

# Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil

Maria Elane Dias de Oliveira<sup>1</sup>,

*Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Av. Transnordestina, s/n, LABOTEC II, CEP 44.036-900 Feira de Santana/BA, Brasil*

Antonio Eduardo Bezerra Cabral<sup>2, †</sup>

*Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Estrutural e Construção Civil, Campus Universitário do Pici, Bloco 710, CEP 60455-760, Fortaleza/CE, Brasil*

## RESUMO

O objetivo deste artigo é avaliar o desempenho de argamassas de revestimento produzidas substituindo-se parcialmente o agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de resíduos de construção e demolição (RCD). Para tanto, fez-se a caracterização dos agregados natural e reciclado, por meio de ensaios normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Posteriormente, desenvolveu-se 6 traços de argamassa, substituindo-se o agregado natural pelos agregados reciclados nos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Para cada traço produzido foi determinado o índice de consistência por meio do ensaio *flow table*, onde o espalhamento foi fixado em  $260\text{mm}\pm 10\text{mm}$ . A resistência à compressão foi determinada aos 14 e 28 dias e a resistência de aderência foi realizada aos 37 dias. Os resultados apontam que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados requer mais água para manter a mesma trabalhabilidade, entretanto melhora a resistência à compressão e a resistência de aderência ao substrato. A modelagem dos resultados aponta que o teor ótimo de substituição dos agregados naturais pelos reciclados encontra-se entre 30% e 40%.

## 1. INTRODUÇÃO

A maior extração de recursos naturais para uso industrial ocorre na construção civil, conseqüentemente esse setor também gera considerável quantidade de resíduos, os quais são denominados costumeiramente de entulhos e tecnicamente de resíduos de construção e demolição (RCD). O entulho é gerado no próprio processo construtivo, em função de erros ou

---

<sup>1</sup> Tecnóloga em Saneamento Ambiental, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA/UEFS)

<sup>2</sup> Professor Adjunto II do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil (DEECC/UFC)

<sup>†</sup> Autor para correspondência (eduardo.cabral@ufc.br)

indefinições na elaboração dos projetos, ou devido a falhas na execução, acarretando substituição de componentes. Ocorrem ainda perdas na estocagem e no transporte dos materiais ou devido à má qualidade dos materiais empregados. Por fim, existe o entulho produzido em demolições, reformas e reconstruções, na substituição de materiais em que sua vida útil já se exauriu (Lima, 2005).

No Brasil, os padrões construtivos usualmente empregados propiciam o desperdício na execução de edificações, pois os processos são de conversão e não de montagem. Nos países desenvolvidos, a média de resíduos produzidos em novas obras permanece abaixo de 100 kg/m<sup>2</sup>, enquanto no Brasil, este índice pode alcançar até 300 kg/m<sup>2</sup> (Novaes; Mourão, 2008). Entretanto, a elevada geração de entulho e a falta de gerenciamento sobre os mesmos ainda é um problema em países do sul da Europa, embora haja países membros do bloco, como Dinamarca, Holanda e Bélgica, que reciclam mais 80% do RCD (Corinaldesi; Moriconi, 2009).

Dados levantados em diversas localidades brasileiras, onde é expressiva a geração dos resíduos da construção civil, mostram que eles têm uma participação importante no conjunto dos resíduos produzidos nas cidades, podendo alcançar a cifra expressiva de até duas toneladas de entulho para cada tonelada de lixo domiciliar (Pinto; Gonzáles, 2005). Segundo Cabral (2007), no Brasil é gerado, em média, 0,52 tonelada de RCD por habitante por ano, sendo que estes representam de 34% a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos produzidos nas cidades.

Existe uma fração do RCD, denominado Classe A, que no Brasil é obrigatório a sua reciclagem, conforme as exigências da resolução n° 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), devendo-os transformá-los em agregados reciclados, de forma que estes sejam reutilizados como insumos na própria construção civil. Conforme estudos de vários autores (Zordan, 1997; Brito Filho, 1999; Quadros; Oliveira, 2001; Nóbrega, 2002; Vieira, 2003; Lovato, 2007; Oliveira et al., 2009), em média 70% do RCD gerado nas cidades brasileiras enquadra-se nesta classificação, devendo portanto serem reciclados. Em Fortaleza, 74% do RCD descartado via container é Classe A (Novaes; Mourão, 2008), enquanto que na Europa, Henrichsen (2000) afirma que mais de 90% dos RCD podem ser reciclados, embora 75% destes ainda sejam dispostos em aterros (Corinaldesi; Moriconi, 2009).

Há vários trabalhos que demonstram a viabilidade do uso dos agregados reciclados, tanto no uso da fração graúda (Oikonomou, 2005; Etxeberria et al., 2007), quanto no uso da fração miúda (Evangelista e Brito, 2007; 2010), entretanto na produção de concreto. Embora o uso da fração miúda para produzir argamassa já tenha sido estudada por alguns autores (Corinaldesi, 2005; Miranda, 2000; Lima, 2005; Moriconi et al., 2003), não há muitos estudos do uso da mesma na produção de argamassas de revestimento.

