

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830
BT/PCC/438

**Estudo de argamassas com agregados
reciclados contaminados por gesso de
construção**

**Gerusa de Aguiar
Silva Maria de Souza Selmo**

São Paulo – 2004

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico – Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan
Vice-Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves

Conselho Editorial
Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves
Prof. Dr. Paulo Helene
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico
Prof. Dr. João Petreche

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

O presente trabalho é parte da dissertação de mestrado apresentada por Gerusa de Aguiar sob orientação da Profa. Dra. Silvia Maria de Souza Selmo: “Estudo de Argamassas com Agregados Reciclados Contaminados por Gesso de Construção”, defendida em 05/11/2004, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia Civil da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Aguiar, Gerusa de
Estudos de argamassas com agregados contaminados por gesso de construção / Gerusa de Aguiar, Silva Maria de Souza Selmo. -- São Paulo : EPUSP, 2006.

20 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil ; BT/PCC/438)

1. Argamassa (Propriedades) 2. Agregados (Reciclagem; uso)
I. Selmo, Silvia Maria de Souza II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título
IV. Série
ISSN 0103-9830

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS CONTAMINADOS POR GESSO DE CONSTRUÇÃO

GERUSA DE AGUIAR

SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO

RESUMO

Através do desenvolvimento de um programa experimental foram avaliadas as alterações das propriedades mecânicas e da microestrutura de diversas argamassas pré-estabelecidas, em função da aceleração da sua deterioração por ciclos de umedecimento e secagem, em comparação com argamassas mantidas em câmara seca e inicialmente tomadas como referência.

As análises permitiram concluir que a baixa contaminação por gesso de construção dos agregados reciclados utilizados neste estudo foi suficiente para produzir alterações significativas no desempenho mecânico das argamassas, mesmo para a condição de exposição em câmara seca.

Concluiu-se que limites na faixa entre 0,1 % e 0,2% de sulfatos solúveis, em massa de agregado reciclado, preconizados por algumas instituições europeias, são mais adequados para as argamassas deste estudo do que o limite de 1,0% admitido pela NBR 15116 (ABNT, 2004), no caso de agregados reciclados para concreto não estrutural.

Neste Boletim Técnico são apresentados os resultados obtidos para um dos 4 grupos de argamassas estudados, o Grupo G6, que engloba as argamassas na proporção de 1:6 (cimento:agregado reciclado), em massa. Os resultados para as argamassas dos Grupos G9, G12 e G12F se encontram na dissertação.

Palavras-chave: argamassa, agregado reciclado, sulfatos, gesso de construção.

ABSTRACT

Through the development of an experimental program evaluating the alterations in the mechanical properties and in the microstructure of diverse pre-defined mortars, as a function of the acceleration of their deterioration through wetting and drying cycles, in comparison with mortars kept in a dry chamber, and initially taking as reference.

The analysis allowed concluding that even the low plaster of Paris ratio present in the recycled aggregates was enough to produce significant alterations in the performance of mortars, even on the ones kept in the dry chamber.

It was confirmed that limits between 0,1 % and 0,2% of soluble sulphates, in aggregate mass, praised by some European institutions are more adequate for the mortars evaluated on this work, than the limit of 1,0% admitted by NBR 15116 (ABNT, 2004) for non-structural recycled aggregate concrete.

This Technical Bulletin presents the results obtained for one of the four groups of mortars studied, the G6 Group, which is composed by the mortars with mix proportion of 1:6 (cement:recycled sand), by weight. The results for the mortars of the Groups G9, G12 and G12F can be found in the Master of Science dissertation.

Key words: mortar, recycled aggregate, sulfates, plaster of Paris.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do estudo

Mesmo que pesquisas brasileiras sobre reciclagem de resíduos de construção e demolição venham crescendo nos últimos anos, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos considerando o uso de agregados reciclados para a produção de argamassas; a maioria dos trabalhos só considera o uso como agregado graúdo em concretos para fins não estruturais.

Entretanto, a fração miúda (partículas menores que 5,0 mm) é uma parcela significativa resultante da reciclagem dos resíduos de construção e demolição. Mesmo quando o objetivo é a produção apenas de agregado graúdo, o agregado miúdo é naturalmente produzido como resíduo do processo de britagem. Esta fração corresponde a até 50% do montante produzido nas usinas de reciclagem no Brasil. (Angulo 2004)

Em contra-partida, o emprego dessa fração em materiais não estruturais, como é o caso de argamassas de revestimento e de assentamento de alvenarias, pode ser vantajoso, se ponderado o largo consumo dessas argamassas no Brasil e o avanço gradativo das pesquisas sobre o tema, como hoje ocorre pelos trabalhos de Miranda (2001) e Selmo (2001) e dentro dos quais se enquadra a dissertação de Aguiar (2004), com parte dos seus resultados apresentados neste Boletim.

1.2 Justificativas do estudo

1.2.1 O gesso como contaminante nos resíduos de construção e demolição

Um dos contaminantes que podem estar presentes nos agregados reciclados são os sulfatos, cuja principal fonte é o gesso de construção, largamente empregado na construção civil.

A Resolução 307/02 (CONAMA, 2002) e a NBR 10004 (ABNT, 2004) classificam o gesso como resíduo não inerte e que, portanto, não pode ser depositado nos aterros de construção, devendo ser separado dos demais resíduos por triagem.

Entretanto, no caso dos resíduos de gesso estarem na forma de revestimentos aderidos a concreto e alvenaria, a identificação deste material e a tarefa de soltar estes pedaços de gesso do substrato não é viável, pois o gesso apresenta elevada aderência a todos os tipos de base mineral, como avaliado por Selmo et al. (1997).

Assim, conclui-se que, mesmo com a classificação da Resolução 307/02 (CONAMA, 2002) e da NBR 10004 (ABNT, 2004), uma fração de resíduos de gesso poderá continuar presente nos resíduos de construção e demolição que chegam às centrais de reciclagem e, conseqüentemente, contaminar em baixos teores os agregados reciclados.

1.2.2 Divergências nos critérios para sulfatos solúveis em agregados

A presença de gesso em teores elevados pode provocar um efeito danoso aos concretos e argamassas, pois os sulfatos, em presença de compostos de alumínio e cálcio como o C_3A^1 , por exemplo, podem levar à formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais. (Collepari, 2003; Taylor; Famy; Scrivener, 2001; Hime; Mather, 1999; Fu; Ding; Beaudoin, 1997; Gallias, 1998)

¹ C_3A é a terminologia abreviada do composto $3CaO.Al_2O_3$ e será aqui adotada por ser convencional na tecnologia de cimento Portland.

Não há um consenso no meio técnico internacional quanto aos limites de sulfato para agregados reciclados e os valores variam entre 0,15% a 1,0%, numa ordem de grandeza quase 10 vezes maior. Também existe uma grande dificuldade em se obter dados sobre os teores reais encontrados nos agregados reciclados.

2. DETERIORAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR SULFATOS DE CÁLCIO

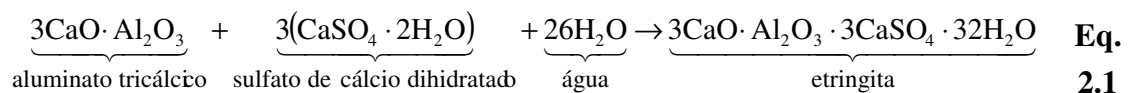
A etringita é um produto normal da hidratação dos componentes do cimento e a sua formação está sempre relacionada com expansão volumétrica da pasta. Quando essa reação acontece no estado fresco, esse caráter expansivo não é prejudicial.

A deterioração de produtos de cimento Portland pela ação de sulfatos ocorre por processos destrutivos que se iniciam a partir da formação de etringita tardia dentro dos poros de concretos, argamassas ou pastas, em idades mais avançadas, quando a matriz já está endurecida e rígida.

2.1 Etringita primária e monossulfoaluminato

De acordo com a teoria clássica, em compostos de cimento puros, em função da concentração do C_3A e dos íons sulfato (SO_4^{-2}) na solução, o produto cristalino formado é o trissulfoaluminato de cálcio (AFt) ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm).

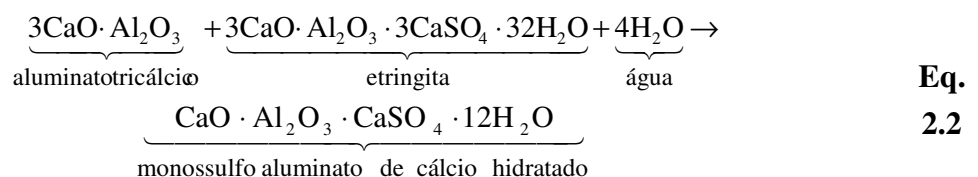
O trissulfoaluminato de cálcio é também conhecido como etringita. Como consagrado na literatura e evidenciado em Taylor (1996), a formação da etringita está condicionada a uma alta relação $SO_4^{-2}/Al(OH)_4^-$, junto com a presença de Ca^{+2} , OH^- e água, como descrito na Eq. 2.1



A etringita cristaliza-se primeiro, pois a relação sulfato/aluminato é alta na fase aquosa durante a primeira hora. Mais tarde as características da solução se alteram, aumentando a solubilidade dos aluminatos. Esta etringita formada nas primeiras horas de hidratação é chamada de *etringita primária*.

Depois do sulfato da solução ter sido consumido, quando a concentração de aluminatos se eleva novamente devido à renovação de hidratação do C_3A e do C_4AF , a etringita torna-se instável e é gradativamente convertida em monossulfoaluminato de cálcio.

A reação de conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio está descrita na Eq. 2.2.



De acordo com a teoria clássica, como citado, por exemplo, por Mehta (1994), o monossulfoaluminato é o produto final da hidratação dos cimentos Portland com mais de 5% de C_3A .

Taylor (1996) evidencia que para que ocorra a conversão de etringita em monossulfoaluminato, a relação entre SO_3 e Al_2O_3 precisa ser de 0,79, em massa. Kuzel (1996) salienta ainda que a concentração de SO_3 dentro da solução dos poros precisa ser superior a 2,35 mg/L para que a etringita esteja estável e não se converta em monossulfoaluminato.

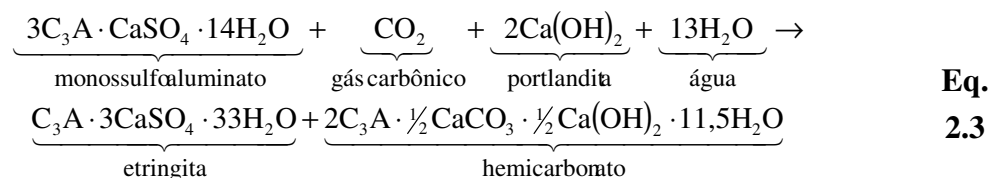
2.2 Processos de deterioração de materiais cimentícios por sulfatos de cálcio

Reações envolvendo a formação de etringita em idades avançadas dos materiais a base de cimento Portland estão relacionadas com processos destrutivos que se iniciam a partir da formação de etringita dentro dos poros de concretos, argamassas ou pastas no estado endurecido.

Quando a etringita é formada na pasta endurecida é chamada de *etringita tardia*. A sua expansão é heterogênea e em um concreto já endurecido e muito rígido pode causar fissuras e lascamentos, ou seja, a sua deterioração progressiva.

A formação da etringita tardia está relacionada com a conversão do monossulfoaluminato novamente em etringita, em função do ingresso de íons SO_4^{-2} no meio cimentício. Esta formação não ocorre de forma homogênea em todo o meio, podendo ocasionar um aumento de volume localizado e gerar tensões que provocam fissuras nos concretos e argamassas endurecidos. (Collepari, 2003), (Taylor; Famy; Scrivener; 2001), (Hime; Mather, 1999) e (Fu et al., 1995)

A escola clássica defende a reversão do monossulfoaluminato em etringita em função do ingresso de íons sulfato no sistema. No entanto, estudos mais recentes, como os de Taylor (1996 e 1997), Kuzel (1991 e 1996) e Kakali; Tsivilis; Aggeli (2000), consideram que esta reversão possa ocorrer em função da presença outros íons ou compostos no sistema como, por exemplo, o CO_2 e a portlandita, como descrito na Eq. 2.3, transcrita de Kuzel (1996)



Como se pode ver neste caso, a reação leva à formação de etringita e à ocorrência de carbonatação. Kuzel (1996) explica que o concreto contendo monossulfoaluminato é atacado pelo CO_2 . O SO_4^{-2} na estrutura cristalina do monossulfoaluminato é substituído pelo CO_3^{-2} , como resultado, a concentração de sulfato na solução dos poros aumenta, e a etringita é formada novamente.

Kuzel (1996) discute a ocorrência de monossulfoaluminato nos materiais cimentícios em função do teor de CO_2 na matriz cimentícia, como pode ser visto na Figura 2.1.

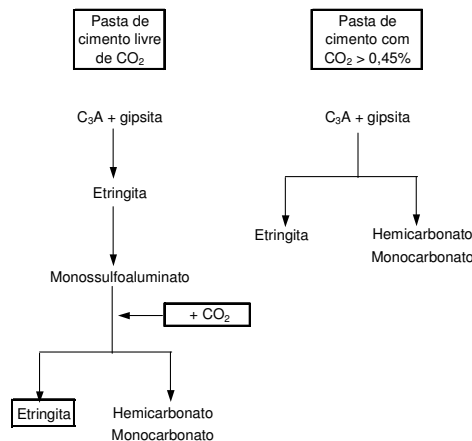


Figura 2.1 – Influência do CO₂ nas reações de hidratação do C₃A em cimentos Portland. (Adaptado de Kuzel, 1996)

Taylor (1997), também fala da conversão de monossulfoaluminato em etringita pela disponibilização de íons SO₄ pela anidrita, e nestes casos pouca ou nenhuma dissolução da portlandita e ou descalcificação do C-S-H precisam ocorrer.

De qualquer forma, o que se pode concluir da literatura, é que a existência do monossulfoaluminato, condicionado ou não à presença de íons SO₄, é um fator de risco para a formação de produtos expansivos, visto que esse não é o único íon apontado por especialistas como passível de propiciar a reversão do monossulfoaluminato em etringita e hoje muito se discute a importância da presença de CO₂.

