



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DE
ARGAMASSAS**

JORMAN JOE REVILLA FLORES

Foz do Iguaçu 2024

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DE
ARGAMASSAS**

JORMAN JOE REVILLA FLORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Loic Barbara Rodier

Foz do Iguaçu 2024

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DE
ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Latino-
Americano de Tecnologia,
Infraestrutura e Território da
Universidade Federal da Integração
Latino-Americana, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Materiais.



Orientador: Prof. Dr. Loic Barbara Rodier
UNILA



Prof. Julián Eduardo Mejía Ballesteros
UNAD



Prof. Rafael Henrique Filomeno
USP

Foz do Iguaçu, 24 de abril de 2024.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Jorman Joe Revilla Flores

Curso: Bacharel em Engenharia de Materiais

Tipo de Documento

(..x..) graduação	(....) artigo
(....) especialização	(..x..) trabalho de conclusão de curso
(....) mestrado	(....) monografia
(....) doutorado	(....) dissertação
(....) tese	(.....) CD/DVD – Obras audiovisuais
	(....) _____

Título do trabalho acadêmico: Estudo da influência do pó de vidro como substituição parcial do cimento Portland nas propriedades de argamassas.

Nome do orientador(a): Loic Barbara Rodier

Data da Defesa: 24/04/2024

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, 24 de abril de 2024.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de maneira significativa para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

A meu orientador, o Prof. Loic Barbara Rodier, expresso gratidão pela sua orientação, paciência e apoio ao longo de todo o processo de pesquisa. Seu comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, agradeço pela constante inspiração e apoio ao longo da minha jornada acadêmica.

Aos técnicos de laboratório do setor sul, agradeço a ajuda, paciência e colaboração para a realização dos experimentos. Este trabalho não teria sido possível sem a contribuição valiosa de cada um de vocês. Muito obrigado a todos.

RESUMO

Atualmente, a indústria cimentícia é uma grande consumidora de recursos naturais para a fabricação do cimento. No entanto, esses recursos são finitos na natureza. Um dos métodos encontrado para diminuir o uso dos recursos naturais de uma forma sustentável é a incorporação de materiais recicláveis e/ou resíduos como substituição parcial do cimento Portland. Este estudo foi desenvolvido para avaliar o uso do pó de vidro como substituição parcial do cimento Portland. Para isso, garrafas de vidro foram moídas até obter pó de vidro com partículas próximas da granulometria ($15\mu\text{m}$) do cimento Portland. Nesse estudo, dois tipos de cimento foram avaliados, o CPV ARI e o CII-F-32, para a elaboração de argamassas de traço 1:3 (cimento: areia) e relação água/cimento (a/c) igual a 0,5. Foram utilizados os teores de pó de vidro de 0, 10 e 20% em massa de substituição em relação à quantidade de cimento. Análises termogravimétricas, ensaios de capilaridade e de resistência à compressão bem como testes de resistência ao fogo foram realizados para avaliar a influência do pó de vidro nas propriedades das argamassas. Os resultados demonstraram que o pó de vidro pode ser empregado como uma substituição parcial do cimento Portland CPV ARI, até uma porcentagem de 10% em massa, devido à melhoria nas propriedades de durabilidade. No entanto, o uso de pó de vidro como substituição parcial do cimento CII-F-32 não mostrou melhoria das propriedades em comparação à referência.

Palavras-chave: Pó de vidro; pozolâna; argamassa.

RESUMEN

Actualmente, la industria de cementera es un gran consumidor de recursos naturales para la fabricación de cemento. Sin embargo, estos recursos son de naturaleza finita. Uno de los métodos encontrados para reducir el uso de recursos naturales de manera sustentable es la incorporación de materiales y/o residuos reciclables como reemplazo parcial del cemento Portland. Este estudio fue desarrollado para evaluar el uso de polvo de vidrio como reemplazo parcial del cemento Portland. Para lograrlo, se trituraron botellas de vidrio para obtener polvo de vidrio con partículas cercanas al tamaño ($15\mu\text{m}$) del cemento Portland. En este estudio se evaluaron dos tipos de cemento, CPV ARI y CII-F-32, para la preparación de morteros con una relación 1:3 (cemento:arena) y una relación agua/cemento (a/c) igual a 0.5. Se utilizaron contenidos de polvo de vidrio de 0, 10 y 20% en masa de reemplazo con relación a la cantidad de cemento. Se realizaron análisis termogravimétricos, ensayos de capilaridad y resistencia a la compresión, así como ensayos de resistencia al fuego para evaluar la influencia del polvo de vidrio en las propiedades de los morteros. Los resultados demostraron que el polvo de vidrio se puede utilizar como sustitución parcial del cemento Portland CPV ARI, hasta en un porcentaje del 10% en masa, debido a la mejora en las propiedades de durabilidad. Sin embargo, el uso de polvo de vidrio como sustituto parcial del cemento CII-F-32 no mostró mejora en las propiedades en comparación con la referencia.

Palabras clave: Polvo de vidrio, puzolanas, mortero

ABSTRACT

Currently, the cement industry is a major consumer of natural resources for cement manufacturing. However, these resources are finite in nature. One of the methods found to reduce the use of natural resources in a sustainable way is the incorporation of recyclable materials and/or waste as partial replacements for Portland cement. This study was developed to evaluate the use of glass powder as a partial replacement for Portland cement. For this purpose, glass bottles were ground to obtain glass powder with particles close to the particle size (15 μ m) of Portland cement. In this study, two types of cement were evaluated, CPV ARI and CII-F-32, for the preparation of mortar with a mix ratio of 1:3 (cement: sand) and a water/cement ratio (w/c) of 0.5. Glass powder contents of 0, 10, and 20% by mass were used as replacements relative to the quantity of cement. Thermogravimetric analyses, capillarity tests, and compressive strength tests as well as fire resistance tests were conducted to assess the influence of glass powder on the properties of the mortars. The results demonstrated that glass powder can be employed as a partial replacement for CPV ARI Portland cement, up to a percentage of 10%, due to the improvement in durability properties. However, the use of glass powder as a partial replacement for CII-F-32 cement did not show improvement in properties compared to the reference.

Key words: Glass powder, pozzolan, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de reciclagem do vidro	21
Figura 2 - Moinho de bolas.....	24
Figura 3 - Pó de vidro.....	25
Figura 4 - Peneira de 150µm.....	26
Figura 5 - Pastas de cimento	27
Figura 6 - Argamassadeira.....	28
Figura 7 - Pasta de cimento em pó	29
Figura 8 - Equipamento STA 8000	30
Figura 9 - Ensaio de capilaridade.....	31
Figura 10 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI de Referência	34
Figura 11 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI 10%.....	35
Figura 12 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI 20%.....	35
Figura 13 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F de Referência	36
Figura 14 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F 10%.....	36
Figura 15 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F 20%.....	37
Figura 16 - Curvas TG/DTG das pastas de cimento.....	38
Figura 17 - Ensaio de compressão cimento CPV-ARI nas idades de 28 e 90 dias.....	42
Figura 18 - Ensaio de compressão cimento CII-F nas idades de 28 e 90 dias	43
Figura 19 - Índice de atividade Pozolânica CPV-ARI.....	44
Figura 20 - Índice de atividade Pozolânica CII-F.....	45
Figura 21 - Perda de massa e resistência após aquecimento de 700 °C.....	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição mineralógica do cimento Portland	15
Tabela 2 - Diâmetro médio dos materiais	26
Tabela 3 - Elaboração das pastas de cimento	27
Tabela 4 - Elaboração das argamassas	28
Tabela 5 – Teor da água ligada em hidratos e da Portlandita CPV-ARI	39
Tabela 6 - Teor da água ligada em hidratos e da Portlandita CPII-F	39
Tabela 7 - Comparação absorção e taxa de absorção CPV-ARI	40
Tabela 8 - Comparação absorção e taxa de absorção CPII-F	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
3.1 CIMENTO PORTLAND	15
3.1.1 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND.....	16
3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS	17
3.3 USO DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND	19
3.4 O VIDRO NO BRASIL	21
4 MATERIAIS.....	23
4.1 CIMENTO	23
4.2 PÓ DE VIDRO.....	24
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL:	27
5.1 ELABORAÇÃO DAS PASTAS DE CIMENTO.....	27
5.2 ELABORAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	28
5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)	29
5.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	31
5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP)	32
5.6 RESISTÊNCIA AO FOGO DAS ARGAMASSAS	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
6.1 TERMOGRAVIMETRIA (TG)	34
6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	40

6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	42
6.4 PERDA AO FOGO	46
7 CONCLUSÃO.....	47
8 REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A proteção do meio ambiente e a redução do uso dos recursos naturais são fatores socioeconômicos muito importantes e significativos para o desenvolvimento do setor da construção civil no Brasil. No mundo, o concreto é o material mais consumido, depois da água (SANTOS et al., 2019). Onde para a sua produção existe uma grande emissão de dióxido de carbono (CO₂) e é consumida uma grande quantidade de recursos naturais, nesse contexto, o setor da construção civil deve adotar métodos mais eficientes e sustentáveis para limitar os impactos sobre o meio ambiente (HOSSAIN et al., 2018).

