

# INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS DE BETÃO EM ARGAMASSAS

M. Braga\*, J. de Brito\*\*, M.<sup>a</sup> Rosário Veiga\*\*\*

\*Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

\*\*Professor Catedrático. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

\*\*\* Investigadora Principal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa - Portugal



## RESUMO

*O estudo que se apresenta teve como fim avaliar o comportamento de argamassas cimentícias quando são incorporados na sua constituição agregados muito finos de betão reciclado. Para este efeito, foi realizada um conjunto de ensaios com o objectivo de melhorar o desempenho das argamassas em vários aspectos: resistência, absorção de água, retracção, permeabilidade à água, entre outros. Os resultados obtidos com a investigação foram bastante positivos, tendo em conta que grande parte das argamassas modificadas melhorou algumas das suas propriedades.*

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento económico de um país é fortemente influenciado pela indústria da construção. Sendo esse um factor favorável, é preciso ter em conta as consequências negativas que tem ao nível ambiental.

Com a intensa industrialização, avanço de novas tecnologias, crescimento populacional, aumento do número de pessoas nos centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos transformaram-se em grave problema urbano com uma gestão dispendiosa e complexa, conduzindo a escassez de área de deposição de resíduos causados pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais na gestão dos resíduos e problemas de saneamento público e contaminação

ambiental (John, 1999) (John, 2000) (Brito, 1999) (Gunther, 2000) (Pinto, 1999).

Desta forma, houve a necessidade de intervir e arranjar soluções alternativas à deposição dos resíduos da construção e demolição em aterros e que sejam benéficas em termos ambientais. Uma das soluções encontradas foi a reciclagem de resíduos, uma vez que a construção civil tem um grande potencial de utilização dos mesmos, visto consumir até 75% de recursos naturais (John, 2000) (Pinto, 1999). No entanto, é importante ter presente que, embora a redução na geração de resíduos seja sempre uma acção necessária, é limitada, uma vez que existem impurezas na matéria-prima, e envolve custos e patamares de desenvolvimento tecnológico (John, 2000).

Assim, este trabalho teve como objectivo

principal reaproveitar a fracção mais fina dos resíduos da construção e demolição, mais concretamente de betão vindo de demolições, e avaliar como estas se comportam se nelas se incorporar este betão, previamente triturado. É esperado que ocorra o chamado efeito de filer - preenchimento dos espaços vazios existentes no interior da argamassa - melhorando o seu comportamento mecânico e de durabilidade devido à maior compacidade da mistura.

## 2. ESTADO DE ARTE

A reciclagem de resíduos, nomeadamente como agregados de argamassas e betões, tem vários benefícios do ponto de vista da sustentabilidade, tanto que essa percepção da importância da reciclagem para a sustentabilidade tem levado diferentes países a adoptarem políticas específicas visando criarem condições para que ela aconteça.

As propriedades dos agregados reciclados são geralmente menos favoráveis do que as dos naturais e, por essa razão, é necessário determinar as percentagens de substituição óptimas, com as quais se poderá melhorar em grande parte a qualidade das argamassas (Silva et al., 2009).

A granulometria e a forma das partículas têm forte influência na percentagem de vazios existentes no revestimento, condicionando o seu comportamento. Quanto mais reduzida for a percentagem de vazios, menor será a quantidade de ligante e água necessários para a execução da argamassa e, por conseguinte, menor será a retracção (Cavaco, 2005).

Também a plasticidade das argamassas é função do teor de finos (inclusive ligantes) com dimensão inferior a 0.075 mm. São as partículas finas que melhoram a coesão interna da mistura, permitindo que a argamassa mantenha as deformações impostas pela execução, pois grãos menores apresentam maior força de tensão superficial (Selmo, 1989).

Angelim et al. (2003) constataram que a adição, a argamassas de cimento e cal, de finos, nomeadamente pó de calcário, pó de granulite (rocha metamórfica granular,

composta fundamentalmente de feldspato e quartzo), pó de micaxisto e saibro, confere uma maior trabalhabilidade, diminuindo os tempos de aplicação relativamente às argamassas sem esta adição.

De acordo com Ishikawa (2003), todos os materiais finos, os ligantes cimento e cal, os argilo-minerais presentes no saibro e outros materiais inertes apresentam elevada superfície específica e, desta forma, influem na plasticidade das argamassas. Com o aumento de finos inertes, há uma melhoria da trabalhabilidade.

Silva et al. (2006) verificaram que, provavelmente devido ao maior teor de material pulverulento nos agregados britados em relação aos naturais, existe uma redução do teor de ar incorporado nas argamassas produzidas com areia britada relativamente às produzidas com areia natural.

Segundo o estudo de Silva et al. (2005), sobre a influência do filer de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento, a presença de filer na argamassa influenciou favoravelmente os resultados dos ensaios, aumentando as resistências à compressão e à tracção por flexão e a aderência à tracção, e negativamente na formação de fissuras visíveis. Viu-se, também, que a presença de filer teve influência favorável nos resultados de absorção de água e índice de vazios.

Silva et al. (2009) concluíram que a incorporação de finos cerâmicos na argamassa (5 e 10% do total) melhora claramente o seu comportamento, quer à tracção por flexão quer à compressão. O efeito de filer, a menor relação água / cimento e o possível efeito pozolânico dos finos de tijolo são as razões apontadas para justificar os comportamentos observados nas argamassas.

De acordo com os estudos já realizados acerca da incorporação de finos em argamassas, é expectável que o preenchimento dos espaços vazios existentes nas argamassas com os agregados muito finos de betão melhore algumas das suas propriedades através do chamado efeito de filer e de um eventual efeito hidráulico dos agregados de

betão incorporados. Assim, é provável que as argamassas modificadas apresentem uma melhoria da resistência mecânica e uma redução da sua capilaridade devido à maior compactidade e adensamento destas.

### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para evidenciar os resultados esperados, foram realizados vários ensaios em argamassas com diferentes taxas de substituição de areia por agregados finos de betão (granulometria < 0.150 mm). O comportamento das argamassas modificadas foi comparado com o de uma argamassa convencional, constituída apenas por cimento, areia e água.

