

VERIFICAÇÃO DA POZOLANICIDADE DO RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO PROVENIENTE DE PARA-BRISAS DE AUTOMÓVEIS – ESTUDOS INICIAIS

VERIFICATION OF POZZOLANIC PROPERTIES OF WASTE LAMINATED GLASS FROM CAR WINDSHIELD

L.S. Jordoní (1); A.S. Sauer (2); F.A. Tristão (3); J.L. Calmon (3); G.L. Vieira (3)

(1) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: lorenacivil@yahoo.com.br

(2) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: alinesisa@hotmail.com

(3) Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo.

RESUMO

Nas últimas décadas houve um aumento de iniciativas para desenvolvimento de alternativas de reutilização e reciclagem dos resíduos antes considerados apenas como “lixos” tendo como único destino os aterros sanitários. Essa questão está sendo discutida pelas pesquisas desenvolvidas que estão presentes em diversas áreas. O setor de fabricação de vidros laminados está em constante crescimento devido principalmente à demanda na fabricação de veículos que depende desse material. O vidro laminado é encontrado principalmente em parabrisas e em portas e janelas dos prédios sem esquadrias. Sua estrutura possui três camadas: duas camadas externas de vidro e uma camada intermediária feita com um polímero orgânico denominado PVB (polivinilbutiral). Após a vida útil desse material, ele se torna um problema ambiental devido à sua destinação final. A reciclagem desse material possui como fator limitante a dificuldade em separar todo o PVB do vidro, assim tal resíduo terá uma parcela pequena de PVB em sua composição. O resíduo

de vidro laminado foi submetido aos ensaios determinados na NBR 12653 – Materiais Pozolânicos para verificar se as condições prescritas nessa norma se aplicam ao resíduo. Através dos resultados desta pesquisa pretende-se confirmar a viabilidade técnica de uso do resíduo do vidro laminado proveniente dos parabrisas de automóveis como material pozolânico.

Palavras-chave: vidro laminado, resíduo, PVB, pozolanicidade e reciclagem.

ABSTRACT

In recent decades there has been an increase in initiatives to develop alternatives for reuse and recycling of waste previously considered only as "waste" being the only destination landfills. This issue is being discussed by the research developed that are present in several areas. The manufacturing sector of laminated glass is constantly growing due mainly to demand in the manufacture of vehicles that depend on this material. Laminated glass is mainly found in windshield and doors and windows of buildings without frames. The structure has three layers: two outer layers of glass and an intermediate layer made of an organic polymer known as PVB (polivinibutiral). After the useful life of that material, it becomes an environmental problem due to its final destination. The recycling of this material has as a limiting factor to the difficulty in separating all the PVB glass, so that waste will have a small portion of PVB in its composition. The residue of laminated glass was subjected to tests as determined by the NBR 12653 - pozzolanic materials to verify that the conditions prescribed in this standard apply to the residue. Through the results of this research is intended to confirm the technical feasibility of using waste glass from laminated windshield of the car as pozzolanic material.

Key-words: laminated glass, waste, PVB, pozzolanic and recycling.

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil ocupa uma posição de destaque na economia por ser uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social. Este setor consome grandes quantidades de recursos naturais e de energia,

além de ser um grande gerador de resíduos. Mas além de consumir, a indústria da construção civil também tem a capacidade de absorver os resíduos gerados tanto por ela como por outras atividades econômicas, reutilizando-os incorporados aos materiais de construção.

Por isso, o número de pesquisas com o intuito de reduzir os impactos decorrentes desta atividade econômica vem crescendo. Grande parte destes estudos visa à substituição parcial tanto dos agregados quanto do material cimentício, por materiais suplementares provenientes de resíduos industriais.

A utilização de alguns destes resíduos com características pozolânicas na composição de materiais cimentícios visa diminuir a extração de matéria-prima para a produção do cimento Portland e possibilitar destinação final adequada a tais resíduos.

