

# Physical-mechanical potential properties of wastes from glass lapping to produce mortar as partial replacement of the conventional aggregate

## *Propriedades físico-mecânicas de resíduos da lapidação de vidro utilizados em argamassa cimentícia como substituinte parcial do agregado convencional*



U. G. RIBEIRO <sup>a</sup>  
[prof.umberto.ribeiro@gmail.com](mailto:prof.umberto.ribeiro@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9444-745X>

D. F. SANTOS <sup>a</sup>  
[dirceufernandes@live.ca](mailto:dirceufernandes@live.ca)  
<https://orcid.org/0000-0001-8403-2701>

### Abstract

Glass lapping residues (RLV) are fine tailings from the processing of glass for civil construction, commonly non-recyclable. The present study analyzed the use of these residues in Portland cement mortar composition, partially replacing the conventional aggregate, aiming at better compaction. Percentages of residues were adopted at 0% (reference), 5%, 10% and 20% by mass, replacing the fine conventional aggregate (sand). The binder used was Portland cement CP IV-32. The RLV and fine aggregate were submitted to physical tests, through grain size analysis, grain shape and specific mass; RLV and cement, in turn, submitted to chemical analysis by X-ray spectrometry, to identify the compounds. To evaluate the compressive strength and compaction analysis of the composite in the hardened state, cylindrical specimens 50x100 mm were produced. ANOVA (Analysis of Variance) and Coefficient of Variation showed that the RLV added in 5% resulted in lower voids indexes and moisture absorption than the conventional one. The tests also showed best mechanical performance on compression analysis (30,2 MPa) for 5% of residues in the composite, surpassing the conventional one.

**Keywords:** compaction of mortars, alternative materials, glass lapping wastes, recycling.

### Resumo

Resíduos da lapidação de vidros (RLV) são rejeitos finos do beneficiamento de vidros para construção civil, comumente descartados e não recicláveis. O presente estudo analisou a utilização destes resíduos na composição de argamassa de cimento Portland, substituindo parcialmente o agregado convencional, visando uma melhor compactação. Adotaram-se percentuais de resíduos em 0% (referência), 5%, 10% e 20% em massa, substituindo o agregado miúdo (areia). O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP IV-32. O RLV e agregado miúdo foram submetidos a ensaios físicos, através de análise granulométrica, forma dos grãos e massa específica; RLV e cimento, por sua vez, submetidos à análise química por espectrometria de raios-X, para identificação dos compostos. Para avaliação da resistência à compressão e análise da compactação do compósito em estado endurecido, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos 50x100 mm. ANOVA (Analysis of Variance) e Coeficiente de Variação mostraram que o RLV adicionado em 5% resultou menores índices de vazios e absorção de umidade do que o convencional. Os testes também mostraram que 5% do resíduo no compósito apresenta o melhor desempenho mecânico por compressão (30,2 MPa), superando o convencional.

**Palavras-chave:** compactação de argamassas, materiais alternativos, resíduos de lapidação de vidro, reciclagem.

<sup>a</sup> Faculdade de Rondônia, Coordenação de Pesquisa e Extensão, Porto Velho, RO, Brasil.

## 1. Introdução

A legislação brasileira fomenta a adoção de práticas de descarte, para resíduos sólidos, voltadas para a não degradação ambiental, estimulando a sua não geração, mas na impossibilidade, recomenda o reuso, evitando a disposição final inadequada [1].

O processamento (produção) de vidros na construção civil, neste contexto, gera basicamente dois tipos de resíduos: os “cacos” ou lascas graúdos (que podem ser reciclados pela indústria vidreira na forma de utensílios domésticos, embalagens, etc) e um pó fino, resultado da lapidação, furação e acabamento das placas de vidro, os quais são rejeitados nas recicladoras por causarem danos aos fornos, devido à finura do material [2].

A reutilização dos resíduos finos pode oferecer vantagens como redução dos custos, diminuição do impacto ambiental negativo e redução do consumo de recursos naturais [3], objetivos indiretos neste trabalho.

No Estado de Rondônia, Brasil, os resíduos finos são gerados por três indústrias de processamento de vidros, atualmente. Em Porto Velho, localizada ao norte do Estado, informações foram coletadas em uma indústria local acerca da produção, processamento de vidros e geração de resíduos finos. De acordo com as informações obtidas do corpo técnico da Empresa, o resíduo de lapidação de vidro (RLV) é um rejeito de máquinas lapidadoras e de corte, que fazem o desbaste e acabamento na lateral das chapas e na perfuração do vidro. Segundo a Empresa, gera-se mensalmente cerca de 800 kg de RLV, o que totaliza, aproximadamente, 30 ton/ano, processados em 3 (três) máquinas lapidadoras no Estado.

Na região mencionada a destinação do material residual segue um percurso que começa pela coleta e armazenamento temporário no local de origem, sendo periodicamente retirado através de caçambas com volume entre 2-3 m<sup>3</sup>, e finalmente, conduzido a um depósito a céu aberto, lançado, algumas vezes, junto com os grãos de maiores dimensões. Em visita ao depósito, foi obtida a informação de que há rejeição do material pela indústria vidreira, inclusive daquelas porções equivocadamente misturadas com o material graúdo durante o armazenamento.

