

Desempenho mecânico de concretos produzidos com agregados reciclados quando submetidos ao ataque por sulfatos no processo de cura

Mechanical performance of concretes produced with recycled aggregates when subjected to the attack of sulfates in the curing process

John Kennedy Fonsêca Silva

Graduando do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).

E-mail: kennedy31@hotmail.com.br

Rogério Borges Vieira

Professor orientador (UNIPAM).

E-mail: rogeriobv@unipam.edu.br

Resumo: A construção civil é um dos principais setores da economia brasileira, sendo responsável pelo emprego de grande parte da mão de obra nos centros urbanos. Nos últimos anos, o setor tem crescido bastante, o que, por um lado, tem movimentado a economia das cidades, mas, por outro, tem acelerado o processo de exploração de recursos naturais e de geração de resíduos, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias que visem reduzir o impacto ambiental causado pelo setor. O objetivo deste trabalho é analisar o desenvolvimento inicial da resistência mecânica de corpos de prova cilíndricos de concreto que foram submersos em soluções de sulfato de magnésio e foram produzidos parcialmente com agregados miúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha. Para isso, realizou-se um estudo com todos os componentes utilizados, incluindo os agregados e o aglomerante, calculando-se, em seguida, o traço do concreto de modo a obter a resistência desejada para os corpos de prova. Em sequência, moldaram-se os corpos de prova, que, após a cura, foram rompidos. Observou-se que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram desempenho mecânico equivalente ao dos concretos confeccionados com agregados naturais.

Palavras-chave: Impacto ambiental. Resíduos da construção. Concreto sustentável.

Abstract: The construction industry is one of the main sectors of the Brazilian economy, being responsible for the employment of much of the labor in urban centers. In recent years, the industry has grown a lot, which on one hand has moved the economy of cities, but on the other hand has accelerated the process of exploitation of natural resources and waste generation, requiring the development of technologies to reduce the environmental impact of the sector. The objective of this study is to analyze the initial strength development of cylindrical specimens of concrete that were submerged in magnesium sulfate solutions that were produced partially from recycled fine aggregates waste of red ceramic. For this, a study was conducted on all the components used, including the aggregates and cement. Then, the dosage of the concrete was calculated to obtain the desired strength for the specimens. In sequence, the specimens were molded, and, after curing, they were broken. The concrete produced with recycled aggregates showed equivalent mechanical performance of concrete made with natural aggregates.

Keywords: Environmental Impact. Waste construction. Sustainable concrete.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é, atualmente, um dos principais setores da economia brasileira. Desse modo, é também um dos maiores consumidores de recursos naturais e um dos maiores geradores de resíduos. Isso provoca diversos impactos no meio ambiente, como, por exemplo, o depósito irregular de resíduos, que é um problema que aflige as autoridades e atinge as populações não somente no Brasil, mas também em outros países do mundo (CABRAL *et al.*, 2007).

Os resíduos de construção e demolição (RCDs) constituem uma importante parcela dos resíduos sólidos produzidos nas cidades brasileiras, correspondendo em torno de 50% dos resíduos sólidos urbanos. Dentre os diversos constituintes dos RCDs, a cerâmica vermelha, proveniente de restos de tijolos e telhas cerâmicas utilizadas nas construções, equivale a uma considerável parcela desses resíduos (CABRAL *et al.*, 2009).

Diante desses problemas, há um crescente interesse na redução de impactos ambientais associados ao setor, seja na fase de produção de materiais e componentes, seja na construção, no uso ou na demolição da edificação (FLORIM; QUELHAS, 2004). Num futuro próximo, o uso de materiais alternativos na construção, tal como os agregados reciclados obtidos a partir do processamento dos RCDs, deve tornar-se mais notório (ANGULO *et al.*, 2013). Tal prática, inclusive, possui normatização estabelecida pelas NBR 15115 (ABNT, 2004a) e NBR 15116 (ABNT, 2004b), sendo que a maior aplicação desse tipo de agregado tem sido em camadas de pavimentação. Entretanto, seu uso na fabricação de concreto tem aumentado (CABRAL *et al.*, 2010).

A incorporação de agregados reciclados em concretos apresenta, no entanto, algumas particularidades que carecem de análise. A heterogeneidade dos RCDs, por exemplo, influi diretamente nas características dos agregados reciclados com eles produzidos (CABRAL *et al.*, 2007) e, além disso, os processos construtivos interferem na qualidade do agregado gerado (RODRIGUES; FUCALE, 2014). Sendo assim, é necessário entender o comportamento desses concretos com relação a algumas propriedades, tanto de natureza mecânica quanto com relação à sua durabilidade (CABRAL *et al.*, 2008).

O objetivo deste trabalho é analisar a influência que o ataque por sulfatos de magnésio, em solução aquosa, promove no desenvolvimento inicial de resistência mecânica, nas idades de 3, 7 e 28 dias, de corpos de prova cilíndricos de concreto produzidos com agregados miúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha em substituição parcial ao agregado miúdo natural, proveniente de areia de rio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto é um dos produtos mais utilizados no mundo, sendo definido como um material bastante heterogêneo constituído por um meio aglomerante (cimento) no qual estão aglutinadas partículas de agregados (areia e rocha). O aglomerante e os agregados utilizados dependem da função para qual o concreto está sendo confeccionado e podem variar ainda em virtude da disponibilidade de materiais na região onde ele é produzido.