Além das vantagens ambientais e econômicas, estas adições possibilitam a melhoria de algumas propriedades da matriz cimentícia, pois as mesmas estão diretamente ligadas à produção de concretos de alta resistência e alto desempenho devido ao efeito químico relacionado com a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto responsável pela maior fração de resistência das pastas de cimento. Estas adições também permitem a transformação de vazios através da ocupação destes espaços pelas pequenas partículas do resíduo, minimizando a permeabilidade, e conseqüentemente, aumentando a durabilidade ⁽¹⁾.

De acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO ⁽²⁾, o vidro é um material que pode ser reciclado indefinidamente, sem mudanças nas suas características. A reciclagem deste material permite reduzir os custos de produção, assim como a matéria-prima e energia gasta. No entanto, quando diferentes tipos de cacos de vidro se misturam, ocorrendo variabilidade da composição química, esse material se torna impróprio para reciclagem sendo, geralmente, direcionado a aterros sanitários. Considerando que esse é um produto não biodegradável que leva de 2 mil à 1 milhão de anos para se decompor, a deposição em aterros deve ser evitada.

Park e Lee ⁽³⁾, Corinaldesi et al ⁽⁴⁾, Lam, Poon e Cham ⁽⁵⁾ e Araújo et al ⁽⁶⁾ em seus estudos sobre o uso de resíduo de vidro em matrizes cimentícias sugerem que, quando utilizado em granulometria inferior a 100µm, esse material, além do efeito *filler*, possua certas características pozolânicas devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição.

O resíduo a ser estudado neste trabalho é o resíduo de vidro laminado automotivo, que é constituído por duas ou mais chapas de vidro plano que são unidas por uma película plástica de polivinilbutiral (PVB) durante o processo de laminação. Sua reciclagem é feita junto às indústrias fabricantes e através de recicladores especializados, que adquirem os cacos junto à rede de venda de vidros de reposição para veículos ^(2;7). Estes recicladores processam o vidro através de moagem, separando quase que totalmente o vidro do PVB. Porém, ao final deste processo ainda restam pequenas partículas de PVB agregadas ao vidro moído, e por este motivo a possibilidade de reutilização deste tipo de resíduo é limitada.

O objetivo deste trabalho é verificar as características pozolânicas da amostra de resíduo de vidro laminado moído proveniente dos parabrisas de automóveis submetido aos ensaios determinados pelas normas NBR 5751 - Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal ⁽⁸⁾ e NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento ⁽⁹⁾ e compará-los com os limites estabelecidos pela NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Especificação ⁽¹⁰⁾, visando confirmar a viabilidade técnica do uso deste resíduo como material pozolânico na substituição parcial do aglomerante em concretos e argamassas de cimento Portland.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa foi utilizado o resíduo de vidro laminado (RVL) proveniente de uma usina de reciclagem localizada em São Paulo. Essa usina recebe o vidro laminado proveniente de parabrisas de automóveis após sua vida útil e passa o mesmo por um processo de moagens de forma a separar a película de PVB do vidro. Tal procedimento consegue separar a maior parte da película, porém

o resíduo de vidro no final do processo ainda possui uma pequena parcela de PVB em sua composição.

O resíduo de vidro laminado foi recebido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC – UFES) em três tambores de 20l conforme mostra a figura 1.



Figura 1 - Resíduo de vidro laminado ao chegar ao laboratório

O resíduo foi homogeneizado, seco em estufa por 24h e depois moído em um moinho de argolas durante 40 segundos cada fração de 50g de resíduo (Figura 2). A metodologia desse processo foi determinada de forma que a finura do resíduo se equiparasse com a finura do cimento Portland determinada pela NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200) - Método de ensaio ⁽¹¹⁾.



Figura 2 – Moinho de argolas e resíduo de vidro laminado após processo de moagem

Foi realizado o ensaio de determinação de massa específica no resíduo de vidro moído conforme a NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica ⁽¹²⁾ obtendo o resultado de 2,31g/cm³. O resíduo também foi submetido ao ensaio de granulometria a laser e a curva granulométrica apresenta-se conforme mostra o gráfico 1.