No Brasil há tradição de se executar os revestimentos das edificações em argamassa, estimando-se o consumo deste material da ordem de 0,13 m<sup>3</sup> de argamassa por cada metro quadrado de construção (Souza; Franco, 1997, citado por Miranda, 2000). Em valores médios, em 2008, Fortaleza teve 100 canteiros de obras verticais, aonde foram construídos 4.000m<sup>2</sup> em cada canteiro (Novaes; Mourão, 2008). Considerando que para uma argamassa de revestimento de traço em massa 1:1:8 (cimento:cal:areia), traço este que se assemelha ao costumeiramente utilizado nas obras cearenses, o volume de agregado miúdo úmido para cada metro cúbico de argamassa é de 1,3 m<sup>3</sup> (Miranda, 2000), tem-se que nesse período foram consumidos 67.600 m<sup>3</sup> de agregados miúdos, somente na produção de argamassas. Diante disso, a substituição dos agregados naturais pelos reciclados na produção de argamassas parece ser proeminente para a cidade de Fortaleza.

Os agregados reciclados geralmente apresentam características físicas diferentes das dos agregados naturais, o que influi diretamente no desempenho das argamassas. Entretanto,

substituições parciais dos agregados naturais pelos reciclados têm apresentado desempenho satisfatório (Leite et al., 2000; Miranda, 2000; Corinaldesi; Moriconi, 2009).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de revestimentos argamassados produzidos com a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado proveniente da reciclagem do RCD de Fortaleza.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Materiais utilizados na produção das argamassas

Os materiais utilizados para a produção das argamassas e na construção da miniparede foram areia de rio quartzosa, passante na peneira 4,8mm, cimento Portland CP II Z 32 RS e tijolo cerâmico de 8 furos, todos obtidos em depósitos de material de construção de Fortaleza. A água utilizada foi proveniente da rede pública de distribuição e o agregado reciclado foi proveniente da reciclagem da parte mineral do RCD coletado por Oliveira et al. (2009), cuja a composição encontra-se na Figura 1.

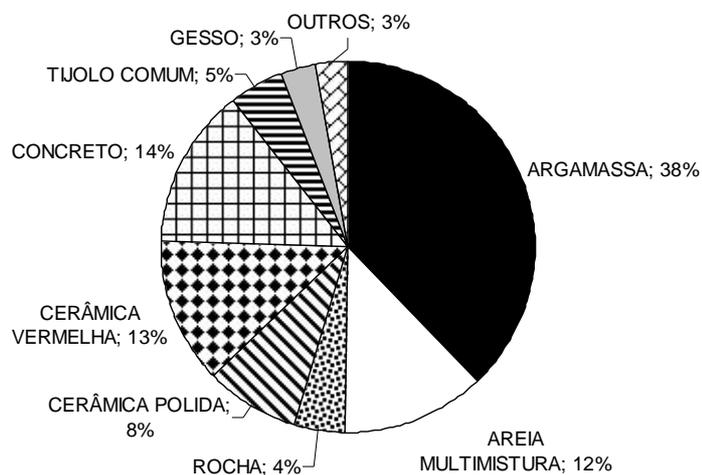


Figura 1 – Composição do RCD utilizado para a produção do agregado miúdo reciclado usado no experimento<sup>2</sup>

Para a realização da reciclagem do RCD coletado, foi eliminado do resíduo o gesso e a parcela “outros”, sendo o restante encaminhado à sede do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), em Fortaleza, sendo triturado por um britador de mandíbulas modelo 6240. Posteriormente, o material reciclado foi peneirado em peneira de abertura 4,8mm, sendo o material passante aqui denominado de agregado miúdo reciclado ou areia reciclada, o qual foi utilizado no experimento.

Não foram realizados ensaios para determinação da reação álcali-agregado do material resultante da britagem uma vez que não há histórico deste tipo de reação em concretos produzidos na cidade de Fortaleza, além de que utilizou-se a fração miúda do agregado reciclado, onde há menor susceptibilidade de ocorrer tal reação.

<sup>2</sup> Denominou-se de “Outros” restos de vidro, aço, betume, folhagem, madeira, papel, plástico, tinta, alumínio, amianto, isopor e material orgânico.

## 2.2 Método de pesquisa

Os agregados reciclados e naturais foram encaminhados à Universidade Federal do Ceará (UFC), para o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), onde foi feito o processo de quarteamento, segundo as prescrições da NBR NM 26 (ABNT, 2001). Foram então separadas amostras para serem feitos os ensaios de caracterização dos agregados, os quais estão apresentados na Tabela 1. As características dos demais materiais utilizados foram fornecidas pelos fabricantes dos mesmos.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização realizados nos agregados e suas respectivas normas

Ensaio	Norma de ensaio:ano
Granulometria	NBR NM 248:03
Massa Unitária	NBR NM 45:06
Massa Específica	NBR 9775:87
Absorção	NBR NM 30:01
	Ensaio proposto por Dias et al. (2005)
Teor de Finos <75 µm	NBR NM 46:03

Para se determinar a influência dos agregados reciclados nas propriedades das argamassas, foi utilizado um procedimento experimental, utilizando-se seis traços, nos quais se substitui gradualmente os agregados naturais pelos reciclados, conforme teores apresentados na Tabela 2. Os percentuais de substituição são em massa.

Tabela 2 – Percentagem dos agregados natural e reciclado em cada traço

Traço Nº	Agregado natural (%)	Agregado reciclado (%)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50

O traço utilizado para cada ensaio foi de 1:3, em massa, onde o índice de consistência da argamassa (*flow table*), obtido por meio das recomendações da norma NBR 13276 (ABNT, 2005), foi fixado em 260mm ± 10mm e a relação água/cimento de cada argamassa foi ajustada até obter este espalhamento.