A campanha experimental foi dividida em duas fases: numa primeira fase de ensaios, com carácter eliminatório, escolheu-se, de um conjunto de argamassas com diferentes percentagens de substituição de areia por finos de betão, aquela que apresentou melhor desempenho nas várias propriedades estudadas; na segunda fase, apenas se realizaram ensaios sobre a argamassa seleccionada na fase anterior com o intuito de aprofundar outras características relevantes das argamassas e, assim, concluir sobre a sua viabilidade de aplicação.

As argamassas estudadas, fabricadas ao traço único (em volume) de 1:4, são as descritas em seguida:

- I(0-1:4) - 0% de incorporação - traço volumétrico 1:4 (cimento: areia siliciosa) - argamassa de referência;
- I(5-1:4) - 5% de incorporação - traço

volumétrico 1:4 (cimento: areia siliciosa e agregados finos de betão);

- I(10-1:4) - 10% de incorporação - traço volumétrico 1:4 (cimento: areia siliciosa e agregados finos de betão);
- I(15-1:4) - 15% de incorporação - traço volumétrico 1:4 (cimento: areia siliciosa e agregados finos de betão).

As análises granulométricas da areia e dos finos de betão são apresentadas nas Figuras 1 e 2. As massas volúmicas aparentes dos diferentes constituintes das argamassas (areia, finos de betão e cimento) são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Massa volúmica aparente dos constituintes da argamassa

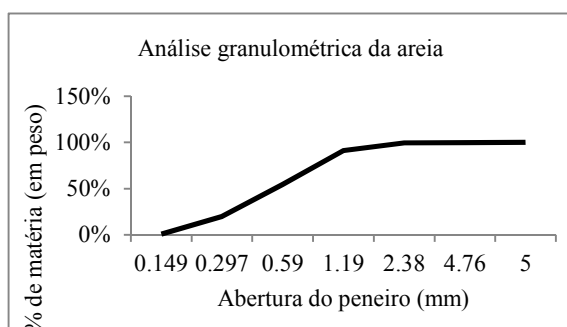
	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	1035
Areia	1433
Finos de betão < 0.149 mm	842

### 4. 1ª FASE

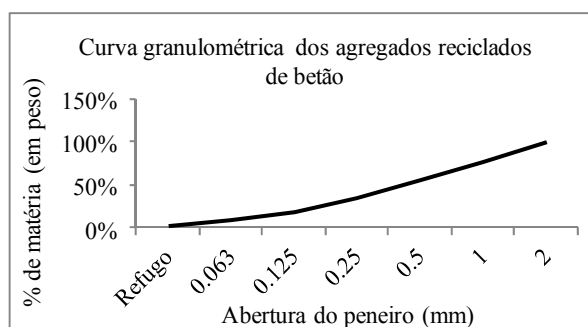
Esta fase experimental permitiu fazer uma primeira caracterização das várias argamassas em estudo e escolher aquela que melhor satisfaz os objectivos desejados.

#### 4.1 Consistência por espalhamento (argamassa em pasta)

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (1999) e permitiu acertar a quantidade de água a somar à mistura. Segundo a norma e para



**Fig 1** - Curva granulométrica da areia



**Fig 2** - Curva granulométrica dos agregados finos reciclados de betão

**Tabela 2** - Relação água / cimento e resultados do ensaio de espalhamento

Nomenclatura	Relação água / cimento	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)	Espalhamento (mm)
I(0-1:4)	1.41	220	170.8
I(5-1:4)	1.24	199	177.0
I(10-1:4)	1.18	191	176.5
I(15-1:4)	1.12	183	172.0

argamassas de reboco, a consistência considerada adequada é de 175 mm  $\pm$  10 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Constata-se que, com o aumento da percentagem de incorporação de finos, a quantidade de água a adicionar à mistura para se obter o espalhamento pretendido, diminui porque os espaços vazios anteriormente ocupados pela água são agora preenchidos pelos finos de betão (efeito de filler). No fabrico das argamassas, verificou-se uma significativa melhoria da trabalhabilidade com o aumento da incorporação de finos, o que indica que a dimensão, a forma e a textura das partículas têm um papel relevante na trabalhabilidade e justificam o decréscimo da relação água / cimento. As partículas finas melhoram a coesão interna da mistura, como referido por Selmo (1989).

Os resultados estão de acordo com Silva et al. (2009) que estudaram a incorporação de finos cerâmicos apenas até 10% e também verificaram uma diminuição da quantidade de água necessária a adicionar à mistura.

Hudson (1999) concluiu que partículas menores do que 150  $\mu$ m, se tiverem uma forma arredondada, podem actuar como lubrificante na pasta de cimento aumentando a trabalhabilidade e permitindo dessa forma uma redução da relação água / cimento.

Por outro lado, Angelim et al. (2003) verificaram que, para percentagens de incorporação de finos entre 20 e 40%, foi preciso aumentar a quantidade de água da amassadura para obter a trabalhabilidade desejada.

A bibliografia aponta para uma tendência na melhoria da trabalhabilidade com a incorporação de finos mas tal depende naturalmente da natureza e teor destes.

#### 4.2 Massa volúmica (argamassa em pasta)

Este ensaio foi realizado de acordo com

a norma europeia EN 1015-6 (1998). Os resultados são apresentados na Figura 3.

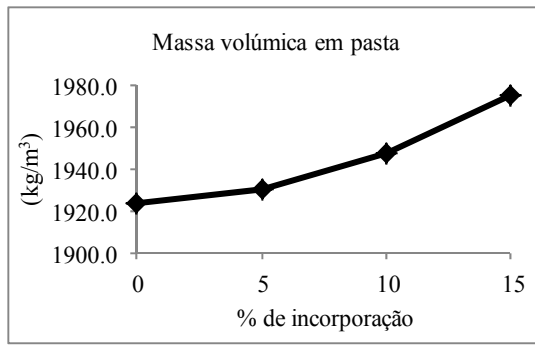
Apesar de os finos de betão apresentarem menor massa volúmica aparente do que a areia, a massa volúmica em pasta aumentou com a incorporação de finos, o que se justifica pela diminuição do teor de água das argamassas e pelo efeito de filler.