Os principais materiais cimentícios empregados na construção civil são as argamassas e os concretos. Tais materiais são compostos constituídos por uma base cimentícia, que possui uma fração ligante (cimento) e uma outra fração inerte (areia e/ou agregados).

Nos últimos anos, foi observado um crescimento do consumo desses materiais no Brasil. Esse crescimento do consumo, conseqüentemente, se traduziu em um aumento da quantidade da matéria-prima utilizada para elaborar esses materiais. O cimento Portland é um exemplo de matéria-prima que teve a demanda aumentada. Em 2023, o consumo de cimento Portland chegou a aproximadamente 33,8 milhões de toneladas até o mês de junho.

Uma forma eficaz de reduzir a quantidade de cimento Portland nas construções é a substituição parcial do cimento Portland por aditivos minerais, que são materiais silicosos ou sílico aluminosos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O vidro é composto principalmente por sílica e por essa razão é considerado promissor para ser usado como substituição parcial do cimento Portland. Dentre os diversos tipos de vidro, o mais comum - o vidro de soda-cal - é, então, produzido a partir da mistura dos compostos inorgânicos (sílica (SiO₂) - que compõe entre 65 e 70% do vidro; barrilha ou soda (Na₂CO₃) e calcário (CaCO₃), que, ao serem misturados e submetidos ao processo de fusão nas proporções definidas, atingem uma condição rígida por resfriamento sem haver cristalização (BARROS, 2016).

Com isso, este trabalho pretende estudar a influência do uso do pó de vidro como substituição parcial do cimento de modo a diminuir as quantidades de cimento utilizadas.

Nesse projeto, o vidro foi escolhido como aditivo mineral devido a quantidade e disponibilidade desse material produzido no país. Estima-se que 980 mil toneladas de vidros são produzidas por ano (CEMPRE,2011).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro nas propriedades físico-mecânicas e durabilidade de argamassas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a percentagem de substituição ideal do pó de vidro em relação ao cimento.
- Avaliar a influência do tipo de cimento na reatividade do pó de vidro.
- Estudar a influência da substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro na resistência à compressão e os parâmetros indicativos de durabilidade tais como a absorção capilar e a resistência ao fogo.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 CIMENTO PORTLAND

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes ou ligantes, que endurece pela adição da água. Quando misturado com água, agregados graúdos e/ou miúdos o resultado é o chamado de concreto ou argamassa. As características e propriedades do cimento vão depender da qualidade e proporção dos materiais inseridos na sua composição (Silva et al., 2021).

O cimento é fabricado a partir da calcinação de dois componentes básicos: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro). O resultado dessa calcinação fornece as matérias-primas do cimento. O carbonato de cálcio (CaCO_3) aquecido em alta temperatura forma o óxido de cálcio (CaO) e libera CO_2 para atmosfera. Já a calcinação da argila produz os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A Tabela 1 mostra a composição mineralógica do cimento (GLASSER,1997).

Tabela 1 - Composição mineralógica do cimento Portland

Nome	Fórmulas	Peso (%)
Óxido de cálcio	CaO	61 - 67
Óxido de silício	SiO_2	17 - 24
Óxido de alumínio	Al_2O_3	3 - 8
Óxido de ferro	Fe_2O_3	1 - 6
Óxido de magnésio	MgO	0,1 - 4
Óxido de sódio + Óxido de Potássio	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,5 – 1,5
Trióxido de enxofre	SO_3	1 – 3

Fonte: Adaptado (GLASSER,1997)

Os componentes mais importantes do cimento Portland são o silicato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e o silicato dicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), pois eles são responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O aluminato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) hidrata-se rapidamente, no entanto, ele tem pouca influência nas propriedades mecânicas da pasta de cimento. Já o ferroaluminato tetracálcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) tem a função de equilibrar a composição química da pasta de cimento por apresentar boa estabilidade química (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Quando o cimento Portland reage com a água, os principais produtos formados são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica do material, o hidróxido de cálcio ou portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e a etringita ($\text{C}_6\text{A}_3\text{H}_{32}$). Devido à presença da portlandita, a matriz cimentícia torna-se um ambiente de elevada alcalinidade com um pH da ordem de 12-13 (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

3.1.1 Tipos de cimento Portland

O cimento Portland é constituído, principalmente por clínquer (o produto granulado que surge após a queima de calcário misturado com argila), mas também outros aditivos, para a formação de diferentes tipos de cimento Portland. Cada tipo de cimento tem as quantidades dos produtos de adição e clínquer, determinados pela ABNT (CASTRO, 2021).

- Cimento Portland Comum (CP I): Este é o tipo mais básico de cimento Portland e é usado em aplicações de engenharia civil, incluindo fundações, lajes e principalmente estruturas de concreto.
- Cimento Portland Composto (CP II): Este tipo de cimento é composto por uma mistura de clínquer e adições, como CP II-E com escória de alto-forno, CP II-Z com pozolana e CP II-F com filer.
- Cimento Portland de Alto Forno (CP III): Este tipo de cimento é produzido a partir de uma mistura de clínquer e escória de alto-forno. Ele possui maior resistência inicial e final do que o cimento Portland Comum e é frequentemente usado em estruturas de concreto pré-fabricado.

- Cimento Portland Pozolânico (CP IV): Este tipo de cimento contém adições pozolânicas, como cinza volante ou sílica ativa. Ele é conhecido por sua capacidade de melhorar a durabilidade do concreto.
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V): Este tipo de cimento é projetado para fornecer resistências iniciais mais altas do que o cimento Portland Comum.

Os aditivos introduzindo no cimento podem ter caráter hidráulico, ou seja, reagir com os produtos da hidratação do cimento Portland para formar compostos cimentícios que contribuem para o aumento da resistência mecânica do material cimentício. Tais aditivos podem também ter um comportamento inerte, apresentando apenas um efeito catalisador na hidratação, favorecendo assim a nucleação e a densificação da matriz cimentícia. Os materiais pozolânicos fazem parte da categoria dos aditivos com caráter hidráulico.

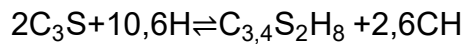
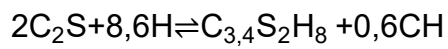
3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Materiais pozolânicos são definidos como aqueles que possuem, em sua composição, silicatos ou silicos-aluminatos amorfos com nenhuma ou pouca atividade aglomerante, mas que quando em contato com a água e em temperatura ambiente reagem com hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades cimentantes (WILD et al., 1996). Os materiais pozolânicos podem melhorar significativamente as propriedades dos tanto no estado fresco como endurecido, aumentando a resistência à compressão, a resistência química, reduzindo o pH e a concentração de íon hidroxila na água de poro, bem como a permeabilidade da matriz (FRIAS et al., 2000).

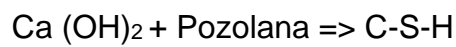
OLIVEIRA e BARBOSA (2006) ressaltam que uma das propriedades dos materiais pozolânicos é a capacidade de o material se combinar com o hidróxido de cálcio, transformando-se quimicamente em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. A hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) do cimento Portland produz

hidróxido de cálcio (CH), que por sua vez, pode ser consumido pela reação pozolânica, formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e diminuindo a alcalinidade da pasta de cimento.

- Hidratação do cimento Portland:



- Reação Pozolânica:



Diversos aditivos minerais têm sido estudados para ser utilizados como substituição parcial do cimento. Esses materiais podem ser naturais, tal como a pozolana natural (rocha vulcânica) ou ainda subprodutos da indústria tais como o vidro em pó (BARROS, 2016; DE MELO, 2023; RODIER et al., 2018; BARDINI, 2007).