2.3 Deterioração por contaminação com sulfatos de origem interna como estudado nesta pesquisa

A ação de sulfatos internos ocorre quando há sulfato livre na microestrutura da pasta, em função da liberação atrasada de sulfato proveniente de agregados contaminados por gesso ou da decomposição térmica da etringita primária.

Esta ação é favorecida pela existência de microfissuras, pela deposição de cristais de etringita nessas regiões e ocorre em um ambiente que favoreça a difusão de SO₄⁻² e a reação com íons Ca⁺² e aluminato, através dos poros capilares saturados de água. (Collepari, 2003).

De acordo com Collepari (2003), quando há liberação atrasada de sulfato, presença de microfissuras e exposição à água ao mesmo tempo há uma grande possibilidade da ocorrência da deterioração por sulfatos. Estes fatores são melhor descritos na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Elementos necessários para a ocorrência de ataque por sulfatos internos. (Adaptado de Collepardi, 2003)

2.4 Limites para sulfatos e outros sais solúveis normalizados em agregados

Não se podem desprezar os efeitos que a contaminação pelo sulfato pode causar à estrutura interna de concretos e argamassas, e o estabelecimento de critérios seguros para limites de aceitação desse contaminante deverá ser um avanço importante para a tecnologia da reciclagem e a sua aceitação pelo mercado consumidor.

Não há um consenso no meio técnico internacional quanto aos critérios e limites de sulfato para agregado reciclado, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Limites de sulfatos para agregados em mistura com cimento Portland.

País	Referência	Norma	Limite de sulfatos solúveis		Aplicação
			Valor	Forma de expressão	
França	AFNOR (1994)	NF P 18 541	0,15 % em massa de agregado	SO ₄	Agregados reciclados para concreto
França	RILEM (1994)	TC 121 DRG	1,0 % em massa de agregado	SO ₃	Agregados reciclados para concreto
Alemanha	DIN (2002)	DIN 4226-100	600 mg/L	SO ₄	Agregados reciclados para concretos e argamassas
Japão	ASD (2004)	Specification 378	1,0 % em massa de agregado	SO ₃	Agregado reciclado para concreto (substituição de 20%)
Holanda	NEN (1990)	NEN 5936	1,0 % em massa de agregado	SO ₃ *	Agregados reciclados
Itália	UNI (1999)	UNI 8520-2	0,20%	SO ₃	Agregados naturais
Brasil	IPT (1981)	IPT ES – 5 (1981)	0,05 %	-	Agregado miúdo de argamassa de revestimento
Brasil	ABNT (2004)	NBR 15116/04	1,0 % em massa de agregado	SO ₄	Agregados reciclados para concreto não estrutural

* Sulfatos totais (solúveis e combinados).

A maioria dos limites informados se refere a agregados reciclados para concreto. Não se sabe se esses teores são coerentes para o caso do uso em argamassas não estruturais, em função da sua composição, níveis de porosidade e comportamento, que podem ser diferentes.

Como se pode ver, apenas a norma DIN 4226-100 se refere aos limites para argamassas produzidas com agregado reciclado, enquanto a especificação ES-5 do IPT se refere a agregados naturais.

É necessário aprofundar este tema nas pesquisas sobre agregados reciclados, considerando que estes são mais porosos que os agregados naturais e podem, em tese, suportar melhor as tensões de expansão, pela formação da etringita. (Collepardi, 2003)

Como no início desta pesquisa não havia ainda no Brasil uma norma que tratasse especificamente de agregados reciclados, adotou-se a NBR 7211 (ABNT, 1987) como referência. Ela estabelece que o teor de sulfatos, expressos em SO₃ nos agregados naturais deve ser menor que 0,1%, em massa de agregado.

Segundo o Prof. Dr. Jörg Seele, especialista do IGS de Munique (Arendt; Seele, 2000), os danos por sulfatos solúveis presentes em alvenarias afetadas por umidade, podem ser admitidos como proporcionais ao total de sulfatos presentes nesses elementos e os limites na Tabela 2.2 são por ele indicados como critérios para uma boa previsão.

Tabela 2.2 – Níveis de contaminação e danos esperados pela ação de sulfatos, em materiais de construção, por critérios do IGS. (Seele; Greven; Selmo, 2004)

Sulfatos (% em massa)	Classificação e nível dos danos
$\leq 0,024$	Sem efeitos – Nível 0
$\leq 0,077$	Pequeno – Nível I
$\leq 0,24$	Médio – Nível II
$\leq 0,77$	Alto – Nível III
$> 0,77$	Muito alto – Nível IV

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Decidiu-se realizar um estudo experimental com a finalidade de analisar mais profundamente o efeito do uso de agregados reciclados contaminados com gesso de construção em argamassas de assentamento de alvenarias, que é o emprego atual do agregado produzido na usina de reciclagem Irmãos Preto, situada na cidade de Socorro (SP).

3.1 Resumo da metodologia

Este programa experimental foi desenvolvido com agregados reciclados contaminados por diferentes teores de sulfato (pela aplicação de gesso de construção como revestimento em alvenarias), com o objetivo de avaliar a sua contribuição para a formação de etringita tardia e de uma possível deterioração de argamassas de assentamento, em processo de envelhecimento acelerado.

Os fatores listados abaixo influenciam no fenômeno de formação da etringita tardia e foram considerados no planejamento do estudo de Aguiar (2004):

- Expor as argamassas inicialmente logo após a moldagem a um ambiente úmido, para favorecer a solubilização dos íons presentes no agregado reciclado, no cimento e na cal para favorecer as reações químicas de formação do composto expansivo em estudo
- Aplicar ciclos de umedecimento e secagem para favorecer a formação de microfissuras e a deposição dos cristais de etringita tardia;
- Na ciclagem, secar as argamassas utilizando temperatura bem inferior a 70 °C, de modo a impedir a decomposição da etringita primária (Colleparidi, 2003), o que poderia dificultar a análise da formação da etringita tardia, em função da liberação atrasada de sulfato pelo agregado reciclado.

3.2 Materiais utilizados

Para a moldagem dos traços foram utilizados: cimento CP III 32 RS, areia normal brasileira, além dos quatro tipos de agregado reciclado resultantes da moagem de paredes construídas em laboratório, nas quais foram aplicadas diferentes espessuras de revestimento de gesso.

O cimento resistente a sulfatos foi adotado para se tentar prevenir o processo de deterioração em estudo, em função do seu baixo teor de C₃A. Se os problemas detectados forem significativos, mesmo com o uso deste tipo de cimento, é sinal de que é preciso realmente se preocupar com a questão da contaminação pelo sulfato.

Um outro agregado constituído essencialmente de areia normal brasileira, composta na granulometria similar aos agregados reciclados foi denominado AN e escolhido para a produção de argamassa de referência quartzosa, isenta de fonte de sulfatos. A areia normal brasileira é produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, especialmente para o controle de qualidade oficial do cimento brasileiro e para o desenvolvimento de pesquisas.

3.2.1 Agregados reciclados utilizados

Para se ter dados mais confiáveis e fazer uma melhor correlação entre os materiais, optou-se por produzir artificialmente os agregados reciclados a serem usados na pesquisa, com o intuito de reproduzir proporcionalmente a composição teórica de concreto, alvenaria cerâmica e argamassa existente em obras da região de Socorro (SP), além de se ter melhor conhecimento da composição e homogeneidade do resíduo.

