

# **Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias**

## **Characterization of the waste laminated glass windshields for use as a partial replacement of cement in cementitious matrices**

**Lorena Jordoni Simões; Aline Silva Sauer; Fernando Avancini Tristão; João Luiz Calmon; Geilma Lima Vieira**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo.*

*E-mail: lorenacivil@yahoo.com.br, alinesisa@hotmail.com, fernandoavancini@ct.ufes.br, calmonbarcelona@gmail.com, geilma.vieira@gmail.com*

**RESUMO:** Com a crescente preocupação quanto à melhoria da gestão dos resíduos sólidos, surge a busca de novas alternativas para a destinação final destes. A reutilização de resíduos incorporados a materiais de construção vem sendo apontada como uma destas alternativas. Dentre os resíduos gerados no Brasil, destacam-se os resíduos de vidro. O vidro laminado, utilizado no setor automotivo e da construção civil, possui reciclagem limitada devido à dificuldade de separar totalmente seus componentes, vidro plano e o polímero polivinilbutiral. A utilização do resíduo de vidro como adição mineral vem sendo estudada por diversos autores. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é caracterizar o resíduo de vidro laminado de parabrisas moído em granulometria inferior a 75  $\mu\text{m}$ , visando confirmar a viabilidade técnica para uso como material pozolânico em substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas. Os resultados indicam o potencial de utilização deste resíduo como adição mineral em matrizes cimentícias.

**ABSTRACT:** With increasing concern for improving the management of solid waste, is the search for new alternatives for the disposal of these. The reuse of waste incorporated into building materials has been identified as one of these alternatives. Among the waste generated in Brazil, highlight the waste glass. The laminated glass used in automotive and construction industries, recycling has limited due to the difficulty of completely separating its components, flat glass and polyvinyl butyral polymer. The use of waste glass as mineral admixture has been studied by various authors. Thus, the objective of this research is to characterize the residue laminated glass windshield ground into particle size less than 75 micron, to confirm the technical feasibility for use as pozzolanic material for partial replacement of Portland cement in concrete and mortar. The results indicate the potential of using this waste as mineral admixture in cement.

### **1. 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. 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 [1].

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 [2].

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 [3].

Dentre os mais variados resíduos gerados no Brasil, destacam-se os resíduos de vidro. Em 2011, estima-se que foram produzidos 3 milhões de toneladas de vidro, sendo a metade de vidros planos, utilizados principalmente pela construção civil e indústria automobilística. A indústria automobilística foi responsável pelo consumo de 10% da produção de vidros planos, utilizados habitualmente na composição de vidros laminados [4]. O vidro laminado é composto por duas ou mais camadas de vidro plano unidas pelo polímero orgânico denominado polivinilbutiral (PVB) e após a vida útil, devido à dificuldade de separar todo o PVB do vidro, a reutilização do resíduo de vidro é limitada e sua destinação ocorre geralmente em aterros. Sendo o vidro um material não biodegradável que leva de 2 mil a 1 milhão de anos para se decompor, sua disposição em aterros deve ser evitada [5].

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos utilizando diferentes tipos de resíduos de vidro incorporados em concretos e argamassas. Autores como Shi *et al.*[6], Sobolev *et al.*[7], Ismail e Al-Hashmi [8], Idir, Cyr e Tagnit-Hamou [9], Paiva *et al.*[10], Salomão *et al.*[11], Wang [12], Khmiri, Samet e Chaabouni [13], Matos e Souza-Coutinho [14] e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos [15], avaliaram a aplicação do resíduo de vidro como substituto do cimento Portland, confirmando o efeito *filler* e o potencial pozolânico que este resíduo apresenta quando utilizado em granulometria inferior a 75 $\mu$ m, devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição. Além disso, nesta granulometria o

resíduo de vidro tende a se tornar um inibidor da reação álcalis-sílica, uma reação deletéria que forma um gel expansivo provocando danos a matriz cimentícia [10-14].

Com base nas pesquisas apresentadas, o objetivo deste estudo é caracterizar o resíduo de vidro laminado de parabrisas moído em granulometria inferior a 75  $\mu$ m, visando confirmar a viabilidade técnica de uso deste resíduo como material pozolânico na substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de vidro laminado (RVL) utilizado foi cedido por uma usina de reciclagem localizada em São Paulo - Brasil. Essa usina recebe o vidro laminado de refugos (parabrisas quebrados ou trincados) e processa este material através de moagens para separar a película de PVB do vidro. Tal procedimento não consegue separar totalmente estes materiais, por isso o resíduo de vidro resultante ainda possui uma pequena parcela de PVB em sua composição (Figura 1).