Com o propósito de evitar o descarte dos resíduos não-recicláveis de maneira inapropriada, estudos tem sido levados a efeito com os resíduos de vidros, principalmente como substituinte ao aglomerante (dado sua baixa granulometria e propriedades químicas de material pozolânico), e ainda aproveitando os grãos acima de 75 µm como agregado miúdo, porque assim se comporta o material, neste diâmetro dos grãos [4]; o agregado fino também pode ajudar na compactação, preenchendo os vazios entre os grãos maiores, não sendo indicada, no entanto, a sua aplicação como agregado graúdo [5].

A utilização desses rejeitos possui dupla vantagem – pode reduzir o consumo do cimento e também pode tornar o custo direto da argamassa mais baixo [6] – considerando ainda, a possibilidade de diminuição do consumo do agregado natural.

Cabe ressaltar que a redução do cimento Portland vai ao encontro das pretensões do desenvolvimento ecologicamente correto, uma vez que a produção do cimento responde por 5% de todo o CO<sub>2</sub> produzido mundialmente, além de consumir grande quantidade de energia na sua produção [7].

Além da economia de aglomerante, o pó fino de vidro colabora também na resistência final, já que possui propriedades cimentantes de um material pozolânico [8]. O ganho de resistência tende a aumentar na proporção que o material se torna mais fino [5].

Considerando que a otimização da granulometria pode alterar a densidade de empacotamento favorecendo a redução dos espaços vazios [9], optou-se por verificar, neste estudo, qual o grau de empacotamento (compactação) proporcionado pela adição do pó fino de vidro em determinada faixa granulométrica da areia selecionada.

A densidade de empacotamento é literalmente definida como “a fração  $h$  de um volume preenchido por uma determinada coleção de sólidos” [10].

Londero [9] explica que a densidade de empacotamento é item essencial para a determinação de uma aplicação de agregados conveniente com redução dos índices de vazios e consumo otimizado de cimento nos compósitos; e esta (densidade de empacotamento) possui relação direta com as diversas classes granulométricas, possivelmente encontradas em determinada areia.

Porém, uma distribuição granulométrica, baseada em diâmetros de grãos reduzidos, pode acarretar inconvenientes atrelados ao aumento da superfície específica e, conseqüentemente, alta demanda de água na mistura ou dificuldades na trabalhabilidade [11]. Diante da possibilidade de prejuízo à trabalhabilidade, o aumento do fator água/cimento ( $a/c$ ), para corrigir este fato, tende a impactar o desempenho mecânico ([6]; [12]), sendo alternativa viável a utilização de aditivo polifuncional.

O pó fino de vidro, na mistura cimentícia, tem propriedades reconhecidas, relacionadas com a pozolanicidade do material; ou seja, favorece o aumento da resistência e durabilidade do material compósito ([13]; [14]). Mas, quimicamente, deve ser motivo de atenção, uma vez que as reações álcalis-sílica tendem a comprometer a hidratação do cimento na combinação com RLV, e dada a presença dos óxidos Na<sub>2</sub>O na composição, podem gerar reações de expansibilidade do material [15].

Outro fator a ser levado em consideração é a forma dos grãos. Este fator pode influenciar a trabalhabilidade e consistência, uma vez que os grãos lamelares e pouco arredondados tornam-se menos fluidos [16]. No entanto, a heterogeneidade na forma dos grãos pode trazer benefícios na adesividade mecânica entre agregados e a matriz cimentícia, aumentando a sua força de ligação [17].

O estudo da faixa granulométrica adequada deve contribuir com a compactação do compósito, ou seja, preferencialmente composta por agregados finos. Neste sentido, O. Ribeiro [18] selecionou cerca de 90% de RLV com diâmetros menores que 101,2 µm em suas pesquisas. Assim, o diâmetro dos grãos pode ser facilmente definido, já que o processo de moagem pode ser realizado por diversos equipamentos como: moinhos de bolas, pilões manuais e também utilizando peneiras padronizadas, nas dimensões desejadas [3].

Já Arnold [19], em testes com argamassas com teor de agregados finos (filer) aumentados em 10%, verificou que quanto menor a dimensão do material, mais ar incorporado, já no estado fresco. Este comportamento do material assinala a necessidade de otimização da fluidez e trabalhabilidade, assim como a busca de uma relação  $a/c$  ideal, fatores que podem levar a melhores resultados, já no processo de mistura [12].

Quanto ao desempenho mecânico, nos testes de Turgut [4] em blocos produzidos com de pó de vidro, foi obtido aproximadamente 25 MPa de resistência no compósito, embora naquele estudo houve adição de cinza volante e um tipo de pó oriundo de trituradores de calcário, visando alcançar melhores resultados. Em outra pesquisa, Aliabdo [20] testou argamassa com 25% de pó de vidro, alcançando resistência à compressão de 24 MPa, em 7 dias de cura; Já Simões [13] obteve melhores resultados com máximo de 15% de adição, em cerca de 31 MPa, aos 28 dias; e ainda, Islam [21], para 25% de resíduos aos 28 dias, alcançou cerca de 30 MPa.