3.3 USO DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND

Os materiais pozolânicos podem ser reconhecidos por três atributos fundamentais: elevado teor de sílica, partículas amorfas e uma vasta área superficial específica. Em comparação com a sílica ativa e as cinzas volantes, o vidro apresenta uma quantidade suficiente de sílica e, quando moído, cumpre os critérios básicos de uma pozolana para demonstrar seu comportamento pozolânico (SHAO et al., 2000).

A dimensão das partículas do pó vidro no cimento Portland demanda controle, pois tem um impacto importante nas características fundamentais do material elaborado. Isso é crucial porque a mistura pode ser afetada pela reação álcali-sílica, o que desencadeia fissuras no material cimentício, resultando em um desempenho mecânico inadequado e uma baixa durabilidade (IDIR et al., 2010).

Estudos conduzidos por Idir et al. (2010) e Araújo et al. (2011) indicaram que a inclusão de vidro moído com granulometria igual ou inferior a 100 μ m em misturas de cimento resultou em expansões controladas devido à reação álcali-sílica. Em contrapartida, Matos e Souza-Coutinho (2012) e Salomão et al. (2010) afirmaram que as expansões só podem ser controladas com o uso de vidro moído com granulometria igual ou inferior a 75 μ m.

No entanto, apesar das numerosas pesquisas realizadas, é desafiador fazer uma generalização sobre o impacto do tamanho das partículas reativas dos agregados, pois há resultados contraditórios sobre qual tamanho é mais prejudicial e resulta em uma expansão maior da ASR. Alguns estudos mostraram expansões significativas para partículas extremamente pequenas, enquanto outros indicaram uma expansão insignificante quando as partículas reativas tinham menos de 50 a 150 μ m (Matos et al., 2010).

Segundo Neville (1997), a resistência mecânica é uma característica fundamental quando se trata de materiais cimentícios para aplicações estruturais. Portanto, têm sido realizadas várias pesquisas e estudos sobre a adição de vidro moído em concretos e argamassas, visando aumentar as resistências mecânicas dessas misturas. De acordo com Simões (2013), diversos estudos indicam que a melhor maneira de utilizar o vidro em adições a concretos e argamassas é na forma

de pó e que ele pode ser usado como substituição parcial do cimento Portland, e que quanto mais fino for o pó de vidro, melhor será a sua reatividade.

Lopes et al. (2021) avaliou a substituição parcial do cimento por resíduo moído de vidro (RMV) em percentagens de substituição que variaram entre 10%, e 40% em massa. O autor afirmou que a introdução desse resíduo melhorou a resistência à compressão das argamassas. As argamassas contendo o resíduo mostraram desempenho superior em comparação às argamassas de referências sem aditivo. Além disso o índice de atividade pozolânica (IAP) das argamassas apresentou valores superiores a 103%, sendo o mínimo par ser considerado como um material pozolânico é 75%.

Todos os estudos citados mostraram que o pó de vidro, finamente moído, tem a tendência de se comportar como um material pozolânico e contribuir para aprimorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos materiais cimentícios de uma forma semelhante a outros materiais pozolânicos, como a sílica ativa.

3.4 O VIDRO NO BRASIL

Segundo um estudo conduzido pela Abividro em 2019, no país o mercado produz mais de 8,6 bilhões de unidades por ano, o que equivale a 1,3 milhões de toneladas do material. O vidro tem um tempo estimado de decomposição em torno de 5 mil anos. Por outro lado, apresenta a vantagem significativa de poder ser reciclado indefinidamente. No Brasil, a indústria de reciclagem de vidro movimenta aproximadamente R\$ 120 milhões por ano. Além disso, de acordo com a Abividro, o vidro pode ser reaproveitado em sua totalidade, sem perda de qualidade, podendo alcançar uma reciclagem de 100%. A Figura 1 ilustra os processos que contribuem para tornar o vidro um material com capacidade de reciclagem infinita.

Figura 1 - Ciclo de reciclagem do vidro



Fonte: Abividro (2019)

Em 2021, a reciclagem de vidro pelas associações de recicladores foi de 1.453,09 toneladas. No entanto, o processo de reciclagem do vidro envolve altos custos de utilização de mão de obra, grande quantidade de água e de energia.

O volume de vidro no Brasil é significativo, o uso do vidro como aditivo mineral fino no cimento pode ser outra alternativa para aumentar a quantidade de vidro reciclado e elaborar um material eco eficiente para a indústria de construção.

4 MATERIAIS

4.1 CIMENTO

Neste projeto, foram utilizados dois tipos de cimento: CPV-ARI e CII-F. Eles foram empregados para estudar a reatividade do vidro tanto com cimento sem adição quanto com adição.

- Cimento Portland tipo CPV-ARI, não possui adições e tem uma alta resistência inicial.
- Cimento Portland tipo CP II-F de acordo com a NBR 5736 (ABNT,1991), é constituído de 94% a 66% de clínquer e gesso e de 6% a 34% de escória granulada de alto forno.

4.2 PÓ DE VIDRO

O pó de vidro utilizado é oriundo da moagem de garrafas recicladas proveniente de uma fábrica de reciclagem, localizada na cidade de Foz do Iguaçu.

As garrafas de vidro foram moídas em um moinho de bola da Marca SOLAB, a 600 rpm por 2h (Figura 2).

Figura 2 - Moinho de bolas



Fonte: Autoria própria

A moagem é realizada com o objetivo de reduzir o vidro em pó como mostrado na Figura 3. As garrafas de vidro em um primeiro momento passaram por processos de limpeza e remoção de todo os tipos de materiais plásticos e/ou resíduos não desejados que pudessem interferir na elaboração das argamassas.

Figura 3 - Pó de vidro

Fonte: A autoria própria

Após moagem o pó de vidro obtido foi peneirado em uma peneira com abertura de malha de 150 μm (Figura 4). O tamanho de partícula escolhido foi deliberado para permitir o estudo do comportamento dentro dessa dimensão, evitando ao mesmo tempo a necessidade de grande consumo energético para reduzir a granulometria.

O tamanho das partículas foi avaliado utilizando um granulometro modelo CILAS 1090. As mediadas foram realizadas em meio líquido, na faixa de 0.04 μm - 2500.00 μm e ultrassonografias de 60 segundos. O tamanho das partículas dos materiais utilizados é mostrado na Tabela 2.

Figura 4 - Peneira de 150 μ m

Fonte: A autoria própria

Tabela 2 - Diâmetro médio dos materiais

	d ₉₀	d ₅₀	d ₁₀	Média μ m
Vidro	121,27	41,29	3,63	55,54
CPV-ARI	32,84	12,29	1,26	15,46
CPII-F-32	32,56	8,87	0,94	14,12

Fonte: A autoria própria

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL:

5.1 ELABORAÇÃO DAS PASTAS DE CIMENTO

As pastas de cimento foram elaboradas utilizando uma relação água/cimento fixa igual a 0,5. As formulações dos corpos de prova são mostradas na Tabela 3 para cada tipo de cimento.

Após a elaboração, as pastas de cimento (Figura 5) foram submetidas a uma cura submersas em água por 3, 7 e 28 dias. Após o tempo de cura foram levados para o ensaio de análises Termogravimétrica (TG).

Tabela 3 - Elaboração das pastas de cimento

Pasta de Cimento	Cimento %	Pó de Vidro %	Água/cimento
REF	100	0	0.5
V10	90	10	0.5
V20	80	20	0.5

Fonte: Autoria própria

Figura 5 - Pastas de cimento



Fonte: Autoria própria

5.2 ELABORAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas foram elaboradas na Argamassadeira (Figura 6), utilizando o traço 1:3 (aglutinante: areia), mantendo também a relação água/cimento igual a 0,5 para todas as formulações (Tabela 4). A norma EN 196-1 foi utilizada para a elaboração dos corpos de prova em moldes cilíndricos de (5x10 cm). Após a elaboração, os corpos de prova foram submetidos a uma cura em água por 28, 90 dias e levados para testes de resistência e durabilidade.

