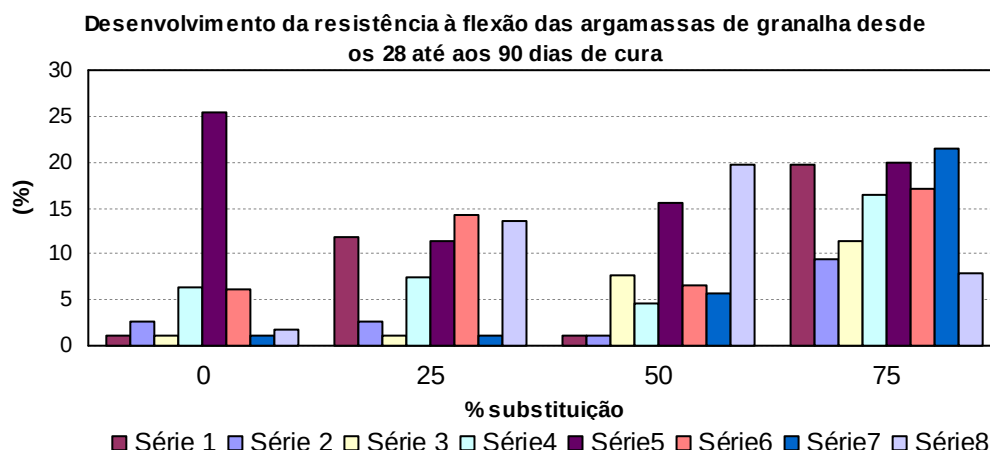


Figura 111. Desenvolvimento da resistência à flexão das argamassas de todas as séries produzidas, desde os 28 aos 90 dias de cura.

Nas argamassas das Séries 1, 2, 3, 6 e 8 o desenvolvimento de resistência à compressão ao longo do tempo é tanto maior quanto maior é a percentagem de granalha na argamassa. Nessas argamassas os incrementos de resistência com o tempo em algumas percentagens de substituição de areia por granalha chegam a ser superiores aos que se verificam nas argamassas de referência respectivas, quer na resistência à compressão quer na resistência à flexão. As argamassas da Série 4, em que se lavou a granalha para remoção das partículas finas de óxido de ferro, têm um comportamento diferente. Apesar da resistência à compressão se desenvolver com o tempo, esse incremento vai sendo menor à medida que se aumenta a dosagem de granalha na argamassa, mas verifica-se o contrário na resistência à flexão. Já as argamassas da Série 5, em que a fracção fina foi removida, apresentam desenvolvimentos de resistência à compressão com o tempo dentro do mesmo intervalo: entre os 17,5 e os 12,5%, ou seja, quase constantes independentemente da quantidade de granalha presente nas argamassas. No entanto, a sua resistência à flexão vai desenvolvendo com o tempo tanto mais quanto maior é a dosagem de granalha na argamassa. E, contrariamente ao que seria esperado, são as argamassas com escória original, Série 7, que apresentam o menor desenvolvimento de resistência à compressão ao longo do tempo. No entanto, no que se refere à resistência à flexão, é esta a série de argamassas que maior desenvolvimento de resistência apresenta. Uma conclusão concreta pode ser retirada da análise da Figura 111: são as argamassas com maior dosagem de granalha que mostram maior desenvolvimento de resistência à flexão com o tempo.

6.16 Influência da relação a/c nas propriedades de argamassas produzidas com granalha

A influência da relação água/cimento nas propriedades das argamassas com granalha foi estudada nas Séries 1 e 2. Na Série 1 manteve-se constante a dosagem de água em todas as percentagens de substituição de areia natural

por granalha, pelo que a consistência das argamassas foi sendo alterada. Na Série 2 a dosagem de água foi sendo modificada mediante as necessidades de modo a manter a mesma consistência em todas as argamassas produzidas.

