

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

NIVALDO JOSÉ MOSER

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM COMPÓSITOS DE
ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO APÓS EXPOSIÇÃO A
ELEVADAS TEMPERATURAS**

Farroupilha

2019

NIVALDO JOSÉ MOSER

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM COMPÓSITOS DE
ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO APÓS EXPOSIÇÃO A
ELEVADAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon

Farroupilha

2019

CIP - Catalogação na Publicação

M899a

Moser, Nivaldo José, 1960-

Avaliação da resistência mecânica em compósitos de argamassa com adição de pó de vidro após exposição a elevadas temperaturas / Nivaldo José Moser -- 2019.

76 f.

Orientador: Douglas Alexandre Simon.

Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2019.

1. Resistência de materiais. 2. Materiais compósitos. 3. Concreto. 4. Argamassa. 5. Pó de vidro. I. Simon, Douglas Alexandre, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.17

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária
Rejane Cristina Job CRB 10/1639

NIVALDO JOSÉ MOSER

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM COMPÓSITOS DE ARGAMASSA
COM ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Daniela Lupinacci Villanova – IFRS
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Prof.^a Dr.^a Janete Eunice Zorzi – UCS
Universidade de Caxias do Sul

Prof.^a Dr.^a Eveline Bischoff –IFRS
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon-IFRS
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Apresentado e aprovado em: 18 de outubro de 2019.

Local da defesa: IFRS – Campus Farroupilha

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Vito (in memoriam) e Balilde,
pelos valores e exemplos, de vida e dignidade.

À minha esposa Vera, pela compreensão,
carinho e por minhas longas ausências.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram direta e indiretamente para esse trabalho e sou grato a todas elas.

Quero deixar meus agradecimentos ao Professor Dr. André Zimmer que muito contribuiu em orientações e conselhos.

Ao Professor Dr. Saulo R. Bragança, pelas orientações e correções.

Ao Professor Dr. Douglas Simon, por acreditar no meu trabalho, pela oportunidade de concluí-lo e pelos incentivos.

Agradecimento muito especial ao Professor Dr. Edson L. Francisquetti que, mesmo com seu pai, o Sr. Valdemar, gravemente doente, não mediu esforços em me orientar, fazer as correções, além de não me deixar desistir de lutar. Muito obrigado!

Epígrafe

Nenhum vento sopra a favor de quem não
sabe para onde ir (Sêneca).

RESUMO

Concretos e argamassas, amplamente empregados na construção civil, oferecem grande resistência mecânica na temperatura ambiente. Porém, ao serem submetidos a elevadas temperaturas, como no caso de incêndio, perdem essas propriedades devido à remoção da água estrutural dos silicatos na matriz de cimento. O objetivo principal desse trabalho é avaliar a resistência mecânica de compósitos constituídos de argamassa e pó de vidro, com 28 dias de cura e após exposição a elevadas temperaturas. Foi estabelecida uma argamassa sem vidro como padrão de referência e outras três formulações contendo pó de vidro. As proporções de cimento e cal hidratada foram mantidas em todas as formulações. A formulação com pouco vidro foi constituída por 1,2 volumes de pó de vidro para 4,8 volumes de areia, enquanto a formulação com mais vidro teve três volumes de cada e outra somente com pó de vidro como agregado. Após exposição a elevadas temperaturas, 800, 1000 e 1200 °C, os corpos de prova contendo 20% de vidro, apresentaram resistência mecânica e integridade física, enquanto que o mesmo não foi observado para o padrão de referência. Esses resultados demonstraram a viabilidade potencial do pó de vidro para o desenvolvimento de uma argamassa resistente a elevadas temperaturas.

Palavras-chave: *argamassa; pó de vidro; elevadas temperaturas; resistência mecânica.*

ABSTRACT

Concrete and mortar widely used in construction offer great mechanical resistance at room temperature. However, when subjected to high temperatures as in the case of fire they lose these properties due to the removal of structural water from silicates in the cement matrix. The main objective of this work is to evaluate the mechanical strength of composites composed of mortar and glass powder with 28 days of cure and after exposure to high temperatures. A mortar without glass was established as a reference standard and three other formulations containing glass powder. The proportions of cement and hydrated lime were maintained in all formulations. The low-glass formulation consisted of 1.2 volumes of glass powder to 4.8 volumes of sand while the more-glass formulation had three volumes each and one with only glass powder as an aggregate. After exposure to high temperatures, 800, 1000 and 1200 °C, specimens containing 20% glass powder showed mechanical resistance and physical integrity while, it was not observed for the reference standard. These results demonstrated the potential viability of glass powder for the development of a high temperature resistant mortar.

Keywords: mortar; glass powder; high temperatures; mechanical resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferenças entre pasta, argamassa e concreto.....	6
Figura 2 - Contribuição dos principais componentes do cimento na resistência à compressão.....	9
Figura 3 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 25 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.....	11
Figura 4 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 300 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.....	12
Figura 5 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 500 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.....	12
Figura 6 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 700 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.....	13
Figura 7 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 1000 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.....	15
Figura 8 - Gel produzido pela reação álcali sílica.....	24
Figura 9 - Fluxograma da metodologia.....	28
Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica da areia.....	35
Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do pó de vidro.....	36
Figura 12 - Variação dimensional - cura de 28 dias.....	37
Figura 13 - Corpos de prova após exposição a 1000 °C.....	39
Figura 14 - Corpos de prova AL50 (A) e AL20 (B) após serem submetidos à temperatura de 1200 °C.....	39
Figura 15 - Resistência à flexão para todas as amostras.....	42
Figura 16 - Micrografia da face interna da amostra AL20 após ser submetida a 1200 °C. (Q) quartzo; (P) poros; (FV) Fase Vítreas.....	43
Figura 17 - Resistência à compressão para todas as amostras.....	45
Figura 18 - Micrografias da face interna das amostras AL0, AL20, AL50 e AL100 após cura de 28 dias em temperatura de 25 °C.....	46
Figura 19 - Micrografia da face interna da amostra de AL20 após exposição a 800 °C.....	47
Figura 20 - Micrografia da face interna da amostra AL20 após exposição a 1000 °C.....	47
Figura 21 - Micrografia da face interna da amostra AL50 após exposição a 1000 °C.....	48
Figura 22 - Micrografia da face interna da amostra AL100 após exposição a 1000 °C.....	49
Figura 23 - Absorção de água.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições do cimento Portland.....	7
Tabela 2 - Nomenclatura e siglas dos principais compostos do cimento Portland.....	8
Tabela 3 - Composição química básica do vidro sodo-cálcico.....	16
Tabela 4 - Formulações, proporções e códigos de identificações adotados.	30