O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e por uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição de moagem. Clínqueres são nódulos de 5mm a 25mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias primas com proporcionamento adequado é aquecida sob altas temperaturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O cimento Portland anidro não aglomera areia e rocha. Ele adquire a propriedade adesiva apenas quando é misturado à água. Isso se dá porque a reação química do cimento com a água, comumente denominada hidratação do cimento, resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A hidratação do cimento gera, genericamente, silicatos de cálcio hidratado ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que conferem resistência ao material, e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), principal responsável pela geração de um ambiente alcalino, com pH próximo de 13. No concreto armado, a elevada alcalinidade gera uma camada passivante ao longo das barras de aço, que as protege do fenômeno da corrosão (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

O agregado é definido como o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia (PETRUCCI, 1978). As características relevantes do agregado para a composição do concreto incluem: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes. Essas características resultam da composição mineralógica da rocha fonte, das condições de exposição a que a rocha foi submetida antes de produzir o agregado e do tipo de equipamento utilizado para produção do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 ATAQUE POR SULFATOS EM CONCRETOS

A maioria dos solos contém sulfato (SO_4) na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), normalmente de 0,01% a 0,05%. Essa quantidade é considerada inofensiva ao concreto. A solubilidade da gipsita na água em temperatura normal é bastante limitada, aproximadamente 1400 mg/L. Normalmente, as concentrações maiores de sulfato nas águas subterrâneas se devem à presença de sulfatos de magnésio (MgSO_4), sódio

(Na_2SO_4) e potássio (K_2SO_4) (METHA; MONTEIRO, 2014). Os sulfatos estão presentes na natureza, também em ambientes marinhos, na água de rios, no lençol freático, em água de pântanos e de composição de matéria orgânica, além de ambientes poluídos com esgotos, ambientes industriais ou, ainda, no próprio agregado constituinte do concreto (SOUZA, 2006).

A forma mais comum de ataque por sulfatos é a resultante do ingresso de íons sulfato de alguma fonte externa para o interior da pasta de cimento hidratada. Os sulfatos difundem-se no concreto e em demais materiais de base cimentícia por meio da rede de poros dos mesmos. Dentro da pasta de cimento hidratada, os sulfatos reagem com os compostos de cálcio (Ca) para formar gipsita e com as fontes de cálcio e alumínio (Al) para formar etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$). Esses compostos formados são deletérios à estrutura cimentícia (SOUZA, 2006).

No caso do ataque por sulfato de magnésio, a conversão do hidróxido de cálcio em gipsita é acompanhada pela formação simultânea de hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) que é insolúvel e que reduz a alcalinidade do sistema. Na ausência de íons hidroxila na solução, o silicato de cálcio hidratado deixa de ser estável e também é atacado pela solução de sulfato. O sulfato de magnésio é, portanto, o mais severo ao concreto (METHA; MONTEIRO, 2014).

A deterioração do concreto pelo ataque por sulfatos é associada à expansão do concreto ocasionada pela formação da etringita. A pressão exercida pelo crescimento dos cristais de etringita pouco cristalina e a expansão resultante da adsorção de água em meio alcalino são os mecanismos pelos quais a formação de etringita causa expansão (METHA; MONTEIRO, 2014).

O ataque por sulfatos pode se manifestar na forma de expansão e fissuração do concreto. Quando o concreto fissura, sua permeabilidade aumenta e a água agressiva penetra mais facilmente em seu interior, acelerando, portanto, o processo de deterioração. O ataque por sulfato também pode se manifestar na diminuição progressiva de resistência e perda de massa devido à perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento (METHA; MONTEIRO, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Gil (2002) recomenda que as pesquisas sejam classificadas com relação aos objetivos gerais e com relação ao delineamento, que, em linhas gerais, expressa o desenvolvimento da pesquisa, com ênfase nos procedimentos técnicos de coleta e análise dos dados.

Quanto aos objetivos gerais, esta pesquisa classifica-se como explicativa, pois, conforme define Gil (2002), o presente trabalho procura definir as variáveis que contribuem para a ocorrência do fenômeno estudado, que, nesse caso, é o desenvolvimento inicial da resistência mecânica de corpos de prova cilíndricos de concreto que foram submetidos ao ataque por sulfatos de magnésio presentes em solução aquosa e que foram produzidos com agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha, em substituição parcial ao agregado miúdo natural.

Com relação ao delineamento, o trabalho classifica-se como experimental, pois, conforme define Gil (2002), consiste em determinar um fenômeno de estudo, selecionar

as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Foram identificadas duas variáveis independentes: a substituição de agregados naturais por agregados reciclados e a presença de sulfato de magnésio em solução aquosa durante a cura do concreto, ao passo que a variável dependente identificada foi o desenvolvimento inicial de resistência.