Visando determinar o desempenho geral do produto, este trabalho estudou algumas características físicas, químicas (identificação dos compostos) e mecânicas dos resíduos finos da lapidação de vidros, adicionados à argamassa cimentícia, substituindo parte do agregado miúdo natural, com a finalidade de reduzir a porosidade e, hipoteticamente, melhorar a compactação. Esta hipótese se refletiu diretamente no desempenho mecânico, que também foi avaliado.



**Figura 1**  
RLV seco ao ar, após 20 dias da coleta

## 2. Materiais e programa experimental

### 2.1 Caracterização dos materiais

#### 2.1.1 Cimento Portland

O CP IV-32 escolhido possui ampla disponibilidade regional, produzido pela Votorantim Cimentos – Unidade Porto Velho. Foram realizados ensaios para determinação do módulo de finura, por meio de peneiramento na peneira de malha 75  $\mu\text{m}$  [22] e determinados os tempos de pega por meio do aparelho de Vicat [23]. Foi realizada caracterização química por fluorescência de raios-X, e identificados teores dos constituintes químicos do cimento para posterior comparação com a composição química do RLV.

#### 2.1.2 RLV

Os resíduos da lapidação foram coletados junto à ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), em quantidade aproximada de 50 kg, em estado pastoso, colocados em repouso à sombra por 20 dias, onde adquiriram consistência sólida pela secagem em temperatura ambiente; posteriormente, reduzidos à forma de torrões (Figura 1).

Para caracterizar a finura do RLV, uma vez destorroado e moído através de um moinho de grãos, foi realizado o procedimento descrito na NBR 9289 [24] – peneiramento por lavagem, utilizando-se as peneiras de malhas 75  $\mu\text{m}$  (nº 200) e 300  $\mu\text{m}$  (nº 50). Utilizou-se o mesmo procedimento para finura da cal hidratada, uma vez que, depois de moído, o RLV possui finura semelhante (dado que não há padronização específica para a finura do resíduo). A amostra para obter-se o índice de finura foi de 50g passante na malha 600 $\mu$ . A fração do pó selecionada para utilização foi aquela passante na peneira com malha de 300  $\mu\text{m}$ .

Com a finalidade de interpretar melhor a adequação entre grãos de resíduos e de areia, foi conveniente observar, por microscopia ótica aumentada em 400x, a forma final dos grãos a ser utilizados, após moagem e peneiramento, cuja imagem é apresentada e discutida mais adiante, neste trabalho.

A massa específica destes resíduos foi obtida através do método do frasco de Le Chatelier, utilizando como líquido de imersão o querosene comum (NBR NM 23, [25]).

Análise química e de perda ao fogo do RLV foram solicitadas à Universidade Federal do Paraná (UFPR), sobre uma amostra (200g) do material, moído e passante na peneira de malha 300  $\mu\text{m}$ , fração a ser aplicada nos estudos. Estas análises visaram determinar se o RLV agrega componentes químicos incompatíveis com a hidratação e a química do cimento ou com ganho de resistência para o compósito. Os ensaios foram desenvolvidos através de fluorescência de raios-X, em equipamento Espectrômetro PANalytical Axios Max.

#### 2.1.3 Agregado miúdo

A areia (agregado miúdo natural) utilizada foi extraída do Rio Candeias no município de Candeias do Jamary, RO (distante 23 km de Porto Velho), coletada diretamente do local de extração (8°47'53.5"S 63°42'47.3"W), visando obter areia com menor teor

**Tabela 1**

Definição dos traços para a produção dos compósitos, com teores referentes à massa do cimento

Mistura	Teores cimento: [areia:RLV] + a/c + aditivo	Descrição
RLV0	1:[3:0] + 0,48 + 0,008	Referência
RLV5	1:[2,85:0,15] + 0,48 + 0,008	5% resíduo
RLV10	1:[2,70:0,30] + 0,48 + 0,008	10% resíduo
RLV20	1:[2,40:0,60] + 0,48 + 0,008	20% resíduo

de impurezas possível. Foram coletados aproximadamente 50 kg do agregado miúdo em pilhas armazenadas no local, tendo o cuidado de ensacar amostras de pelo menos duas pilhas distintas, visando uma melhor representatividade do material. Foram obtidas as propriedades de análise granulométrica por peneiramento (NBR NM 248, [26]) e massa específica através do frasco de Chapman (NBR 9776, [27]).

Visando uma possível aplicação do material compósito em revestimentos, em substituição à argamassa convencional, foi utilizada a faixa granulométrica (NBR 7211, [28]) do agregado convencional passante na peneira 2,36 mm para a mistura. Esta fração pode favorecer uma melhor compactação, combinada com o fino diâmetro do RLV. Matos [8] analisou aplicação com demanda considerável de agregados mais finos ( $\cong 2,36$  mm) em contribuição para melhorar desempenho dos concretos autoadensáveis.

## 2.2 Procedimentos experimentais

### 2.2.1 Estudo de dosagem e produção do compósito

A Tabela 1 apresenta a definição das misturas testadas com partes das respectivas matérias primas. Utilizaram-se, para a produção dos corpos de prova, os procedimentos padronizados, seguindo a relação a/c de 0,48 e do traço de 1:3 (NBR 7215, [29]).