Buscou-se reproduzir proporcionalmente a composição teórica de concreto, alvenaria e argamassa existente em obras, e se usou o modelo de pórtico de Crescêncio (2003). Foram construídas quatro pórticos de 2,00 m x 1,50 m x 0,20 m de alvenaria de tijolo maciço, assentada com argamassa mista e envolvidas por um elementos de concreto, configurando um pórtico conforme o esquema mostrado na (Figura 3.1).

Estes pórticos receberam aplicação posterior de emboço de argamassa mista três delas receberam revestimento de gesso com uma espessura diferente em cada parede. Cada parede foi então demolida separadamente e depois britado em um moinho de martelo.

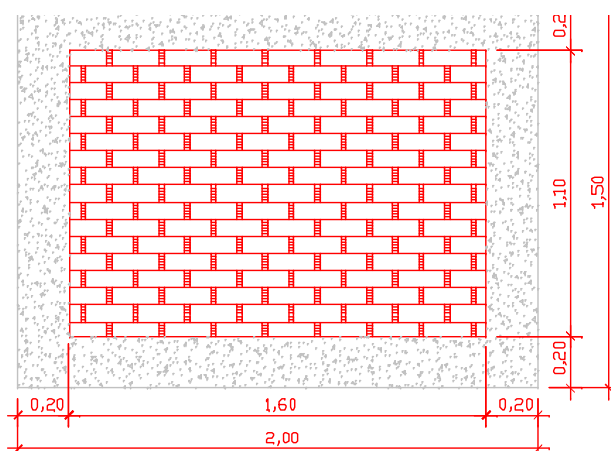


Figura 3.1 – Esquema do pórtico base para produção dos agregados reciclados.

Em 3 pórticos de alvenaria, a pasta fresca foi aplicada em espessuras crescentes, para gerar espessuras finais e contaminações de sulfato diferentes. As contaminações por sulfatos previstas estão descritas na Tabela 3.1 e foram planejadas para resultar nos valores indicados na última coluna.

Tabela 3.1 – Pórticos geradores dos agregados reciclados produzidos.

Agregado reciclado produzido	Pórtico base gerador do agregado	Espessura do revestimento de gesso	Teor previsto (SO ₄ , % em massa)
A1	P1	-	≅ 0,0
A2	P2	Fina (5 mm)	≅ 1,2
A3	P3	Média (10 mm)	≅ 2,4
A4	P4	Grossa (15 mm)	≅ 3,5

3.3 Descrição das argamassas moldadas

A escolha do traço de moldagem aqui analisado procurou privilegiar proporções viáveis para argamassas de assentamento de alvenarias, passíveis de contato com umidade e com consumo de cimento moderado, para tornar economicamente atrativo o uso de agregado reciclado. As argamassas foram reunidas em um grupo chamado G6, com proporção de 1:6 (cimento:agregado reciclado) e este traço foi reproduzido com cada um dos agregados reciclados (A1 a A4). –A cal foi utilizada apenas com a areia normal brasileira, pois ela não apresenta o mesmo teor de finos que o agregado reciclado. O traço acima foi então adaptado da seguinte maneira:

- 1 : 1 : 6 (cimento : cal hidratada : areia normal brasileira)

A identificação das argamassas se encontra na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 –Detalhamento das argamassas do estudo.

Argamassa	Componentes secos (kg)										Água (kg)	Massa total (kg)	Relação a/c total	Finos totais (%)
	CP III 32 RS	Cal CH III	Agregado reciclado				Areia normal brasileira (AN)							
			A1	A2	A3	A4	1,2	0,6	0,3	0,15				
G6	T1	1	-	6	-	-	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	29,5
	T2	1	-	-	6	-	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,9
	T3	1	-	-	-	6	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,8
	T4	1	-	-	-	-	6	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,3
	T5	1	1	-	-	-	-	0,92	1,62	1,83	1,64	1,5	9,5	1,5

3.4 Ciclos de umedecimento e secagem

A cura inicial foi em câmara úmida por 7 dias e foi sucedida da permanência em câmara seca até os 63 dias de idade, para que as primeiras reações pudessem acontecer de forma mais intensa pela cura úmida e depois disso os corpos-de-prova atingissem considerável estabilidade dimensional e de massa.

Após os 63 dias de idade, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, Cada ciclo teve duração de 14 dias e foi executado da seguinte maneira:

- 7 dias de umedecimento, através da permanência em câmara úmida, em contato com pequena lâmina de água em uma das faces. Optou-se por este tipo de molhagem para prevenir a lixiviação excessiva dos sais, que poderia ocorrer caso o corpo-de-prova fosse imerso;

- 7 de secagem em estufa ventilada à temperatura de 40 °C.

Este procedimento foi repetido por 8 ciclos completos. A cada dois ciclos foram realizados ensaios mecânicos com os corpos-de-prova, nas idades de 91, 119 e 175 dias.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização das argamassas no estado plástico

As argamassas no estado plástico foram caracterizadas quanto à consistência, densidade de massa aparente e consumo de cimento por m³. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização das argamassas no estado plástico.

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de finos totais (kg/m ³)	
G6	T1	283	1921	218	451
	T2	285	1892	215	435
	T3	255	1943	221	445
	T4	263	1911	217	431
	T5	252	2066	217	435

O índice de consistência sofreu variação, mas manteve-se dentro da faixa especificada de 275 ± 20 mm.

A densidade de massa aparente no estado plástico não apresentou variações consideráveis, ficando dentro da faixa de 1800 a 1900 kg/m³ para as argamassas com agregado reciclado e 2000 kg/m³ para as argamassas com areia normal brasileira.

4.2 Caracterização das argamassas de 63 a 175 dias de idade

Os itens 4.2.1 a 4.2.8 apresentam os resultados dos ensaios após a permanência dos 7 até os 63 dias de idade em câmara seca e durante a sua ciclagem, até 175 dias de idade.

Um conjunto de corpos-de-prova dessas argamassas sofreu a mesma cura úmida inicial e simultânea, mas permaneceu em câmara seca até 175 dias e está identificado adiante com o código NC.

4.2.1 Absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para os ensaios aos 63 dias de idade.

Tabela 4.2 – Caracterização inicial das argamassas no estado endurecido.

Argamassa	Absorção de água (%)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	
G6	T1	27	1501	36
	T2	26	1512	34
	T3	26	1486	34
	T4	26	1503	34
	T5	16	1845	25

Houve uma diferença significativa na densidade das argamassas de agregado reciclado em comparação com a argamassa de areia normal brasileira, o que era esperado, em função da alta porosidade dos agregados reciclados.

A alta porosidade das argamassas com agregado reciclado, comprovada pelos valores de densidade e porosidade aparente é a causa da sua alta absorção de água, que por sua vez tem origem na baixa densidade deste tipo de agregado.

Esta porosidade poderia ser considerada como um benefício se a pressão causada pela cristalização interna dos sais acaba for minimizada pelos vazios da microestrutura, como defende Collepardi (2003), por exemplo, mas nada se pode afirmar sem a avaliação das propriedades mecânicas, o que será feito mais adiante.

4.2.2 Composição química

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para os ensaios após 63 dias de idade.