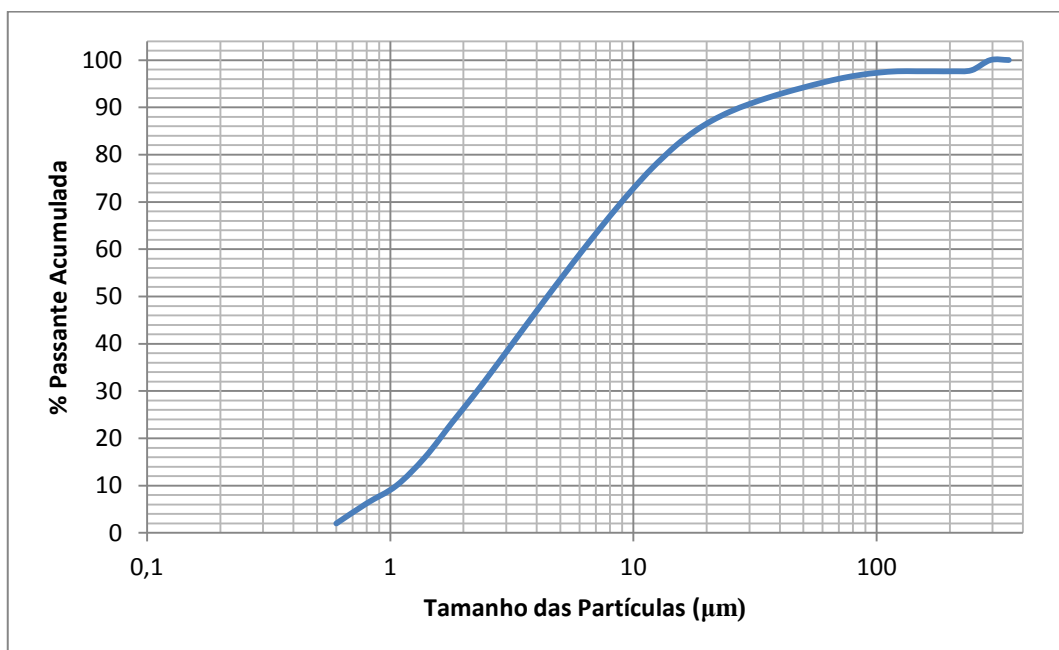


Gráfico 1 - Curva Granulométrica do Resíduo de Vidro laminado

Para a verificação da pozzolanicidade do resíduo foram realizados os ensaios determinados pelas normas NBR 5751 - Materiais pozzolânicos – Determinação da atividade pozzolânica - Índice de atividade pozzolânica com cal ⁽⁸⁾ e NBR 5752 – Materiais pozzolânicos – Determinação da atividade pozzolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozzolânica com cimento ⁽⁹⁾ e compará-los com os limites estabelecidos pela NBR 12653 – Materiais Pozzolânicos – Especificação ⁽¹⁰⁾ no LEMAC-UFES ambos baseados na resistência à compressão das argamassas.

Foi utilizado 234g de cada uma das quatro frações de areia padrão (1,2; 0,6; 0,3 e 0,15mm) beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a água utilizada foi fornecida pela concessionária pública de abastecimento e usada em quantidade suficiente para se obter um índice de consistência da argamassa em 225 ± 5 mm.

O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI. Apesar da norma NBR 5752 ⁽⁹⁾ determinar o uso do cimento CP I não foi possível utilizar esse tipo de cimento, pois o mesmo não se encontra disponível no mercado. Dessa forma, foi escolhido o CPV ARI para substituí-lo por ser o tipo de cimento com menor teor de adições. As características físico-químicas do cimento utilizado na pesquisa são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização do cimento CPV ARI

Propriedades Determinadas		Teores	Método de Ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Análises físicas				
Massa específica (g/cm ³)		3,05	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4767	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥3000
	Finura - resíduo na peneira 400#	2,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	133	NBR NM 65 (ABNT, 2002)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	187	NBR NM 65 (ABNT, 2002)	≤ 600
Análises química				
Perda ao fogo - PF (%)		3,68	NBR NM 18(ABNT, 2004)	≤ 4,5
SiO ₂ (%)		19,21	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Al ₂ O ₃ (%)		5,15	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Fe ₂ O ₃ (%)		2,90	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
CaO (%)		63,58	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
MgO (%)		0,78	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 6,5
SO ₃ (%)		2,76	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 3,5
K ₂ O (%)		0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Resíduo Insolúvel - RI (%)		0,92	NBR NM 15 (ABNT, 2004)	1,0
Resistência à compressão				
1dia (MPa)		27,90	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 14
3 dias (MPa)		39,30	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 24
7 dias (MPa)		44,20	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 34

Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim (2012).