Para a parte de aglomerante relacionou-se as partes de agregados (identificados na Tabela 1 com “[ ]”), sendo 0% de RLV na mistura de referência (RLV0), chegando a 20% do resíduo para a maior quantidade em massa (RLV20), substituindo parcialmente a massa do agregado miúdo. Observe-se que a soma das partes de agregados, para todas as misturas, conserva a massa definida na mistura de referência. Os limites percentuais para as misturas de resíduos seguem outros trabalhos já realizados ([4]; [12]; [20]).

Em mistura inicial experimental, devido à indisponibilidade de equipamento para o teste da mesa de consistência (*flow table*) [30], verificou-se que havia alta demanda de água pelos agregados, perceptível no processo de amassamento, trazendo dificuldades quanto à trabalhabilidade. Assim, adotou-se teor de aditivo plastificante arbitrado em 0,8% da massa de cimento (limite de 1% recomendado pelo fabricante). Foi escolhido o aditivo Master-Polyheed® 30, utilizado na produção de concretos e argamassas usinados. Este aditivo possui base química em lignosulfonatos (melhora a coesão e diminui a segregação), e densidade entre 1,15 e 1,19 (g/cm<sup>3</sup>) [31].

**Tabela 2**

Dosagem, em massa, dos componentes das misturas (g)

Mistura	RLV0	RLV5	RLV10	RLV20
Cimento	1500	1500	1500	1500
RLV	0	225	450	900
Areia	4500	4275	4050	3600
Água	720	720	720	720
Plastificante	12	12	12	12

A densidade de empacotamento e as massas unitárias foram obtidas utilizando-se recipiente cilíndrico com volume de 25 cm<sup>3</sup>, e ensaiados, um a um, a areia, o RLV e as misturas RLV5, RLV10 e RLV20; a massa unitária obtida pelo método A (compactada) descrito na NBR NM 45 [32] e a densidade de empacotamento pela Equação 1, para cada material e para as misturas, conforme o percentual de participação das fases (0, 5, 10 e 20%), sendo somadas  $\beta_{[i]}$  parciais para definir  $\beta_{total}$  de cada mistura [33], conforme Equação 2.

$$\beta = 1 - \left[ \frac{\gamma - \rho}{\gamma} \right] \quad (1)$$

$$\beta_{total} = \beta_{areia[i]} + \beta_{RLV[i]} \quad (2)$$

Onde,

$\beta$  é a Densidade de empacotamento

$\gamma$  é a Massa específica real

$\rho$  é a Massa unitária

[i] = percentual de contribuição de cada fase no compósito.

Para determinar as propriedades físicas e mecânicas do compósito foram produzidos corpos de prova cilíndricos 50x100 mm (diâmetro da base x altura). As misturas foram preparadas em misturador mecânico para argamassas, com a fração unitária do cimento definida em 1500g (Tabela 2), suficiente para moldar, com cada mistura, 10 corpos de prova cilíndricos, perfazendo total de 40 espécimes entre RLV0 e RLV20. Havendo material excedente após a moldagem de cada série, o mesmo foi descartado.

Uma vez moldados os corpos de prova, após 24h foram desmoldados e imediatamente submetidos a cura em tanque de imersão em água, permanecendo imersos por 25 dias, findos os quais, foram realizadas análises físicas não destrutivas, antes dos ensaios destrutivos.

### 2.2.2 Análise física do compósito endurecido

Os procedimentos para caracterização física foram realizados seguindo-se a prescrição na NBR 9778 [34]. Para os testes, os corpos de prova, em número de três exemplares para cada mistura, foram inicialmente secos em estufa, por 24h, em temperatura de 110±5° C. O método utilizado foi a sequência de determinações dos índices por imersão dos corpos de prova em água (pesagem hidrostática); inicialmente com pesagem a seco, depois saturação em água por 24h (imersão), pesagem imersa em água e pesagem saturada com superfície seca, registrando-se as massas em cada pesagem.

**Tabela 3**

Composições químicas dos CP IV-32 e RLV

Material	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Perda ao fogo
CP IV - 32 (%)	1,59	11,35	35,63	4,60	40,50	3,40	-	-
RLV (%)	2,50	0,80	67,00	0,30	10,00	0,50	10,80	7,74

### 2.2.3 Análise mecânica do compósito endurecido

Testes de desempenho mecânico foram realizados para determinar a influência do RLV na resistência à compressão do material convencional. Os corpos de prova cilíndricos 50x100 mm foram submetidos à compressão axial, sendo em número de 10 (dez) testes para cada tipo de mistura.