LISTA DE ABREVIATURAS

ASR	Reação Álcali-Sílica (do inglês: Alkali-Sílica Reaction).
CKSH	Silicato de Potássio Hidratado.
CNaSH	Silicato de Cálcio Sódio Hidratado.
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado.
FV	Fase Vítreo.
g	grama.
Kgf/s	Quilograma-força por segundo.
mm	Milímetro.
n	número de mol.
µm	Micrometro.
P	Poros.
PDV	Pó de vidro.
PPRV	Programa Permanente de Reciclagem do Vidro.
Q	Quartzo.
T. A.	Temperatura Ambiente.
°C/min	Grau Celsius por minuto.
°C	Grau Celsius.
cm ² /g	Centímetro quadrado por grama.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVO GERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 COMPÓSITOS	4
2.2 ARGAMASSAS E CONCRETOS	4
2.2.1 Principais reações na cura do cimento Portland	6
2.3 CONCRETOS E ARGAMASSAS EM ELEVADAS TEMPERATURAS	10
2.3.1 Degradação de concreto e argamassas em altas temperaturas	11
2.4 VIDROS.....	15
2.4.1. Principais tipos de vidro.....	15
2.4.2 Propriedades dos vidros.....	16
2.4.3 Comportamento do vidro em altas temperaturas	17
2.4.3.1 Sinterização.....	17
2.4.4 A questão ambiental do vidro como resíduo	18
2.4.5 Aplicações do vidro em concreto e argamassas	19
2.4.5.1 O vidro como substituto do cimento e propriedade pozolânica	19
2.4.5.2 Vidro como substituto do agregado (areia) em argamassas	21
2.4.5.3 Reação Álcali Sílica (ASR)	22
2.4.6 Efeitos do pó de vidro em argamassas após altas temperaturas.	24
3 MATERIAIS	27
3.1 DESCRIÇÕES DOS MATERIAIS.....	27
4 METODOLOGIA	28
4.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA	28
4.2 PREPARAÇÕES DOS MATERIAIS	29
4.2.1 Areia	29

4.2.2	Pó de vidro	29
4.3	PREPARAÇÕES DOS MOLDES	29
4.4	PREPARAÇÕES DAS ARGAMASSAS E COMPÓSITOS	30
4.4.1	Formulações.....	30
4.4.2	Homogeneização dos ingredientes das argamassas e compósitos	30
4.5	CONFORMAÇÕES E DESMOLDES DOS CORPOS DE PROVA.....	31
4.6	TRATAMENTOS TÉRMICOS	31
4.7	CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS E CORPOS DE PROVA.....	32
4.7.1	Variação dimensional	32
4.7.2	Resistência mecânica.....	32
4.7.2.1	Resistencia mecânica à flexão	33
4.7.2.2	Resistência mecânica à compressão	33
4.7.3	Absorção de água.....	33
4.7.4	Microestrutura	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1	ANÁLISES GRANULOMÉTRICA DA AREIA E PÓ DE VIDRO.....	34
5.2	VARIAÇÃO DIMENSIONAL	36
5.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	40
5.3.1	Análise da resistência mecânica	41
5.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	49
6	CONCLUSÕES.....	52
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Os produtos feitos à base de cimento Portland são muito vantajosos, pois utilizam materiais simples como brita, areia e cal hidratada. São de fácil manuseio, adquirem resistência mecânica satisfatória em 48 horas e após 28 dias atingem resistências mecânicas elevadas (ABCP, 2002; BAUER, 2000). Os materiais cimentícios encontram enorme aplicação no ramo da construção civil, principalmente, na forma de concretos e argamassas. Os concretos têm função estrutural, enquanto as argamassas podem atuar como ligantes entre blocos cerâmicos, como em assentamentos de alvenaria ou como revestimento de paredes (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007).

No entanto, uma desvantagem é a degradação do material cimentício após ser exposto a elevadas temperaturas. Nesse caso, um dos itens de relevância é o que se refere à segurança das edificações. Mais especificamente em relação a incêndios nas construções de alvenaria, em que podem atingir temperaturas elevadas causando a degradação do material cimentício, tornando a resistência mecânica da edificação seriamente comprometida (INGHAM, 2009; RIGÃO, 2012). Segundo Nadjai et al. (2006), paredes construídas em alvenaria, após sofrerem exposição a elevadas temperaturas como em um incêndio, podem entrar em colapso estrutural, pois, além da degradação das propriedades da argamassa, geralmente o fogo se desenvolve em apenas um lado da parede, gerando tensões que tendem ao encurvamento devido à expansão térmica diferencial localizada.

A construção civil segue normas nacionais e internacionais de dimensionamento das estruturas, de maneira a garantir que resistam, por determinado tempo, em situação de incêndio, antes de sofrer colapso (INGHAM, 2009; BAILEY, 2004). Em termos de normatização nacional as principais são: NBR 15200:2012, NBR 14432:2001 e NBR 14323:2013. Entre as normatizações internacionais, podemos citar o Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005).

Segundo Freire (2016), o vidro tem ganhado espaço na construção civil, tanto em termos de construção como decoração, devido ao emprego de alta tecnologia em sua fabricação. Além disso, possui propriedades importantes, tais como conforto térmico e acústico e por permitir maior aproveitamento da luz natural. Porém, segundo Maia (2003), o aumento no consumo de vidro gera, também, grandes quantidades de

resíduos desse material que torna crescente a importância de estudos no sentido de recolocar esse material novamente na cadeia produtiva.

O presente trabalho visa avaliar o efeito da incorporação do pó de vidro em argamassa, principalmente, em termos de resistência mecânica, antes e após elevadas temperaturas e também, contribuir para a redução do problema ambiental pelo reaproveitamento dos rejeitos de vidro.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Os usos de produtos cimentícios encontram grandes aplicações, principalmente na Construção civil. O grande crescimento desse setor causa diversos tipos de impacto ambiental.

A produção de cimento Portland lança na atmosfera 1/2 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido, considerando apenas a reação química principal (NWAUBANI; POUTOS, 2013). Segundo Scrivener e Kirkpatrick (2008), de todo CO₂ produzido pela ação humana, 5 a 8% é gerado na fabricação do cimento Portland.

Além do cimento, o uso em larga escala de concretos e argamassas, contribui para o esgotamento precoce de jazidas como de areia, calcário e rocha, cuja exploração causa degradação de áreas ambientais pela retirada desse material (RAKSHVIR; BARAI, 2006, TERRO, 2006).

O uso do vidro também gera grandes quantidades de resíduos que são depositados em aterros, ocupando considerável espaço (SHAO et al., 2000; TERRO, 2006).

Apesar dos produtos cimentícios serem muito resistentes e duráveis, quando expostos a elevadas temperaturas se deterioram, perdendo sua resistência mecânica o que pode causar colapso de uma edificação em situação de incêndio, colocando em risco os ocupantes e as equipes de salvamento (BAILEY, 2004; INGHAM, 2009)

O presente trabalho estuda a resistência de argamassa contendo vidro incorporado após exposição a elevadas temperaturas. Também, contribui para o desenvolvimento, em etapa subsequente, de uma argamassa capaz de resistir a

elevadas temperaturas e reduzir os riscos de colapsos das estruturas cimentícias, como em casos de incêndio ou de aplicações de natureza semelhante.