Pelo que se observou na Figura 67, o valor do espalhamento nas argamassas da Série 1 foi reduzindo em cerca de 1cm a cada 25% de granalha que ia sendo incorporada na argamassa em substituição da areia. Com já se disse, apesar da consistência das argamassas passar a ser cada vez mais seca não se pode dizer que a relação água cimento ia sendo cada vez menor porque o poder de absorção de água da granalha é muito próximo do da areia natural. Já na Série 2, para manter o mesmo padrão de consistência, a relação água cimento foi sendo aumentada o que está directamente relacionado com a ligeira redução de resistência à compressão das argamassas desta série com as da Série 1 (Figura 112). Já na resistência à flexão são as argamassas da Série 2 que mostram melhor comportamento (Figura 113).

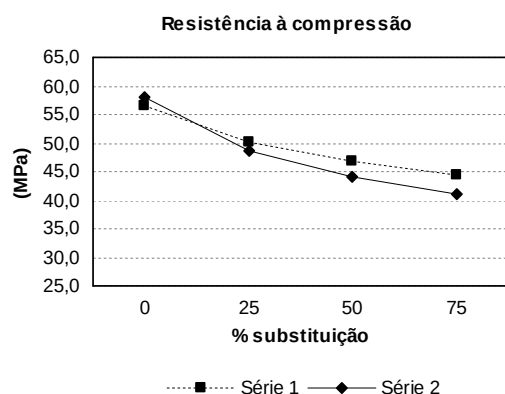


Figura 112. Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 1 e 2, aos 28 dias de cura.

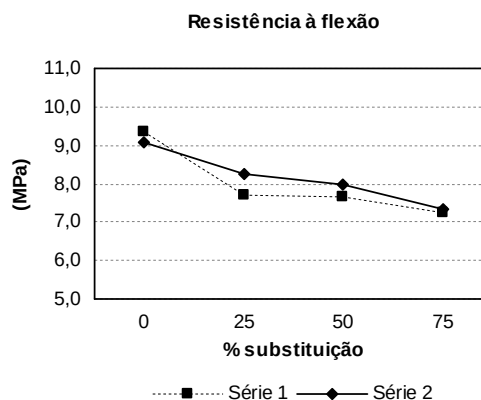


Figura 113. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 1 e 2, aos 28 dias de cura.

De um modo geral, no que se refere aos resultados obtidos nestas duas séries de argamassas, pode concluir-se que a fixação da consistência e trabalhabilidade das argamassas de granalha não parece reduzir de forma muito acentuada a sua resistência mecânica.

6.17 Influência do tipo de cimento no desenvolvimento da resistência das argamassas à medida que se aumenta a dosagem de granalha

A Série 8 foi produzida com o objectivo de se determinar se existiria alguma influência do tipo de cimento no desenvolvimento das propriedades mecânicas à medida que se aumentava a dosagem de granalha nas argamassas, principalmente o seu desenvolvimento no tempo. Pela análise dos resultados apresentados nas Figuras 114 e 115, em que se compara a resistência de argamassas de granalha produzidas com cimento Portland

42,5 Tipo I (Série 3), e argamassas de granalha produzidas com cimento Portland 32,5 Tipo II (Série 8), verifica-se que o comportamento das argamassas de granalha é diminuído quando se usa cimento com adições.

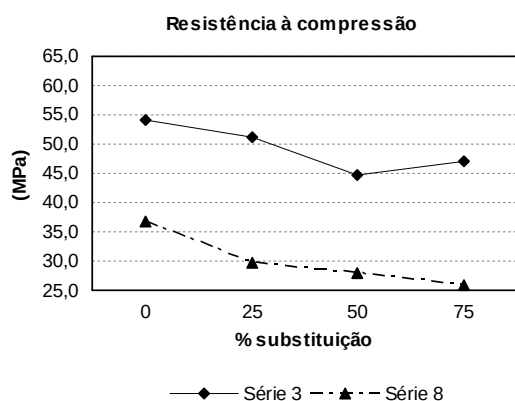


Figura 114 . Resultados da resistência à compressão das argamassas da Série 3 e 8, aos 28 dias de cura.