Foi construída uma alvenaria de 2m x 1m (largura x altura) com blocos cerâmico de 8 furos, sendo em seguida chapiscada. Este procedimento foi adotado para que a argamassa de revestimento tivesse uma melhor aderência com o bloco cerâmico e para que este não absorvesse a água de amassamento da argamassa. Dois dias após a aplicação do chapisco foram delimitadas seis áreas de 50cmx50cm para a aplicação de cada traço de argamassa, conforme Figura 2.

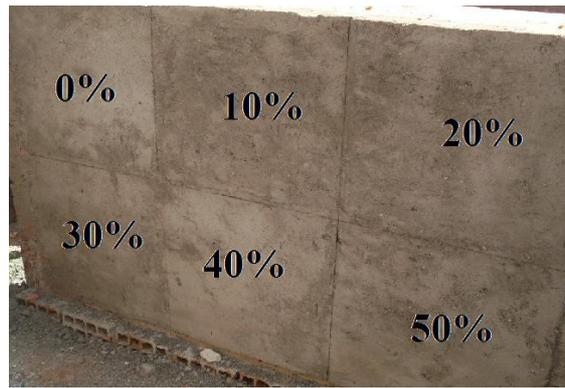


Figura 2 – Mini-parede com a aplicação dos seis traços de argamassa

Na idade de 37 dias foi então realizado o ensaio de resistência de aderência, conforme prescrições da NBR 13528 (ABNT, 2005). Em cada traço foram aplicadas três placas não deformáveis, de seção circular, com 50mm de diâmetro, com um dispositivo no centro para o acoplamento do equipamento de tração, conforme Figura 3.



Figura 3 – Procedimento do ensaio de resistência de aderência

Embora a resistência à compressão não seja a grandeza de maior importância na avaliação do desempenho da argamassa, esta propriedade foi medida para avaliar a influência dos materiais na resistência das mesmas. Para tanto, da quantidade total de argamassa produzida para a confecção do revestimento na mini-parede, retirou-se uma amostra da mesma e moldou-se quatro corpos-de-prova cilíndricos 50mm x 100mm (diâmetro x altura) para cada traço, conforme procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 1996). A desmoldagem dos corpos-de-prova foi realizada com 24 horas após a moldagem, sendo que os corpos-de-prova ficaram submersos em água saturada com cal. Os corpos-de-prova permaneceram na câmara úmida até o dia de serem ensaiados, os quais foram aos 14 e 28 dias de idade.

### 3. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Agregados

A distribuição granulométrica dos grãos dos agregados natural e reciclado encontra-se na Figura 4, enquanto que as demais características encontram-se na Tabela 3.

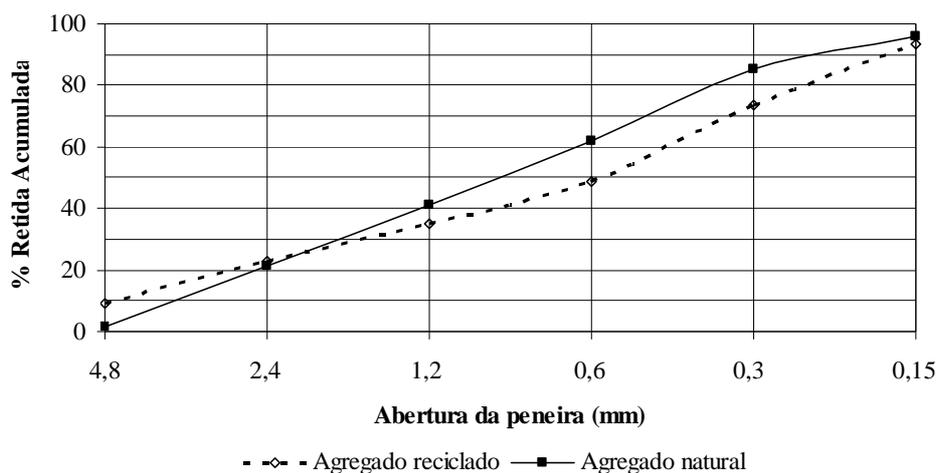


Figura 4 – Distribuição granulométrica dos grãos dos agregados reciclado e natural

Tabela 3 – Módulo de finura (MF), dimensão máxima característica (DMC), massa específica, massa unitária, teor de finos <75µm e absorção de água dos agregados natural e reciclado

Tipo de agregado	MF	DMC (mm)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Teor de finos <75µm	Absorção (%)	
						Método da NM 30	Método de Dias et al. (2005)
Natural	3,07	4,8	2,62	1,38	5,58	0,77	0,24
Reciclado	2,82	6,3	2,49	1,34	11,42	7,55	5,30

Conforme os dados da Figura 4 pode-se observar que os agregados natural e reciclado possuem uma distribuição granulométrica dos grãos semelhante, embora o agregado reciclado possua ligeiramente uma maior quantidade de grãos de diâmetro entre 4,8mm e 2,4mm, enquanto que o agregado natural possui uma maior quantidade de grãos mais finos, entre 1,2 e 0,15mm. Conforme dados da Tabela 3, os valores determinados para a dimensão máxima característica (DMC) ratificam essa informação, uma vez que o DMC do agregado reciclado é superior ao DMC do agregado natural. Entretanto, o agregado natural possui, como um todo, grãos maiores que os do agregado reciclado, uma vez que o seu maior módulo de finura é maior, o que significa dizer que o agregado natural é mais grosso que o agregado reciclado.