Tabela 4.3.– Análise mineralógica aos 63 dias de idade, por FR-X.
(óxidos, em % de massa)

Argamassa	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Perda ao fogo	Total	
G6	T1	59,1	11,4	4,75	-*	2,11	12,0	0,42	-*	-*	1,38	0,74	9,07	100,97
	T2	58,3	11,0	5,11	-*	2,14	12,3	0,43	-*	-*	1,37	0,85	8,91	100,41
	T3	58,4	11,1	4,78	-*	2,05	12,6	0,43	-*	-*	1,36	0,49	8,62	99,83
	T4	58,2	10,9	4,87	-*	2,16	12,6	0,44	-*	-*	1,37	1,03	8,77	100,34
	T5	76,0	2,30	0,61	-*	3,73	10,4	<0,10	-*	-*	0,35	0,53	7,39	101,31

* Valores não informados pelo LCT, consideram-se que em teor desprezível.

4.2.3 Teor de sais solúveis totais e de sulfatos solúveis

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 mostram os resultados obtidos para sulfatos solúveis e sais solúveis totais ao longo das idades de análise adotadas neste estudo, conforme legendas.

Aos 63 dias, para todas as argamassas com agregado reciclado, os teores de sulfatos solúveis se mostram entre os limites de risco baixo a médio, para o desempenho e a durabilidade de alvenarias expostas à umidade, pelos critérios na Tabela 2.2.

Com a evolução dos ciclos, ou seja, de 63 para 175 dias, os teores de sulfatos solúveis aumentaram para valores que enquadrariam todas essas argamassas como sendo de risco potencial médio, para a durabilidade de alvenarias expostas à umidade, pelo critério de Seele (Tabela 2.2), independente do agregado reciclado usado.

Apenas nas argamassas com os agregados A1 e AN, os teores de sulfato solúveis permaneceram estáveis, independente do número de ciclos aplicados.

As considerações acima permitem enquadrar os agregados reciclados contaminados com revestimento de gesso, como potencialmente mais deletérios para o desempenho de argamassas expostas à umidade.

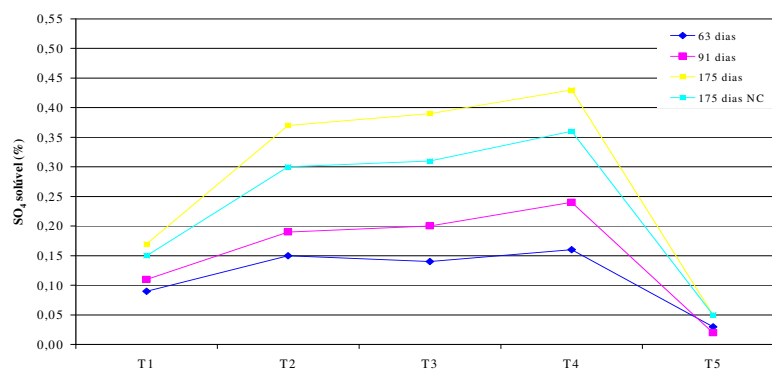


Figura 4.1 – Sulfatos solúveis nas argamassas T1 a T5, em 3 idades do estudo, sendo que na última foram caracterizadas as argamassas não cicladas (NC).

Nas argamassas com agregados reciclados contaminados (T2, T3 e T4), os valores de sais solúveis totais cresceram de 63 para 175 dias de idade.

Nota-se que o teor de sais solúveis totais da argamassa T5, produzida com AN, é bem maior do que os valores apresentados pelas argamassas com os agregados reciclados, evidenciando a solubilidade da cal usada neste traço, conforme já demonstrado nos estudos de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a).

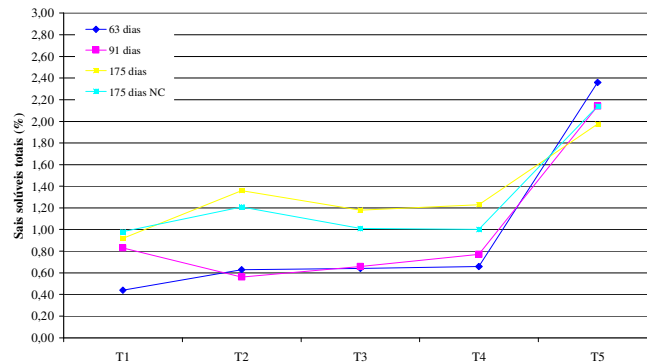


Figura 4.2 – Sais solúveis totais nas argamassas.

4.2.4 Susceptibilidade à formação de eflorescências

Esta análise foi realizada para as argamassas não cicladas e mantidas em câmara seca até 175 dias, sendo que adotou-se a metodologia de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003b), e temperatura de 40 °C e os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Análise da formação de eflorescências nas argamassas.

Identificação		Análise da formação de eflorescência			
Grupo	Argamassa	Ocorreu	Intensidade	Local de formação	Cor predominante do sal formado
G6	T1	Sim	Média	Topo e laterais	Branco
	T2	Sim	Média	Topo e laterais	Branco
	T3	Sim	Média	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T4	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T5	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo

Com base nos resultados da Tabela 4.4 e no estudo de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a), como já comentado em 4.2.3, a formação de sais deve ser proveniente principalmente do hidróxido de cálcio, da cal e do cimento já que, mesmo no traço com areia normal brasileira (T5), ocorreu a formação de eflorescência e em alta intensidade.

Destaca-se ainda que, as argamassas com agregados reciclados apresentaram intensidade de formação de eflorescências crescente de acordo com a contaminação dos agregados por sulfato.

4.2.5 Análise das curvas TG e DTG

Para fazer a análise, as curvas TG e DTG da Figura 4.3 foram divididas em faixas de temperatura de interesse para o estudo, como descrito abaixo:

- **Faixa menor que 80° C**

Esta faixa de temperatura representa apenas a perda da água residual das argamassas, não envolvendo reações de desestabilização da etringita e de interesse neste estudo.

Para todas as argamassas e idades testadas (63, 91, 119 e 175 dias), a perda de massa até 80° C foi sempre em valores muito baixos e na faixa de 0,1% a 0,4 %, confirmando boas condições de secagem das argamassas, desde a cura inicial em câmara seca até 63 dias e durante todos os finais de ciclos para os ensaios mecânicos. A argamassa com areia normal apresentou valor ligeiramente menor, entre 0,1 % e 0,2 %, coerente com a maior densidade do agregado quartzoso.

- **Faixa entre 80° C e 125° C**

Essa faixa corresponde à desestabilização da etringita, mas também à desidratação inicial do C-S-H e perda final de umidade das argamassas.

Não houve diferença significativa de perda de massa entre as argamassas com agregados reciclados. Para todas as argamassas, a perda de massa foi maior aos 63 dias do que nas outras idades, podendo isto ser também indicativo de perda de água livre, por processo lento de difusão.

Dos 63 aos 175 dias percebe-se uma tendência de diminuição da perda de massa para todas as argamassas.

- **Faixa entre 125° C e 180° C**

Essa faixa corresponde principalmente à conversão de dihidrato para hemidrato, considerando que os demais compostos dos cimentos hidratados estejam em massa constante dentro do grupo. Estes resultados estão coerentes com a diferenciação de sulfatos solúveis, medidos também por análise química.