#### 4.3 Massa volúmica aparente (argamassa no estado endurecido)

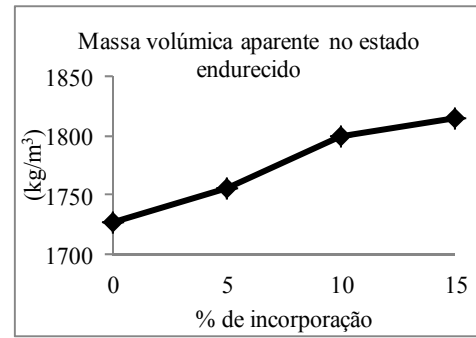
Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-10 (1999). Utilizou-se uma amostra de três provetes, para cada tipo de argamassa, submetidos a um processo de cura de 28 dias, tendo sido ensaiados no final deste período. Os resultados são apresentados na Figura 4.

Verifica-se, tal como na argamassa em pasta, um aumento da massa volúmica no estado endurecido com o aumento da incorporação de finos. A razão para o aumento da massa volúmica da argamassa no estado endurecido é semelhante à que explica a evolução da massa volúmica no estado fresco. Parte dos vazios que existem na argamassa após a água evaporar, que a areia não preenche, são preenchidos pelos finos de betão, por estes serem mais pequenos. Assim, existem menos espaços vazios nas argamassas à medida que se aumenta a percentagem destes o que as torna mais compactas. Em concordância com os resultados obtidos, Ishikawa (2003) constatou que um maior teor de materiais abaixo do peneiro 0.150 mm (até a um determinado valor crítico) contribui para a diminuição do teor de ar incorporado, uma melhor arrumação das partículas da mistura e, consequentemente, o aumento da massa volúmica aparente.

Tal como na argamassa em pasta, o efei-



**Fig 3** - Massa volúmica em pasta para as diferentes percentagens de incorporação



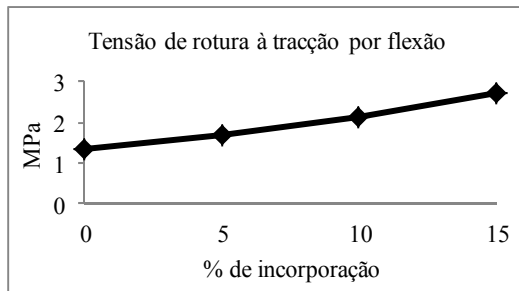
**Fig 4** - Massa volúmica aparente no estado endurecido para as diferentes percentagens de incorporação

to de filer prevaleceu sobre o facto de o resíduo de betão apresentar menor massa volúmica aparente do que a areia, para a gama de taxas de incorporação testadas.

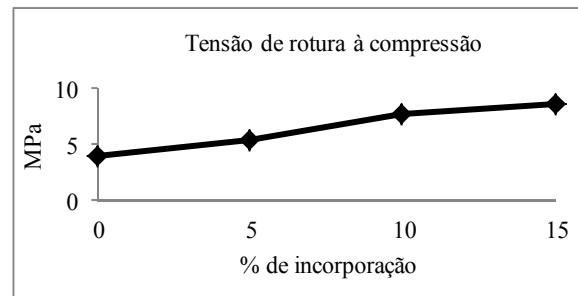
#### 4.4 Resistência à tracção por flexão e à compressão

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (1999). Utilizou-se uma amostra de três provetes, para cada tipo de argamassa, submetidos a um processo de cura de 28 dias, tendo sido ensaiados no final deste período. Os resul-

tados são apresentados nas Figuras 5 e 6. Estas mostram um aumento significativo, quase linear, da resistência mecânica das argamassas, quer à tracção por flexão quer à compressão, à medida que se aumenta a percentagem de incorporação de finos de betão. Segundo Angelim et al. (2003), os resultados obtidos podem ser justificados pela presença dos finos na argamassa que provocam o efeito de filer, pela menor relação água / cimento relativamente à argamassa de referência e ainda por um eventual efeito hidráulico dos finos de betão.



**Fig 5** - Resistência à tracção por flexão para as diferentes percentagens de incorporação



**Fig 6** - Resistência à compressão para as diferentes percentagens de incorporação

A melhoria da resistência mecânica das argamassas está de acordo com os resultados obtidos por outros autores que estudaram a incorporação de finos nas argamassas. Comparando os resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por flexão devidos à adição de finos com os de outros investigadores (Figura 7), verifica-se que Silva et al. (2009) obtiveram valores superiores com a incorporação de resíduos

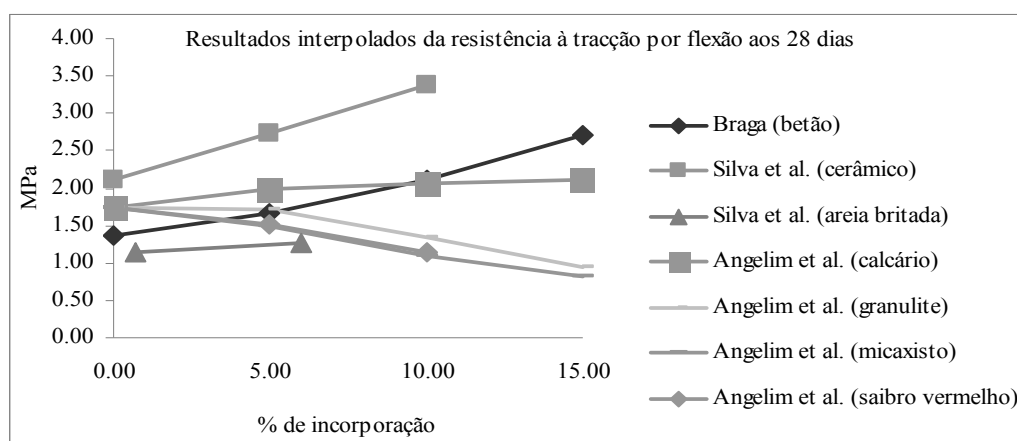
cerâmicos, no entanto, os finos de betão adicionados às argamassas a partir de uma determinada percentagem (10%) induziram resultados sempre superiores aos obtidos por Angelim et al. (2003). Enquanto que, no presente estudo e no de Silva et al. [6], se verifica uma tendência crescente na resistência à tracção por flexão com o aumento de incorporação de finos, no trabalho de Angelim et al. (2003), à excepção dos finos de calcário, a tendência é contrá-