Ainda de acordo com os dados da Tabela 3, o agregado reciclado apresentou uma menor massa específica que o agregado natural. Tal fato se deve possivelmente a maior quantidade de poros que os agregados reciclados apresentam. Essa maior porosidade também acarreta em uma menor massa unitária.

Por serem frágeis, os materiais constituintes do RCD, ao serem submetidos ao processo de reciclagem, produzem uma quantidade considerável de material pulverulento, sendo este material medido pelo ensaio de teor de finos <75µm. Conforme resultados apresentados na Tabela 3, o teor de material pulverulento dos agregados reciclados é mais que o dobro do apresentado pelos agregados naturais.

De acordo com Miranda (2000), o limite máximo de finos <75µm que um agregado reciclado pode possuir para evitar a fissuração de revestimentos argamassados é de 25%. Contudo, Silva et. al. (2009) sugere que este valor é entre 10% e 15%. Diante disso, o agregado reciclado produzido possui um teor de finos aceitável para a sua utilização em argamassas.

Por ter mais vazios e uma quantidade maior de material pulverulento, os agregados reciclados geralmente apresentam elevadas absorções de água (Corinaldesi; Moriconi, 2009;

Miranda, 2000; Leite et al., 2000). Os valores das absorções encontrados nos dois métodos utilizados demonstram coerência com a bibliografia pesquisada, uma vez que a absorção média dos agregados reciclados supera em mais de doze vezes a absorção média dos agregados naturais.

### 3.1.2 Demais materiais

O cimento utilizado foi o CP II Z 32 RS, cujas composições física e química apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente, foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4 – Composição química do cimento utilizado (fornecido pelo fabricante)

Composto	Teores (%)
Óxido de magnésio (MgO)	3,2
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,0
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6,59
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	21,93
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,29
Óxido de cálcio (CaO)	54,26
Equivalente alcalino	0,85
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	3,0
Resíduo insolúvel	13,4
Perda ao fogo	5,2

Tabela 5 – Composição física do cimento utilizado (fornecido pelo fabricante)

Ensaio	Resultado	
Área específica (Blaine)	3.610 cm <sup>2</sup> /g	
Tempo de pega	Início	195 min
	Fim	255 min
Resistência à compressão	3 dias	25,3 MPa
	7 dias	32,3 MPa
	28 dias	42,7 MPa

Os blocos cerâmicos utilizados possuíam dimensões médias de 19,7cm x 19,5cm x 9,7cm (largura x altura x espessura) após medidas em 10 amostras, com 8 furos quadrados na direção horizontal e tinham ranhuras nas faces laterais, de forma a auxiliar na ancoragem física do revestimento argamassado.

### 3.2 Produção das argamassas

Para a determinação da quantidade de água necessária para se atingir o índice de consistência desejado das argamassas (260mm±10mm), seguiu-se as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2005), deixando-as 15 minutos em repouso antes da realização do ensaio na mesa de abatimento. As relações água/cimento necessárias para se atingir o índice de consistência desejado para cada traço estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Relação água/cimento encontrada em cada traço para se atingir o índice de consistência desejado (260mm±10mm)

Traço N°	Relação a/c
1	0,73
2	0,74
3	0,74
4	0,75
5	0,76
6	0,76

Conforme se pode observar nos dados da Tabela 6, a gradual incorporação do agregado reciclado exigiu uma maior quantidade de água para que se atingira a consistência desejada. Isto muito possivelmente se deve à presença das partículas finas (<75µm), aumentando assim a superfície específica a ser molhada, e também à maior porosidade deste tipo de agregado, como se pode constatar nos ensaios de caracterização. Este comportamento também foi observado em outras pesquisas com argamassa e agregados reciclados (Miranda, 2000; Lima, 2005; Moriconi et al., 2003; Corinaldesi; Moriconi, 2009).

### 3.3 Resultados nas argamassas endurecidas

#### 3.3.1 Resistência à compressão

A Figura 5 apresenta os valores médios da resistência à compressão das argamassas, aos 14 e 28 dias, dos traços produzidos.