Nesta faixa, o gesso de construção usado na contaminação dos agregados deve se desestabilizar, em caso de ter permanecido livre nas argamassas (sem efeitos sobre a formação de etringita). Para uma mesma idade de análise, as argamassas com os agregados contaminados mostraram perda de massa ligeiramente maior, em relação à respectiva argamassa de agregado reciclado não contaminado.

Para todas as argamassas com agregado reciclado, a perda de massa foi maior aos 63 dias do que nas outras idades. Isto pode ser indicativo da reação ou alteração de algum composto envolvendo o dihidrato. Nesta faixa, porém, a diferença de perda dos 63 dias para as outras idades é bem menor do que nas faixas abaixo de 125 ° C, onde se desestabilizou a etringita e o monossulfoaluminato de cálcio e houve perda de umidade por difusão da microestrutura das argamassas.

O grupo apresentou comportamento similar ao verificado na faixa de temperatura anterior.

- **Faixa entre 400° C e 550° C**

Essa faixa pode corresponder principalmente à desidroxilação do Ca(OH)_2 .

Para esta faixa o comportamento se inverte. A perda de massa aumentou com os ciclos, para todas as argamassas com agregado reciclado, possivelmente pelo aumento de cal hidratada no meio, liberada pela reação de algum composto que tenha se formado ou tenha sido alterado nessa mesma faixa de temperatura.

- **Faixa entre 550° C e 800° C**

Esta faixa deve corresponder principalmente à volatilização de gás carbônico, dos carbonatos de cálcio e de magnésio (magnesita).

Para as argamassas com agregado reciclado mais contaminado (T3 e T4) agregados reciclados, houve tendência de aumento de perda de massa nessa faixa de temperatura, pela evolução da ciclagem. Em outras palavras, pode-se interpretar que houve aumento de carbonatação das argamassas.

A maioria das argamassas não cicladas apresentou menor perda de massa a 175 dias do que as cicladas, mostrando menor carbonatação do que as cicladas. Isto está coerente

com a ausência de umidade para as condições de cura em câmara seca e ainda pela saída de água livre do sistema, como detectado para a faixa de 80° C a 125° C.

- **Faixa entre 800° C e 1000° C**

Esta faixa deve principalmente corresponder à volatilização final de gás carbônico de carbonatos de cálcio e de dolomita.

Os teores de perda de massa ocorridos nessa temperatura foram sempre mais baixos para as argamassas de agregados reciclados do que para a argamassa de areia normal, sendo isto coerente com a adição de cal nas argamassas de areia normal.

De 63 para 175, ao final da ciclagem, houve tendência a aumento de perda de massa nessa faixa de temperatura, indicativo de aumento de carbonatação pela ciclagem. Não há diferença muito nítida de valores das argamassas cicladas em relação às argamassas não cicladas, podendo-se pensar que a faixa anterior (de descarbonatação inicial) foi considerada mais apropriada para a análise desta reação.

- **Faixa entre 80° C e 1000° C**

Esta faixa representa a perda total de massa durante a realização do ensaio.

Pode-se notar que, de 63 para 175 dias houve aumento da perda de massa total para todas as argamassas, confirmando-se o aumento global de massa nos corpos-de-prova pelos efeitos da carbonatação.

4.2.6 Resistência à tração na flexão

A Figura 4.4 (a) mostra a variação obtida nos resultados obtidos para a resistência à tração na flexão, com relação aos 175 dias de idade, em função da ciclagem.

Não se verificou tendência de influência da contaminação do agregado reciclado na resistência à tração na flexão das argamassas, no entanto, todas as argamassas com agregado reciclado, sejam elas cicladas ou não cicladas, apresentam perda significativa de resistência à tração na flexão com relação aos 63 dias de idade. Esse comportamento não foi verificado na argamassa com AN.

4.2.7 Resistência à compressão simples

A Figura 4.4 (b) mostra a variação obtida nos resultados obtidos para a resistência à compressão simples, com relação aos 175 dias de idade, em função da ciclagem.

Como pode ser observado, a ciclagem entre 63 e 91 dias promoveu um aumento expressivo de resistência à compressão em todas as argamassas.

Na continuação da ciclagem, esse ganho de resistência foi progressivamente perdido para as argamassas com agregados reciclados contaminados (T2, T3 e T4). As únicas argamassas que não apresentaram sinais significativos de perda resistência progressiva entre 91 e 175 dias foram: T5 e T1, respectivamente, as de areia normal e a do agregado reciclado não contaminado por gesso.

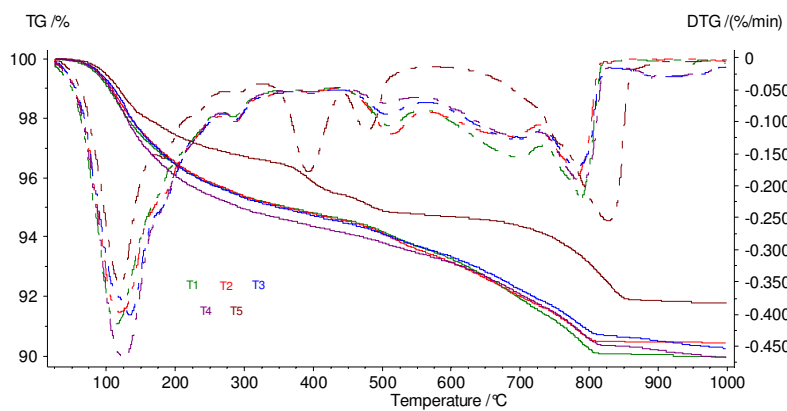
O fato do aumento de resistência coincidir com os primeiros ciclos de umedecimento e secagem levou à suposição da formação de algum produto de hidratação ou de carbonatação, em função da molhagem sofrida pelas argamassas durante a permanência na câmara úmida.

4.2.8 Módulo de elasticidade (estático e dinâmico)

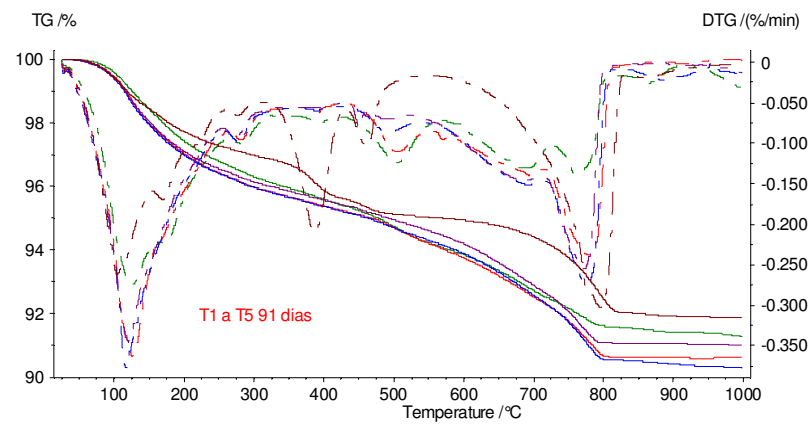
A Figura 4.4 (c) e (d) mostra a variação obtida nos resultados obtidos para o módulo de elasticidade, com relação aos 175 dias de idade, em função da ciclagem.