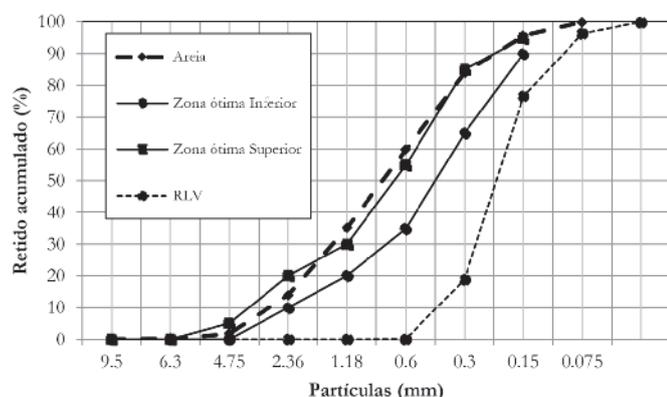
Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na idade de 28 dias de cura, no Laboratório de Ensaios Físicos da Votorantim Cimentos – Unidade Porto Velho. Os exemplares foram preparados, conforme prescrito na NBR 5738 [35]. A máquina utilizada foi uma prensa Toni Technik, com capacidade de carga até 300 kN, configurada para aplicação de carga a uma velocidade constante de 0,25 Mpa/s.

## 3. Resultados e discussões

### 3.1 Propriedades dos materiais

O cimento Portland CP IV-32 utilizado neste estudo mostrou uma composição química com os níveis percentuais apresentados na Tabela 3, compatíveis com as especificações da NBR 5736 [36], juntamente com os resultados da análise química do RLV, para efeitos de comparação.

Os componentes silicoaluminosos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub>), característicos do material pozolânico, participam com cerca de 47 % na composição do cimento, não excedendo os valores normativos especificados entre 15-50% [36]. Como a adição do RLV aumenta o teor da sílica na mistura (Tabela 3), a pozolanicidade pode ficar aumentada [13]. Já as reações álcalis-sílica podem gerar expansibilidade do material, devido à presença do sódio [15].



**Figura 2**  
Curva granulométrica agregado miúdo e RLV

Quando comparado com outras classes de materiais pozolânicos [37], o RLV alcançou 68,3% para o total dos compostos SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, contra os 50% requeridos para material pozolânico (para materiais pozolânicos da classe E). No entanto, outros estudos apresentaram amostras ultrapassando 70% para os compostos [4]. A perda ao fogo, verificada em 7,74%, excedeu em pouco o estabelecido na norma, que é de 6% máximo.

O resultado da análise granulométrica da areia resultou uma curva (Figura 2) regular, demonstrando ser um agregado de diâmetros de grãos bem distribuídos, encontrando-se numa faixa de módulo de finura 2,90, quase que totalmente na zona ótima padronizada (NBR 7211, [28]).

Os grãos de resíduos (Figura 3) apresentaram-se, não raras vezes, na forma lamelar ou angular. Como a forma dos grãos não pôde ser controlada no processo de moagem, isso pode ter potencializado prejuízo na trabalhabilidade (como já mencionado no estudo da dosagem), uma vez que o formato dos grãos influencia a



**Figura 3**  
Forma dos grãos de RLV com 300 µm, observados por microscopia óptica, aumentados 400x. Observe-se a forma angular, lamelar ou alongada dos grãos

**Tabela 4**

Massas específicas dos materiais

Materiais	(g/cm <sup>3</sup> )	Método
RLV	2,34 ± 0,01	NBR NM 23 [25]
Areia	2,65 ± 0,01	NBR 9776 [27]
CP IV - 32	2,97 ± 0,03	NBR NM 23 [25]

consistência [16], e o atrito entre eles pode acarretar dificuldades no processo de mistura. No entanto, a heterogeneidade na forma dos grãos pode trazer benefícios na adesividade mecânica [17]. A geometria irregular dos grãos não acontece apenas com os grãos maiores. Também com micropartículas de 33µm, observadas por Microscopia Eletrônica de Varredura, já foi comprovada esta característica [3].

A amostra de resíduos com grãos passantes na malha da peneira 600 µm, submetida ao procedimento de finura por lavagem [24], mostrou que 56,55% são menores que 300 µm. Já por peneiramento a seco (NBR NM 248, [26]) – Figura 2, este índice sobe para próximo de 80%. Outras pesquisas relatam até 90% de RLV com grãos abaixo de 101,2 [18]. Considerando a mesma faixa de grãos (<600 µm) para o agregado miúdo natural, observou-se que apenas 16% são menores que 300 µm. Isso mostra que o RLV abaixo de 600 µm possui maior massa de grãos pulverulentos do que a areia. Por conseguinte, existe a possibilidade de se alcançar melhores índices de compactação. Quanto à finura do cimento analisado, foi verificada em 6,7 %, ficando abaixo de 8%, máximo padronizado para este tipo de cimento [36], mostrando também que mais de 93% dos grãos possui diâmetro menor ou igual a 75µm, indicando melhor adequação de compactação e de reação pozolânica com os grãos de RLV utilizados.

Os grãos de resíduos (<= 300µm) preencherão os espaços vazios entre os grãos de areia na faixa 2,36 mm. Sendo a massa específica da areia convencional maior que a do RLV (Tabela 4), isto indica que a substituição pelo resíduo não acarretará aumento na massa específica do compósito em estado endurecido. Assim, quanto maior o percentual de substituição, tanto menor será a massa específica do compósito estado seco.