Além disso, o trabalho pode contribuir para a redução do consumo de cimento, pois o vidro apresenta propriedades pozolânicas, reduzindo a emissão de CO₂. Também, na redução do consumo de areia, pois pode atuar como agregado, prolongando a vida útil das jazidas em operação e protegendo os recursos naturais. Pela utilização dos rejeitos de vidro, pode diminuir os depósitos desse material nos aterros.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este estudo propõe correlacionar com uma argamassa padrão de referência, a resistência mecânica de compósitos contendo pó de vidro, tanto em temperatura ambiente como após exposição a elevadas temperaturas, para o desenvolvimento de um material compósito para aplicação como argamassa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a obtenção do objetivo proposto, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o pó de vidro quanto à distribuição do tamanho de partícula.
- b) Caracterizar a argamassa usada como padrão de referência.
- c) Obter compósitos com diferentes teores de pó de vidro.
- d) Caracterizar os diferentes compósitos.
- e) Avaliar a resistência mecânica dos diferentes compósitos em temperatura ambiente e após exposição nas temperaturas de: 800, 1000 e 1200 °C.
- f) Avaliar o potencial da utilização do pó de vidro no desenvolvimento de uma argamassa resistente a elevadas temperaturas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPÓSITOS

Os compósitos são reconhecidos como uma classe distinta, baseada no conceito de combinar vários tipos de materiais durante a fabricação, a fim de obter um material com propriedades muito superiores a qualquer outro material monolítico convencional. As fases constituintes de um compósito devem ser quimicamente diferentes e estarem separadas por uma interface distinta (CALLISTER, 2012).

Muitos materiais compósitos são formados por apenas duas fases: Uma denominada matriz, que é contínua e envolve a outra, denominada fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Subentende-se por geometria da forma dispersa: a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das partículas. O concreto é um exemplo bem conhecido de compósito. Pertence a um grupo de compósitos conhecido como compósito de partículas grandes no qual, a matriz (cimento) e o disperso (areia e brita) são materiais cerâmicos (CALLISTER, 2012).

2.2 ARGAMASSAS E CONCRETOS

Existem vários tipos de argamassas e concretos, destinados aos mais variados tipos de aplicações. As argamassas mais comuns, como de assentamento ou revestimento, são constituídas basicamente por cimento, cal hidratada e areia (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007). Os concretos mais comuns são constituídos fundamentalmente por cimento, agregado fino (areia) e agregado graúdo (brita) (CALLISTER, 2012). A norma NBR 13281:2005, que estabelece os tipos de argamassa, aplicações e os requisitos mínimos, define argamassa como:

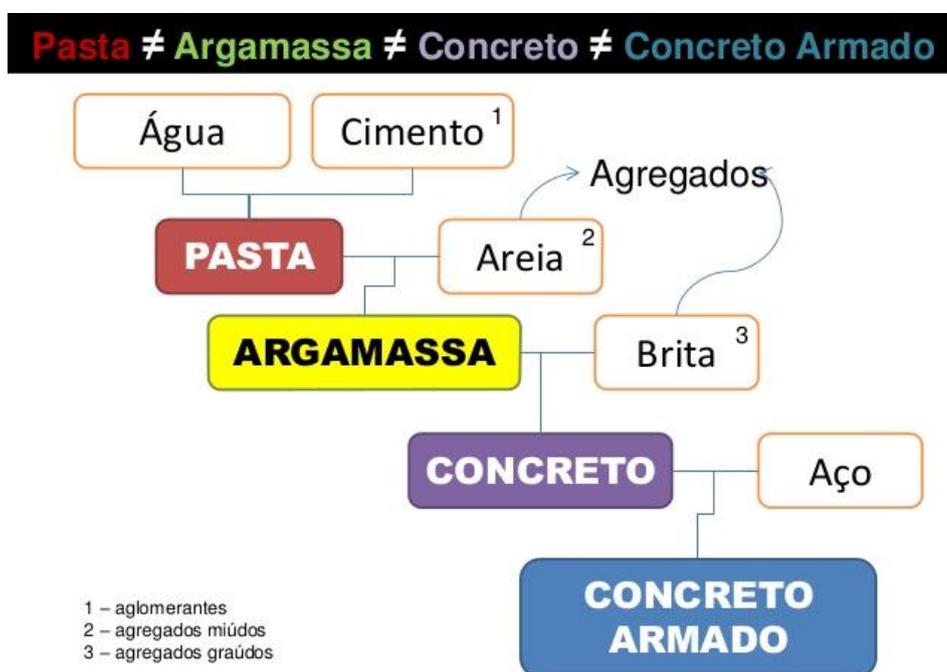
“argamassa: Mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).” (2005, p.2).

As composições das argamassas variam nas proporções dos seus constituintes de acordo com a aplicação na obra. O cimento é o aglomerante que possui a propriedade de manter unidas as partículas da argamassa. A cal hidratada é de boa qualidade quando possui em torno de 88% em óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), considerados componentes ativos. Sua principal função é aumentar a plasticidade da argamassa, melhorar a retenção de água e ampliar a extensão da aderência ao substrato. A areia é o agregado inerte, que é mantido unido pelo aglomerante. As areias com maior granulometria tendem a aumentar a resistência à compressão enquanto aquelas que só possuem partículas menores formam argamassas com menor resistência, mas com maior aderência e por isso são utilizadas como argamassas de assentamento e revestimento (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007).

Segundo Garcia, Santos, Ribeiro (2011), o concreto pode ser considerado como uma argamassa na qual foi adicionado um agregado graúdo e suas propriedades estão suportadas pela constituição dessa argamassa. No entanto, deve-se ter a clareza da diferença fundamental entre concreto e argamassa. O concreto é um elemento estrutural por si só, sendo uma argamassa que contém agregado graúdo, enquanto a argamassa tem a função de ligar unidades estruturais entre si. No concreto a resistência à compressão é essencial enquanto que na argamassa é secundária (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007; ROMANO, 2004).

A Figura 1 ilustra as diferenças entre pasta, argamassa, concreto e concreto armado, bem como as diferenças entre aglomerante, agregados miúdos e graúdos.

Figura 1 - Diferenças entre pasta, argamassa e concreto.



Fonte: Grubba (2016).

2.2.1 Principais reações na cura do cimento Portland

Os cimentos mais comuns e mais consumidos no mundo são do tipo Portland que, por sua vez, são muito diversificados. Essa diversificação está relacionada, principalmente, em função da sua composição, para atender necessidades específicas. Os principais tipos de cimentos usados da construção civil são: cimento Portland comum, cimento Portland composto, cimento Portland de alto forno e cimento Portland pozolânico (ABCP, 2002; BAUER, 2000).

Para as argamassas mais usadas, assentamento e revestimento, os tipos de cimento mais usados são: o cimento de escória de alto forno CP-III e o cimento pozolânico CP-IV (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007). O Cimento Portland é identificado pela sigla CP seguido de um algarismo romano que indica a composição.

A Tabela 1 apresenta as composições e as siglas para os tipos de cimento Portland mais utilizados.

Tabela 1 - Composições do cimento Portland

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I CP I-S	100 99-95			- 1-5	NBR 5735
Composto	CP II-E CP II-Z CP II-F	6-34 - -	6-34 - -	- 6-14 -	0-10 0-10 6-10	NBR 11578
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: adaptado de ABCP (2002); Bauer (2000).