A ciclagem entre 63 e 91 dias promoveu aumento expressivo de módulo dinâmico para todas as argamassas. Na idade final, a maioria das argamassas apresentou redução do módulo estático e do módulo dinâmico. Entretanto, mesmo com a redução, os valores de módulo dinâmico para todas as argamassas com agregado reciclado aos 175 dias de idade são bem maiores do que os valores aos 63 dias de idade, o que não acontece com a argamassa de areia normal brasileira.

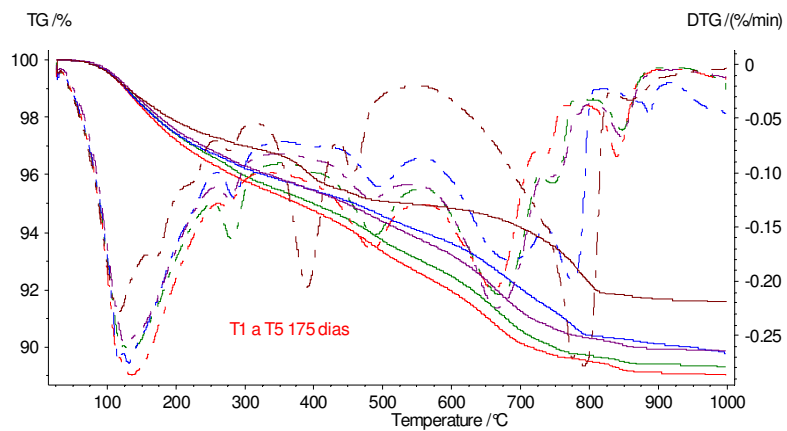
Para as argamassas não cicladas, aos 175 dias de idade, todas apresentaram valores de módulo estático e dinâmico menores do que os valores aos 63 dias de idade.



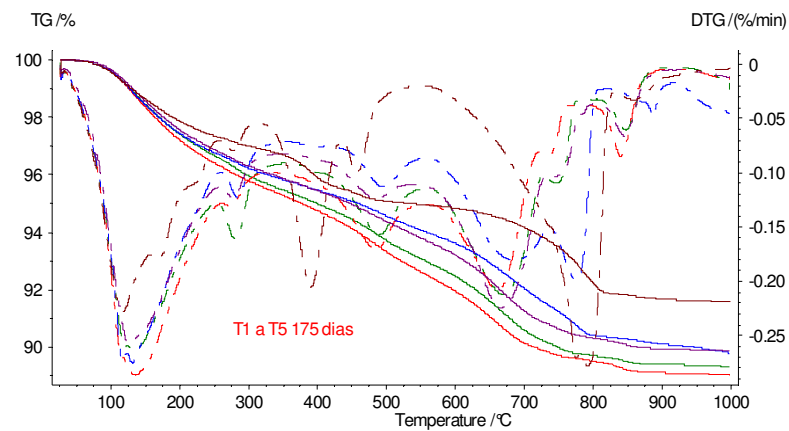
(a) 63 dias



(d) 91 dias

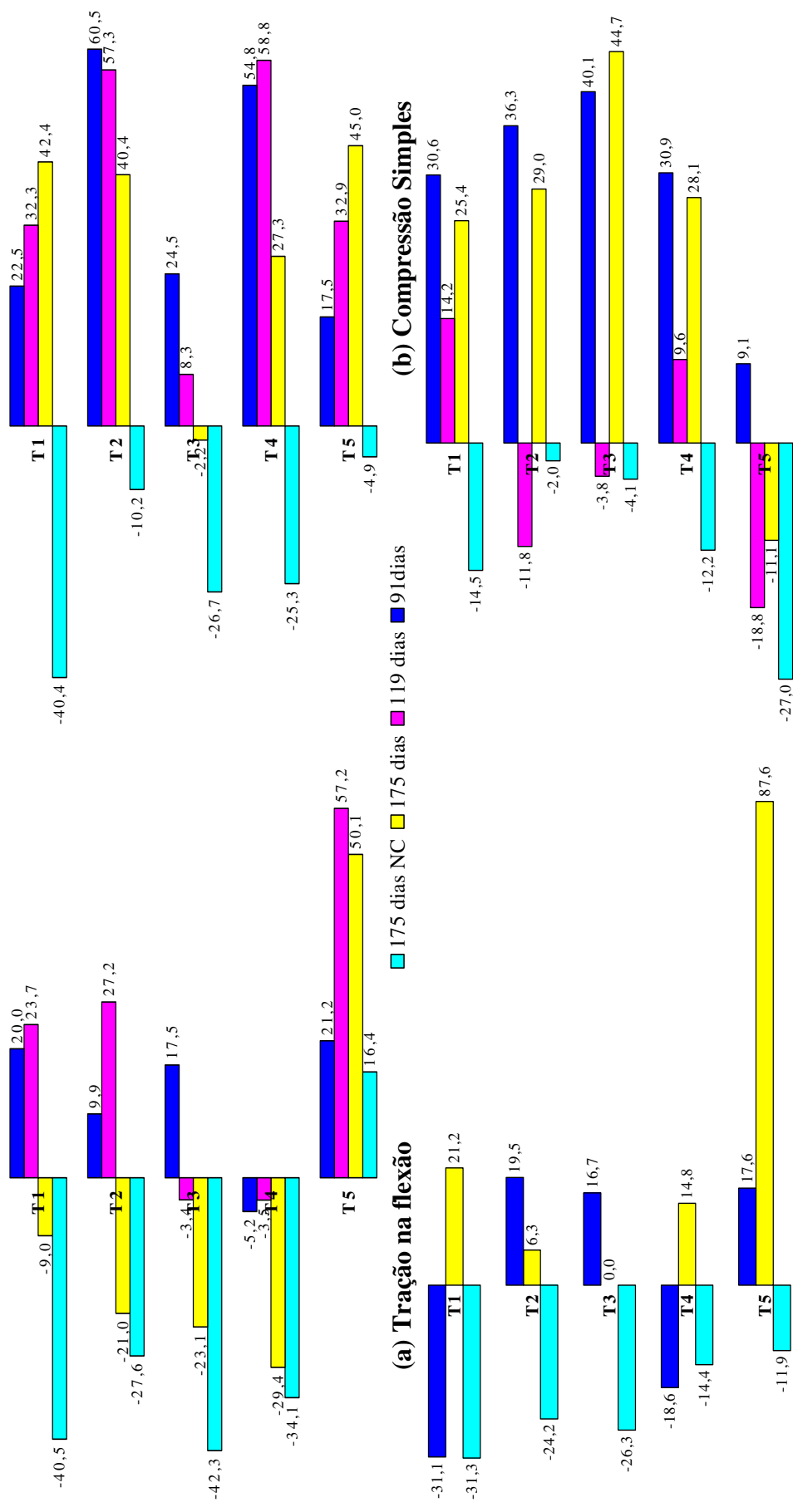


(c) 175 dias



(d) 175 dias não cicladas

Figura 4.3 – Curvas TG e DTG das argamassas do Grupo G6



(c) Módulo de elasticidade estático

(d) Módulo de elasticidade dinâmico

Figura 4.4 – Variação percentual da resistência mecânica com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

5. CONCLUSÕES

5.1 Quanto à contaminação por sulfatos nos agregados reciclados

A baixa contaminação dos agregados reciclados por revestimentos de gesso neste estudo foi suficiente para dobrar a disponibilidade de sulfatos solúveis e produzir alterações no desempenho das argamassas, conforme salientado nos itens seguintes.