Figura 1 – RVL ao chegar ao laboratório

Já no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo - Brasil (LEMAC – UFES), o RVL foi homogeneizado, seco em estufa por 24h à 110°C e depois moído em um moinho de argolas durante 40 segundos cada fração de 50g de resíduo. A metodologia desse processo foi determinada de forma que a finura do RVL se equiparasse com a finura do cimento Portland (Figura 02) determinada pela NBR 11579 [16].



Figura 2 - RVL após a moagem no moinho de argolas

O RVL foi submetido a uma série de testes, a fim de determinar suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A figura 3 apresenta um organograma das fases de caracterização do resíduo.

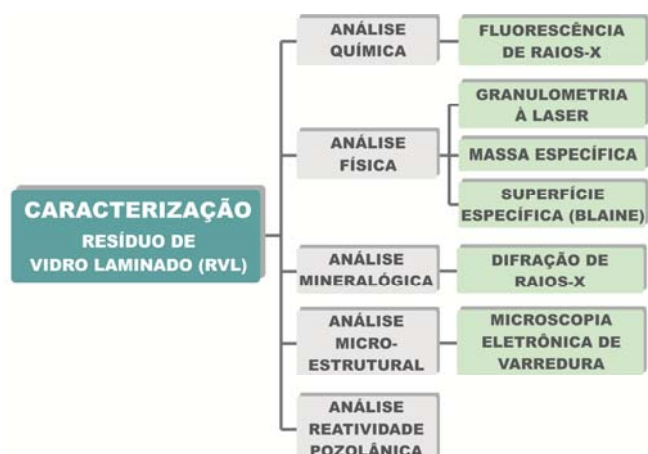


Figura 3 - Organograma das fases de caracterização do RVL

A análise química do RVL foi feita pelo Laboratório de ensaios de materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER) em Natal – RN, através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX) utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

Para análise física, o resíduo foi submetido a um ensaio de granulometria à laser (granulômetro Sympatech), ensaio de determinação de massa específica conforme a NBR NM 23 [17] e ensaio de determinação da superfície específica pelo

método de Blaine, normatizado pela NBR NM 76 [18].

Já a análise mineralógica foi feita através da técnica de difração de raios-X (DRX), utilizando o equipamento XRD 6000 da Shimadzu, no Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, e as imagens microestruturais no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO 40 XVP, no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

Para a verificação da pozolanicidade do resíduo foram realizados os ensaios determinados pelas normas NBR 5751 [19] e NBR 5752 [20] e compará-los com os limites estabelecidos pela NBR 12653 [21] no LEMAC-UFES, ambos baseados na resistência à compressão das argamassas.

A Cal utilizada foi a CH I conforme determinada pela norma NBR 5751 [19] com massa específica igual a 2,23g/cm<sup>3</sup>.

O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI. Apesar de a norma NBR 5752 [20] determinar o uso do cimento CP I, não foi possível utilizar esse tipo de cimento, pois o mesmo não se encontra disponível com facilidade 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 foram cedidas pelo fabricante e estão em conformidade com as normas brasileiras.

### 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios caracterização do RVL foram comparados com as características do cimento CPV ARI, uma vez que o intuito desta pesquisa é o estudo da viabilidade técnica do uso deste resíduo como substituto parcial do cimento Portland em matrizes cimentícias.

A tabela 1 apresenta os resultados das análises química e física do RVL, comparando-os com as características do cimento CPV ARI.

Tabela 1 - Composição química e física do RVL e do CPV ARI

Composto	RVL	CPV ARI
SiO <sub>2</sub> (%)	56,77	19,21
CaO (%)	5,64	63,58
MgO (%)	3,67	0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,07	5,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,29	2,9
K <sub>2</sub> O (%)	0,16	0,8
SO <sub>3</sub> (%)	0,16	2,83
Na <sub>2</sub> O (%)	15,41	-
Perda ao fogo (%)	11,81	3,68
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	3,05
Superfície específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	7833	4767

**Nota:** Os dados relativos ao cimento CPV ARI foram cedidos pela empresa fabricante, correspondente ao lote do cimento utilizado.