A função do cimento na argamassa, é conferir resistência mecânica, promover a aderência ao substrato, reter água e contribuir para a plasticidade. Os cimentos CP-III e CP-IV são os mais utilizados para argamassa porque reagem mais lentamente, absorvendo melhor as pequenas deformações (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007).

Segundo Bauer (2000), o cimento é constituído fundamentalmente pelos seguintes materiais: óxido de cálcio (Ca) (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (magnésia) (MgO) e pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3). Possui ainda, em menor quantidade, impurezas, como óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) que constituem os álcalis do cimento, óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância.

Os principais compostos químicos do cimento Portland são silicatos, aluminatos e ferro-aluminatos, que possuem uma nomenclatura específica, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclatura e siglas dos principais compostos do cimento Portland.

Composto	Fórmula	Sigla
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A

Fonte: Adaptado de BAUER (2000); NEVILLE (1997); ROMANO (2004).

Silicatos são compostos anidros. Quando misturados com água reagem formando produtos hidratados e insolúveis. Simplificadamente, as principais reações do cimento Portland podem ser escritas conforme consta no Quadro 1.

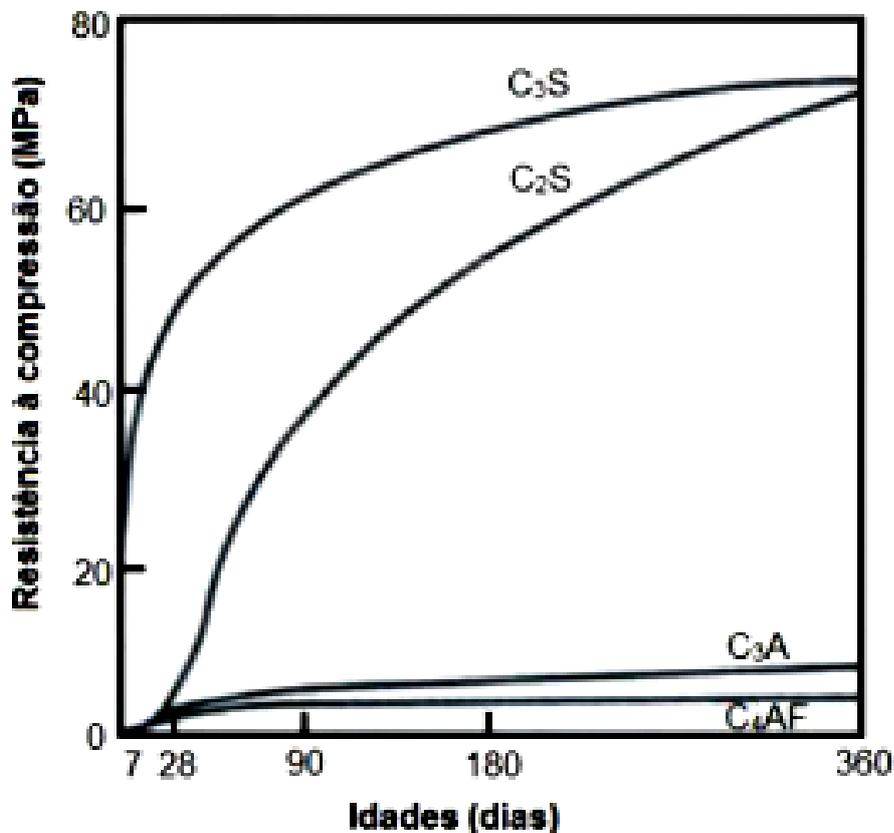
Quadro 1 – Principais reações do cimento Portland.

<p>ETAPA 1:</p> <p>Na presença de água a reação começa pelo aluminato tricálcico:</p> $\text{C}_3\text{A} + \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
<p>ETAPA 2:</p> <p>Em seguida reage o silicato tricálcico.</p> $\text{C}_3\text{S} + 4,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ $2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2 \cdot 3\text{H} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$
<p>ETAPA 3:</p> <p>Os silicatos dicálcicos reagem mais tarde:</p> $\text{C}_2\text{S} + 3,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ $2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2 \cdot 3\text{H} + \text{Ca}(\text{OH})_2$

Fonte: Adaptado de BAUER (2000); NEVILLE (1997); ROMANO (2004).

A Figura 2 mostra as progressões das reações dos principais componentes no processo de cura com relação ao tempo. Pode se ver que os aluminatos, apesar de iniciarem a reação, contribuem muito pouco para a resistência mecânica do cimento em relação aos silicatos e não aumentam, de forma significativa, sua resistência mesmo em idades mais avançadas. O silicato tricálcico é o componente que mais produz resistência mecânica em curto espaço de tempo. Aos 28 dias, a resistência do cimento se deve basicamente a esse componente. O silicato dicálcico mostra uma evolução mais lenta na resistência, porém atinge altos valores em idades mais avançadas. As resistências desses dois componentes tendem a convergir para valores muito próximos em torno de 360 dias. As formulações dos silicatos tricálcico e dicálcico (C_3S e C_2S) contribuem de forma primordial nas resistências dos compostos de cimento (BAUER, 2000; NEVILLE, 1997; NEVILLE; BROOKS, 2013; ROMANO, 2004).

Figura 2 - Contribuição dos principais componentes do cimento na resistência à compressão.



2.3 CONCRETOS E ARGAMASSAS EM ELEVADAS TEMPERATURAS

No ramo da alvenaria encontram-se os principais exemplos de efeitos causados por elevadas temperaturas em concretos e argamassas, principalmente, no caso de incêndios. Numa situação de incêndio, a alvenaria se comporta relativamente bem a altas temperaturas apresentando boa capacidade de isolar ambientes em relação à passagem de calor, do fogo e dos gases. As paredes podem ser usadas para a compartimentação dos ambientes e isolar os locais atingidos pelo sinistro, evitando a propagação do fogo (ANDREINI; SASSU, 2011).

O concreto sofre expansão durante o aquecimento. Esse aquecimento faz com que o volume do agregado aumente ao mesmo tempo em que causa a contração da pasta de cimento que o rodeia tornando a ligação entre a pasta de cimento e o agregado o ponto mais frágil do material aquecido (PANCAR, 2017).

Porém, o material que compõe a argamassa de assentamento dos blocos, que é a responsável pela integridade da parede, sofre grandes efeitos e transformações quando submetidas a altas temperaturas. Segundo Morales, Campos, Faganello (2011):

“O efeito da elevação da temperatura sobre o concreto e as argamassas de cimento é pequeno e de certa forma irregular até os 250 °C. Este efeito se torna bastante acentuado e compromete a integridade da estrutura quando a temperatura ultrapassa os 300 °C, principalmente nos casos em que esta elevação é seguida do resfriamento rápido.” (2011, p. 54).