Tabela 4 - Elaboração das argamassas

Argamassa	Cimento (g)	Pó de Vidro (g)	Areia (g)	Água/cimento
REF	433,33	0	1300	0.5
V10	390	43,3	1300	0.5
V20	346,67	86,6	1300	0.5

Fonte: Autoria própria

Figura 6 - Argamassadeira

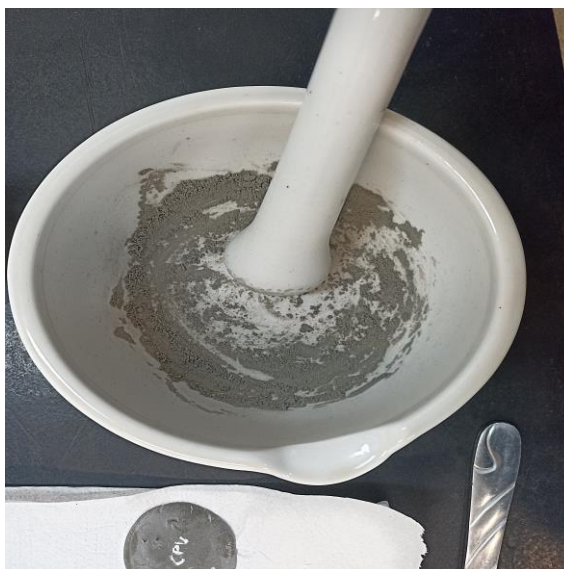


Fonte: Autoria própria

5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

A Termogravimetria (TG) é uma técnica utilizada para avaliar a estabilidade e a decomposição térmica dos constituintes das pastas de cimento (HOPPE FILHO et al., 2017).

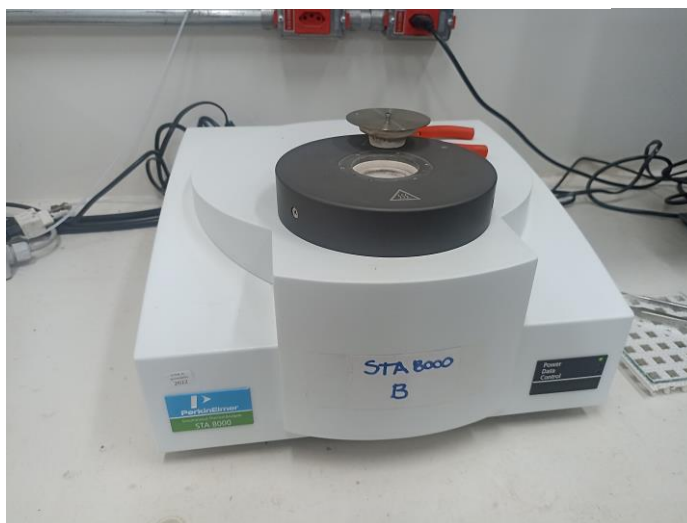
Figura 7 - Pasta de cimento em pó



Fonte: Autoria própria

As amostras de pastas de cimento foram moídas até convertidas em pó (Figura 7) e analisadas em um analisador térmico STA 8000 da marca PerkinElmer (Figura 8), com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, um fluxo de nitrogênio e um intervalo de temperatura de 60°C a 900°C . As análises foram realizadas para avaliar o teor de água quimicamente ligada e o teor do hidróxido de cálcio nas diferentes pastas de cimento nas idades de 3, 7 e 28 dias (Rodier et al., 2017).

Figura 8 - Equipamento STA 8000



Fonte: A autoria própria

Segundo Rodier et al (2017), o teor de água quimicamente ligada (%H) e o teor do hidróxido de cálcio (%CH) presente nas pastas de cimento pode ser calculada a partir da Equação 1 e 2:

$$\%CH = (M_i - M_f) \cdot \left(\frac{M_{CH}}{M_H}\right) \quad (1)$$

Em que:

M_i e M_f são as massas inicial (400 °C) e final (550 °C)

M_{CH} é a massa molar do hidróxido de cálcio

M_H é a massa molar da água

$$\%H = M_i - M_f \quad (2)$$

M_i e M_f são as massas inicial (100 °C) e final (300 °C)

5.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme as especificações da norma NBR 9779. Após a elaboração das argamassas, os corpos de provas foram curados a uma temperatura ambiente por 28 dias. Após atingir esse tempo, os corpos de provas foram recobertos com uma fita impermeabilizante para favorecer a absorção da água apenas pela superfície em contato com a esponja úmida (Figura 9). A massa das amostras foi monitorada durante 25 dias até atingir a saturação.

A quantidade de água absorvida por área de contato é determinada pela Equação 3:

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S} \quad (3)$$

Em que:

C massa saturada em $\left(\frac{g}{cm^2}\right)$

M_{sat} é a massa saturada depois de ficar a massa constante em (g)

M_s é a massa do corpo de prova seco (g)

S é a seção transversal do corpo de prova em (cm^2)

Figura 9 - Ensaio de capilaridade



Fonte: Autoria própria

5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP)

Os corpos de prova, com substituição parcial do cimento (0, 10 e 20% em massa) e formato cilíndricos (50x100cm), foram elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento, três de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,5. A resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada aos 28 e 90 dias.

O índice de atividade pozolânica (IAP) das argamassas contendo o pó de vidro foi determinado segundo a Equação 4 (ASTM C618):

$$SAI = \frac{A_c}{A_s} (100) \quad (4)$$

Em que:

A_c é a resistência a compressão da argamassa com material pozolânico

A_s é a resistência a compressão da argamassa sem material pozolânico

5.6 RESISTÊNCIA AO FOGO DAS ARGAMASSAS

O ensaio de resistência ao fogo foi realizado para avaliar a influência da adição do pó de vidro no desempenho mecânico das argamassas após o tratamento térmico. Quatro corpos de prova por formulação foram elaborados com os mesmos traços e relação a/c., após 28 dias de cura, os corpos de prova foram secados em uma estufa a 105 °C. O tratamento térmico foi realizado em uma mufla da marca QUIMIS Q318M24 a uma temperatura de 700 °C por 2 horas. Após tratamento resfriadas para evitar choque térmico e posteriormente submetidas a o ensaio de compressão (Rodier; Savastano et al., 2018).

A perda de massa dos corpos de prova foi determinada de acordo com a Equação 5:

$$\text{Perda de massa \%} = \frac{(m_i - m_f) \times 100}{m_i} \quad (5)$$

Em que:

m_i é a massa inicial da argamassa

m_f é a massa após tratamento térmico

A perda de resistência dos corpos de prova foi determinada de acordo com a Equação 6:

$$\text{Perda de resistência \%} = \frac{(\partial_a - \partial_b) \times 100}{\partial_a} \quad (6)$$

Em que:

∂_a é resistência da argamassa sem tratamento

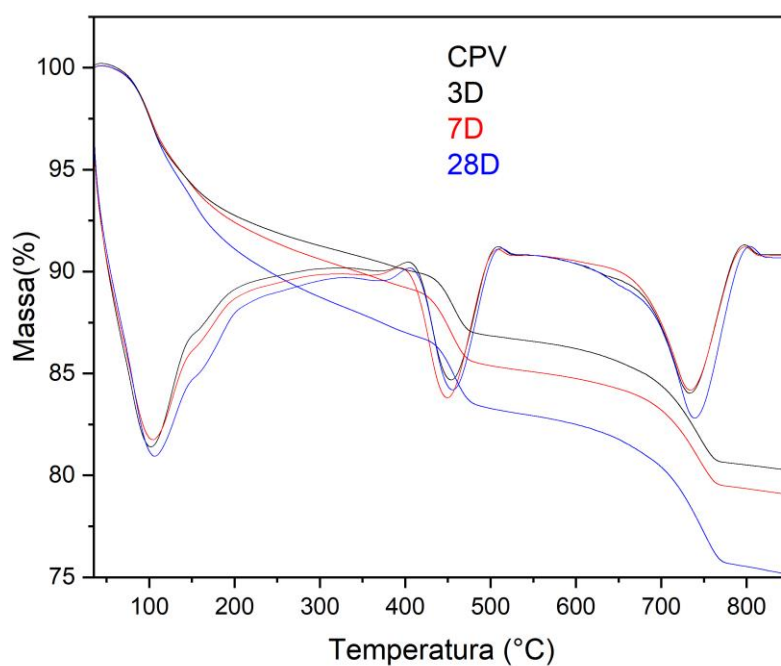
∂_b é resistência da argamassa após tratamento térmico