Os óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO fazem parte do sistema ternário da composição química dos principais cimentos encontrados no mercado [22]. Ao observar a composição química do RVL, nota-se que estes óxidos somados chegam a aproximadamente 70% do total, o que indica o RVL como um material aceitável para fins cimentantes.

Ao analisar os demais componentes do RVL, observa-se altos teores de Na<sub>2</sub>O e MgO. Estes altos teores também foram observados na composição química dos resíduos de vidro estudados por Khmiri, Samet e Chaabouni [13], Matos e Souza-Coutinho [14] e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos [15]. Estes óxidos são responsáveis pela reação álcali-agregado, que causam expansões na matriz cimentícia. Entretanto, estes autores verificaram que apesar do alto conteúdo alcalino, a expansão devido à reação álcali-silica (RAS) foi significativamente reduzida com a incorporação do resíduo de vidro em argamassas [13-15]. Isso ocorre, pois o consumo do álcali na formação do C-S-H durante a reação pozolânica antecede a RAS, não sobrando álcali suficiente para induzir essa reação deletéria [14].

Além disso, o percentual de perda ao fogo encontrado no RVL também foi muito alto, aproximadamente três vezes o percentual encontrado para o cimento CPV ARI. Este alto percentual pode ser atribuído à quantidade de PVB, material orgânico, na amostra do RVL ensaiada.

A caracterização física do RVL, apresentada na tabela 1, mostra que a massa específica do RVL é menor que a do cimento, dado que deve ser levado em consideração durante a determinação da dosagem dos materiais para a confecção do traço da matriz. Além disso, esta diferença de massa específica tende a influenciar diretamente a massa específica de concretos e argamassas com incorporação do resíduo. Já o resultado encontrado para superfície específica pelo método Blaine indica que este resíduo é mais fino que o cimento CPV ARI, possuindo superfície específica, aproximadamente, duas vezes superior a deste cimento.

O ensaio de granulometria a laser, ao qual o RVL foi submetido, possibilitou a constatação de que 98% das partículas estão abaixo de 75 µm, sendo que 90% são menores que 25 µm. A figura 4 mostra a comparação entre o tamanho das partículas do RVL e do cimento através da sobreposição das duas curvas granulométricas.

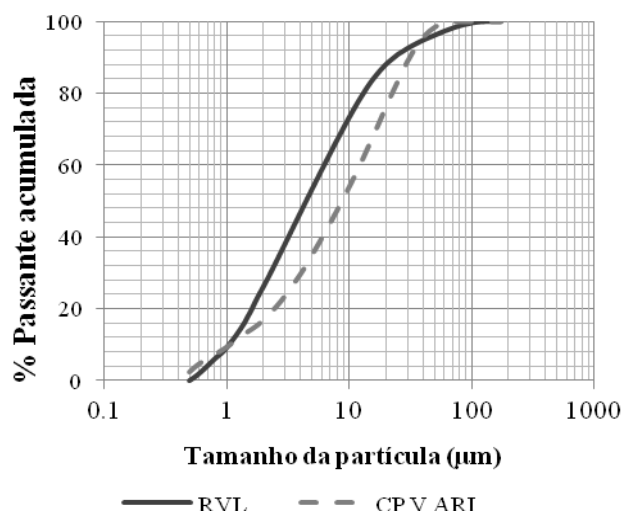


Figura 4 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica do RVL e do cimento CPV ARI

Mesmo apresentando distribuição granulométrica semelhante a do cimento, o RVL apresentou superfície específica maior, o que pode ser atribuído a maior irregularidade da partícula de vidro em relação à partícula do cimento, como pode ser visto nas micrografias apresentadas na figura 5. Estes resultados corroboram com os encontrados por Shi *et al.* [6], Paiva *et al.* [10] e Matos e Souza-Coutinho [14].