### 3.2 Compósitos endurecidos

Nas avaliações dos níveis de absorção de umidade e porosidade o RLV0 (referência) apresentou índices entre 1,5 e 2%, respectivamente, maiores que o RLV5. Apesar de a diferença entre as

médias não apresentar-se elevada, os coeficientes de variação entre estas misturas praticamente dobram de valor, chegando a 7,31% (RLV5) contra 4,16% (RLV0), por exemplo, para absorção de umidade (Tabela 5). A alta variação relativa nos índices de porosidade e absorção de umidade pode indicar a ocorrência de segregação dos materiais durante a preparação do compósito. As médias de índices de vazios apontam uma queda em RLV5, com tendência à estabilização em RLV20, com índices próximos do compósito RLV0. Neste item a finura do material pode influenciar a incorporação de vazios [19], já no estado fresco. Esse fato, combinado com a possível segregação dos materiais, podem determinar o aumento do índice de vazios, conforme se incrementa o teor de resíduos finos. O aumento de vazios não afeta a massa específica significativamente, até RLV10 (Tabela 5), sendo melhor perceptíveis as diferenças apenas para RLV20. Mesmo não sendo encontrada grande redução nas massas específicas, para a amostra seca houve diminuição significativa entre a referência e o teor de 20% de resíduos, de 2,09 para 1,97 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 6%.

### 3.3 Desempenho mecânico e consumo de cimento

A análise de variância (ANOVA) realizada sobre resultados da resistência à compressão, para cada teor de resíduos, indicou diferença ao nível de 5% de significância. Analisando as médias (Tabela 6) por pares (teste de Tukey), verificou-se que todos os tratamentos possuem diferença significativa em relação ao compósito de referência (RLV0), porém nenhum deles entre si (RLV5 a RLV20). As diferenças entre RLV0 e RLV5, RLV10 e RLV20 foram de 36,2%, 20,8% e 23,4%, respectivamente, com mais de 27 MPa de média para este último. Nos testes de Turgut [4] foi, aproximadamente, 25 MPa.

Os resultados a 5% de resíduos mostraram uma melhor adequação entre os finos RLV e areia. Já para outros percentuais, há um decréscimo na resistência, possivelmente causada por falhas no adensamento/mistura e/ou segregação de materiais, devido à trabalhabilidade prejudicada; mesmo assim, a 20% de adição, o compósito ficou 1,23 vezes mais resistente que a referência. O aumento da resistência à compressão de maneira geral deve-se, em grande parte, às propriedades cimentantes do resíduo fino de vidro. Por outro lado, um fator que implicaria na perda de resistência é o aumento do índice de vazios (Tabela 5), conforme se incrementa os resíduos.

Apesar da redução da trabalhabilidade, manter a relação água/cimento em 0,48 contribuiu bastante para a resistência à compressão. Miranda Jr. [12], com acréscimo desse índice (chegando

**Tabela 5**

Características físicas dos compósitos endurecidos, determinados por imersão em água  
CV = coeficiente de variação

Compósito Índices	RLV0		RLV5		RLV10		RLV20	
	Média	cv	Média	cv	Média	cv	Média	cv
Absorção de umidade (%)	5,63 ± 0,23	4,16	4,43 ± 0,32	7,31	6,09 ± 0,96	15,80	5,96 ± 0,64	10,72
Índice de vazios (%)	11,75 ± 0,46	3,94	9,31 ± 0,64	6,89	12,33 ± 1,82	14,77	11,73 ± 1,18	10,03
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,09 ± 0,01	0,46	2,10 ± 0,01	0,43	2,03 ± 0,02	1,17	1,97 ± 0,02	0,77

**Tabela 6**

Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Resistência à compressão (MPa)			
RLV0	RLV5	RLV10	RLV20
22,18 ± 3,2 a	30,21 ± 2,0 b	26,79 ± 4,5 b	27,36 ± 2,5 b

Nota: Médias com letras diferentes indicam diferença significativa entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

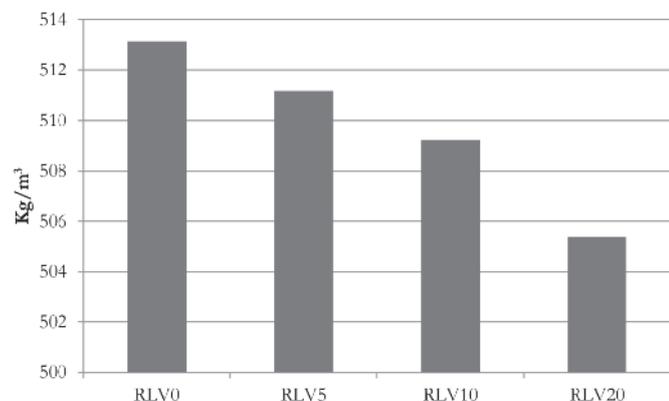
a 0,58) comprovou decréscimo de resistência para cerca de 17 MPa aos 28 dias, para quaisquer teores de resíduos testados (0-20%). Neste sentido, a literatura mostra que melhores resultados para adição de pó de vidro à argamassa cimentícia ocorreram com substituições em torno de 25%. Aliabdo [20] alcançou 24 MPa, em 7 dias de cura; Simões [13] obteve cerca de 31 MPa, aos 28 dias; e Islam [21], aos 28 dias alcançou cerca de 30 MPa.