O ambiente utilizado para a realização dos procedimentos experimentais foi o laboratório Análises Tecnológicas de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), sendo que os materiais e os equipamentos utilizados foram obtidos desse laboratório, com exceção do sulfato de magnésio, que foi fornecido pelo Almoarifado de Química, pertencente à mesma instituição, e dos resíduos de cerâmica vermelha, que foram obtidos de uma obra localizada dentro do campus principal do UNIPAM.

O projeto experimental foi dividido em quatro etapas principais:

- 1) Caracterização dos agregados naturais e do aglomerante;
- 2) Obtenção, processamento e caracterização dos resíduos de cerâmica vermelha;
- 3) Determinação do traço do concreto;
- 4) Molde, cura e rompimento dos corpos de prova.

Os dados foram coletados a partir da realização de ensaios experimentais, sendo que foram transferidos para planilhas eletrônicas que foram utilizadas durante a análise dos resultados obtidos com os experimentos.

O estudo foi realizado com base nos ensaios recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009b), que especifica os requisitos exigíveis para recepção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland.

Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados (naturais e reciclado) e do aglomerante (cimento) foram: massa específica do cimento Portland (ABNT, 2001a), absorção de água do agregado miúdo (ABNT, 2001b), massa unitária dos agregados graúdo e miúdo (ABNT, 2006), teor de pulverulência dos agregados graúdo e miúdo (ABNT, 2003a), massa específica do agregado graúdo (ABNT, 2009a), absorção de água do agregado graúdo (ABNT, 2009a), composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo (ABNT, 2003b) e massa específica do agregado miúdo (DNER, 1998).

O cimento utilizado foi o CP-II-E-32, por se tratar de um cimento bastante empregado nas obras executadas na região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais. O agregado miúdo empregado foi uma areia lavada de rio proveniente de uma jazida localizada em Pará de Minas - MG, ao passo que o agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem calcária extraída de uma jazida localizada em Varjão de Minas - MG. Tais agregados foram utilizados porque são materiais disponíveis no mercado local, sendo que são bastante empregados na região.

Quando os estudos referentes à caracterização dos agregados e do aglomerante foram finalizados, os procedimentos necessários para a obtenção, processamento e caracterização dos resíduos de cerâmica vermelha foram iniciados. Objetivando-se a eliminação de quaisquer ameaças de contaminações provenientes, por exemplo, de solos e gessos, empregaram-se tijolos cerâmicos que ainda não haviam sido utilizados na obra.

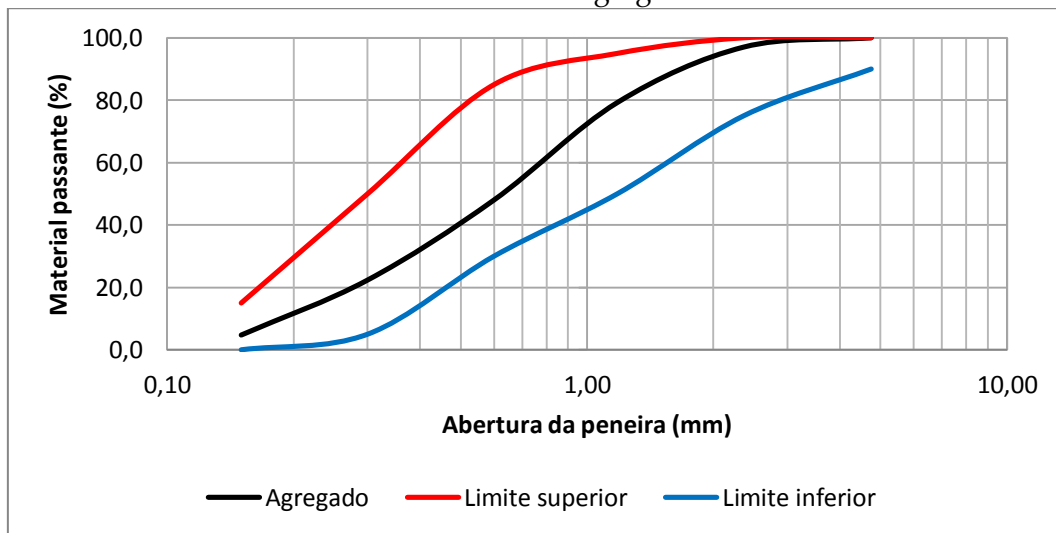
Devido à indisponibilidade de uma máquina específica para a trituração de resíduos na instituição, utilizou-se, para esse propósito, a máquina de abrasão, cuja finalidade original é a realização do ensaio descrito na NBR 51 (ABNT, 2001c). Após a trituração, observou-se que o material obtido apresentava granulometria bastante irregular, sendo necessário, portanto, realizar um procedimento de peneiramento que consistiu em, inicialmente, separar os resíduos por frações granulométricas para, posteriormente, juntar essas frações nas devidas proporções para que o agregado miúdo reciclado apresentasse a mesma curva granulométrica do agregado miúdo natural.