ria. Silva et al. (2005) também verificaram um acréscimo da resistência à tracção por flexão com a incorporação de finos de areia britada (6%) sendo, no entanto, o aumento menos significativo do que o obtido com a introdução dos finos de betão e finos cerâmicos.

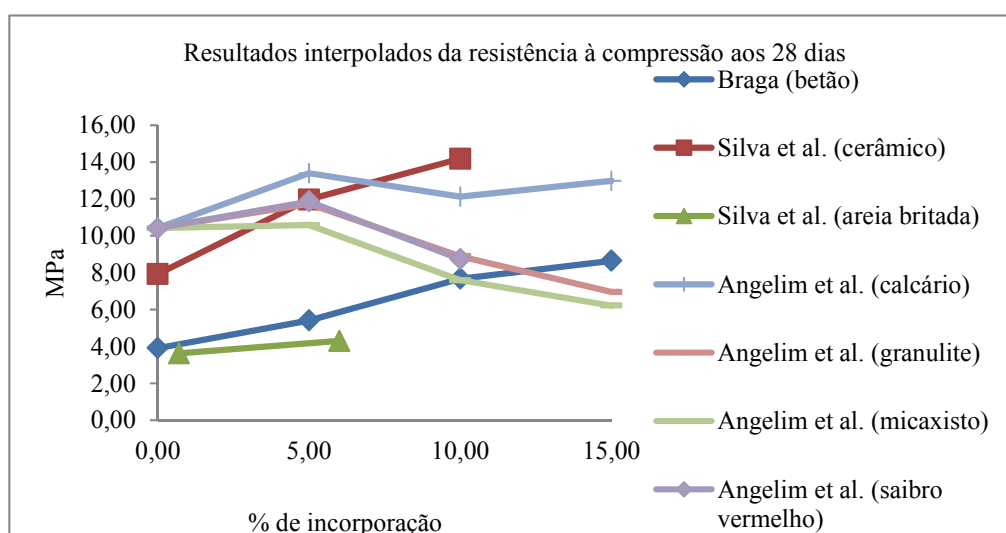
No ensaio de resistência à compressão, comparando os resultados do presente estudo com os de Angelim et al. (2003), Silva et al. (2009) e Silva et al. (2005) (Figura 8), todas as argamassas com uma incorporação de  $\approx 5\%$  de finos verificaram um acréscimo da sua resistência (face à argamassa convencional). No entanto, para percentagens

superiores, apenas se continua a verificar uma tendência crescente da resistência para as argamassas com introdução de finos de betão e com finos cerâmicos. As argamassas com 15% de incorporação de finos de granulite e micaxisto tiveram valores inferiores aos da argamassa sem adição de finos.

Logo, só a incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas provocou um desempenho mecânico superior nas argamassas do que os finos de betão do presente estudo.



**Fig7** - Resistência à tracção por flexão aos 28 dias, para cada um dos diferentes tipos de pó adicionados, comparando os resultados de Braga (2010), Silva et al. (2009), Silva et al. (2005) e Angelim et al. (2003)



**Fig 8** - Resistência à compressão aos 28 dias, para cada um dos diferentes tipos de pó adicionados, comparando os resultados de Braga (2010), Silva et al. (2009), Silva et al. (2005) e Angelim et al. (2003)

#### 4.5 Absorção de água por capilaridade

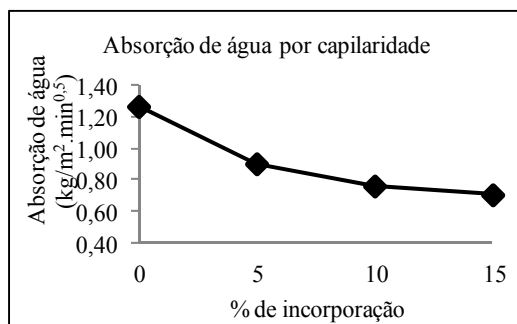
Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-18 (2002). Utilizou-se uma amostra de três provetes (semi-prismas), por tipo de argamassa, submetidos a um processo de cura de 28 dias, tendo sido impermeabilizados lateralmente, e ensaiados no final deste período. Os resultados são apresentados na Figura 9.

A uma maior resistência da argamassa corresponde uma maior compactidade e, como tal, um coeficiente de absorção menor. Ao substituir-se parte da areia por finos, estes vão preencher parte dos espaços vazios existentes, restando poros de pequenas dimensões na argamassa endurecida que dificultam a circulação da água e, consequentemente, proporcionam um menor fluxo capilar de água no interior da argamassa.

Em termos gerais segundo Pereira [14], há uma tendência para um aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento da água de amassadura. Como, neste caso, o teor de água adicionada à mistura foi diminuindo com o aumento da percentagem de incorporação de finos, tal também pode ter determinado a diminuição do coeficiente de absorção.

Conclui-se, assim, que esta propriedade das argamassas apresenta uma melhoria significativa à medida que se aumenta a percentagem de incorporação de finos de betão até, pelo menos, 15% (quantidade máxima experimentada neste trabalho).

#### 4.6 Secagem



**Fig 9** - Absorção de água por capilaridade em função da percentagem de incorporação

Neste ensaio, foram utilizados os mesmos semi-prismas do ensaio de absorção de água por capilaridade, tendo-se registado as diferenças de massa ocorridas durante a secagem em ambiente condicionado de laboratório ( $20\pm 2$  °C e  $65\pm 5\%$  RH). O comportamento dos provetes durante a fase de secagem é apresentado na Figura 10.