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

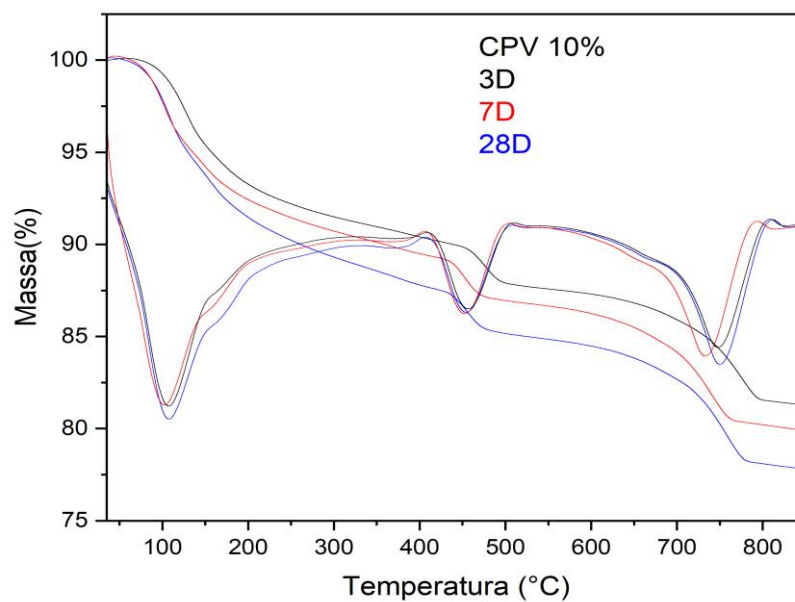
6.1 TERMOGRAVIMETRIA (TG)

A análise termogravimétrica (TG) é uma técnica que permite avaliar quantitativamente o teor dos constituintes da pasta de cimento hidratada. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os resultados da análise termogravimétrica das pastas de cimento CPV-ARI e as figuras 13, 14 e 15 das pastas de cimento do CII-F aos 3, 7 e 28 dias.

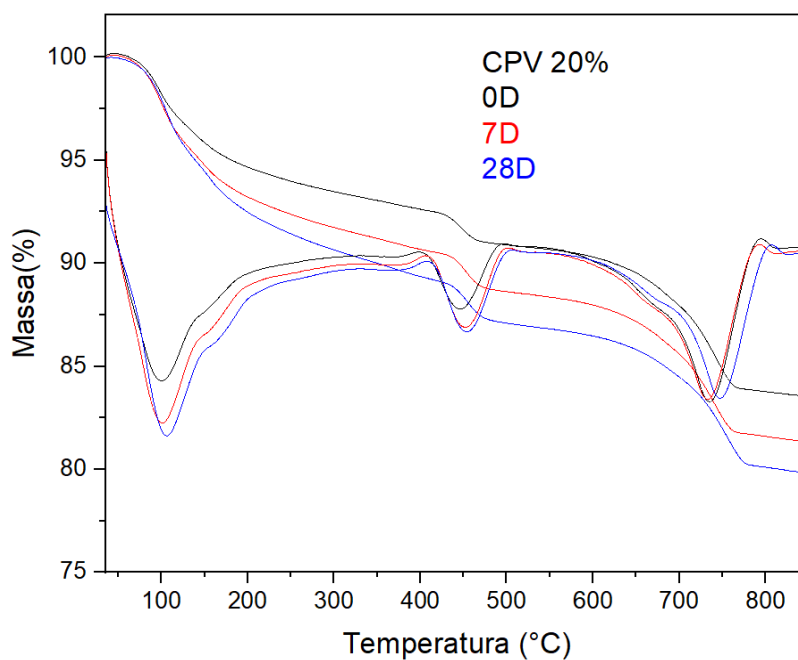
Figura 10 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI de Referência



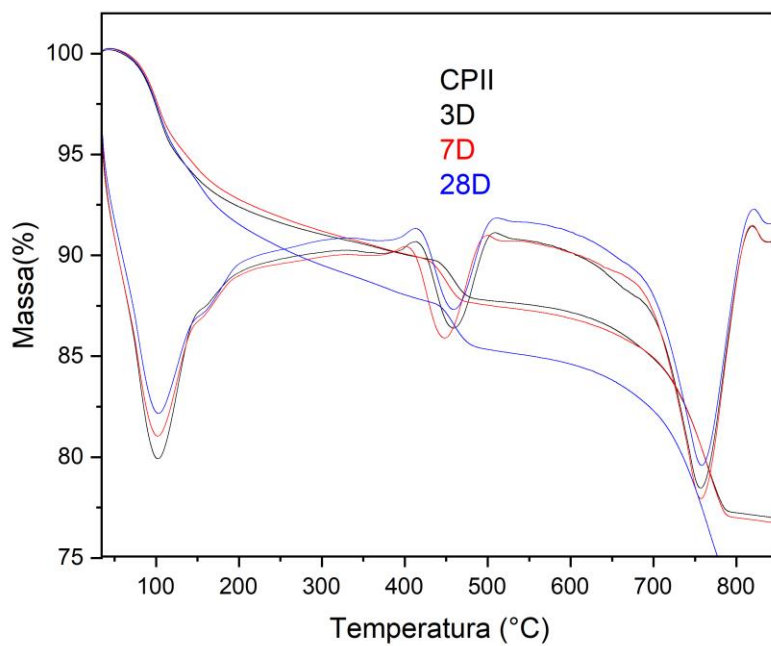
Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI 10%

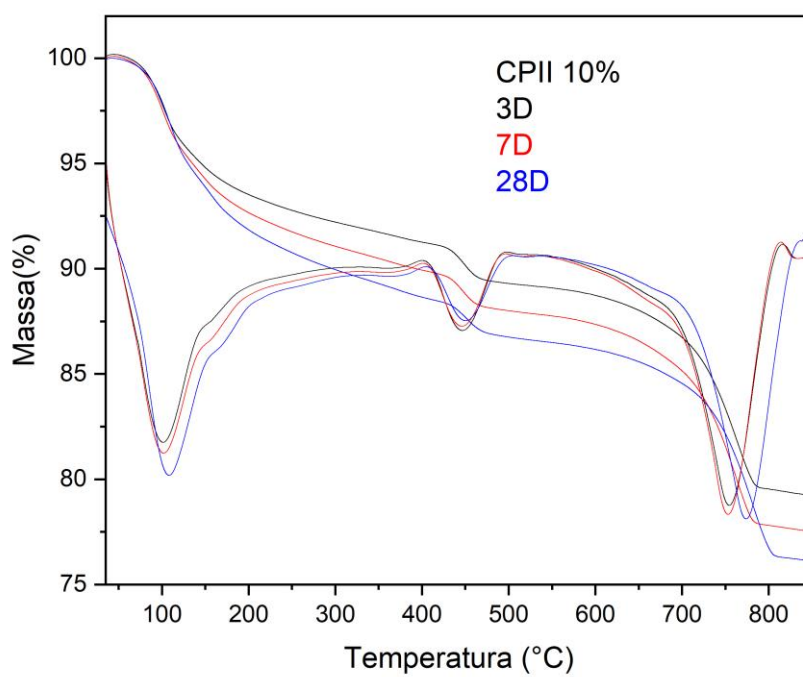
Fonte: Autoria própria

Figura 12 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CPV-ARI 20%

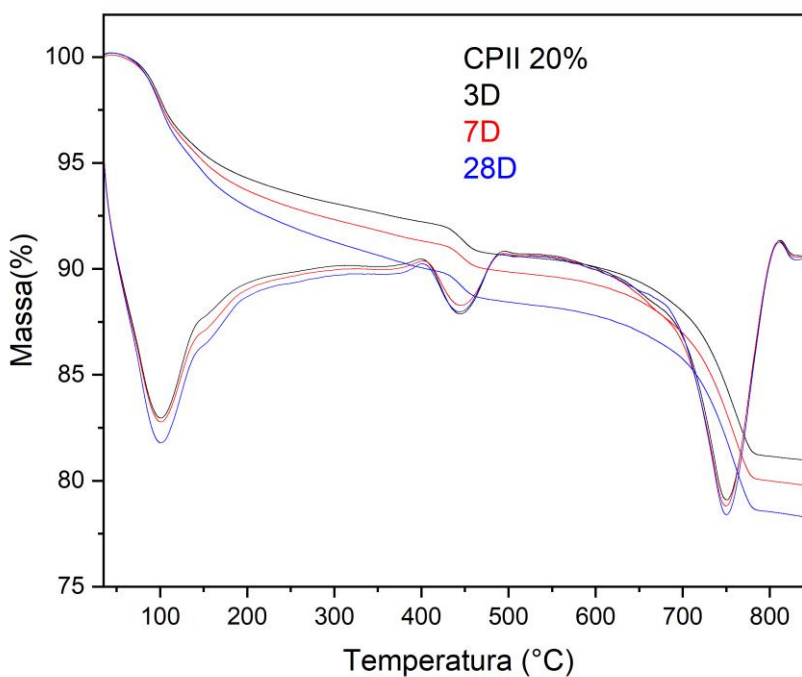
Fonte: Autoria própria

Figura 13 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F de Referência

Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F 10%

Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Curvas TG/DTG da pasta de cimento CII-F 20%