A Cal utilizada foi a CH I conforme determinada pela norma NBR 5751 ⁽⁸⁾ com massa específica igual a 2,23g/cm³.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Índice de Atividade Pozolânica com cal (IAP-cal)

Os procedimentos para a preparação da argamassa seguiram o determinado pela norma NBR 5751 ⁽⁸⁾ e as proporções seguem na tabela 2.

Tabela 2 - Proporções dos materiais utilizados para preparação da argamassa

Material	Valores
CHI	104 g
Resíduo de Vidro Laminado	215,46 g
Areia Normal (IPT)	936 g
Água	190 g
Consistência	230 mm

Foram moldados três corpos de prova, os quais foram submetidos à cura nos próprios moldes durante sete dias, sendo que, durante as primeiras 24h eles permaneceram a uma temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e durante as 144h posteriores os corpos de prova foram mantidos a uma temperatura de $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ até 4h antes do ensaio de ruptura à compressão. Os resultados desse ensaio encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de resistência a Compressão Axial para verificação do IAP-cal

Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	Massa específica do RVL (g/cm^3)	Área específica do RVL (cm^2/g)
P1-CAL	2,01	2,11	4,55	2,31	9051,42
CP2-CAL	2,11				
CP3-CAL	2,20				

A norma NBR 12653 ⁽¹⁰⁾ estabelece que a resistência à compressão dos corpos de prova devem atingir, aos sete dias, um valor igual ou superior a 6,00 MPa. Das amostras ensaiadas nenhuma atingiu esse valor. Foi verificado nos corpos de prova antes do ensaio de compressão que os mesmos ainda encontravam-se úmidos o que pode ter colaborado para diminuição da resistência dos mesmos.

Índice de Atividade Pozolânica com cimento (IAP-cim)

Para execução desse ensaio foram preparadas duas argamassas, sendo uma de referência (sem substituição de resíduo de vidro laminado) e outra com substituição de 35% em volume de substituição do cimento pelo material pozolânico. As quantidades de materiais necessários para a preparação das argamassas seguem na tabela 4.

Tabela 4 - Proporção de materiais para moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	312	202,8
Material Pozolânico	-	82,71
Areia Normal	936	936
Água	159,63	159,69

As rupturas realizadas nos corpos de prova foram realizadas aos 28 dias conforme orienta a NBR 5752 ⁽⁹⁾ e os resultados são mostrados no gráfico 2. Foram preparados seis corpos de prova, sendo três unidades referentes à argamassa A, argamassa padrão (1PAD, 2PAD e 3PAD) e três unidades referentes à argamassa B, argamassa com resíduo (1RES, 2RES e 3RES).