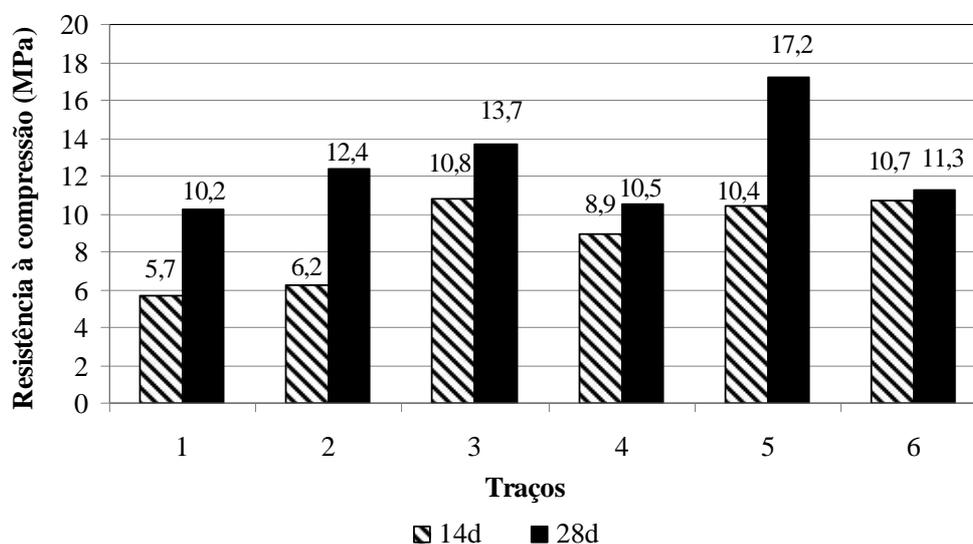


Figura 5 – Resistência à compressão média das argamassas aos 14 e 28 dias

Conforme a Figura 5 pode-se observar que a substituição do agregado natural pelo reciclado propiciou um incremento na resistência à compressão das argamassas, para ambas as idades estudadas. Entretanto, esse incremento de resistência não é linear ao acréscimo de agregado reciclado nas argamassas, em nenhuma das idades estudadas.

A introdução de 10% do agregado reciclado na mistura propiciou um incremento na resistência à compressão da argamassa, aos 14 dias de idade, de 8,8%. Entretanto, a partir do teor de 20% de agregado reciclado, as argamassas aumentaram sua resistência à compressão

consideravelmente, aos 14 dias de idade, atingindo acréscimos de 90%, 56%, 83% e 88% com relação à resistência da argamassa de referência, para os teores de substituição de 20%, 30%, 40% e 50%, respectivamente.

Comportamento semelhante se observou para as resistências à compressão aos 28 dias de idade, entretanto os acréscimos nas resistências foram mais modestos. Os acréscimos obtidos foram de 22%, 34%, 3%, 69% e 11% para os traços 2, 3, 4, 5 e 6. Nota-se que a resistência à compressão aos 28 dias de idade das argamassas aumentou à medida que se incorporou os agregados reciclados à mistura, à exceção dos teores de 30% e 50%.

O decréscimo na resistência à compressão obtido para a argamassa do traço 4 (com teor de 30% de agregados reciclados) é incoerente, quando comparado com os resultados obtidos para as argamassas dos traços 3 e 5, que apresentam valores superiores. Entretanto, a incorporação de 50% de agregados reciclados na mistura da argamassa (traço 6) reduziu novamente a resistência à compressão.

Uma explicação para o acréscimo da resistência à compressão à medida que se aumenta o teor de incorporação do agregado reciclado na mistura seria devido à maior presença de água nas argamassas propiciado por estes, conforme pode ser observado na Tabela 6, devido à elevada absorção de água dos agregados reciclados. Esta água adicional propicia uma maior hidratação dos grãos de cimento (Lima, 2005). Entretanto, a partir de uma determinada quantidade de material reciclado incorporado na mistura, a quantidade de água necessária para se manter a consistência desejada da argamassa é tão grande, que esta reduz a sua resistência à compressão, em função da elevada porosidade produzida.

O comportamento dos resultados obtidos nos ensaios realizados para a resistência à compressão das argamassas coadunam com o de alguns pesquisadores (Leite et al., 2000; Miranda, 2000), entretanto são contraditórios com o de outros pesquisadores (Lima, 2005; Moriconi et al., 2003; Corinaldesi; Moriconi, 2009), uma vez que para estes últimos, a resistência à compressão das argamassas com agregados reciclados, em qualquer teor, sempre foi inferior à resistência à compressão da argamassa de referência. Possivelmente estes resultados são contraditórios porque os métodos de pesquisa utilizados foram diferentes, com composições dos agregados reciclados diferentes, sugerindo a necessidade de uniformizar as pesquisas na área e de se utilizar os resultados obtidos com cautela.

Uma vez que em ambas as idades o valor da resistência à compressão aparenta decrescer a partir de um certo teor de agregado reciclado, realizou-se uma regressão não linear dos resultados obtidos, buscando-se determinar equações que melhor se ajustassem a esse resultado. Então, para as resistências à compressão obtidas aos 14 dias de idade, obteve-se um polinômio de 2º grau, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 77%, apresentado na Equação 1 e na Figura 6.

$$f_{c_{14d}} = -23,9.AMR^2 + 22,2.AMR + 5,4 \quad (1)$$

Já para as resistências obtidas aos 28 dias de idade, caso se considere o resultado do traço 4, ou seja, o com 30% de agregado reciclado, o polinômio (Equação 2) encontrado apresenta um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito baixo, explicando somente 24% dos efeitos dos agregados reciclados na resistência à compressão das argamassas aos 28 dias. Contudo, se o resultado encontrado para o traço 4 for considerado um valor espúrio e este for excluído da análise, o coeficiente de determinação do modelo encontrado (Equação 3) sobe para 66%, conforme pode ser observado na Figura 7. As condições de contorno das Equações 1, 2 e 3 são para um teor de agregados miúdo reciclado (AMR) entre 0% e 50%.