Para a confecção do concreto, adotou-se o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (BOGGIO, 2000), sendo que os materiais foram dosados em massa e o concreto foi confeccionado com a utilização de uma betoneira. Após a confecção, sua consistência foi verificada pelo método do abatimento do tronco de cone, com base nas orientações da NBR 67 (ABNT, 1998), em seguida, os corpos de prova foram moldados e curados, de acordo com o descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo que alguns foram submersos em uma solução aquosa contendo sulfato de magnésio. O ensaio de resistência à compressão foi realizado com base na NBR 5739 (ABNT, 2007), nas idades de 3, 7 e 28 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 1 apresenta o resultado da análise granulométrica do agregado miúdo natural. Observa-se que a distribuição granulométrica desse agregado permaneceu dentro dos limites recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 1 – Granulometria do agregado miúdo natural

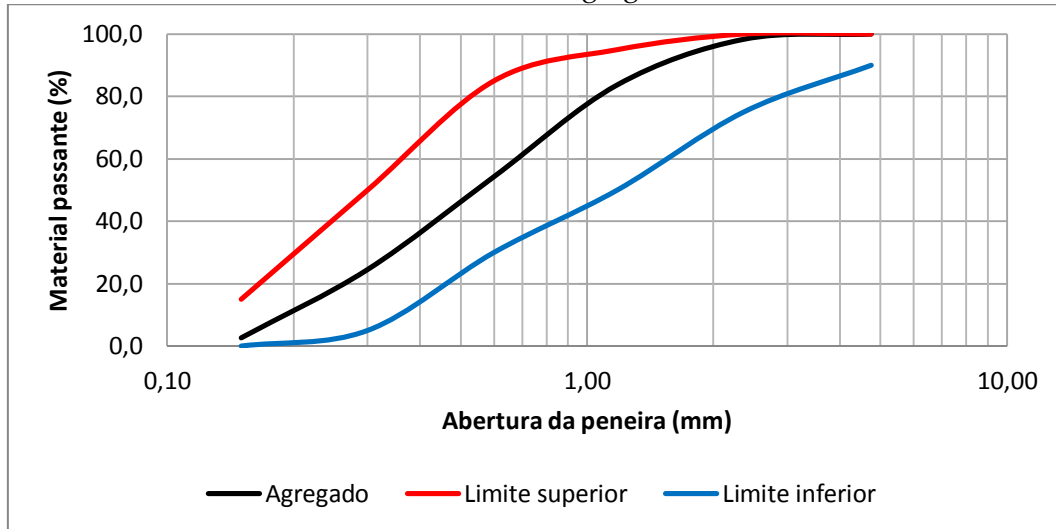


Fonte: Dados da pesquisa.

O Gráfico 2 mostra o resultado da análise granulométrica do agregado miúdo reciclado. Verifica-se que essa curva assemelhou-se àquela apresentada pelo Gráfico 1,

sendo que esse fato era esperado devido ao procedimento adotado para o processamento dos resíduos de cerâmica vermelha.

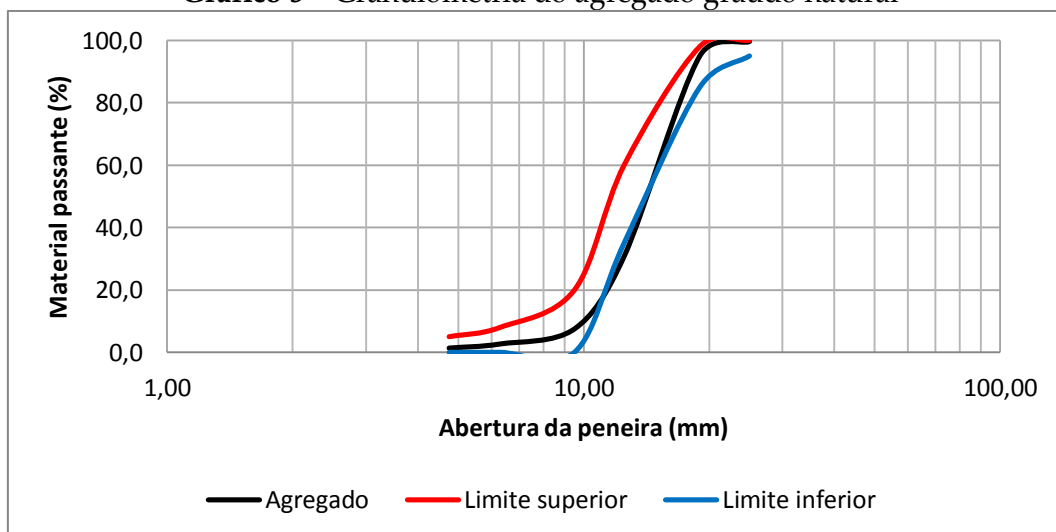
Gráfico 2 – Granulometria do agregado miúdo reciclado



Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 3 fornece o resultado da análise granulométrica obtida para o agregado graúdo natural. Observa-se que parte da distribuição granulométrica desse agregado desviou-se do limite inferior proposto pela NBR 7211 (ABNT, 2009b), caracterizando, segundo a norma, um agregado com características não recomendáveis para aplicação em concretos. Por se tratar, no entanto, de um desvio localizado em apenas um dos limites e localizado em apenas um intervalo compreendido entre duas peneiras (9,5 mm e 12,5 mm), optou-se por utilizar o agregado para a confecção dos concretos.