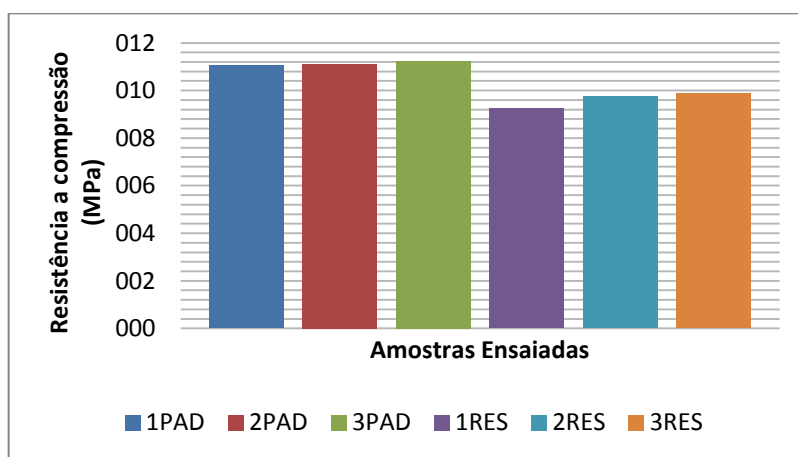


Gráfico 2 - Resistência à compressão para verificação do IAP-cim

Os valores médios das resistências à compressão bem como o índice de atividade pozolânica das amostras ensaiadas encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de Pozolanicidade com cimento Portland

Amostra	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	Índice de atividade Pozolânica (%)	Água Requerida (%)
Argamassa A	11,14	0,93	-	-
Argamassa B	9,62	3,9	86,36	100,04

Segundo a NBR 12653 ⁽¹⁰⁾ para as amostras de resíduo de vidro laminado serem consideradas materiais pozolânicos pelo ensaio de IAP-cim, devem apresentar índice de atividade pozolânica maior que 75%. Este índice é a relação entre a resistência dos corpos de prova com adição e a resistência dos corpos de

prova de controle. Conforme o resultado apresentado na tabela 5 confirma-se a pozolanicidade do resíduo através desse ensaio.

A água requerida para preparação da argamassa B foi praticamente igual a quantidade necessária para a preparação da argamassa A, dessa forma a quantidade de água não foi responsável pela diferença das resistências médias das argamassas produzidas.

CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados dos ensaios previstos na metodologia adotada são apresentadas a seguir as conclusões que a princípio são válidas apenas para as condições experimentais iguais as utilizadas, mas que servem como preparação para a realização de novas pesquisas.

Foram verificadas as características pozolânicas da amostra de resíduo de vidro laminado moído proveniente dos parabrisas de automóveis submetido aos ensaios determinados pelas normas NBR 5751 ⁽⁸⁾ e NBR 5752 ⁽⁹⁾. Os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 12653 ⁽¹⁰⁾ e verificou-se que para o IAP-cal os limites não foram atendidos, o que pode ter sido provocado pelo tempo insuficiente de cura.

Já para os resultados do IAP-cim o percentual atingido foi de 86,36%, valor superior aos 75% estabelecido pela norma e em concordância com os resultados de estudos anteriores consultados. Esse resultado pode ser devido à grande quantidade de sílica amorfa existente na composição do resíduo.

Os resultados encontrados indicam a viabilidade técnica do uso deste resíduo como material pozolânico na substituição parcial do aglomerante em concretos e argamassas de cimento Portland, porém outros estudos devem ser realizados de forma a conhecer melhor todas as propriedades do resíduo em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes pelo auxílio financeiro na forma de bolsa para o segundo autor e ao Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção do Centro

Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC – UFES) onde os ensaios de resistência à compressão foram realizados.

REFERÊNCIAS

- (1) GOBBI, A.; MATTANA, A. J.; MEDEIROS, de M. H. F. Uso de análise hierárquica para a escolha de adições pozolânicas para o concreto: Uma aplicação inicial. **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto**, Florianópolis, 2011.
- (2) ANUÁRIO ABIVIDRO 2008. Disponível em: <http://www.abividro.org.br>, acesso em 23 de outubro de 2010.
- (3) PARK, S. B.; LEE, B. C.; Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. **Cement and Concrete Research**, V.34, P.1145-1152, 2004.
- (4) CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, V.25, P. 197-201, 2005.
- (5) LAM, C. S.; POON, C. S.; CHAN, D.; Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass - ARS consideration. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p. 616-625, 2007.
- (6) ARAÚJO, A.P.; PERUZZI, A. de P.; DIAS, J.F. da SILVA, T.J. Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto**, Florianópolis, 2011.
- (7) GUIA DO VIDRO. Portal Guia do Vidro. Disponível em <http://www.guiadovidro.com.br/>, acesso em 28 de setembro de 2011.
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.
- (9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

(10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** – Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

(11) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579** – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

(12) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.