$$f_{c_{28d}} = -33,8.AMR^2 + 21,6.AMR + 10,2 \quad (2)$$

$$f_{c_{28d}} = -70.AMR^2 + 41,2.AMR + 9,5 \quad (3)$$

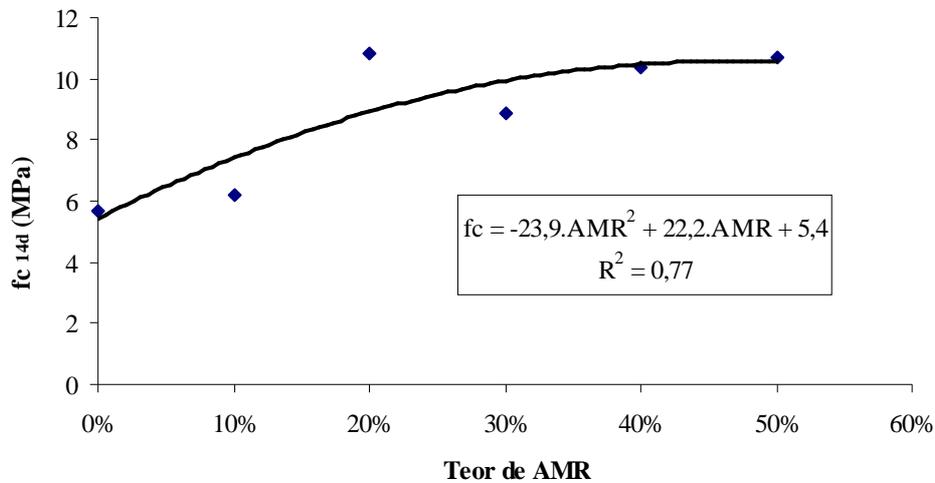


Figura 6 – Interpolação dos resultados de resistência à compressão para 14 dias de idade

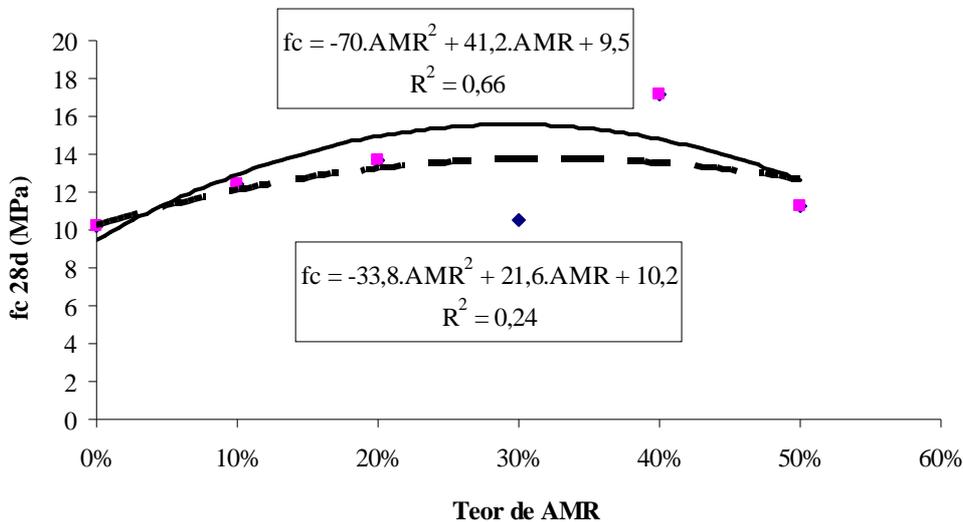


Figura 7 – Interpolação dos resultados de resistência à compressão para 28 dias de idade

De posse dos modelos encontrados para as resistências à compressão das argamassas aos 14 e 28 dias de idade, determinou-se o teor ideal de agregado reciclado na mistura, ou seja, o teor que propiciaria as máximas resistências à compressão da argamassa com agregado reciclado. Os teores encontrados foram de 46% e 29,4% de agregado reciclado, para as resistências máximas à compressão aos 14 e 28 dias de idade, respectivamente.

### 3.3.2 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração das argamassas foi realizado aos 37 dias de idade. Na Figura 8 apresentam-se o maior, o menor e o valor médio da resistência obtida para cada traço produzido.

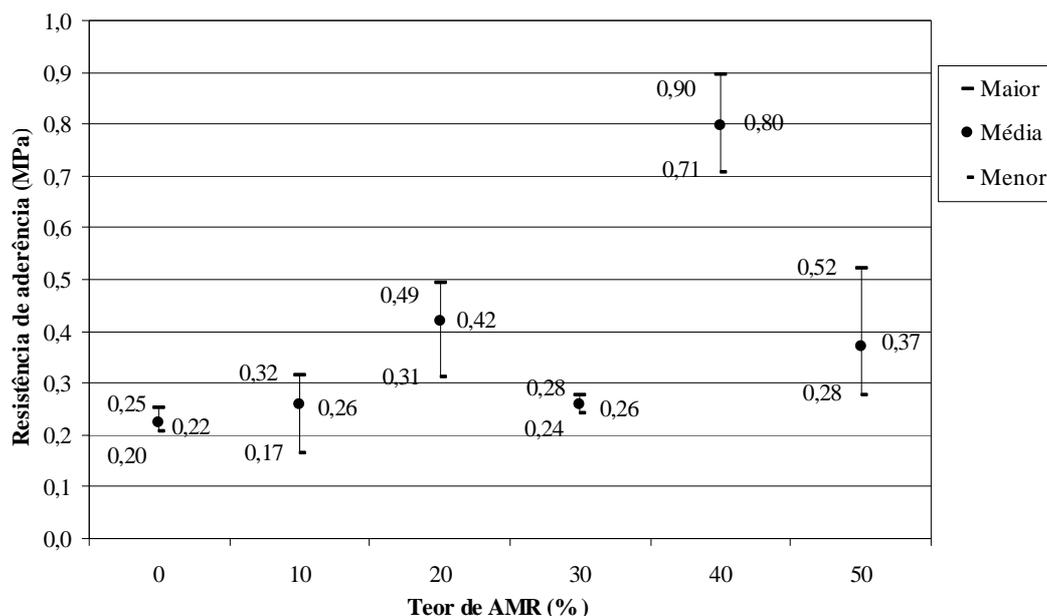


Figura 8 – Resultado da resistência de aderência à tração função dos teores de agregado miúdo reciclado

Conforme pode-se observar na Figura 8, todas as argamassas produzidas atingiram o valor mínimo exigido pela NBR 13749 (ABNT, 1996), para a resistência média de aderência à tração para revestimentos argamassados de parede interna destinados à pintura, que é de 0,20MPa.