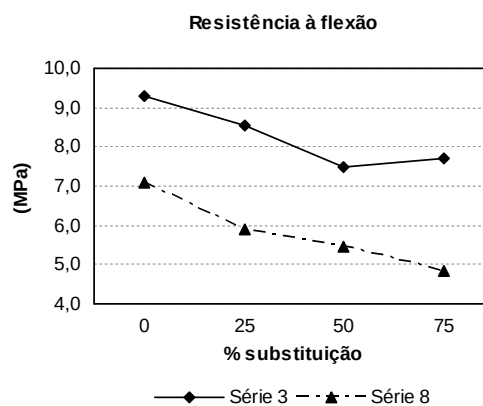


Figura 115. Resultados da resistência à flexão das argamassas da Série 3 e 8, aos 28 dias de cura.

Os decréscimos de resistência quantificados foram de aproximadamente 30% nas argamassas da Série 8; e de cerca de 15% nas argamassas da Série 3.

7. BLOCOS DE BETÃO PRÉ-MOLDADOS

A unidade industrial onde os blocos de betão pré-moldados foram produzidos está laborar desde o ano 2000 e produz cerca de 200 toneladas de produto mensalmente. É uma fábrica composta três áreas distintas: área de armazenamento dos agregados e cimento, existindo um silo para cada tipo de agregado; área de produção composta pela balança (tapete), pela misturadora e pela máquina de moldagem; e área de cura dos produtos moldados (estufa). A balança consiste num tapete, sobre o qual são descarregados os materiais directamente dos silos, e que está equipado com um sistema de sensores conectados com balanças calibradas que realizam a pesagem e conduz os materiais à misturadora.

Dentro da gama de produtos de construção pré-moldados tais como blocos de alvenaria de betão, lancis, pavês, entre outros, optou-se pela moldagem de pavês, por ser um bloco de pequena dimensão e exigir menor quantidade de escória de cobre para a sua produção.

Os pavês são blocos de agregados de betão usados para execução de passeios pedonais. A sua produção consiste na moldagem, a alta vibração (Figura 116), de um betão com muito baixo teor de humidade para permitir a desmoldagem sem descompressão (Figura 117).



Figura 116. Fabrico de pavês: moldagem a alta vibração.



Figura 117. Fabrico de pavês: desmoldagem.

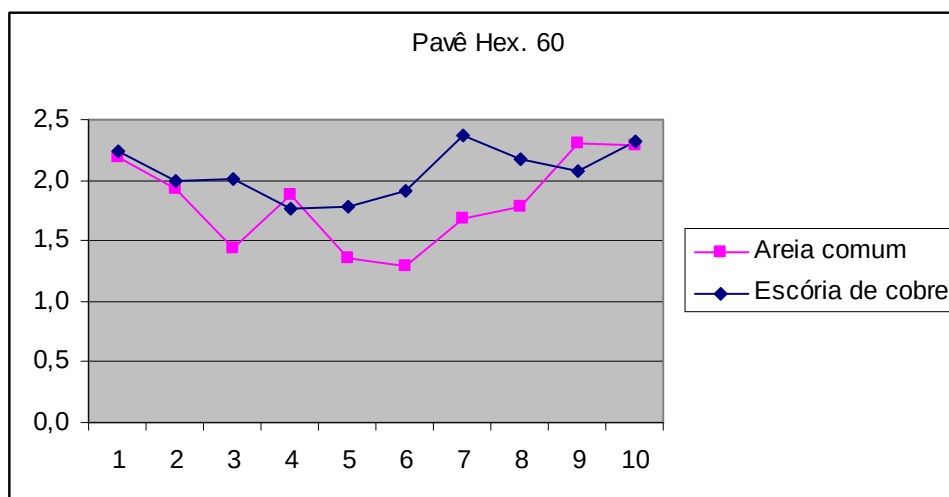
A composição deste betão é a que se apresenta no Quadro 10, em kg/m³.

Areia fina	Areia Grossa	Pó de pedra	Brita 4/8	Cimento Tipo II 32,5	Adjuvante	Água
150	950	150	700	280	0,4% peso cimento	+/- 50l dependendo da humidade dos agregados

Quadro 10. Composição do betão usada na produção de pavês.

Foram moldados 0,55m³ de betão com granalha em substituição da areia fina, resultando em 300 pavês.