Neste trabalho verificou-se um consumo de cimento (Figura 4) diminuído em 1,54% entre o RLV0 e RLV20, mesmo sem redução da massa do aglomerante nas misturas. Isto pode ser explicado pela maior densidade de empacotamento das partículas (Tabela 7), o que tende a reduzir os espaços a serem preenchidos pela pasta de cimento [11]; além disso, sendo a massa específica dos resíduos menor que da areia, a substituição pela mesma massa tende a aumentar o volume dos sólidos [16], diminuindo o consumo do cimento por m<sup>3</sup>. O compósito RLV20 apresenta vantagem pelo menor consumo de cimento e ganho de resistência mecânica em mais de 23%, além da menor densidade entre todos os compósitos.

A densidade de empacotamento naturalmente é maior para os grãos de areia, dada sua massa unitária maior que do RLV [9]. Por outro lado, quando analisadas as misturas, as densidades de empacotamento crescem na medida em que o teor de material fino aumenta. O valor de  $\beta = 0,64$  para RLV5 já demonstra uma melhoria na compactação dos grãos, aumentando até RLV20. Ou seja, existe uma melhor adequação de grãos nas misturas, que no material convencional.

## 4. Conclusões

Este trabalho procurou analisar algumas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material convencional e dos resíduos da

**Figura 4**

Consumo de cimento

**Tabela 7**Densidades de empacotamento ( $\beta$ )

Material	Massa unitária	$\beta$
Areia	1,614 ± 0,022	0,61
RLV0	1,058 ± 0,057	0,45
RLV5	1,697 ± 0,009	0,64
RLV10	1,738 ± 0,009	0,66
RLV20	1,758 ± 0,022	0,68

lapidação de vidros, bem como de um compósito cimentício (argamassa) em estado endurecido.

A análise química do cimento e do RLV mostrou uma potencialização da pozolanicidade, devido ao incremento no teor dos compostos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , com tendência a melhorar as propriedades cimentantes.

Devido as propriedades aglomerantes do RLV, a resistência à compressão para o compósito RLV5 alcançou 30,2 MPa aos 28 dias, representando o melhor desempenho, cerca de 36% acima da referência. Os demais teores de adições também mostraram resistência superior ao convencional, embora menores que o RLV5.

O aumento do teor de agregados finos provocou aumento no consumo de água e dificuldades na trabalhabilidade, efeito da baixa granulometria e forma irregular (lamelar e angulosa) dos grãos de resíduos. A baixa trabalhabilidade pode ter gerado segregação dos resíduos, o que justifica aumento do índice de vazios acima de RLV5. Assim, a melhor adequação, quanto à compactação, se dá com acréscimo de baixo teor de resíduos, para grãos de areia passante na malha 2,36 mm.

Por outro lado, o maior teor de resíduos (20%) causou a redução da massa específica do compósito em 6% para o RLV20. Também nessa mistura houve pequena redução no consumo de cimento, em 1,54%, devido ao melhor empacotamento das partículas e aumento no volume dos sólidos, reduzindo a pasta de cimento.

O estudo sugere a otimização da relação água/cimento para melhorar a trabalhabilidade, evitar segregação dos materiais e reduzir o índice de vazios, bem como testar outras faixas granulométricas do agregado convencional, visando adequar o empacotamento entre este e o RLV.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Faculdade de Rondônia – FARO, pela cessão do Laboratório de concreto para experimentos e Votorantim Cimentos – Unidade Porto Velho, pela realização de ensaios mecânicos.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] Brasil, Presidência da República. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, (2010). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)> Acesso em: outubro de 2018.
- [2] Vargas, Isabella M., Wiebeck, Hélio. Reciclagem de Vidro Laminado: Utilização dos Vidros de Baixa Granulometria