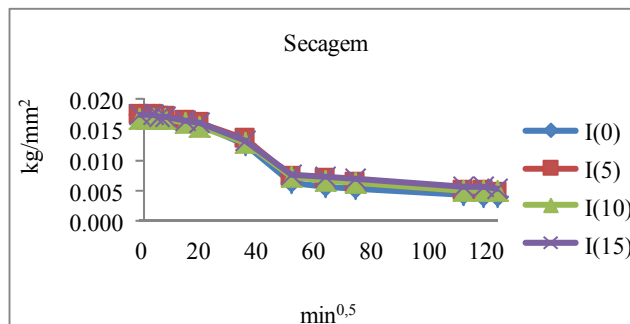
Por observação do gráfico de secagem, conclui-se que a incorporação de finos de betão, até 15%, nas argamassas não tem uma influência preponderante na sua secagem, verificando-se um desempenho muito semelhante ao da argamassa de referência.

#### 4.7 Susceptibilidade à fendilhação

Este ensaio consiste na aplicação de uma amostra de argamassa numa face de um tijolo, verificando-se ao longo do tempo o aparecimento, ou não, de fissuras. Ao fim de 9 meses de observação, não se observou o aparecimento de fissuras em qualquer das argamassas estudadas (Figura 11). No entanto, é preciso ter em conta que a área de aplicação é muito reduzida e que as condições de aplicação da argamassa em laboratório são diferentes das aplicadas em obra, pelo que este ensaio é apenas indicativo.

#### 4.8 Escolha para a segunda fase

Após realizados os ensaios previstos na primeira fase escolheu-se, para a segunda fase de ensaios e de entre as três argamassas



**Fig 10** - Evolução da secagem das argamassas para as diferentes percentagens de incorporação



**Fig 11** - Aspecto do ensaio de susceptibilidade à fendilhação

estudadas, a argamassa com 15% de finos de betão na sua constituição visto ter sido a que melhores resultados obteve em todas as propriedades estudadas. É possível que, se se tivesse experimentado uma percentagem superior a 15% de substituição de areia por finos de betão, alcançar-se-iam resultados ainda mais satisfatórios, o que seria útil do ponto de vista de maximização da reciclagem.

Mas como não foi comprovado por ensaios, adoptou-se conservativamente o valor de 15%, o que se veio a revelar uma opção correcta em face dos resultados da 2ª fase.

## 5. 2ª FASE

Na 2ª fase experimental, apenas foram realizados ensaios sobre a argamassa de referência e a escolhida na primeira fase (I(15-1:4)), para estudar outras características importantes no desempenho das argamassas e caracterizar em maior profundidade os seus aspectos positivos e negativos.

### 5.1 Retenção de água

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-8 (1999). Utilizaram-se três amostras para cada tipo de argamassa no estado fresco. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Através da observação da tabela, verifica-se que a argamassa com incorporação de finos de betão obteve uma maior percentagem de retenção de água comparativamente com a argamassa de referência.

Esta diferença de valores é explicada pela adição de finos uma vez que estes dificultam

**Tabela 3** - Retenção de água

Nomenclatura	Retenção de água (%)
I(0-1:4)	63.81
I(15-1:4)	79.59

tam a libertação da água do interior da argamassa. No entanto, este resultado vem contrariar Camarini e Ishikawa (2004), citados por Silva et al. (2005), que concluíram nos seus estudos que o teor de finos não contribuiu para aumentar a retenção de água. Já Silva et al. (2009) obtiveram resultados condizentes com os obtidos neste estudo, verificando um aumento de cerca de 13% da capacidade da argamassa de reter água ao adicionar 10% de finos cerâmicos.

A capacidade de retenção de água de uma argamassa é importante pois previne eventuais problemas, tais como a absorção excessiva de água pelo suporte onde a argamassa é aplicada e a rápida perda de água da argamassa com a consequente deficiente hidratação do cimento. O primeiro problema referido tem como resultado a possibilidade de expansão do suporte e o aumento da probabilidade de retracção na secagem; o segundo provoca uma diminuição da resistência da interface suporte / argamassa devido à criação de uma camada insuficientemente hidratada (Sabbatini, 2007).

Conclui-se que o aumento da retenção de água, caso não diminua outras propriedades das argamassas como a permeabilidade ao vapor de água, será salutar na maioria das circunstâncias para as principais características das argamassas, tornando-as menos sensíveis à porosidade e às condições de humedecimento do suporte.

### 5.2 Variação dimensional

Este ensaio foi realizado de acordo com Cahier 2669-4 do CSTB de norma europeia EN 1015-13 (1993). Utilizou-se uma amostra de três provetes, por tipo de argamassa, com início das medições logo após



a descofragem. Os resultados são apresentados na Figura 12.

Por observação dos resultados obtidos, verifica-se um aumento significativo da retrac-

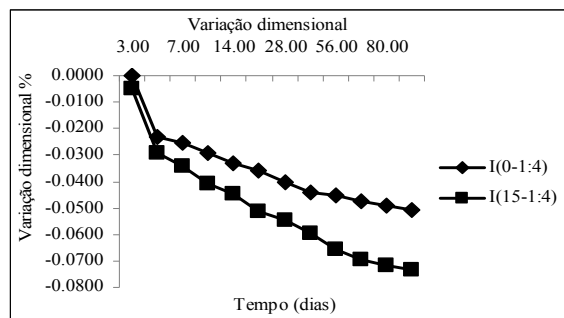


Fig 12 - Tempo versus variação dimensional

ção na argamassa com incorporação de finos de betão de cerca de 44 % relativamente à argamassa de referência.

Segundo a bibliografia existente, é esperado um aumento da retracção com a incorporação de agregados reciclados. Sendo portanto este aumento esperado, é necessário verificar se tal não implicará um agravamento significativo na fissuração das argamassas, o que foi avaliado pelo ensaio de susceptibilidade à fendilhação.