Observa-se que à medida que se aumentou o teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, a resistência de aderência média das argamassas aumentou, à exceção dos teores de 30% e 50%, correspondentes aos traços 4 e 6. Este comportamento é bastante semelhante ao apresentado pela resistência à compressão das argamassas na idade de 28 dias.

O incremento na resistência de aderência possivelmente ocorre devido à maior absorção de água dos agregados reciclados, fazendo com que as argamassas produzidas com estes retenham mais água, propiciando uma melhor hidratação dos grãos de cimento e a formação de uma quantidade superior de cristais hidratados que penetram no substrato, fortalecendo assim a aderência (Lima, 2005; Corinaldesi; Moriconi, 2009; Moriconi et al., 2009).

Portanto, a incorporação do agregado reciclado proporcionou um acréscimo na resistência de aderência e que, de maneira similar à resistência à compressão das argamassas, esse incremento na resistência de aderência não ocorreu de forma linear com a incorporação do agregado reciclado, sugerindo portanto que há um teor ótimo de agregados reciclados na mistura.

De maneira similar à realizada para a resistência à compressão das argamassas, realizou-se uma regressão não linear dos resultados obtidos para a resistência de aderência, buscando-se determinar equações que melhor se ajustassem a esses resultados. O polinômio encontrado que melhor descreveu o comportamento das argamassas foi um polinômio de grau 5, descrito na Equação 4, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 89%, conforme pode ser observado na Figura 9.

$$f_c = -3.10^{-7}.AMR^5 + 4.10^{-5}.AMR^4 - 0,001.AMR^3 + 0,027.AMR^2 - 0,14.AMR + 0,22 \quad (4)$$

Entretanto, considerou-se os resultados obtidos para o teor de 30% como resultados espúrios. Assim, excluindo-se os resultados do traço 4, fez-se uma nova modelagem e o modelo que melhor aderiu aos dados foi um polinômio de 3º grau, apresentado na Equação 5, cujo coeficiente de determinação foi considerado satisfatório (86%).

$$f_c = -4.10^{-5}.AMR^3 + 0,0025.AMR^2 - 0,02.AMR + 0,24 \quad (5)$$

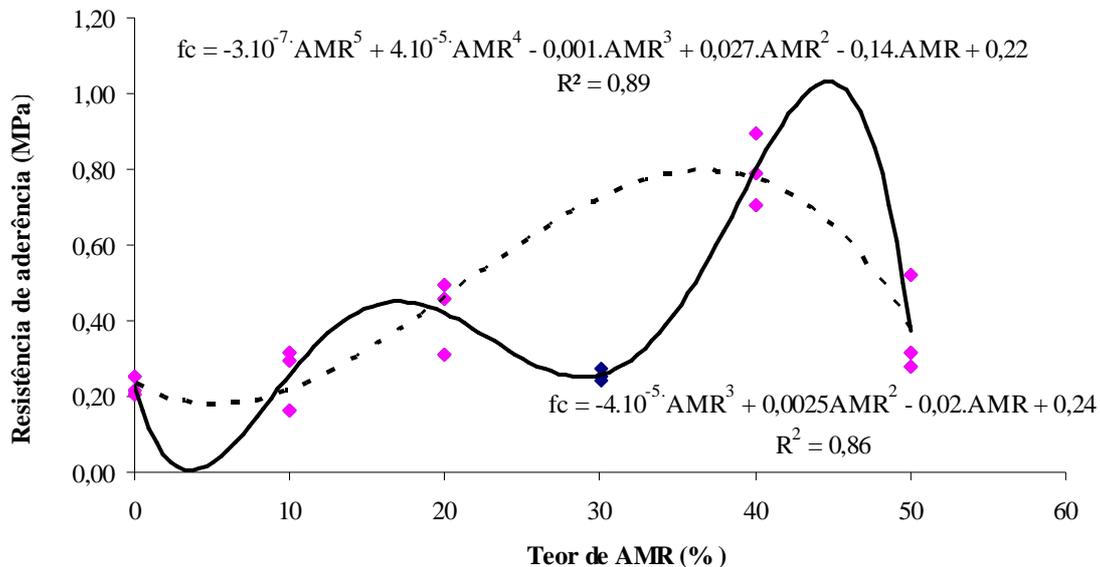


Figura 9 – Interpolação dos resultados de resistência de aderência à tração com determinação de modelos matemáticos

Para se determinar o ponto máximo deste último polinômio, que corresponde ao teor ótimo de agregados reciclados na argamassa, de maneiras que esta apresente a maior resistência de aderência, se faz necessário derivá-lo e igualá-lo a zero. A solução da equação de 2º grau apresentará dois valores, um referente à resistência mínima e outro, à máxima. O teor de agregados reciclados encontrado para a resistência máxima foi de 37,2%, valor este que se aproxima bastante ao valor do teor ideal de agregado reciclado encontrado para a resistência à compressão aos 28 dias.