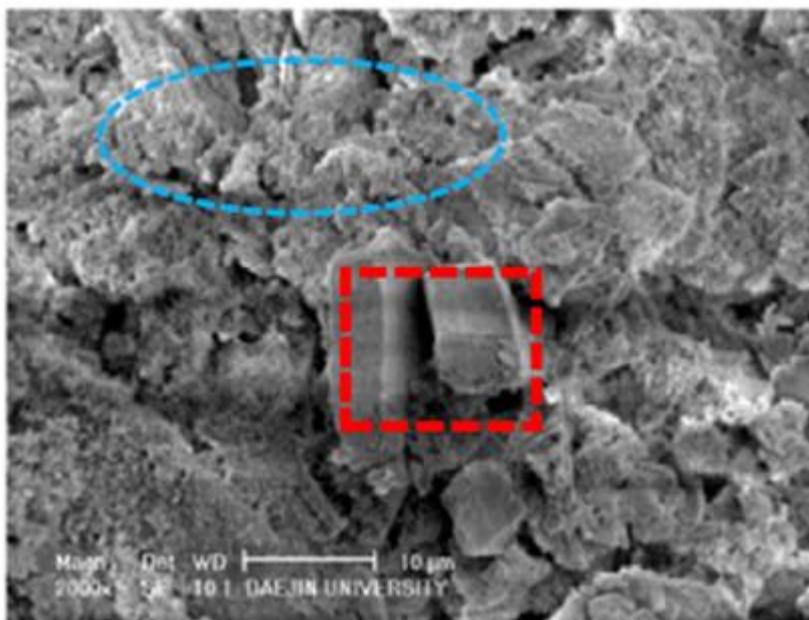
Temperaturas mais elevadas, da ordem de 800 °C, comprometem seriamente as estruturas feitas em alvenaria devido à perda da resistência dos componentes cimentícios (BAILEY, 2004). Segundo Inghan (2009), um incêndio com baixas temperaturas, mas que se prolonga por um determinado tempo, pode causar danos mais severos no material cimentício do que elevadas temperaturas por curto espaço de tempo.

2.3.1 Degradação de concreto e argamassas em altas temperaturas

O concreto, por ser utilizado como elemento estrutural, tem sido alvo de intensas pesquisas, uma vez que, quando submetido a altas temperaturas, sofre significativas reduções de resistência mecânica (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO, 2011). Em temperaturas baixas, 250 a 300 °C, os materiais que compõem a alvenaria, no máximo, apresentam mudança de cor, sem apresentar maiores danos (INGHAN, 2009).

Mais especificamente, entre 25 e 100 °C ocorre vaporização da água adsorvida e livre, ocasionando aumento da porosidade e tamanho dos poros, bem como alterações na distribuição desses poros, favorecendo a diminuição da densidade (KIM; YUN; PARK, 2013; KHOURY, 1992). A Figura 3 mostra a microestrutura da pasta cimentícia na temperatura ambiente. O círculo destaca o gel CSH e o retângulo, a portlandita (KIM; YUN; PARK, 2013).

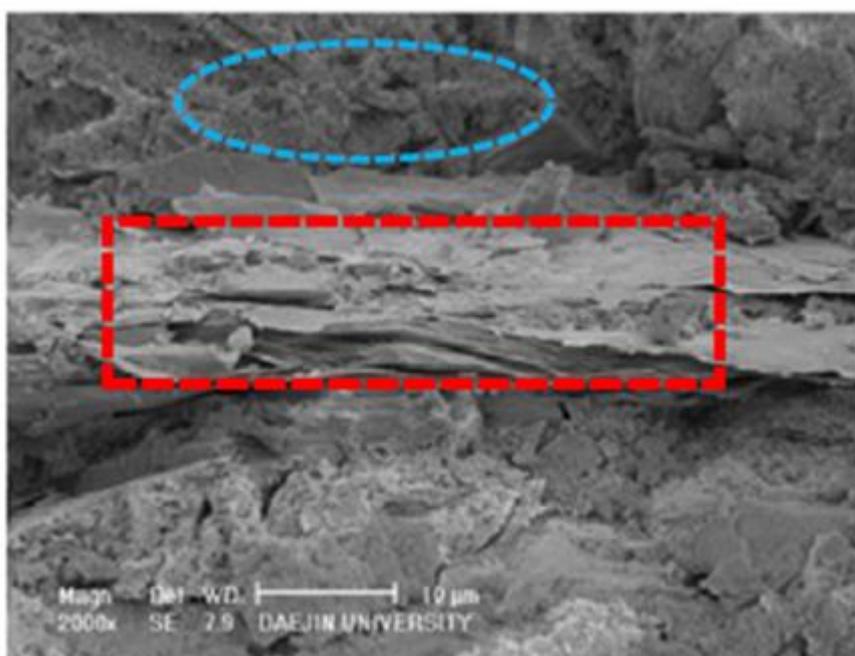
Figura 3 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 25 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.



Fonte: Adaptado de Kim, Yun, Park (2013).

Entre 100 e 400 °C ocorre uma diminuição da porosidade, apontada como resultado de uma hidratação adicional que ocorre no interior dos poros. Nesse caso, supostamente, grãos de cimento não hidratados durante o período de cura reagem com a água proveniente da desidratação, com base no fato de que essa formação de novos produtos de hidratação ocorre nos poros (KIM; YUN; PARK, 2013; KHOURY, 1992). Para os casos em geral, a temperatura de 300 °C é considerada uma temperatura crítica, acima da qual se considera que o concreto sofre danos significativos (INGHAN, 2009). A Figura 4 mostra a microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 300 °C, onde os produtos de hidratação do cimento como o gel CSH (círculo) e a portlandita (retângulo) ainda estão bem formados (KIM; YUN; PARK, 2013).

Figura 4 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 300 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.

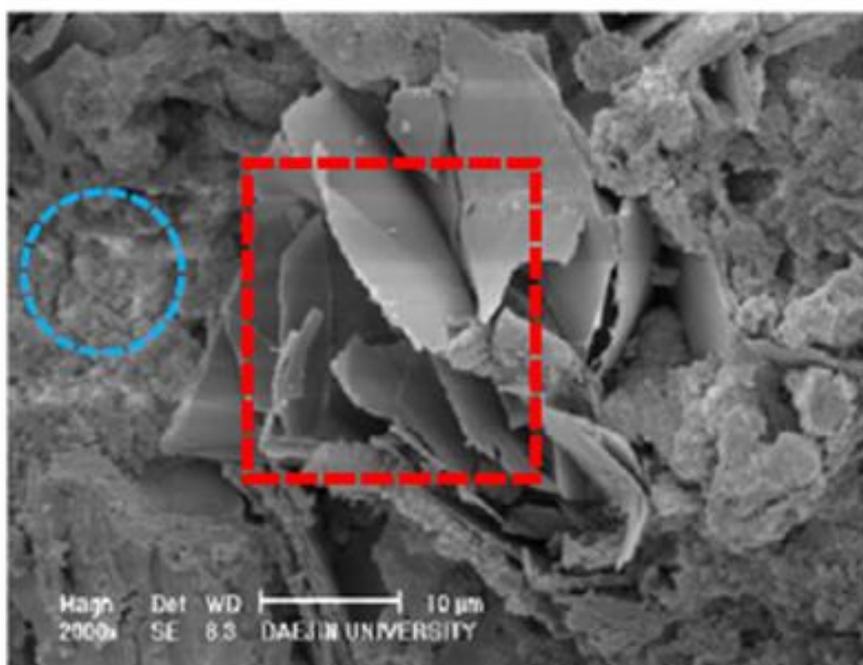


Fonte: Adaptado de Kim, Yun, Park (2013).