Aos 28 dias de cura os pavês foram submetidos ao ensaio de carga de rotura por tracção tendo-se obtido resultados ligeiramente superiores aos obtidos em pavês produzidos com areia fina comum (Figura 118).

**Figura 118.** Resultados do ensaio de carga de rotura por tracção de pavês produzidos com areia comum e pavês produzidos com granalha em substituição da areia comum, aos 28 dias de cura.

Verifica-se que a aplicação de escória de cobre neste tipo de produtos não altera as suas características mecânicas e, embora não se tendo realizado ensaios de desgaste, é presumível que apresentem maior resistência. No entanto, é fundamental a realização de ensaios de envelhecimento para se averiguar a durabilidade e viabilidade desta aplicação.

8. CONCLUSÕES

A gralha estudada possui características físicas adequadas ao seu emprego como agregado fino em produtos de construção, depois de limitada a percentagem de material fino abaixo de 3%. A composição granulométrica e a capacidade de absorção de água são idênticas à de areias finas comuns. A sua massa volúmica e dureza superiores às de areias naturais são características de maior valor sobre estas, o que seriam de elevado interesse em aplicações em produtos de construção. A sua maior massa volúmica seria uma característica muito valorizada na produção de betão pesado, blocos de betão maciços pré-moldados, entre outros, pois permitiriam o aumento da massa volúmica desses betões, trazendo vantagens significativas em aplicações específicas. Do mesmo modo, a sua maior dureza aumentaria a resistência ao desgaste em betões e produtos pré-moldados tais como, respectivamente em betão à vista em pavimentos técnicos e em blocos de betão para pavimentos (pavês), entre outros.

No entanto, o estudo experimental realizado revela que as propriedades mecânicas de todas as argamassas produzidas com gralha são inferiores às verificadas nas argamassas de referência, sendo tanto menores quanto maior a dosagem de gralha usada em substituição da areia natural. Observou-se também que à medida em que foi incrementada a percentagem de gralha nas argamassas maior foi o atraso de presa nestas.

Efectivamente, da revisão bibliográfica realizada, não existem estudos que demonstrem a influência negativa deste resíduo em betões ou argamassas, na escala em que foi verificada no estudo experimental do presente trabalho. Segundo os estudos analisados seria de prever que as resistências mecânicas de argamassas produzidas com gralha fossem incrementadas à medida que fosse aumentada a sua dosagem, para além do facto de as características físicas deste material por si só induzirem à expectativa de melhores resistências do que as realmente obtidas. É também conhecido que na maior parte dos produtos de misturas cimentícias se observa uma relação de proporcionalidade directa entre a maior massa volúmica do material e o aumento da sua resistência mecânica. Esse efeito não se observou em nenhuma das argamassas produzidas com gralha. Por outro lado constatou-se ainda que, de um modo geral, para todas as séries de argamassas produzidas, a resistência à tracção aos 90 dias apresentou valores afastados da lei dos desenvolvimentos de resistência que se vinha a registar para as outras idades. É de prever a hipótese da actuação do óxido de ferro presente na gralha potenciando reacções de expansibilidade a longo prazo, fazendo diminuir a sua resistência à tracção sem influenciar a resistência à compressão.

Na verdade, a granalha da origem estudada contém minerais na sua constituição química prejudiciais à sua utilização em misturas de cimentos, e em quantidades significativas que excedem largamente os limites normativos. A presença forte de óxido de zinco e de vestígios de enxofre na composição química quer da granalha quer da escória de cobre original influenciam negativamente as propriedades resistentes de misturas cimentícias.

A composição química da granalha estudada varia ligeiramente à usada em outros trabalhos científicos internacionais, o que é compreensível dada a variabilidade do processo de produção do cobre e a variabilidade inerente à constituição química do próprio minério de cobre. Não existem contudo exemplos de estudos em que houvesse presença de óxido de zinco e de enxofre na sua composição química em quantidades tão significativas quanto no resíduo estudado.