Convém destacar que os teores do presente estudo estão muito abaixo dos limites estabelecidos pela recém aprovada NBR 15116 (2004), sendo esta a única norma sobre agregados reciclados para uso na construção civil vigente no país.

Este trabalho confirma a preocupação em se controlar a contaminação por sulfatos em agregados reciclados para a produção de argamassas, considerando-se mais apropriados os limites preconizados pelo IGS (Tabela 2.2) e pelas normas francesa, alemã e italiana citadas na Tabela 2.1.

5.2 Quanto aos efeitos principais dos ciclos de umedecimento e secagem

A ciclagem teve um efeito muito expressivo nas argamassas, principalmente durante a aplicação dos primeiros ciclos, desencadeando um processo de carbonatação que alterou visivelmente as suas propriedades mecânicas, promovendo um aumento sensível de resistência de 63 para 91 dias de idade. Os ensaios de termogravimetria comprovaram a ocorrência da carbonatação das argamassas.

A permanência das argamassas em câmara seca, dos 7 aos 175 dias de idade, promoveu uma redução dos valores de resistência mecânica das argamassas bem mais prejudicial do que os ciclos de umedecimento e secagem aplicados.

5.2.1 Quanto às alterações na microestrutura das argamassas

As argamassas produzidas com os agregados reciclados contaminados pelo revestimento de gesso (A2, A3 e A4) sofreram variação em seus teores de sulfatos solúveis com a aplicação da ciclagem (de 63 para 175 dias). Para a argamassa com o agregado reciclado não contaminado (A1), a aplicação dos ciclos praticamente não influenciou os teores de sulfatos solúveis (Figura 4.1).

Assim, ficou comprovado que a presença de gesso de construção nos resíduos de construção e demolição usados para a produção de agregados reciclados pode causar modificações na microestrutura das argamassas com eles produzidas. Inclusive, o fenômeno ocorreu também para as argamassas mantidas em câmara seca, sendo necessário elucidar melhor os mecanismos, pois há o efeito simultâneo de retração por secagem.

Analisando os resultados, percebe-se que é imprescindível incluir os ensaios de análise química quantitativa em estudos de deterioração de produtos cimentícios com agregados reciclados, pois apenas a análise de propriedades físicas e mecânicas não permite avaliar critérios que possam ser importantes em estudos desta natureza.

5.2.2 Quanto aos ensaios de resistência mecânica

A resistência à tração na flexão foi a propriedade mais afetada, com redução generalizada de valor aos 175 dias (Figura 4.4).

Como melhor comportamento quanto a esta propriedade apenas se destacou apenas a argamassa T5, com o agregado AN. Entre as argamassas com agregado reciclado, a condição de permanência em câmara seca mostrou-se ainda mais agressiva do que a

condição de aplicação de ciclos de umedecimento e secagem, possivelmente pelos efeitos de retração do agregado miúdo reciclado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGULO, S. C. **Caracterização e controle de qualidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2004. 140p. Exame de Qualificação (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- ARCHITECTURAL SERVICES DEPARTMENT. Hong Kong. **Particular specification for designed mix concrete with 20% recycled coarse aggregates**. Disponível em: <<http://www.archsd.gov.hk/english/reports/e378.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2004.
- ARENDT, C., SEELE, J. **Umidade e Sais em Edificações**. Verlagsanstalt Alexander Koch. Stuttgart. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – NBR NM 50**. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – especificação – NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos – NBR 15116**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – classificação – NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. **Granulats pour bétons hydrauliques - NF P 18 541**. France, 1994.
- COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p.401-407, Mai-Jul 2003.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n.o 307 de 05 de julho de 2002 – CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 18 out. 2003.
- DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. **Aggregates for concrete and mortar - DIN 4226 - Part 100: Recycled aggregates**. Berlin, 2002.
- ENTE NAZIONALI ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Aggregates for use in concretes - definition, classification and properties – UNI 8520-1**. Milano, 1999.
- FU, Y et al. A kinetic study of delayed ettringite formation in hydrated portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v 25, p.63-70, Jan 1995.
- FU, Y.; DING, J.; BEAUDOIN, J. J. Expansion of portland cement mortar due to internal sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v 27, p. 1299-1306, Sep 1997.
- GALLIAS, J. L. Action of gypsum on recycled aggregate concrete. In: CIB WORLD BUILDING CONGRESS, [s.l.], 1998. **Proceedings: Materials And Technologies For Sustainable Construction**. Symposium A. [s.l.] CIB/RILEM, 1998. v.1, p.175-82.
- HIME, W. G.; MATHER, B. "Sulfate attack," or is it? **Cement and Concrete Research**, v.29, p.789-791, Mai 1999.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **ES – 5 – Especificação técnica**. 1981.
- KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; AGGELI, M. B. Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.1073-77, 2000.
- KUZEL, H. –J. Initial reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v.18, p.195-203, 1996.
- KUZEL, H. –J.; PÖLMANN, H. Hydration of C₃A in the presence of Ca(OH)₂, CaSO₄.2H₂O and CaCO₃. **Cement and Concrete Research**, v.21, p.885-95, 1991.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI, São Paulo, 1994. 573p.
- MIRANDA, L. F. R. Desenvolvimento de metodologia para controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem – Projeto de Pesquisa de Doutorado. Processo FAPESP n.º 01/00610-6. 2001. 23 p. São Paulo.
- MIRANDA, L. F. R. Desenvolvimento de metodologia para controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem – Relatório 01. Processo FAPESP n.º 01/00610-6. 2002. 94 p. São Paulo.
- NEDERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT. **Aggregates for concrete – determination of sulfide content – NEN 5936**. Delft, 1990.
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Ensaio acelerado para simular a formação de eflorescência em argamassas endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., São Paulo, 2003. **Anais**. São Paulo, ANTAC, 2003.
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., São Paulo, 2003. **Anais**. São Paulo, ANTAC, 2003.
- RILEM Recommendation. 121 – DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v 27, p.557-559, 1994.
- SEELE, J.; GREVEN, H.; SELMO, S. M. S. **Umidade ascendente em paredes – panorama sobre o diagnóstico e as soluções de reparo**. 2004. 15 p. São Paulo, 2004. No prelo.
- SELMO, S. M. S. Produção de argamassas em usinas de reciclagem de RCD – Projeto de Auxílio à Pesquisa. Processo FAPESP n.º 01/11966-9. 24 p. São Paulo. 2001.
- SELMO, S. M. S. et al. Microestrutura de pastas de gesso de construção – e feito da relação água / gesso e de alguns aditivos, por microscopia eletrônica de varredura. In: Gypsum Fair'97. **Anais**. Olinda, 1997.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2.ed. New York: Thomas Telford, 1997.
- TAYLOR, H. F. W. Ettringite in cement paste and concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE, [s.l.], 1996. **Proceedings**: Concrete: from material to structure. [s.l.] RILEM, 1996. p.55-76.
- TAYLOR, H. F. W.; FAMY C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v 31, p.683-93, Mai 2001.