Hansen (1985), tendo verificado um aumento entre 40 e 80% da retracção em betões com agregados reciclados face a betões com agregados naturais, aponta como razão a grande quantidade de argamassa ligada à superfície do agregado reciclado.

De acordo com Neville (1996), o aumento da retracção plástica está associado a três factores: baixas taxas de exsudação, elevada retracção autogénea e elevadas pressões capilares provenientes das altas finuras dos materiais cimentícios.

Comparando os resultados com os obtidos por Silva et al. (2009), Silva et al. (2005) e Angelim et al. (2003) (Figura 13), também estes verificaram, face à argamassa convencional, um acréscimo da retracção na argamassa com incorporação de finos. Apenas a argamassa com 5% de incorporação de finos de micaxisto registou uma diminuição da retracção face à argamassa

convencional, o que parece resultar de um problema experimental. A argamassa de saibro vermelho registou um acréscimo significativo da retracção o que pode ter consequências negativas.

### 5.3 Aderência ao suporte

Este ensaio foi feito segundo a norma europeia EN 1015-12 (2000), sobre aplicações de cada tipo de argamassa sobre três faces de tijolos após terem sido submetidas a um processo de cura de 28 dias. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tensão de aderência

Nomenclatura	Aderência (MPa)	Tipologia de rotura predominante
I(0-1:4)	0.33	B
I(15-1:4)	0.45	A

A - rotura adesiva (no plano do revestimento - suporte); B - rotura coesiva (no seio do revestimento)

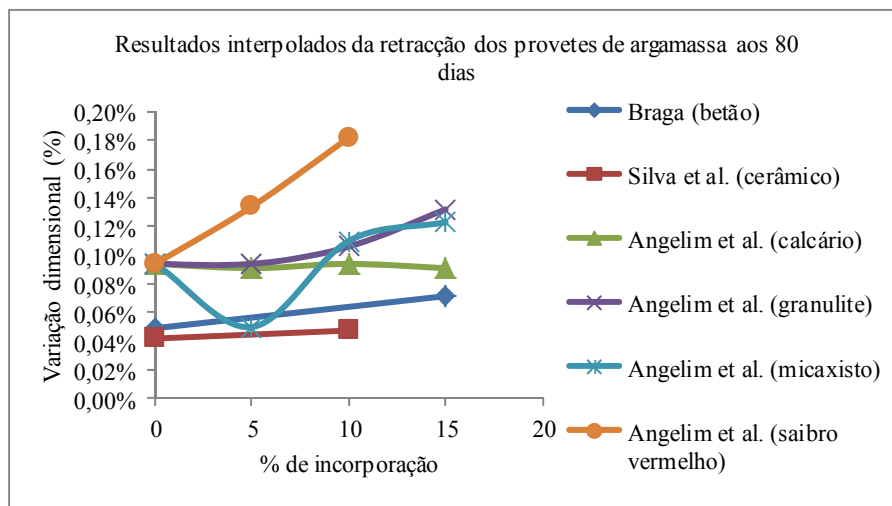
Houve uma melhoria significativa da capacidade de aderência da argamassa com a incorporação de 15% de finos de betão. A rotura das carotes na argamassa de referência foi maioritariamente coesiva, ocorrendo a rotura no seio do revestimento. Para a argamassa com incorporação de finos de betão, a rotura foi adesiva entre o revestimento e o suporte, em resultado do acréscimo da resistência da argamassa à tracção.

Silva et al. (2009) obtiveram valores muito próximo dos deste estudo para a argamassa com 10% de resíduos cerâmicos e um acréscimo significativo face à argamassa de referência. Silva et al. (2005) tiveram também um incremento da capacidade de aderência com a junção de 6% de finos de areia britada.

Por outro lado, Paes et al. (1999) verificaram que existe uma ténue tendência de diminuição da resistência de aderência à medida que o teor de finos aumenta. No entanto, as percentagens de incorporação de finos estudadas são superiores às usadas no presente trabalho o que pode sugerir que, a partir de um determinado valor de percentagem de incorporação de finos, a capacidade de aderência tende a diminuir. Também Scartezini (2002) e Amorim et al. (2003) concluíram, em estudos diferentes,

que argamassas com um maior teor de finos tendem a fazer diminuir a absorção

do substrato e a capacidade de aderência.



**Fig 13** - Retracção dos provetes de argamassa, aos 80 dias (12 semanas), para cada um dos diferentes tipos de pó adicionados, comparando os resultados de Braga (2010) Silva et al. (2009) e Angelim et al. (2003)

#### 5.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Este ensaio foi realizado pelo método da frequência de ressonância de acordo com a norma francesa NF B10-511 (1975). Utilizou-se uma amostra de três provetes prismáticos, por tipo de argamassa, submetidos a um processo de cura de 28 dias, tendo sido ensaiados no final deste período. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Módulo de elasticidade

Nomenclatura	Módulo de elasticidade (GPa)
I(0-1:4)	7.11
I(15-1:4)	10.62

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido que é proporcionada pelo cimento hidratado, pela disposição das partículas dos agregados, devido à forma e rugosidades dos grãos, e pelo teor de material pulverulento. O consumo de água e o teor de cimento são variáveis determinantes nas resistências à compressão e à tracção por flexão e na aderência à tracção, que influenciam directamente o módulo de elasticidade.

Através da Tabela 5, observa-se um aumento do módulo de elasticidade na

argamassa com incorporação de finos de betão.

Silva et al. (2005) obtiveram um maior módulo de elasticidade nas argamassas produzidas com areia britada face às com areia natural e apontam como razões principais o maior teor de material pulverulento, o que leva a uma melhor arrumação das partículas e, conseqüentemente, maior densidade da massa. Para além disso, o consumo de água nas argamassas com areia britada foi menor e isso também pode ter contribuído para aumentar o módulo de elasticidade nas argamassas produzidas com este agregado, já que as resistências mecânicas geralmente diminuem com a relação água / cimento.