- como Carga Abrasiva na Formulação de Vernizes de Alto Tráfego para Pisos de Madeira. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, nº 2, p. 137-144, (2007).
- [3] Galvão, A. C. P.; Farias, A. C. M.; Mendes, J. U. L.. Characterization of waste of soda-lime glass generated from lapping process to reuse as filler in composite materials as thermal insulation. *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 359, p. 367-373, Sept. 2015. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132015000300367&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000300367&lng=en&nrm=iso) >. acesso em 20 out. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613591987>.
- [4] Turgut, Paki. Fly Ash Block Containing Limestone and Glass Powder Wastes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(6):1425-1431, (2013).
- [5] Antônio, A. P., Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação de vidro sodo-cálcico na produção de concretos. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico (2012). Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/3949>> Acesso: setembro de 2018.
- [6] Braga, M., Brito, J. de, Veiga, R. Reduction of the cement content in mortars made with fine Concrete aggregates. *Materials and Structures* 47:171–182 (2014) DOI 10.1617/s11527-013-0053-1. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Veiga2/publication/257895991\\_Reduction\\_of\\_the\\_cement\\_content\\_in\\_mortars\\_made\\_with\\_fine\\_concrete\\_aggregates/links/54fa45e10cf23e66f03128b9/Reduction-of-the-cement-content-in-mortars-made-with-fine-concrete-aggregates.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Veiga2/publication/257895991_Reduction_of_the_cement_content_in_mortars_made_with_fine_concrete_aggregates/links/54fa45e10cf23e66f03128b9/Reduction-of-the-cement-content-in-mortars-made-with-fine-concrete-aggregates.pdf) > Acesso em: 20/10/2018.
- [7] Krizova, K., Hela, R., Use of Green cement in concrete for friendly building construction. In: *Latest Trends in Sustainable and Green Development*, pp. 17-21, Barcelona, Spain, oct. (2012).
- [8] Matos, A. M., Ramos, T., Nunes, S., Sousa-Coutinho, J., Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder. *Materials Research*, 19(1): 67-74, (2016).
- [9] Lontero, C., L. A. Lenz, dos Santos, Í. M. R., Klein, N. S. Determination of the particle packing of granular systems composed with the Brazilian standard sand from IPT: comparison between models for particle size distribution optimization and random compositions. *Cerâmica*, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 22-33, Mar. 2017. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132017000100022&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132017000100022&lng=en&nrm=iso) >. acesso em 22 outubro 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652018>.
- [10] Weisstein, Eric W. „Packing Density.“ From *MathWorld*--A Wolfram Web Resource. Disponível em: < <http://mathworld.wolfram.com/PackingDensity.html> > acesso em: 27/10/2018.
- [11] Mehdipour, Iman, and Kamal H. Khayat. “Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste.” *Cement and Concrete Composites* 78:120-131, (2017).
- [12] Miranda Jr., E. J. P., Bezerra, H. J. C. L., Politi, C. S., Paiva, A. E. M., Increasing the Compressive Strength of Portland Cement Concrete Using Flat Glass Powder. *Materials Research*, 17(Suppl. 1): 45-50, (2014).
- [13] Simões, L. J., Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Espírito Santo, (2013). Disponível em: < [http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/3968/1/tese\\_7343\\_Lorena%20Jodoni%20Sim%C3%B5es.pdf](http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/3968/1/tese_7343_Lorena%20Jodoni%20Sim%C3%B5es.pdf) - 24/06/2017 > Acesso: outubro de 2017.
- [14] Palhares, R. A., Pereira, A. R. S., Cabral, K. C., Nobrega, A. K. C. Avaliação da Atividade Pozolânica dos Resíduos de Cerâmica Vermelha Produzidos no Vale do Assú/Rn. In: *22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Natal, Brasil, (2016).
- [15] V. Ribeiro, D., Silva, A. M. S., Labrincha, J. A., Morelli, M. R. Estudo das reações alcalis-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. *Cerâmica*. 58: 90-98, (2012).
- [16] Weidmann, D. F. Contribuição ao Estudo da Influência da Forma e da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos de Britagem nas Propriedades do Concreto de Cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, (2008). Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106626> > Acesso: outubro de 2018.
- [17] Martins, L. B. S., Produção de Rocha Artificial Utilizando Resíduo de Etapa de Laminação de Vidro Plano em Matriz de Resina Polimérica. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, (2016). Disponível em: < <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-COMPLETA-Lucas-Martins-final.pdf> > Acesso: junho de 2017.
- [18] O. Ribeiro, A. Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassa de cimento Portland. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Uberlândia, MG, Brasil (2015).
- [19] Arnold, D. C. M., Kazmierczak, C. S. Influência da Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo e do Teor de Filer nas Propriedades de Argamassas com Areia de Britagem. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. (2009) Disponível em: < [http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/8/82/TC034\\_Marionne\\_Artigo\\_Granulometria.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/8/82/TC034_Marionne_Artigo_Granulometria.pdf) > Acesso: outubro de 2018.
- [20] Aliabdo A. A., Elmoaty A. E. M. A., Aboshama, A. Y., Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Buildings Materials*, 124: 866-877, (2016).
- [21] Islam, G. M. S., Rahman, M. H., Kazi, N. Waste glass

- powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, nº 6, p. 37-44, (2017).
- [22] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro ABNT, 4p. (2012).
- [23] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 65: Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro ABNT, 4p. (2003).
- [24] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9289: Cal hidratada para argamassas – determinação da finura. Rio de Janeiro ABNT, 4p. (1998).
- [25] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro ABNT, 5p. (2001).
- [26] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 8p. (2003).
- [27] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro ABNT, 3p. (1988).
- [28] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro ABNT, . 9p. (2009).
- [29] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 8p.
- [30] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12276:2002: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro ABNT, 3p. (2002).
- [31] BASF SA. Linha MasterPolyheed®: Aditivo plastificante polifuncional – *Ficha Técnica*. Disponível em: <[https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Portuguese%20\(Brazil\)/Ficha\\_Tecnica\\_MasterPolyheed.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Portuguese%20(Brazil)/Ficha_Tecnica_MasterPolyheed.pdf)> Acesso em julho de 2017.
- [32] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8p.
- [33] Raj, Narasimha, Patil, Suresh G., Bhattacharjee, B. Concrete Mix Design By Packing Density Method. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* (IOSR-JMCE). V. 11, Issue 2, p. 34-46, Ver. I (Mar- Apr. 2014), (2014). Disponível em: < <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol11-issue2/Version-1/F011213446.pdf> > acesso em: 02/11/2018.
- [34] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro ABNT, 4p. (2006).
- [35] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro ABNT, 6p. (2003).
- [36] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro ABNT, 5p. (1991).
- [37] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro ABNT, 5p. (2012).