Gráfico 3 – Granulometria do agregado graúdo natural



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 1, os valores obtidos para a dimensão máxima característica (DMC) e para o módulo de finura (MF) dos agregados podem ser observados. Como era de se esperar, em virtude, novamente, do procedimento adotado para o processamento dos resíduos de cerâmica vermelha, os agregados miúdos apresentaram MF semelhantes e o mesmo DMC. Esse fato, aliado à curva granulométrica obtida para os dois agregados, indica que procedimento adotado para a confecção do agregado miúdo reciclado foi eficaz em copiar as características de distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.

Tabela 1 – DMC e MF

Agregado	DMC (mm)	MF
Miúdo natural	2,36	2,49
Miúdo reciclado	2,36	2,37
Graúdo natural	19,00	6,96

Fonte: Dados da pesquisa.

Obteve-se para a massa específica do cimento o valor de 3,039 kg/dm³. Os demais resultados de caracterização física, que foram obtidos para os agregados, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos agregados

Agregado	Massa específica (kg/m³)	Massa unitária em estado solto (kg/m³)	Massa unitária em estado compactado (kg/m³)	Pulverulência (%)	Absorção (%)
Miúdo natural	2587	1432	1526	2,9	0,91
Miúdo reciclado	2564	1007	-	5,0	21,3
Graúdo natural	2684	1368	1527	0,2	0,23

Fonte: Dados da pesquisa.

Em virtude da porosidade do agregado miúdo reciclado, que pode ser observado por meio da Figura 1, o valor obtido para sua absorção foi bastante elevado quando comparado ao valor obtido para a absorção dos agregados naturais, sendo indispensável, portanto, ao confeccionar-se o concreto, a umidificação prévia desse material, conforme recomenda a NBR 15116 (ABNT, 2004b), para que ele não absorva a água de amassamento do concreto e comprometa a trabalhabilidade esperada para a mistura. Optou-se, então, por umidificar previamente esse agregado aproximadamente 30 minutos antes da confecção do concreto, com um teor de 80% da água absorvida durante a realização do ensaio de absorção.

Figura 1 – Agregado miúdo reciclado



Fonte: Os autores - dados da pesquisa.

Para ambas as massas estudadas (específica e unitária em estado solto), o agregado miúdo reciclado apresentou os menores valores, quando comparado com os outros agregados, sendo esse fato justificado novamente pela alta porosidade desse agregado. Obteve-se, também, um alto teor de material pulverulento para esse material, quando comparado aos outros agregados, sendo esse fenômeno explicado pelo processo de trituração e peneiramento adotado, ora por via úmida para partículas de menor diâmetro, ora por via seca para partículas de diâmetro mais elevado, o que levou à desagregação de partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm, causando a pulverulência.

Determinou-se 30 MPa como a resistência esperada para os 28 dias, o que resultou numa relação água/cimento (a/c) de 0,52 para o CP-II-E-32. Fixou-se o intervalo de 80mm a 100mm como o abatimento do tronco de cone esperado para o concreto no estado fresco. Os resultados obtidos para o traço do concreto, calculados com a utilização do Método ABCP, podem ser observados na Tabela3.

Tabela 3–Traço do concreto

Componente	Massa (kg)	Volume (dm³)
Aglomerante	1,000	0,329
Agregado miúdo	1,715	0,663
Agregado graúdo	2,750	1,025
Água	0,520	0,520
Total	5,985	2,537

Fonte: Dados da pesquisa.

Após o cálculo do traço, calculou-se a dosagem de modo a obter 24 corpos de prova para cada grupo de concreto (controle e experimental), adicionando-se um coeficiente adicional de 30% sobre as massas encontradas, objetivando-se obter, no

mínimo, 48 corpos de prova. A Tabela 4 fornece a dosagem encontrada para o concreto confeccionado sem a utilização de agregados reciclados, ou seja, o Grupo Controle.

Tabela 4 – Dosagem para o concreto confeccionado sem agregados reciclados

Componente	Massa (kg)
Cimento	19,321
Agregado miúdo natural	33,130
Agregado graúdo natural	53,136
Água	10,047
Total	115,634

Fonte: Dados da pesquisa.

Adotou-se um teor de substituição de 30% em massa de agregados naturais (areia lavada de rio) por agregados reciclados (resíduos de cerâmica vermelha), sendo que os resultados de caracterização do agregado miúdo reciclado não foram considerados para o cálculo do traço, optando-se, ao invés disso, pela simples substituição em massa, por se tratar de um processo mais simples e igualmente eficaz para alcançar os objetivos de comparação entre o desempenho dos concretos esperado com o trabalho. A Tabela 5 fornece os resultados encontrados para a dosagem do concreto confeccionado com agregados reciclados, ou seja, o Grupo Experimental.