Quando as temperaturas sobem acima 300 °C, as argamassas começam a perder, progressivamente, suas propriedades inclusive, resistência mecânica. Na temperatura de 400 °C a perda de resistência mecânica é em torno de 50% (HAGER, 2013; RIGÃO, 2012). Segundo Kim, Yun, Park (2013), entre 450 a 500 °C a portlandita, uma estrutura hexagonal formada por $\text{Ca}(\text{OH})_2$, começa a se decompor. A

forma permanece intacta, mas apresenta sinais de separação de placas da estrutura hexagonal, indicando deformação na microestrutura em função da decomposição para formação de CaO. Na Figura 5 pode ser visto as deformações das placas na estrutura da portlandita (retângulo) na temperatura de 500 °C.

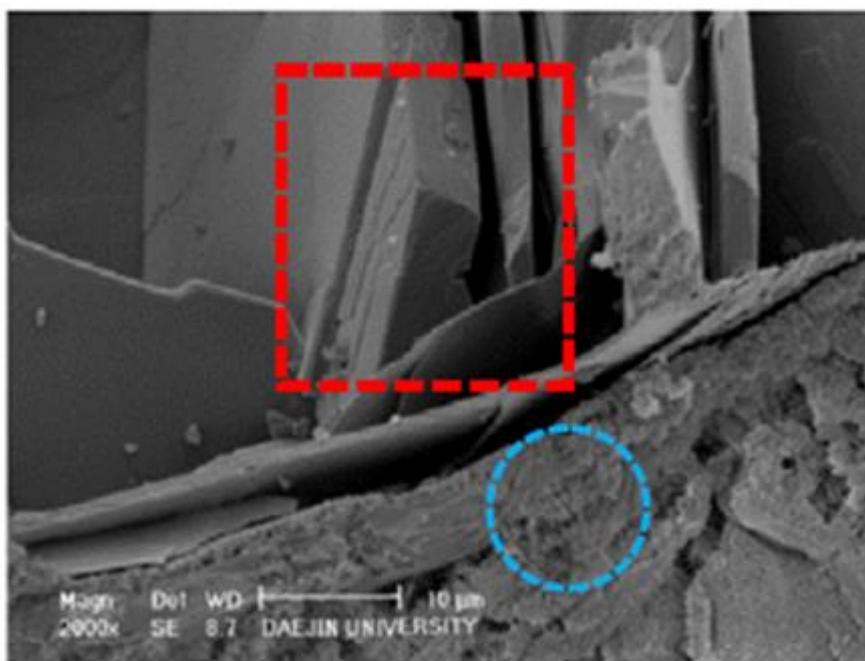
Figura 5 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 500 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.



Fonte: Adaptado de Kim, Yun, Park (2013).

Entre 500 e 700 °C ocorre a maior parte dos processos de desidratação dos produtos hidratados do cimento, que favorece o aumento da porosidade. Em função do aumento de vazios no mesmo volume, a densidade diminui. Devido à degradação, causada pela saída da água estrutural, começam a aparecer fissuras térmicas que se intensificam com o aumento da temperatura. Em 600 °C tem início a microfissuras no interior dos poros, que se intensificam e se propagam pelo material com o aumento da temperatura (INGHAN, 2009; KIM; YUN; PARK, 2013; HAGER, 2013). A Figura 6 mostra desprendimentos das placas de portlandita (retângulo) e redução na quantidade de gel CSH (círculo) devido à sua decomposição (KIM; YUN; PARK, 2013).

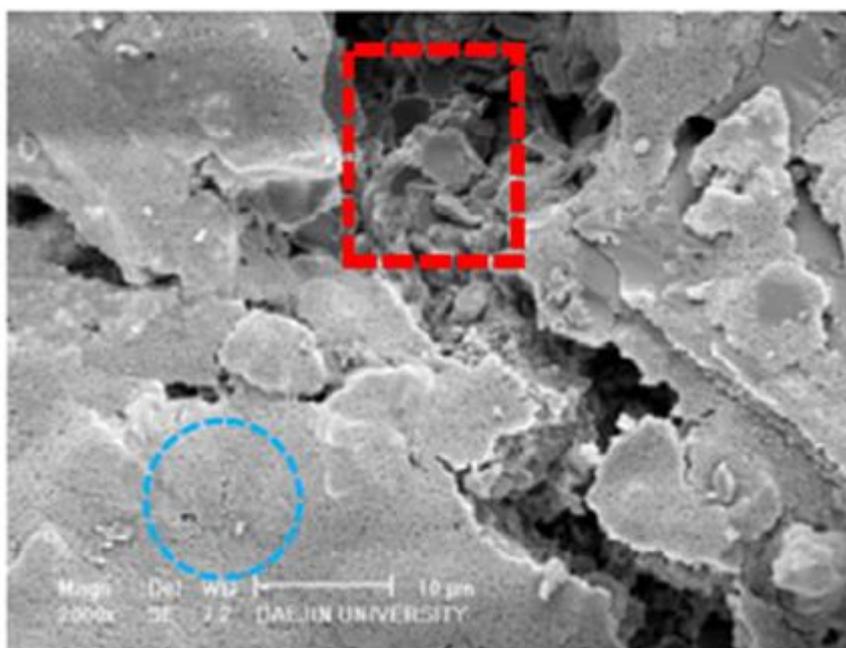
Figura 6 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 700 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.



Fonte: Adaptado de Kim, Yun, Park (2013).

Em torno de 800 a 900 °C, a argamassa de assentamento se deteriora completamente e não oferece resistência mecânica, comprometendo seriamente a integridade do material cimentícios (HAGER, 2013; INGHAN, 2009; RIGÃO, 2012, LIMA et al., 2005). Em 1000 °C o processo de desidratação está quase terminado e aparecem trincas de expansão térmica que se propagam para regiões com muitos vazios. A Figura 7 apresenta a microestrutura da pasta cimentícia após exposição a 1000 °C. Mostra uma espécie de membrana dentro de uma estrutura formada por produtos da decomposição dos silicatos hidratados, minerais e agregados fundidos. Remanescente, apenas uma pequena quantidade da estrutura hexagonal de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Também pode ser visto uma trinca e o estado geral de degradação do material (KIM; YUN; PARK, 2013).

Figura 7 - Microestrutura da pasta cimentícia na temperatura de 1000 °C. Retângulo identifica a Portlandita e o círculo, o gel CSH.



Fonte: Adaptado de Kim, Yun, Park (2013).

2.4 VIDROS

2.4.1. Principais tipos de vidro

Os vidros podem ser divididos em famílias. Exemplos de algumas dessas famílias: Vidros borossilicatos; Vidros alumino borossilicatos; Vidros sodo cálcicos.