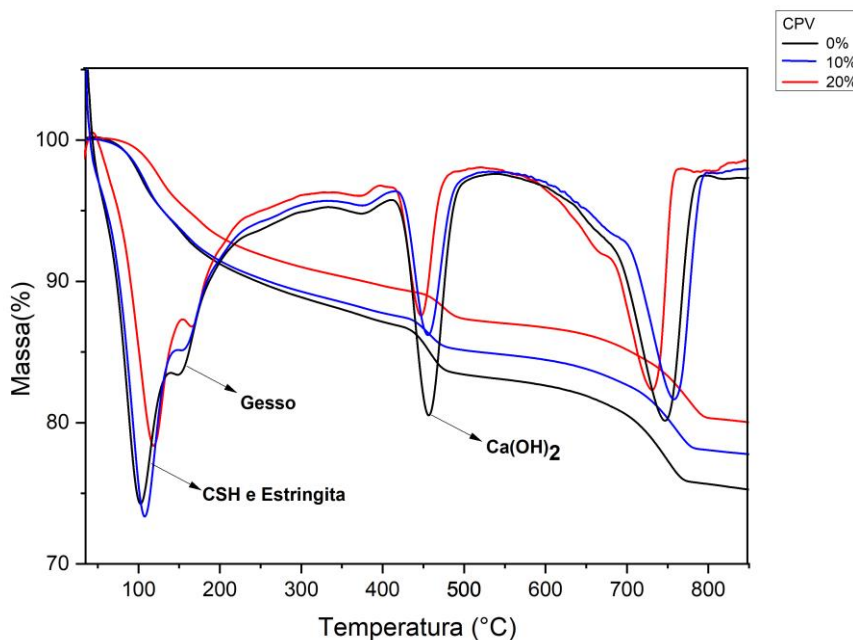
Fonte: Autoria própria

As Figuras mostram as curvas de perda de massa em função da temperatura. e as curvas derivada da perda de massa das pastas de cimento. A partir dos resultados, foi possível identificar três principais reações endotérmicas durante a decomposição das pastas de cimento.

Segundo ALMEIDA E SCHIERI (2006), Rodier, et al (2017) e Scrivner et al., (2016), a perda de massa na faixa de 100 - 300 °C corresponde à perda de massa devido à desidratação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), trissulfatoaluminatos de cálcio hidratados (estringita) e aluminato de cálcio e hidratos de silicato de alumínio (C-A-H e C-A-S-H). Na faixa de 400 - 550 °C, a perda de massa é devido à desidroxilação do hidróxido de cálcio (portlandita). Por fim, na faixa 600 – 800 °C a perda de massa é devido à descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3).

A Figura 16 mostra o efeito da substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI por pó de vidros aos 28 dias. Em comparação a amostra sem pó de vidro (0%), uma diminuição da intensidade do pico relacionado à desidroxilação da portlandita é observada para as amostras contendo pó de vidro (10% e 20%) em massa. Esse fenômeno é devido ao efeito diluição. Menor a quantidade de cimento na amostra, menor a quantidade de hidróxido de cálcio produzida.

Figura 16 - Curvas TG/DTG das pastas de cimento



Fonte: Autoria própria

A Tabela 5 e 6 mostram os teores da água quimicamente ligada e de hidróxido de cálcio nas pastas aos 3, 7 e 38 dias.

Tabela 5 – Teor da água ligada em hidratos e da Portlandita CPV-ARI

CPV-ARI	3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	H (%)	CH (%)	H (%)	CH (%)	H (%)	CH (%)
Referência	6,3	14,55	7,09	15,78	8,86	16,81
V10%	6,8	11,22	6,98	11,67	8,66	12,13
V20%	4,74	8,02	6,06	9,53	7,33	10,48

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Teor da água ligada em hidratos e da Portlandita CPII-F

CPII-F	3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	H (%)	CH (%)	H (%)	CH (%)	H (%)	CH (%)
Referência	6,1	9,7	6,71	10,11	7,42	11,35
V10%	5,28	8,38	5,96	8,22	6,99	7,01
V20%	4,62	6,33	5,05	6,82	5,74	6,86

Fonte: Autoria própria

Observa-se, para os dois tipos de cimento, uma diminuição dos teores de hidróxido de cálcio e água quimicamente ligada com o aumento da percentagem de substituição do cimento por pó de vidro. Esse resultado é devido ao efeito diluição como explicado anteriormente. A diminuição da quantidade do cimento nas amostras leva a uma produção menor de produtos hidratados tais com C-S-H e hidróxido de cálcio.

Além disso, é possível observar também um aumento dos teores de hidróxido de cálcio e água quimicamente ligada com o tempo. Esse resultado mostra que a reação de hidratação do cimento continua com o tempo.

6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Um parâmetro importante a avaliar para os materiais cimentícios é a absorção de água. Ela permite ter uma ideia qualitativa sobre a porosidade que influencia diretamente as propriedades mecânicas. A capilaridade pode ser avaliada em termos de velocidade inicial de absorção e em termos de quantidade total de água absorvida. Os corpos de prova com tamanho de poros maiores absorvem água mais rapidamente em comparação aos corpos de prova com poros de tamanho menor (Lopes et al., 2022).

A Tabela 7 e 8 mostra os valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade (g/cm^2) determinados por meio da equação 3 e os valores da taxa de absorção correspondem à inclinação da primeira parte linear da curva (Lopes et al., 2022), massa saturada versus tempo.

Tabela 7 - Comparação absorção e taxa de absorção CPV-ARI

Argamassas CPV-ARI	Coefficiente de Absorção (g/cm^2)	Taxa de Absorção
Referência	1,112	0,0862
V10%	0,9368	0,0319
V20%	0,9979	0,0465

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Comparação absorção e taxa de absorção CII-F

Argamassas CII-F	Coefficiente de Absorção (g/cm^2)	Taxa de Absorção
Referência	0,9781	0,0743
V10%	1,0212	0,0845
V20%	1,0516	0,0967

Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova contendo 10% em massa de pó de vidro apresentam a menor taxa de absorção e o menor coeficiente de absorção capilar para o cimento CPV-ARI. De acordo com Maroliya (2012), menor o coeficiente de absorção capilar maior a durabilidade. A durabilidade é a capacidade do material cimentício em manter as suas propriedades com o tempo. O resultado obtido mostra que houve uma densificação e refinamentos dos poros, devido à reação pozolânica (Silva et al., 2020). A estrutura dos poros é essencial para a vida útil dos materiais cimentícios, menor a porosidade do material, menor a probabilidade de entrada de agentes agressivos no interior do material.