#### 4. CONCLUSÃO

Segundo os resultados dos ensaios de caracterização, os agregados reciclados apresentaram maiores absorção de água e teor de finos < 75µm e menores massa específica e massa unitária que as dos agregados naturais. A distribuição granulométrica, o módulo de finura e a dimensão máxima característica de ambos foram semelhantes.

Quanto ao comportamento das argamassas no estado fresco, a substituição crescente do agregado natural pelo agregado reciclado fez crescer a demanda de água para se chegar à consistência desejada. Entretanto, para todas as argamassas com agregado reciclado obteve-se resistências à compressão, aos 14 e 28 dias, superiores às da argamassa de referência. Esse comportamento também foi constatado para a resistência de aderência. Esses acréscimos das resistências possivelmente aconteceram em função da maior absorção de água dos agregados reciclados, fazendo com que as argamassas produzidas com estes retenham mais água,

propiciando uma melhor hidratação dos grãos de cimento e a formação de uma quantidade superior de cristais hidratados.

Os resultados obtidos para as propriedades estudadas foram modelados estabelecendo-se modelos não-lineares, com coeficientes de determinação satisfatórios. Foram determinados os teores ótimos de agregado reciclado nas argamassas, ou seja, os teores em que cada propriedade apresenta o valor máximo, sendo que estes se encontram entre 30% e 40%.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas (GPMATE) da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo apoio na realização dos experimentos e ao CNPq pelo suporte financeiro na realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR NM 26: Agregados – Amostragem*, Rio de Janeiro (2001).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*, Rio de Janeiro: ABNT (2005).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração*, Rio de Janeiro (1995).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação*, Rio de Janeiro (1996).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*, Rio de Janeiro (1996).
- Brito Filho, J. A., Cidades versus entulho. In: *Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil*, 1999. São Paulo. Anais... São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, p.56-67 (1999).
- Cabral, A. E. B., Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. São Carlos-SP, 280p. *Tese (Doutorado)*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (2007).
- Corinaldesi, V., Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, (31), p. 505-510 (2009).
- Corinaldesi V.; Moriconi, G., Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, (23), p. 289–294 (2009).
- Dias: J. F; Agopyan: V; Silva, T. J., Proposta de procedimento para a determinação da absorção de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para emprego em concreto. In: *Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)*. Anais. 47º CBC. p.1-10, (2005).
- Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, (37), p. 735–742, (2007).
- Evangelista, L.; Brito, J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, (32), p. 9–14, (2010).
- Evangelista, L.; Brito, J., Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, (29), p. 397–401, (2007).

Henrichsen, A., Use of recycled aggregate. In: *International Workshop on Recycled Aggregate*. Proceedings... Niigata, Japan, p.1-8 (2000).

Leite, M. B.; Pedrozo, P. H.; Oliari, G. F.; Alves, M. F.; Dal Molin, D. C. C., Utilização de agregado reciclado de concreto para produção de argamassa. In: *VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)*. Anais... 8p. (2000).

Lima, F. S. N. S., Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas. 93 f. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal da Paraíba/Centro de Tecnologia, João Pessoa (2005).

Lovato, P. S., Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. 180 f. *Dissertação (Mestrado)*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2007).

Miranda, L. F. R., Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa do entulho reciclado. 170 f. *Dissertação (Mestrado)*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo (2000).

Moriconi, G.; Corinaldesi, V.; Antonucci R., Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick. *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, (36), December, p. 702-708 (2003).

Nobrega, A. R. S., Contribuição ao diagnóstico da geração de entulho da construção civil no município de Campina Grande-PB. Campina Grande. *Dissertação (Mestrado)*. Centro Tecnologia em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande (2002).

Novaes, M. V.; Mourão, C. A. M. A., *Manual de gestão ambiental de resíduos sólidos na construção civil*. Coopercon – Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará. 100p. 1ª Ed. Fortaleza (2008).

Oliveira M. E. D.; Sales R. J. M. S.; Cabral A. E. B., Diagnóstico da geração e caracterização dos resíduos de construção e demolição da cidade de Fortaleza/ CE: Proposta de reciclagem. Fortaleza.CE In: *Encontro Nacional de Resíduos de Construção (ENARC)*. Anais... 10 p. (2009).

Oikonomou, N. D., Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, (27) p. 315–318, (2005).

Pinto, T. P.; Gonzáles, J. L. R., Manejo e gestão de resíduos da construção civil. In: *Manual de Orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios*. Caixa Econômica Federal (CEF) (ed). 194p. Brasília (2005).

Quadros, B. E. C.; Oliveira, A. M. V., Gestão diferenciada do entulho na cidade de Salvador. In: *Carneiro, A. P.; Brum, I. A. S.; Cassa, J. C. S. (ed). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador: EDUFBA; p. 116-141 (2001).

Silva, E. C. R.; Miranda, L. F. R.; Melo, D. V. P.; Amorim Neto, E.; Araújo, M. C.; Gomes, T. O., Propriedades de agregados reciclados produzidos a partir de RCD gerado em canteiros de obras de Recife/PE para uso em argamassas. In: *VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. Curitiba/PR (2009).

Zordan, S. E., Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. 140 f. *Dissertação (Mestrado)*. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1997).