Tabela 5 – Dosagem para o concreto confeccionado com agregados reciclados

Componente	Massa (kg)
Cimento	19,321
Agregado miúdo natural	23,191
Agregado miúdo reciclado	9,939
Agregado graúdo natural	53,136
Água	10,047
Total	115,634

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 2 apresenta parte dos materiais utilizados para a confecção do concreto, os quais foram fisicamente caracterizados por meio da realização dos ensaios, prática esta que é pouco comum em obras corriqueiras.

Figura 2 – Materiais utilizados para a confecção do concreto



Fonte: Os autores – dados da pesquisa.

O procedimento adotado em ambiente laboratorial não fornece exatamente as condições encontradas comumente em obras de pequeno a médio porte, nas quais, geralmente, o controle tecnológico é pouco frequente. Os procedimentos adotados neste trabalho aproximam-se mais da situação encontrada em concreteiras, onde a preocupação com a qualidade do concreto assume maior importância, tendo em vista que essas empresas, frequentemente, fornecem concretos que são utilizados em funções estruturais, em obras de maior porte.

Ao preparar a mistura, lubrificou-se, inicialmente, a betoneira por meio da confecção de uma argamassa com consistência bastante fluida, procedendo-se, em sequência, à produção dos concretos. O procedimento adotado tem por objetivo preencher com argamassa as rugosidades presentes na betoneira, evitando-se, desse modo, a perda de argamassa do concreto durante a sua confecção, que ficaria aderida à superfície do equipamento.

Lançaram-se os agregados e parte da água de amassamento e, em seguida, adicionou-se o cimento e o restante da água. Aguardaram-se alguns instantes para que o concreto adquirisse homogeneidade e, após esse tempo, realizou-se finalmente o teste do abatimento do cone, cujos valores obtidos para os concretos controle e experimental foram, respectivamente, 140mm e 50mm, nenhum deles alcançando, portanto, o abatimento previsto inicialmente quando o traço foi calculado. O abatimento inferior encontrado para o concreto experimental está associado à capacidade de absorção encontrada para o agregado reciclado, que, produziu uma mistura com menor quantidade de água de amassamento, evidenciando, portanto, a necessidade de utilização de ativos plastificantes para que o concreto, que pode ser visualizado por meio da Figura 3, apresente o abatimento esperado, sem que a relação a/c seja alterada.

Figura 3 – Concreto confeccionado

Fonte: Os autores – dados da pesquisa.

Os corpos de prova, que podem ser visualizados por meio da Figura 4, foram, então, moldados e, decorridas 24 horas após a moldagem, foram transferidos uns para a câmara úmida e outros para a solução aquosa contendo sulfato de magnésio, sendo que a solução utilizada possuía concentrações em massa de 92,3% de água proveniente da rede pública de distribuição e 7,7% de sulfato de magnésio, que foi fornecido pelo Almojarifado de Química.

Após o cálculo do volume de solução necessário para a submersão dos corpos de prova, que foi realizado com base no volume dos recipientes disponibilizados para a realização da cura, estabeleceu-se que uma concentração de 10% em massa de sulfato de magnésio seria suficiente para promover um ensaio acelerado de deterioração do concreto. No entanto, com o material disponibilizado, obteve-se somente a concentração em massa de 7,7%, que foi considerada satisfatória e que foi utilizada para a execução da pesquisa.

Figura 4 – Corpos de prova

Fonte: Os autores – dados da pesquisa.

Em virtude do teor adicional utilizado para dosar as misturas, foram obtidos, ao todo, 60 corpos de prova, dentre os quais 48 foram selecionados para integrar o conjunto que seria utilizado para a análise dos dados, conforme é apresentado na Tabela 6. Aqueles 12 que apresentaram as maiores inconformidades geométricas causadas principalmente por adensamento ineficiente foram descartados, tendo em vista que tais imperfeições influenciariam no desempenho mecânico desses corpos de prova.

Tabela 6 – Corpos de prova

Grupo	Obtidos	Descartados	Utilizados
Controle	28	4	24
Experimental	32	8	24
Total	60	12	48

Fonte: Dados da pesquisa.

Realizaram-se, nas idades de 3, 7 e 28 dias, os ensaios de resistência à compressão, sendo que, conforme é apresentado na Tabela 7, os concretos não atingiram, aos 28 dias, os 30 MPa previstos inicialmente, fato este que pode estar associado aos erros cometidos durante a realização do experimento ou à ineficácia apresentada pelo método ABCP para calcular traços de concretos confeccionados com agregados encontrados na região de Patos de Minas – MG. Esse último argumento, apresenta-se, inclusive, como um possível problema de pesquisa para ser explorado. Alguns possíveis erros que podem ter sido cometidos durante a realização dos ensaios experimentais são: adensamento dos corpos de prova mal realizado, cura inadequada dos concretos ou falhas durante o proporcionamento da mistura. Além disso, nenhum coeficiente de majoração da resistência, que considera as variações do experimento, foi utilizado para calcular o traço.