Para além de todas constatações, também em nenhum dos trabalhos consultados foi usada escória de cobre resultante de processos de decapagem, ou seja, granalha, na produção de argamassas ou betões, o que justifica o facto de não existirem registos de ocorrência de reacções expansivas: ausência de óxido de ferro nas diferentes escórias de cobre estudadas por outros autores.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Al-Jabri K.S., Taha R.A., Al-Hashmi A., Al-Harthy A.S.; **"Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete"**; Construction and Building Materials (2005);

Alter, Harvey; **"The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention"**; Resources, Conservation and Recycling (43) (2005); p. 353-360;

André, João; **"O Betão de Ontém, de Hoje e... de Sempre?"**; Revista da Associação Nacional dos Industriais dos Produtos de Cimento (9) (1999); p. 8-14;

Ariño A.M., Mobasher B.; **"Effect of Ground Copper Slag on the Strength and Toughness of Cementitious Mixtures"**; ACI Materials Journal (1999); p. 68-73;

Autoridade da Concorrência; **"Acompanhamento do Mercado do Ferro e Aço"**; *Autoridade da Concorrência - Newsletter* (4) (2004); p. 15;

CIB; **"Agenda 21 para a construção sustentável"** - Tradução do Relatório CIB; *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (2000);

Coutinho, Sousa; **"Fabrico e Propriedades do Betão"**; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil Vol.1* (1997); p. 254-269;

De Pauw, C.; Vyncke, J.; **"Demolition and Recycling. Shouldn't it be introduced in the Model Code?"**; *CEB - Advisory Committee Meeting* (1994);

Dongping, T.; Xianwan, Y.; Zhong, Y. T.; Jishu Y.; **"Study of manufacture of colored glasses from slags of copper smelting"**; Yelian Bufen (1997); p. 5-8;

Dongxue, Li; Fu, Xinghua; Wu, Xuequan; Tang Mingshu; **"Durability Study of Steel Slag Cement"**; *Cement and Concrete Research* (27) (1997); p. 983-987;

FIB - **"Environmental Design - State-of-art report"**; *Fédération Internationale du Béton*; (Bulletin 28) (2004);

Fu, Xinghua; Wenping, Hou; Chunxia, Yang; Dongxu, Li; Xuequan, Wu; **"Studies on Portland Cement with Large Amount of Slag"**; *Cement and Concrete Research* (30) (2000); p. 645-649;

Geiseler, J.; **"Use of Steelworks Slag in Europe"**; *Waste Management* (16) 1996); p. 59-63;

Glasser, F. P.; **"Properties of Cement Waste Composites"**; *Waste Management* (16) (1996); p. 159-168;

Gorai, Bipra; Jana, R.K.; Premchand; **"Characteristics and utilisation of copper slag - a review"**. *Resources, Conservation and Recycling* (39) (2003); p. 299-313;

GS-CEM; **"A Slag-Based Supplementary Cementing Material (SCM)"**; *Cementec Industries Inc. & teckCominco*; (2005);

Hammecker, C. ; **"Importance des transferts d'eaux dans la dégradation des pierres en œuvre"**; Tese de doutoramento, *Université Louis Pasteur de Strasbourg*, Strasbourg (1993) ; 254 pp.

Hartlén, Jan; **"Environmental Consequences of Using Residues"**; *Waste Management* (16) (1996); p. 1-6;

Lobo, Ângela; Albuquerque, Maria Luís; **"Metalurgia-Desafios ao Sector"**; *Ministério da Economia DT* (38) (2001); p. 48;

Marghussian V.K., Maghsoodipoor A.; **"Fabrication of unglazed floor tiles containing Iranian copper slags"**; *Ceramics International* (25) (1999); p. 617-622;

Maslehuddin M., Alfarabi M. S.; Shameem M.; Ibrahim M.; Barry M.S.; **"Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes"**. *Construction and Building Materials*. 17:(2003). p. 105-112;

Mehta, Kumar; **"Advancements in Concrete Technology"**; *Concrete Internacional* (1999a); p. 70-76;

Mehta, Kumar; **"Concrete Technology for Sustainable Development"**; *Concrete Internacional* (1999b); p. 47-53;

Mehta, Kumar; **"Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development"**; *Concrete Internacional*. (2002); p. 23-28;