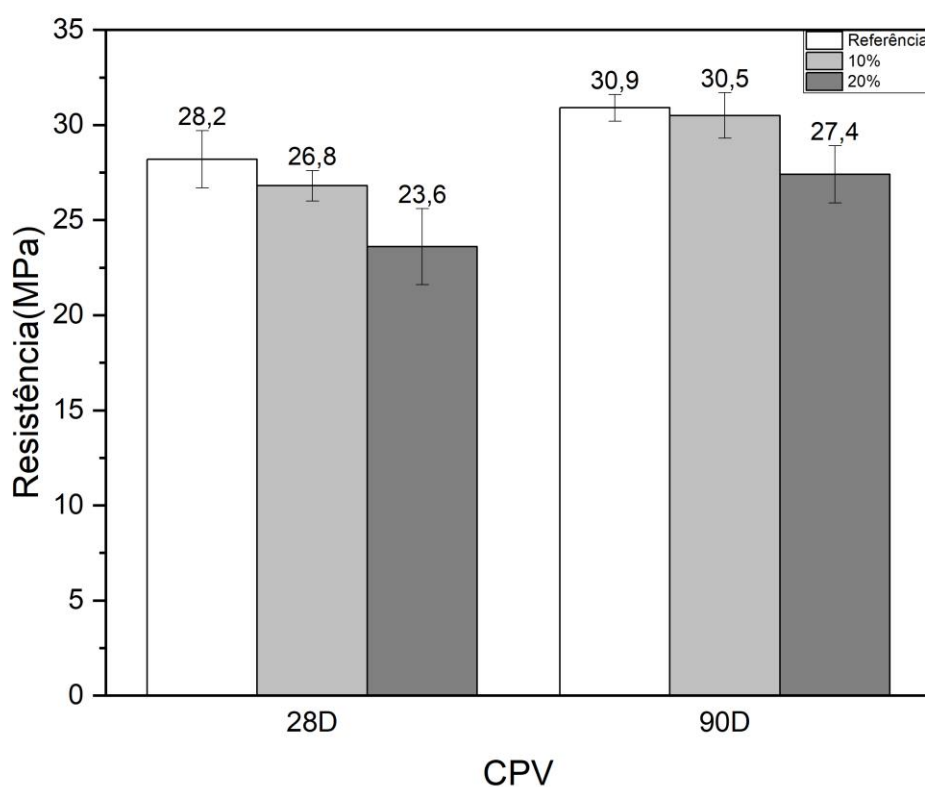
A Tabela 8 mostra que os corpos de provas elaborados com o cimento CIIIF e pó de vidro apresentam um aumento absorção capilar.

A partir dos resultados é possível afirmar que o pó de vidro pode ser utilizado até uma percentagem de 10% em massa para melhorar a durabilidade dos materiais cimentícios.

6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

A Figura 17 mostra a resistência à compressão das argamassas elaboradas a partir do cimento CPV-ARI aos 28 e 90 dias. A resistência à compressão das argamassas aumenta com a idade, este comportamento é principalmente devido à formação dos produtos de hidratação como C-S-H. De acordo com o desvio padrão a argamassa contendo 10% em massa de pó de vidro apresenta uma resistência à compressão similar que a argamassa de referência aos 28 e 90 dias. Esse resultado mostra o potencial de uso do pó de vidro como substituição parcial do cimento.

Figura 17 - Ensaio de compressão cimento CPV-ARI nas idades de 28 e 90 dias

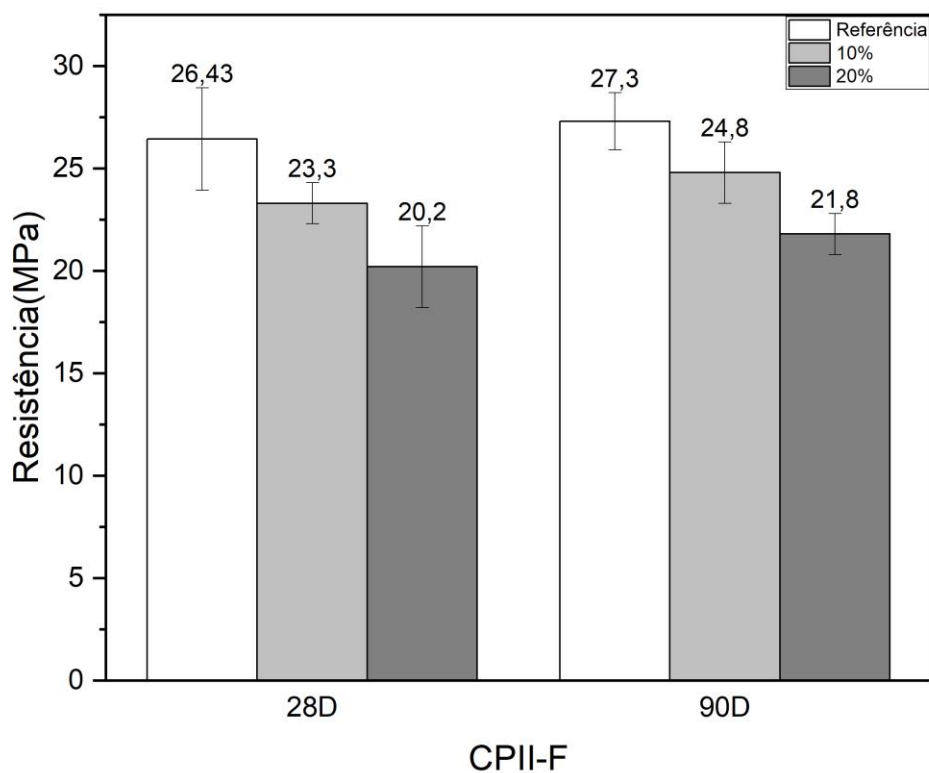


Fonte: Autoria própria

Uma diminuição da resistência à compressão pode ser observada com o aumento da percentagem de substituição. Segundo Rodier e Savastano (2018), essa diminuição ocorre devido ao efeito de diluição. Quando há menos cimento, há uma redução na formação dos produtos de hidratação, o que prejudica a resistência à compressão das argamassas.

A Figura 18 mostra a resistência à compressão das argamassas elaboradas a partir do cimento CII-F aos 28 e 90 dias. Uma diminuição da resistência à compressão das argamassas pode ser observada com o aumento da percentagem de substituição de cimento pelo pó de vidro. Comparado com as argamassas elaboradas com o cimento CPV-ARI, e para um mesmo teor de substituição, a resistência das argamassas elaboradas com o cimento CII-F é menor. Esse resultado pode ser explicado pela composição mineralógica dos cimentos.

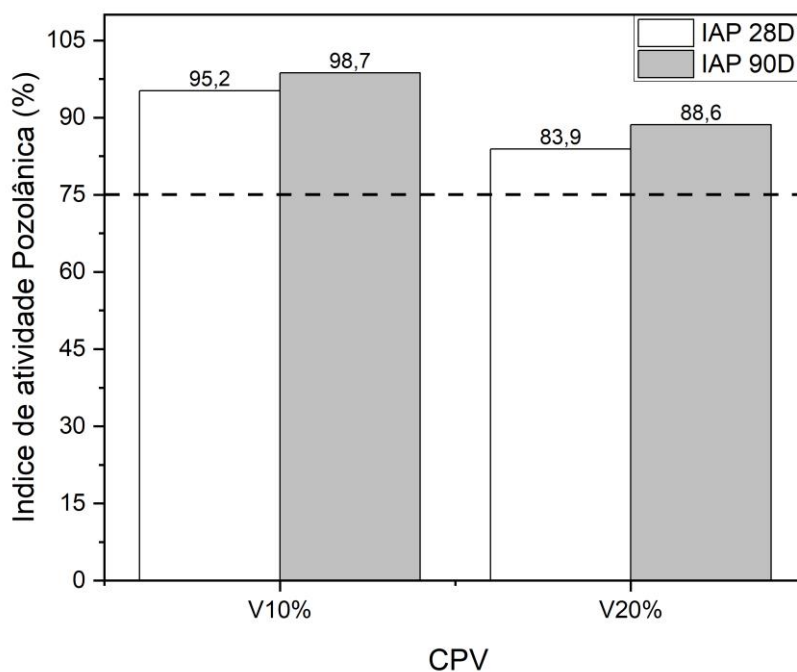
Figura 18 - Ensaio de compressão cimento CII-F nas idades de 28 e 90 dias



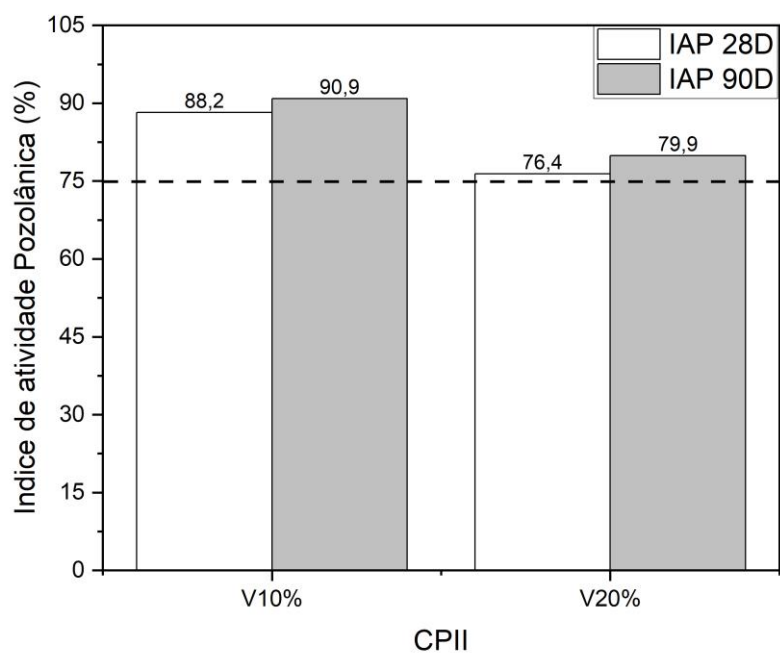
Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20 mostram que os índices de atividade pozolânica são superiores ao valor mínimo de 75%, conforme estabelecido nas normas ASTM C618 e NBR 5752. Estes resultados indicam que o pó de vidro pode ser classificado como material pozolânico para ser usado como substituição parcial do cimento.