Tabela 7 – Resistência à compressão

Idade (dias)	Resistência (MPa)				Média
	Controle		Experimental		
	Câmara	Sulfato	Câmara	Sulfato	
3	11,35	11,89	11,09	10,15	11,1
7	16,09	15,81	16,54	16,09	16,1
28	19,86	19,18	18,81	18,03	19,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que todos os concretos em todas as idades não apresentaram desvio em relação à média superior a 1,0 MPa, podendo-se afirmar, portanto, que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados no teor de 30% não influenciou no ganho inicial de resistência dos concretos curados na câmara úmida, nem dos concretos curados na solução contendo sulfato de magnésio nas proporções apresentadas anteriormente. A Figura 5 mostra o aspecto dos corpos de prova após o desmolde.

Figura 5 – Corpos de prova após o desmolde

Fonte: Os autores – dados da pesquisa.

Por meio da Figura 6, é possível observar a aparência apresentada por um corpo de prova logo após a realização do ensaio de resistência à compressão axial. Nesse caso, a ruptura foi forçada além daquela admitida para tensão máxima suportada pelo corpo de prova, para que as fraturas fossem bastante evidentes e pudessem ser analisadas. Observou-se que, embora esse dado não tenha sido quantificado, grande parte dos corpos de prova apresentou fraturas na pasta de cimento e nos agregados, em ambas as idades de ruptura.

Figura 6 – Corpo de prova após a ruptura

Fonte: Os autores – dados da pesquisa.

A Tabela 8 fornece os coeficientes de variação obtidos com a realização dos ensaios de resistência à compressão. É possível observar que três desses coeficientes apresentaram valores superiores aos 15% que a prática geralmente recomendada como limite máximo para esse tipo de ensaio.

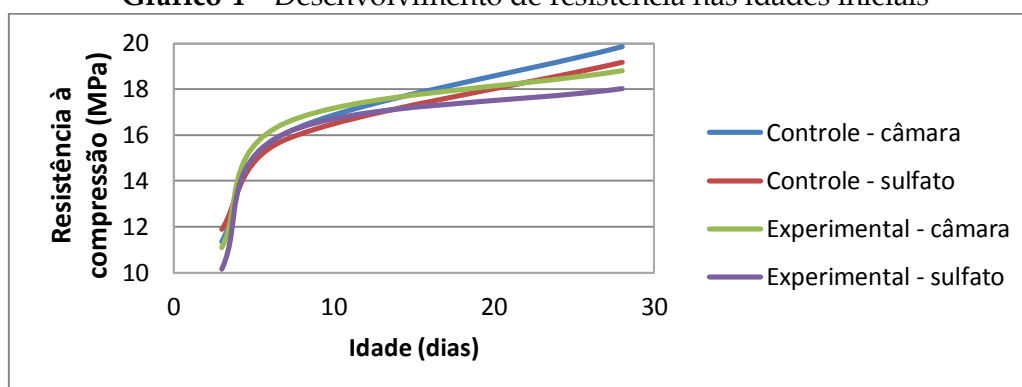
Tabela 8 – Coeficientes de variação

Idade (dias)	Coeficiente de Variação (%)			
	Controle		Experimental	
	Câmara	Sulfato	Câmara	Sulfato
3	3,113	5,817	12,05	3,757
7	8,156	16,07	14,74	8,753
28	15,09	13,15	18,98	8,230

Fonte: Dados da pesquisa.

No Gráfico 4, é apresentado o desenvolvimento de resistência observado para os concretos nas idades iniciais. Observa-se que todos apresentaram desenvolvimento de resistência semelhante, demonstrando que o concreto confeccionado parcialmente com agregado miúdo reciclado apresentou desempenho equivalente àquele confeccionado exclusivamente com agregados naturais. Esse resultado demonstra um desempenho satisfatório para os concretos do Grupo Experimental, sendo que tal desempenho também foi observado em outras pesquisas, mas quando se avaliaram outros aspectos ou características desse material.

Gráfico 4 – Desenvolvimento de resistência nas idades iniciais



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 9, são apresentados os valores encontrados para as massas específicas dos concretos na idade de 28 dias. Verificou-se que os concretos do Grupo Experimental apresentaram-se, em média, 2,7% mais leves que os concretos do Grupo Controle, sendo que esse fenômeno pode ser associado à alta porosidade do agregado reciclado, que o torna mais leve que o agregado natural.

Tabela 9 – Massa específica do concreto

Cura	Concreto	Massa específica (kg/m³)
Controle	Câmara	2385
	Sulfato	2387
Experimental	Câmara	2308
	Sulfato	2335

Fonte: Dados da pesquisa.

Tal leveza, no entanto, por ser pouco significativa, no teor de substituição utilizado, dificilmente encontraria uso para a produção de concretos leves, sendo que, nesse caso, seria interessante estudar o uso de agregado graúdo reciclado de resíduos de cerâmica vermelha em substituição ao agregado graúdo natural, pois esse último, geralmente, apresenta massa específica mais elevada que os demais agregados. Um cuidado especial deveria ser dado, no entanto, para a questão da absorção de água que, nessa situação, certamente seria bastante elevada.

5 CONCLUSÃO

A confecção de concretos com a incorporação de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição constitui uma alternativa atraente para reduzir o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil, sendo que a aplicação segura desses materiais exige a realização de um estudo experimental que verifique se as propriedades desses agregados são adequadas para a aplicação em concretos.