Mobasher, B.; Devaguptapu, R.; Ariño, A.; **"Effect of Copper Slag on the Hydration of Blended Cementitious Mixtures"**; *Proceedings, ASCE, Materials Engineering Conference, Materials for the New Millenium* (1996); p. 1677-1686;

Moura, W.A., Dal Molin, D.; **"Influência da Adição de Escória de Cobre em Características Relacionadas à Durabilidade do Concreto"**; *Ambiente Construído* (4) (2004); p. 41-56;

Moura, W.A.; **"Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto"**; *Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul* (2000); p. 207;

Mukherjee, P. K.; **"Preliminary Slag Scoping Study for EcoSmart Concrete"**; *EcoSmart Concrete Project* (2004); p. 28;

Resende, Célia; Rocha, Bruno; **"Propriedades de Betões Fabricados com Agregados Reciclados"**; *Universidade de Aveiro* (2004); p. 203;

Silva, Pedro; **"Argamassas de reparação"**; *Tese de Mestrado Integrado em Materiais e Processos de Construção, FEUP*, (2008), p. 44, p.49 - 51;

Shi, Caijun; **"Steel Slag -- Its Production, Processing, Characteristics and Cementitious Properties"**; *Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE* (2004); p. 230-236;

Shi, Caijun; Quian, Jueshi; **"High Performance Cementing materials from industrial slags - a review"**; *Resources Conservation and Recycling* (29) (2000); p. 195-207;

Shoya, M., et al.; **"Properties of Self-compacting Concrete with Slag Fine Aggregates"**; *Exploiting Wastes in Concrete* (1999); p. 121-130;

Sirajiddinov, N. A.; Alikulov, A. M.; Irkakhodjaeva, A. P.; **"Effect of copper smelting slag on properties of ceramics"**; *Dokl Akad Nauk Resp. Uzb* (1993); p. 10-27;

Spot, Michel; Wojtarowicz, Maggie; **"Study of GS-CEM and other Slag-Based Products"**; *EcoSmart Concrete Project -- A Concrete Contribution to the Environment* (2004);

Szyrle, W., Wozniak, K., Kustczak, A., Makowski, M., Kozłowski, A.,; **"A resin binder for bonding abrasive particles in grinding wheels"**; *Pol PI* (1988); p. 143-178;

Thomas, Michael; **"Concrete Containing High Volumes of Supplementary Cementing Materials: Special Considerations"**; *University of New Brunswick* (2005).;

Tixier, R.; Arino, A. M.; Mobasher, B.; **"Use Of Copper Slag as a Mineral Admixture in Concrete"**; *10th Annual Northern AZ Concrete Conference*; (1999);

Tixier, R.; Devaguptapu, R.; Mobasher, B.; **"The Effect of Copper Slag on the Hydration and Mechanical Properties of Cementitious Mixtures"**; *Cement and Concrete Research* (27) (1997); p. 1569-1580;

WBCSD – **"Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI)"**; *World Business Council for Sustainable Development* (2002);

Yet-Ming, Chiang; Dunbar, P.; Birnie, I.; David Kingery, W.; "Principles of ceramic science and engineering"; Wiley, USA (1997);

Zain, M.F.M., et al. - **"Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag"**. *Cement & Concrete Composites* 26 (2004); p. 845-851.

Consultas na Internet

EcoSmart (2005); "Projecto Betão EcoSmart"; http://www.ecosmart.ca/enviro_cement.cfm

ONU (2005); "Relatório de Brundtland"; www.doc.mmu.ac.uk/.

[1] <http://www.tabelaperiodica.hpg.ig.com.br/cu.htm>

[2] <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/index.htm>

- [3] <http://e3.uci.edu/clients/bjbecker/SpinningWeb/lecture2.html>
- [4] <http://www.swanseaheritage.net/article/viewall.asp?offset=900>
- [5] <http://home.regent.edu/ruthven/granfork2.html>
- [6] <http://home.regent.edu/ruthven/granfork2.html>
- [7] http://www.barton.com/case_history.cfm
- [8] http://www.barton.com/case_history.cfm
- [9] <http://www.natsteelenvirotech.com.sg/industrialwaste.htm>