A família dos vidros sodo cálcicos é uma das mais comuns e mais utilizadas. Esses vidros mantêm a facilidade de fusão, típica dos vidros alcalinos. Por conter óxidos de cálcio e sódio, se tornam quimicamente mais estáveis. As composições químicas desses vidros compreendem uma faixa estreita. A maioria possui de 8 a 12%, em massa, de óxido de cálcio para 12 a 17% de óxidos alcalinos. Uma quantidade maior de cálcio tende a devitrificar, ou seja, ocorre a cristalização. Com teores muito baixos de cálcio em relação aos óxidos alcalinos, há perda da estabilidade química, resultando em baixa durabilidade. São empregados na fabricação de garrafas, vasilhames, embalagens, potes, copos, vidros planos de

janelas, bulbos e tubos de lâmpadas (AKERMAN, 2000). Sua composição básica está representada na Tabela 3. A pouca variação em sua composição química é um fator que facilita sua reutilização (SANTOS, 2009).

Tabela 3 - Composição química básica do vidro sodo-cálcico.

Componentes	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
%	72	12,5	11	1,5	1	2

Fonte: Adaptado de Akerman (2000).

2.4.2 Propriedades dos vidros

O vidro é um material formado por silicatos. O silicato mais simples é o dióxido de silício (SiO₂) no qual os átomos se dispõem de maneira a formar um tetraedro. A diferença é que os silicatos não são formados por moléculas justapostas, mas, por uma rede tridimensional formada pelas unidades básicas desse tetraedro de silício-oxigênio. Isso acontece porque os átomos de oxigênio, que estão localizados nos vértices do tetraedro são compartilhados com os outros tetraedros à sua volta, o que torna o material eletricamente neutro (AKERMAN, 2000; CALLISTER, 2012). Dessa maneira, os tetraedros se ligam pelos vértices devido ao compartilhamento dos átomos de oxigênio, de tal forma que cada oxigênio fica ligado a dois átomos de silício e todos os quatro átomos de oxigênio ficam ligados a outros quatro tetraedros, formando assim uma rede tridimensional.

A sílica pode formar um sólido com arranjo desordenado e, portanto, não cristalino (amorfo). Nesse caso, tem-se o vidro, que se apresenta fisicamente como um sólido, mas sua estrutura é similar à de um líquido, devido ao grau de aleatoriedade atômica (CALLISTER, 2012). Quando são incorporados óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, tais como óxido de cálcio (CaO) ou óxido de sódio (Na₂O), à estrutura do vidro, os cátions se ligam ionicamente aos oxigênios da rede, modificando a estrutura. Nesse caso, existem pontos da rede na qual não se tem mais um oxigênio ligado a dois átomos de silício. Esses tipos de átomos são denominados modificadores de rede e causam uma diminuição na viscosidade do vidro. Por isso são utilizados como fundentes. A adição de alcalinos diminui a resistência química do vidro. Com altas concentrações de álcalis, o vidro pode tornar-se solúvel em água,

utilizado como matéria prima da indústria de silicatos solúveis, para a fabricação de adesivos, produtos de limpeza e películas protetoras (AKERMAN, 2000).

2.4.3 Comportamento do vidro em altas temperaturas

O comportamento dos vidros, em diferentes faixas de temperatura, depende fundamentalmente das características de sua estrutura que, por sua vez, é dependente da composição química. A história térmica também contribui, mas, em menor grau. A viscosidade é a propriedade mais importante para fabricação e trabalhabilidade do vidro. Para os vidros sodo cálcicos, em torno de 600 a 650 °C o vidro atinge uma viscosidade que permite a conformação plástica do material. No entanto, a melhor viscosidade que permite uma boa trabalhabilidade fica na faixa de 900 a 1100 °C. Acima dessa temperatura ocorre a fusão do vidro (AKERMAN, 2000).

2.4.3.1 Sinterização

A sinterização é um processo espontâneo que ocorre quando partículas que estão em contato mútuo são aquecidas até determinada temperatura. Em torno de 80 a 90% da sua temperatura de fusão, coalescem, formando uma partícula maior, com maior resistência mecânica (PRADO; ZANOTTO, 2002).

A força motriz da sinterização tem origem na diferença entre a energia da superfície e a energia no interior da partícula. Os átomos que estão na superfície possuem um estado mais elevado de energia devido a defeitos estruturais e rompimento de ligações, em relação aos que estão nas camadas mais internas da rede. Como a área superficial é o somatório da área individual de cada partícula, a energia de superfície está relacionada a essa área. Para reduzir essa energia e conferir maior estabilidade é necessário reduzir essa área. A medida da energia da força motriz, para ocorrer a sinterização, pode ser obtida pela razão entre a área superficial e o volume das partículas. Quanto maior essa razão, maior a tendência a sinterizar. Assim, quanto menor o diâmetro das partículas, maior será a força motriz para sinterizar (GERMAN, 1996; SĀLAK, 1995).

O pó de vidro sodo cálcico, como o usado em janelas, segundo Santos (2009), apresenta temperatura de início de sinterização, em torno de 750 °C. Porém, essa temperatura depende do tamanho das partículas do vidro. Quanto menores forem as partículas, menores serão as temperaturas de início da sinterização.

2.4.4 A questão ambiental do vidro como resíduo

O vidro é um material de fácil reciclagem e pode retornar para o processo produtivo inúmeras vezes. Na Europa e Estados Unidos, desde os anos 70 já é feita a reciclagem do vidro. No Brasil, o primeiro programa de aproveitamento do vidro, de forma racional, foi implantado em 1985. Em várias cidades brasileiras já existem Programas Permanentes de Reciclagem do Vidro (PPRV).

Um dos grandes problemas da reciclagem desse material reside no fato de que, para retornar aos fornos, deve estar limpo para não contaminar e alterar os padrões de qualidade do vidro produzido. O mesmo é válido para vidros de composições diferentes (MAIA, 2003). Por ser produzido em grande escala, o vidro acaba causando impacto ambiental quando se torna rejeito, sendo depositado em aterros. Pesquisas em vários ramos buscam formas de reutilização desse tipo de resíduo, principalmente na construção civil, pela incorporação em concretos e argamassas, na qual tem potencial para absorver grandes quantidades desse resíduo (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011).

Segundo Nwaubani e Poutos (2013), a utilização de resíduos de vidro em concretos contribui de duas formas no sentido de minimizar problemas ambientais. A primeira é através da reutilização dos rejeitos de vidro, reduzindo os impactos ambientais por eles causados e também por não ocupar espaço nos aterros, reduzindo o passivo depositado. A segunda é que pode substituir parte do cimento na produção de argamassas e concretos, reduzindo o consumo de cimento. Com isso, reduz consideravelmente a emissão de CO₂ na atmosfera, que é o principal poluente gerado na fabricação do cimento. E ainda, pode melhorar o desempenho de concretos e argamassas, dentro de determinadas condições.