A pesquisa possibilitou a caracterização física dos agregados (naturais e reciclados) utilizados durante a execução do projeto experimental, por meio da aferição das seguintes características: distribuição granulométrica, massa específica, massa unitária (em estado solto e compactado), absorção e teor de material pulverulento.

Observou-se que o agregado miúdo reciclado de resíduos de cerâmica vermelha apresentou os menores valores para as massas estudadas (específica e unitária) e o maior valor para a absorção, sendo que esses fatos estão relacionados à porosidade desse material, que é mais elevada que a dos agregados naturais.

O elevado valor encontrado para o teor de material pulverulento (5%) no agregado miúdo reciclado está relacionado ao processo utilizado para o beneficiamento dos resíduos, que, devido à etapa de trituração, origina partículas com diâmetros inferiores a 0,075mm.

O concreto produzido parcialmente com agregado miúdo reciclado apresentou desenvolvimento de resistência mecânica nas primeiras idades equivalente ao do concreto produzido exclusivamente com agregados naturais, pois os valores encontrados não diferiram mais que 1,0 MPa da média obtida para ambas as idades, sendo que esse desvio é considerado estatisticamente insignificativo.

Nenhum dos concretos atingiu, no entanto, a resistência à compressão esperada para os 28 dias, caracterizando possíveis erros cometidos durante a realização do trabalho. Alguns possíveis erros são: adensamento inadequado dos corpos de prova, cura do concreto mal executada ou falhas cometidas durante a dosagem das misturas. Além disso, durante o cálculo do traço, nenhum coeficiente foi utilizado para majorar a resistência do concreto, sendo que esse fato pode ter influenciado para que o concreto não atingisse a resistência à compressão axial esperada.

A presença de sulfatos de magnésio em solução aquosa na concentração em massa de 7,7% não influenciou no desenvolvimento inicial de resistência, sendo recomendável o estudo da resistência desses concretos em idades mais avançadas, nas quais a deterioração por ataques por sulfatos certamente seria mais significativa.

Por fim, a pesquisa demonstrou que os concretos produzidos com os agregados reciclados utilizados apresentaram desempenho satisfatório no quesito avaliado, sendo que sua utilização é viável para aplicações não estruturais, recomendando-se apenas que seja realizado um controle tecnológico com os agregados utilizados e com o concreto confeccionado, objetivando-se avaliar as propriedades físicas desses materiais.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao UNIPAM pelo incentivo no desenvolvimento da pesquisa, ao responsável pelo Almoxarifado de Química pela disponibilização do sulfato de magnésio e aos técnicos e estagiários do Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção pela orientação durante a realização dos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 23: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2001a. 5 p.
- _____. *NBR 30: agregado miúdo: determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001b. 3 p.
- _____. *NBR 45: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.
- _____. *NBR 46: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.
- _____. *NBR 51: agregado graúdo: ensaio de abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro, 2001c. 6 p.
- _____. *NBR 53: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009a. 8 p.
- _____. *NBR 67: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.
- _____. *NBR 248: agregados: determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003b. 6 p.
- _____. *NBR 5738: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. *NBR 5739: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. *NBR 7211: agregados para concreto: especificação*. Rio de Janeiro, 2009b. 9 p.

_____. *NBR 15115: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução em camadas de pavimentação: procedimentos*. Rio de Janeiro, 2004a. 10 p.

_____. *NBR 15116: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos*. Rio de Janeiro, 2004b. 12 p.

ANGULO, Sérgio Cirelli *et al.* Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. *Ambiente construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 61-73, jun. 2013. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212013000200006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.

BOGGIO, Aldo J. *Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland*. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12575>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra *et al.* Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, São Paulo, v. 55, n. 336, p. 448-460, dez. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132009000400016&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.

_____. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. *Revista IBRACON Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 171-192, jun. 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952008000200004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.

_____. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. *Minerva*, São Carlos, v. 4, n. 1, p. 75-84, jan. de 2007. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2004\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2004(01)%2009.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2016.

_____. Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com agregados reciclados. *Revista IBRACON Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 1-23, mar. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952010000100002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. *DNER-ME 194/98: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me194-98.pdf/view>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

FLORIM, Leila Chaga; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. Contribuição para a construção sustentável: características de um projeto habitacional eco-eficiente. *Engevista*, Niterói, v. 6, n. 3, p. 121-132, 2004. Disponível em: <<http://www.uff.br/engevista/seer/index.php/engevista/article/view/151/54>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

METHA, P.; MONTEIRO, Paulo J. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

PETRUCCI, Eladio Geraldo Requião. *Concreto de cimento Portland*. Atualizado e rev. por Vladimir Antonio Paulon. 6. ed. Porto Alegre: Globo, 1978.

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá; FUCALE, Stela. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. *Ambiente construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, mar. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212014000100009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.

SOUZA, Rui Barbosa de. *Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos: método de ensaio acelerado*. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-07122006-173150/publico/DissRUIBARBOSA.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KULAKOWSKI, Marlova Piva. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. *Ambiente construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 213-228, jun. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212011000200015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 mar. 2016.