As razões apresentadas por Silva et al. (2005) para o aumento do módulo de elasticidade podem ser transpostas para o presente estudo. Na argamassa I(15-1:4), foram incorporados finos na sua mistura e houve uma diminuição do consumo de água o que levou a uma maior compactidade e aumento da rigidez.

Silva et al. (2009) notaram um pequeno decréscimo nas argamassas com 10% de incorporação de resíduos cerâmicos face à de referência. Estes resultados são discordantes com os obtidos na presente investigação e os obtidos por Silva et al. (2005).

Silva et al. (2009) supõem que a proximidade dos resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade fica a dever-se à não existência de muita diferença entre as argamassas, uma vez que esta se resume apenas a 10% do volume total de agregado.

Em conclusão, verifica-se um aumento (de quase 50%) do módulo de elasticidade na argamassa com incorporação de 15% de finos de betão face à de referência o que pode ter um efeito negativo em determinadas circunstâncias, pois um valor maior para o módulo de elasticidade representa maiores tensões internas e menos deformações o que pode levar ao risco de rotura. No entanto, era esperado que, ao melhorar algumas das propriedades das argamassas com a incorporação de finos de betão, existisse uma ligeira degradação de outras.

### 5.5 Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-19 (1998). Foram utilizados, para cada tipo de argamassa, três provetes em forma de disco que foram submetidos previamente a um processo de cura durante 28 dias.

Verifica-se, por observação da Tabela 6, que a argamassa com incorporação de finos de betão apresenta uma menor permeabilidade ao vapor de água em cerca de 18% relativamente à argamassa de referência. A permeabilidade ao vapor da água auxilia a secagem da parede e impede a condensação de água na sua superfície. No entanto, pode-se considerar que o decréscimo ocorrido é pequeno continuando a argamassa a garantir um adequado desempenho.

Os valores são concordantes com os de Silva et al. (2009) que também verificaram uma redução da permeabilidade ao vapor de água em cerca de 20% na argamassa com incorporação de 10% de resíduos cerâmicos e os de Angelim et al. (2003) em que a incorporação de finos diminui a permeabilidade à água em geral, independentemente do estado em que esteja.

### 5.6 Susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida

Este ensaio desenvolvido no LNEC por Veiga (2006), descrito na ficha de ensaio FE Pa 37, é baseado em dois critérios:

- CSAF - coeficiente de abertura à 1ª fenda, dado pelo quociente entre a força de rotura de tracção e a força máxima durante o ensaio de retracção restringida;
- CREF - coeficiente de resistência à evolução da fendilhação por retracção restringida, dado pelo quociente entre a energia de rotura no ensaio de tracção e a força máxima durante o ensaio de retracção restringida.

Tabela 6 - Permeabilidade ao vapor de água

Nomenclatura	Permeabilidade ao vapor de água	
	Permeabilidade (ng/(m.s.Pa))	Coefficiente de difusão
I(0-1:4)	22.7	8
I(15-1:4)	18.62	10

A classificação das argamassas quanto à sua susceptibilidade à fendilhação é feita recorrendo à Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação da susceptibilidade à fendilhação em argamassas de revestimento (Veiga, 2006)

Classe de susceptibilidade à fendilhação		
1 (Frac) *	CSAF $\geq$ 1	CREF $\geq$ 1
2 (Média) *	CSAF $\geq$ 1	0.6 $\leq$ CREF < 1
3 (Forte) **	CSAF < 1	CREF < 0.6

\* Tem que verificar as duas condições para pertencer à classe.

\*\* Basta verificar uma das condições para pertencer à classe.

Os resultados obtidos para os dois vectores estão apresentados na Tabela 8. Pela análise dos resultados, verifica-se que a argamassa de referência, I(0-1:4), pode ser considerada uma argamassa de fraca susceptibilidade à fissuração, embora no limite, enquanto que a argamassa com finos de betão, classificada como de média fissurabilidade, mostra uma diminuição do valor dos dois coeficientes indicando que, ainda que moderado, existe um agravamento da fissurabilidade das argamassas. Estes resultados são concordantes com os que se obtiveram no ensaio de variação dimensional, visto ter-se verificado um aumento da

retração nas argamassas com incorporação de resíduos.

O facto de a argamassa de referência ter

**Tabela 8** - Características das argamassas sujeitas à retração restringida

Nomenclatura	$F_{r\text{ máx}}$ (N)	$R_t$ (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)	Classificação
I(0-1:4)	56.0	266.0	54.9	4.75	1.0	Fraca
I(15-1:4)	76.3	213.3	60.3	2.80	0.8	Média

$F_{r\text{ máx}}$  - força máxima desenvolvida;  $R_t$  - resistência à tracção; G - energia de rotura; CSAF =  $R_t/F_{r\text{ máx}}$ ; CREF =  $G/F_{r\text{ máx}}$

uma maior quantidade de água na sua constituição e ser mais porosa poderia fazer diminuir a resistência à tracção, o que não se verificou. Segundo Veiga (2006), o ambiente do ensaio (23 °C / 50% HR), bastante seco, pode impedir a completa hidratação do cimento e, nesta situação, a argamassa com mais água favorece uma melhor hidratação do cimento o que contribui para um aumento da resistência à tracção e, assim, acaba por compensar a sua maior porosidade. Também o facto de parte da areia ter sido substituída por agregados de menor dimensão (finos de betão) faz com que a susceptibilidade à fendilhação aumente. De acordo com Sousa Coutinho (1954), quando a dimensão do agregado aumenta, a retração evolui de forma mais lenta, pelo que existe uma maior possibilidade de dissipação de tensões. Pelo contrário, para dimensões de agregados menores, a tensão máxima mantém-se constante durante mais tempo, podendo dar origem a rotura.

## 6. CONCLUSÕES

Após a análise de todos os resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que, na 1<sup>a</sup> fase de ensaios, todas as argamassas apresentaram resultados bastante satisfatórios e superaram a argamassa de referência nas propriedades estudadas, tendo-se destacado pelos seus melhores resultados a argamassa com maior percentagem de substituição de areia por finos de betão (15%).