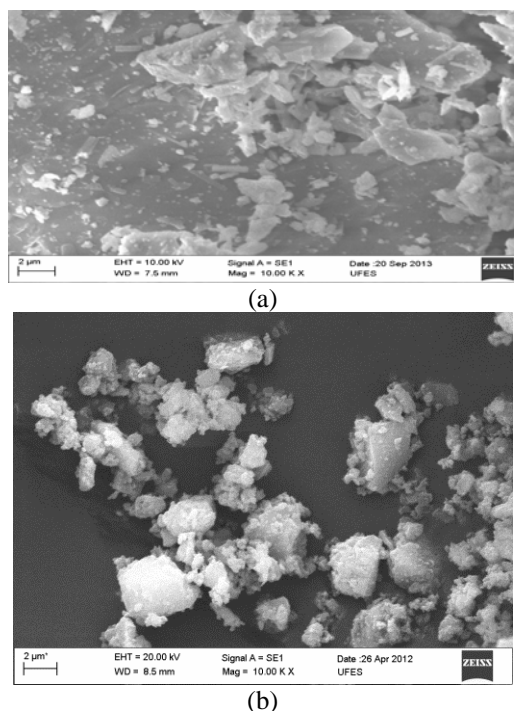


Figura 5 - Micrografias obtidas por MEV das partículas de cimento (a) e RVL (b) com ampliação de 10000X

Por meio do difratograma de raios-X, mostrado na figura 6, foi possível observar que o RVL está predominantemente no estado amorfo, e por ter um alto teor de sílica este resíduo se apresenta como um material potencialmente pozzolânico, corroborando com os estudos de Shi *et al.* [6], Ismail e al-Hashmi [8], Idir, Cyr e Tagnit-Hamou [9], Paiva *et al.* [10], Khmiri, Samet e Chaabouni [13], Matos e Souza-Coutinho [14] e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos [15].

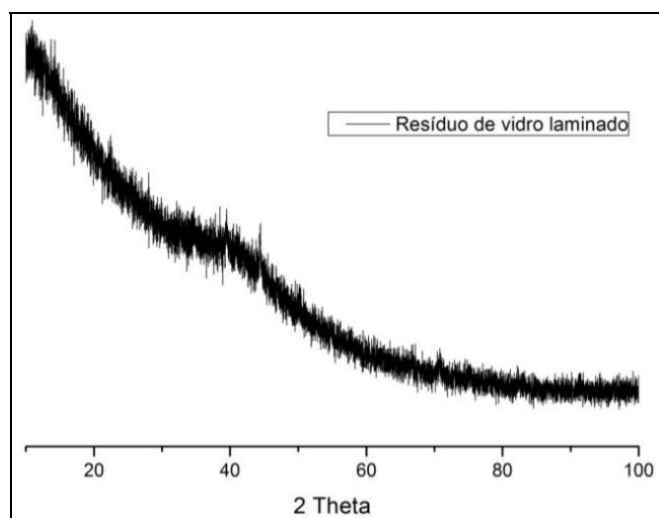


Figura 6 - Difratograma de raios-X do RVL

Os resultados encontrados na caracterização química e mineralógica, e a fina granulometria em

que o RVL será utilizado, indicam que este material tende a possuir alta atividade pozzolânica.

Para confirmação desta característica foram realizados ensaios de determinação da atividade pozzolânica com cal e cimento determinados, respectivamente, pelas normas NBR 5751 [19] e NBR 5752 [20], ambos baseados na resistência à compressão axial das argamassas. Os resultados destes ensaios bem como as características físicas e químicas do RVL foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 12653 [21] para constatação desta hipótese.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 2, o RVL pode ser classificado como material pozzolânico classe E, se desconsiderados os resultados de perda ao fogo, conteúdo alcalino e o índice de atividade pozzolânica com cal.

Tabela 2 - Comparação das propriedades do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 [21]

Propriedades	Limites - NBR 12653 para diferentes classes de material pozzolânico			RVL
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín	70	70	50	63,13
SO <sub>3</sub> , % máximo	4,0	5,0	5,0	0,16
Teor de umidade, % máximo	3,0	3,0	3,0	3,67
Perda ao fogo, % máximo	10,0	6,0	6,0	11,81
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx	1,5	1,5	1,5	15,41
% máxima retida na peneira 45 µm	34	34	34	4,5
Índice de atividade pozzolânica:				
- com a cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0	4,77
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	75	75	75	86,36
- água requerida, % máximo	115	110	110	100,04

Fonte: Adaptado de NBR 12653 [21]

É importante ressaltar que foi verificado no ensaio de determinação do índice de atividade pozzolânica com cal que os corpos de prova, aos sete dias, ainda encontravam-se úmidos (figura 7) mesmo seguindo os procedimentos de cura determinados pela NBR 5751 [19]. Este fato pode ter colaborado para diminuição da resistência dos mesmos.