Figura 19 - Índice de atividade Pozolânica CPV-ARI



Fonte: Autoria própria

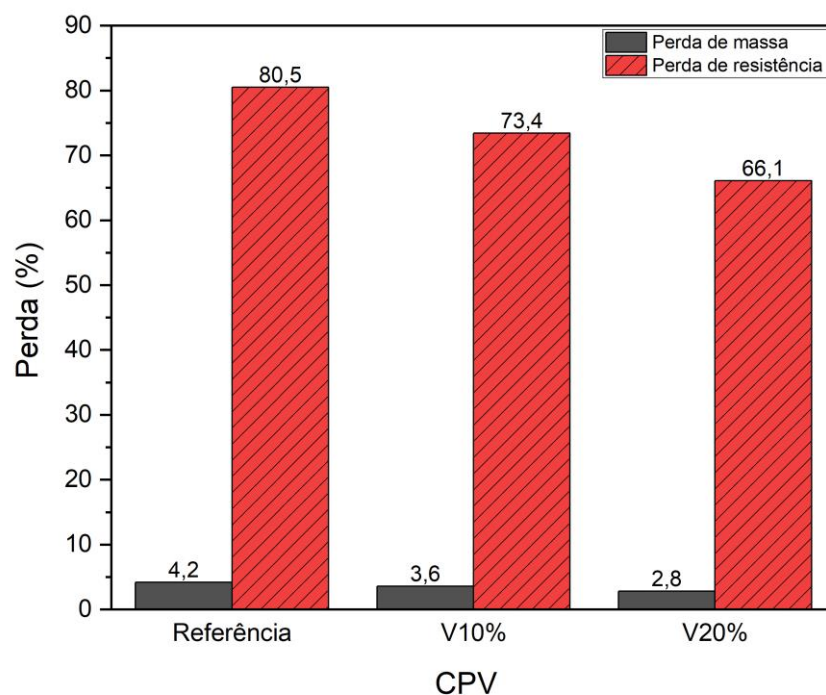
Figura 20 - Índice de atividade Pozolânica CII-F

Fonte: Autoria própria

6.4 PERDA AO FOGO

A Figura 21 mostra as perdas de massa e resistência das argamassas após tratamento térmico. Observa-se uma diminuição das perdas de massa e resistência com o aumento do teor substituição parcial do cimento. Isso se deve à maior formação de hidratos (como C-S-H) durante a reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa presente no pó de vidro.

Figura 21 - Perda de massa e resistência após aquecimento de 700 °C



Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho, por meio dos resultados pode-se concluir que o pó de vidro é um material viável como substituição parcial do cimento Portland para a produção de argamassas.

- O cimento com melhor comportamento foi o CPV-ARI.
- A análise termogravimétrica evidenciou a atividade pozolânica do resíduo de pó de vidro.
- O ensaio de absorção de água por capilaridade mostrou que o pó de vidro pode ser utilizado até uma percentagem de 10% em massa para melhorar a durabilidade dos materiais cimentícios elaborados a partir do cimento CPV-ARI.
- A substituição parcial do cimento por 10% em massa de pó de vidro permite obter resultados similares a aqueles do corpo de prova de referência aos 90 dias. Além disso, o índice de atividade de pozolânica de todas as argamassas contendo pó de vidro excede o requisito mínimo de 75% estipulado pela norma ASTM C618.
- A substituição parcial do cimento por 10% em massa de pó de vidro aumenta a resistência ao fogo, o que resulta em uma melhoria na durabilidade das argamassas aos 28 dias.

8 REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO. Vidro: o resíduo infinitamente reciclável. 2019. Disponível em: <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>. Acesso em 5 de março, 2024.
- ALMEIDA, Alessandra Etuko Feuzicana de Souza; SICHIERI, Eduvaldo Paulo. Thermogravimetric analyses and mineralogical study of polymer modified mortar with silica fume. **Materials research**, v. 9, p. 321-326, 2006.
- ANJOS, M. A. S. et al. Avaliação da atividade pozolânica de microsílica cinza densificada e não densificada. **Holos**, v. 7, p. 88-99, 2016.
- ARAÚJO, A. P. et al. Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Uma breve história do cimento Portland. Disponível em: <<https://abcp.org.br>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- ASTM, C. 618. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**, 2003.
- BARDINI, I. S.; MARCHIORO, T. B. **Um estudo exploratório do uso de vidro reciclado como agregado de concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.
- Barros, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. 2016. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 2016.
- CASTRO, Vinicius Gomes de. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro**. EdUFERSA, 2021.
- CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. Disponível em <www.cempre.org.br>. Acesso em 23 março, 2024.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, VICTOR CARLOS. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

DE MELO, Guilherme Henrique Aires; MOREIRA, Karla Cristina Bentes; SANTOS, Vinicius Ferreira. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 12, n. 1, 2023.

EN, N. F. 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques. **French Standard**, 2006.

FRÍAS, Moisés; CABRERA, Joseph. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 4, p. 561-569, 2000.

GLASSER, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. **Journal of hazardous material**, v. 52, p. 151-170, 1997.

HOPPE FILHO, Juarez et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chappelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, p. e11872, 2017

HOSSAIN, M.; POON, C.; DONG, Y.; XUAN, D. (2018). Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 597–608.

IDIR, Rachida; CYR, Martin; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1309-1312, 2010.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1078-1083, 2009

LIOTTO, Pedro Felix; SANTANA, Genilson Pereira. O uso do vidro em concreto: revisão. **Scientific Amazonia**, v. 9, n. 2, p. C1-C12, 2020.

LOPES, Daniele Ferreira; SILVA, Sabrina Neves da. Avaliação das propriedades de argamassas cimentícias com adição de resíduos da geração termoelétrica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13100, 2022.

LOPES, Raduan Krause et al. Substituição parcial de cimento Portland por resíduo moído de vidro industrial em argamassas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, p. e14214, 2021.

MAROLIYA, M. K. Estimation of Water Sorptivity as Durability Index for Ultra High Strength Reactive Powder Concrete. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 4, n. 3, p. 53-56, 2012.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 36, 2012. p. 205-215.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

Matos, Ana Mafalda. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Materiais e Processos de Construção), Universidade do Porto, Portugal, 2009.

NBR, ABNT. 5736-Cimento Portland Pozzolânico. **Associação Brasileira de**, 1991.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. PINI, São Paulo, n. 2, 1997.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

RODIER, L. et al. Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. **Materials and structures**, v. 50, p. 1-14, 2017

RODIER, Loïc; SAVASTANO, Holmer. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 184, p. 333–341, 2018. a. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.269.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias**. Fortaleza, 2010.

Santos, I. R. S., Lima, J. N., Castro, E. R. C. **Estudo de substituição do agregado graúdo no concreto por resíduo de vidro**. **Congresso Internacional de Patologia y Recuperación de Estructuras**, 15 ed., Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2019. 11-21p.

SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., LOTHENBACH, B., **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**, Taylor & Francis Group, 2016.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**. Elmsford, 2000.

SHI, WU Y, RIEFLER C, WANG H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, 2005.

SIMÕES, Lorena Jordoni. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2013.

SILVA, Danillo de Almeida; MELO, Carlos Eduardo Luna de. Argamassa aderida, o elo fraco no concreto reciclado: uma revisão. 2021.

SILVA, Cícero Joelson Vieira et al. Avaliação das propriedades de argamassas com substituição parcial do agregado por resíduo de vidro. **Engenharia no Século XXI Volume 13**, p. 60.

WILD, S.; KHATIB, Jamal M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and concrete research**, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.