No ensaio de resistência à tracção por flexão, as argamassa I(5-1:4), I(10-1:4) e I(15-1:4) obtiveram acréscimos de resistência face à argamassa de referência de 23, 56 e 99%, respectivamente, e no ensaio de resistência à compressão, pela mesma ordem, os acréscimos foram de 38, 96 e 121%. O coeficiente de absorção de água

por capilaridade, por sua vez, obteve valores menores à medida que se aumentou a percentagem de finos e bastante satisfatórios. O decréscimo observado foi de 29, 40 e 44% nas argamassas I(5-1:4), I(10-1:4) e I(15-1:4), respectivamente.

Na 2<sup>a</sup> fase de ensaios, foram aprofundadas outras características na argamassa que melhor desempenho revelou na fase anterior. Quanto aos ensaios de aderência ao suporte e retenção de água, a argamassa revelou-se superior à argamassa de referência, tendo sido obtidos aumentos face a esta de 36 e 25%, respectivamente. Nos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, módulo de elasticidade e variação dimensional, a argamassa I(15-1:4) apresentou um comportamento inferior ao da argamassa de referência, ainda que a diferença possa ser pouco significativa. Comparativamente com a argamassa de referência, verificou-se um decréscimo de 18% na permeabilidade ao vapor de água, um aumento de 45% da retração e um aumento de 49% no módulo de elasticidade. No ensaio de susceptibilidade à fendilhação por retração restringida, houve um ligeiro aumento da tendência para a fissuração passando da classe de avaliação fraca para média.

Em resumo, em prol do objectivo que se pretende para a argamassa e do meio em que será aplicada, a incorporação dos finos de betão pode trazer vantagens para o seu desempenho, para além da vantagem ambiental de constituir uma reutilização de resíduos que existem em grandes quantidades. Fica também a ideia de que, se se tivesse estudado na 2<sup>a</sup> fase uma argamassa com uma percentagem um pouco menor de incorporação de finos de betão, talvez todos os resultados dos ensaios tivessem superado a argamassa de referência ou ficado ainda mais próximo dos seus, embora não fosse

possível alcançar resultados tão favoráveis como se alcançou na primeira fase.

## 7. REFERÊNCIAS

- Amorim, L. V.; Lira, H. L.; Ferreira, H. C. "Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129, No. 10, 2003, pp. 916-920.
- Angelim, Renato R.; Angelim, Susane C. M.; Carasek, Helena "Influência da adição de finos calcários, siliciosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos", V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA), São Paulo, Brasil, 2003, pp. 383-398.
- Braga, Mariana "Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão - efeitos de filer e hidráulico", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2010.
- Brito, J. A. "Cidade versus entulho", Seminário "Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil 2", Comité Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON), São Paulo, 1999, pp. 56-67.
- Camarini, Gladis; Ishikawa, Paulo H. "Propriedade de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural", X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, Brasil, 2004.
- Cavaco, Luís "Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho", Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005.
- Gunther, W. M. R. "Minimização de resíduos e educação ambiental", Seminário nacional de resíduos sólidos e limpeza pública, Curitiba, Brasil, 2000.
- Hansen, T. C. "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, second state of the art report developments", RILEM Technical Committee -37- DRC, 1985, pp. 1945-1985.
- Hudson, B. "Modification to the fine aggregate angularity test", Seventh Annual International Center for Aggregates Research Symposium, Austin, USA, 1999.
- Ishikawa, Paulo "Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2003.
- John, V. M. J. "Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil", Seminário "Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil 2", Comité Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON), São Paulo, Brasil, 1999, pp. 44-55.
- John, V. M. "Reciclagem de resíduos da construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento", Tese para a obtenção do título de docente, São Paulo, Brasil, 2000.
- Neville, A. M. "Properties of Concrete", 4th edition, Wiley, John & Sons, UK, 1996, 844 p.
- Paes, Isaura N. Lobato; Andrade, Moacir A. Souza de; Angelim, Renato Resende; Hasparyk, Nirole Pagan; Oliveira, Rodrigo Alves de; Passos, José Sergio; Thon, Désirée Gabriela; Carasek, Helena "O efeito de finos calcários nas propriedades da argamassa de revestimento", III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA), Vitória, Brasil, 1999, pp. 335-347.
- Pereira, Tiago A. R. "Otimização das características de humedecimento e secagem de argamassas", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.
- Pinto, T. P. "Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana", Tese de Doutorado em Engenharia da Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999.
- Sabbatini, Fernando Henrique; Franco, Luiz Sérgio; Barros, Mércia M. S. B. "Notas de aula da disciplina de Tecnologia da Construção de Edifícios I. tecnologia de vedações verticais - Capítulo 3: Argamassas de assentamento", São Paulo, Brasil, 2007. Disponível em: [http://www.dptoce.ufba.br/construcao1\\_arquivos/Veda%E7%F5es%20verticais03\\_argamassa%20assentamento.pdf](http://www.dptoce.ufba.br/construcao1_arquivos/Veda%E7%F5es%20verticais03_argamassa%20assentamento.pdf). [Consultado em Julho de 2010]
- Scartezini, L. M. "Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos

- de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2002, 262 p.
- Selmo, Sílvia “Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1989, 227 p.
- Silva, Narciso G.; Buest, Guilherme; Campiteli, Vicente C. “Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas”, VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Florianópolis, Brasil, 2005, pp. 12-22.
- Silva, Narciso G.; Campiteli, Vicente C. “Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas”, XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, Brasil, 2006, pp. 4349-4358.
- Silva, J.; Brito, J. de; Veiga, R. “Incorporation of fine ceramics in mortars”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 556-564.
- Sousa Coutinho, A. “A fissurabilidade dos cimentos, argamassas e betões, por efeito da sua contracção”, Memória n.º 57, LNEC, Lisboa, Portugal, 1954.
- Veiga, M. Rosário; Velosa, Ana; Magalhães, Ana “Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test”, *Materials and Structures*, Vol. 40, No. 10, 2006, pp. 1115-1126.