Figura 7 – Corpos de prova úmidos aos sete dias

Estes resultados estão de acordo com os valores descritos por Shi *et al.* [6], Paiva *et al.* [10], Khmiri, Samet e Chaabouni [13], Matos e Souza-Coutinho [14] e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos [15], que encontraram em suas pesquisas com diferentes tipos de resíduos de vidro e granulometrias (sempre inferiores à  $75\mu\text{m}$ ), índices de atividade pozolânica com cimento variando entre 85 e 104%, portanto, superiores ao mínimo determinado pela norma aos 28 dias, para materiais pozolânicos. Além disso, de acordo com Shi *et al.* [6], Idir, Cyr e Tagnit-Hamou [9] e Pereira -de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos [15] quanto menor o tamanho da partícula do resíduo maior o índice de atividade pozolânica do material.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados observados é possível concluir que:

- Os ensaios de caracterização do resíduo de vidro laminado permitiram identificar que quanto às características físicas, ao equiparar a distribuição granulométrica do resíduo com a do cimento, com 98% das partículas abaixo de  $75\mu\text{m}$ , o resíduo passou a apresentar superfície específica significativamente maior que a do cimento, devido à maior irregularidade da partícula do resíduo de vidro;
- A caracterização química deste resíduo confirmou este material como aceitável para fins cimentantes, apesar do alto teor alcalino. O que não foi preocupante para esta pesquisa, pois segundo a revisão bibliográfica [14], o consumo do álcali na formação do C-S-H durante a reação pozolânica antecede a reação deletéria conhecida como álcali-sílica;
- O percentual de perda ao fogo encontrado na amostra do resíduo de vidro laminado também foi alto, aproximadamente três vezes o percentual encontrado para o cimento CP V

ARI utilizado, o que foi atribuído a presença de PVB, material orgânico, na amostra do resíduo;

- A caracterização mineralógica, feita por difração de raios-X, mostrou que o resíduo de vidro laminado está predominantemente no estado amorfo, requisito básico para que um material seja considerado pozolânico;
- De acordo com a norma brasileira NBR 12653 [21] quanto às características físicas, químicas e mineralógicas, este resíduo finamente moído, pode ser considerado um material pozolânico, se o conteúdo alcalino for desconsiderado, atingindo um índice de atividade pozolânica com cimento igual a 86,36%, ou seja, superior ao mínimo estabelecido pela norma brasileira.

Os resultados encontrados indicam a viabilidade técnica do uso deste resíduo como material pozolânico na substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas, tornando-o uma alternativa de utilização como adição mineral.

#### 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 a os ensaios de caracterização física do resíduo foram realizados.

#### REFERÊNCIAS

1. JOHN, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 113p. Tese (Livre Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.
2. SHI, C.; ZHENG K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 234-247, 2007.
3. 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. In: 53° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. *Anais*. Florianópolis: IBRACON, 2011.

4. MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. *Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos*, Brasília, 2012.
5. ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. *ANUÁRIO ABIVIDRO 2008*. Disponível em: <http://www.abividro.org.br>, acesso em 23 de outubro de 2010.
6. SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H.; Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, v.35, p. 987-993, 2005.
7. SOBOLEV, K.; TÜRKER, P.; SOBOLEVA, S.; ISCIOGLU, G. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. *Waste Management*, v. 27, p. 971-976, 2007.
8. ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A.; Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, v.29, p. 655-659, 2009.
9. IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1309-1312, 2010.
10. PAIVA, O. A.; CORDEIRO, G. C.; ROCHA, F. S.; LIMA, S. P. B.; VASCONCELOS, R. P.; FILHO, R. D. T. Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. *Anais*. Fortaleza: IBRACON, 2010.
11. SALOMÃO, M. C. F.; DIAS, J. F.; MARTINS, J. A. L. G.; SILVA, T. J. Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. *Anais*. Fortaleza: IBRACON, 2010.
12. WANG, H. The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. *Construction and Building Materials*, v.25, p. 791-797, 2011.
13. KHMIRI, A.; SAMET, B.; CHAABOUNI, M. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. *Construction and Building Materials*, v. 28, p. 680-686, 2012.
14. MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 205-215, 2012.
15. PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 197-203, 2012.
16. 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.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23* – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 76* – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5751* – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.
20. 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.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653* – Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
22. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutural, propriedades e materiais*, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008.