2.4.5 Aplicações do vidro em concreto e argamassas

Os rejeitos de vidro vêm ganhando o interesse em muitas pesquisas, principalmente, no sentido de encontrar aplicações e recolocar esse tipo de material novamente na cadeia produtiva, contribuindo tanto para a redução dos custos como na questão ambiental. Seu emprego na construção civil tem se mostrado viável. Estudos mostram que, por possuir propriedades pozolânicas, pode substituir, em pequenas proporções, o cimento sem perda considerável das propriedades (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; NWAUBANI; POUTOS, 2013). Também, pode atuar como agregado em substituição da areia, ou como agregado graúdo (BENTCHIKOU et al., 2017; TOPÇU; CANBAZ, 2004; TUNCAN; KARASU; YALCIN, 2001).

2.4.5.1 O vidro como substituto do cimento e propriedade pozolânica

Vários trabalhos mostram que a substituição de cimento por pó de vidro, em pequenas proporções, mantém a resistência mecânica de concretos e argamassas em valores semelhantes àquela apresentada pelas amostras sem vidro (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; NWAUBANI; POUTOS, 2013; WANG; HOU, 2013). Esses resultados são atribuídos à propriedade pozolânica apresentada pelo pó de vidro com granulometrias abaixo de 600 μm (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001). Porém, maiores teores de substituição de cimento por pó de vidro, reduzem a resistência mecânica (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; NWAUBANI; POUTOS, 2013).

A propriedade pozolânica atribuída ao pó de vidro com baixa granulometria, abaixo de 600 μm , pode ser observada através da quantidade dos produtos de hidratação que são formados nessas pastas cimentícias (DYER; DHIR, 2001). O tamanho das partículas tem grande influência na propriedade pozolânica. Quanto menores as partículas do pó de vidro, maior é o ganho de resistência mecânica para as substituições de cimento por pó de vidro (SHAO et al., 2000; WANG; HOU, 2013;

SADIQUL ISLAM; RAHMAN; KNAYEM KAZI, 2017). A baixa granulometria do vidro moído fornece uma grande área superficial de silicatos enquanto o cimento possui grande quantidade de cálcio. Durante o processo de hidratação, essa situação favorece a formação de grandes quantidades de gel silicato cálcico hidratado (CSH) o que reflete no acréscimo de resistência mecânica (DYER; DHIR, 2001; SHAO et al., 2000; WANG; HOU, 2013; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016). Estudos mostram que até 20% de cimento pode ser substituído por pó de vidro sem prejuízo significativo da resistência mecânica (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; NWAUBANI; POUTOS, 2013; WANG; HOU, 2013).

No entanto, maiores teores de pó de vidro presente na pasta cimentícia reduzem a resistência mecânica consideravelmente, principalmente em idades mais jovens, que antecedem os 28 dias de cura. Segundo Dyer e Dhir (2001), quanto maiores os teores de vidro presentes na formulação, os produtos de hidratação formados pelo vidro podem ter o efeito de diminuir a acessibilidade da água ao cimento ainda não reagido, o que retarda a cura. Isso poderia explicar os ganhos de resistência observados em idades mais avançadas, como entre 28 e 90 dias de cura (NWAUBANI; POUTOS, 2013; SHAO et al., 2000).

Com relação à substituição de parte do cimento por pó de vidro, segundo Nwaubani e Poutos (2013), para que a atividade pozolânica do pó de vidro se torne evidente, três fatores parecem influenciar, de forma fundamental. O primeiro refere-se ao grau de substituição que deve ficar entre 10% e 20%, corroborado por (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; WANG; HOU, 2013). O segundo está relacionado ao tamanho das partículas do pó de vidro. Quanto menores as partículas de vidro, maiores são as resistências apresentadas (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; WANG; HOU, 2013) e também, a distribuição das partículas dentro da pasta cimentícia. As formas geométricas das partículas do pó de vidro são muito irregulares, devido ao processo de moagem. A falta de qualidade nas formas geométricas dessas partículas dificulta sua distribuição nas misturas, contribuindo para redução da resistência mecânica (NWAUBANI; POUTOS, 2013; TOPÇU; CANBAZ, 2004; TUNCAN; KARASU; YALCIN, 2001).

2.4.5.2 Vidro como substituto do agregado (areia) em argamassas

Estudos, em que a areia foi substituída por vidro moído em argamassas e concretos, mostraram que a resistência mecânica diminui em relação às que não contém vidro em suas formulações (ADAWAY; WANG, 2015; BENTCHIKOU et al., 2017; BHANDARY; TAJNE, 2013; DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004). Quanto maiores as quantidades de areia substituída por vidro, maiores decaimentos na resistência mecânica foram observados (BHANDARY; TAJNE, 2013; BENTCHIKOU et al., 2017; DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

Na maioria dos estudos que envolvem substituição de areia por vidro moído, aparentemente, foi considerado que o vidro deveria ter uma distribuição granulométrica e uma gradação semelhante à areia. Isso implica que, na maioria dos casos em que o vidro substitui areia, as partículas de vidro devem ter características semelhantes à areia substituída, ou seja, devem formar uma espécie de “areia de vidro”. Nesse caso, haverá quantidades significativas de partículas de vidro com diâmetros que podem atingir até 16 mm, dependendo das características da areia a ser substituída (ADAWAY; WANG, 2015; BENTCHIKOU et al., 2017; BHANDARY; TAJNE, 2013; DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

Partículas de vidro com diâmetros acima de 1,18 mm contribuem para a redução da área superficial do agregado, reduzindo a atividade pozolânica do vidro, o que reflete na diminuição da resistência mecânica (BHANDARY; TAJNE, 2013; TOPÇU; CANBAZ, 2004). Os estudos mostram que as reduções nas resistências mecânicas, apresentadas por concretos e argamassas contendo vidro em substituição da areia, além da menor área superficial, estão relacionadas a fatores como as superfícies das partículas de vidro mais lisas e planas do que partículas de areia, ou seja, menos rugosas em relação à areia natural, o que diminui a aderência do material cimentício (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004). Ainda, deve-se levar em conta que o vidro é um material mais friável que a areia. Durante a moagem essa friabilidade favorece a formação de muitas trincas que acabam provocando uma adesão incompleta na interface vidro-cimento. Além disso, a moagem do vidro produz partículas com uma morfologia de baixa qualidade (TOPÇU;

CANBAZ, 2004). A morfologia das partículas produzidas pela moagem dificultam sua distribuição durante a mistura dos materiais que compõe a argamassa ou concreto (BHANDARY; TAJNE, 2013) e podem ser a causa da redução de resistência mecânica para concentrações maiores de vidro. Proporções acima de 30% de agregados de vidro podem formar regiões (grumos) onde o cimento disponível é insuficiente ou não consegue aderir adequadamente às partículas, formando vazios microscópicos que afetam consideravelmente a resistência mecânica (ADAWAY; WANG, 2015).

O vidro como substituto da areia deve ser usado com critério. Os estudos recomendam que as concentrações de vidro não devam ser superiores a 30%, para evitar os efeitos da geometria das partículas. A distribuição granulométrica deve ser feita para partículas com diâmetros abaixo de 1,8 mm, descartando diâmetros maiores (ADAWAY; WANG, 2015), para evitar a reação álcali-sílica (ASR), como obtido por Topçu e Canbaz (2004). A gradação da areia de vidro deve conter maiores quantidades de partículas com menores diâmetros, abaixo de 600 µm para promover as reações pozolânicas (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

2.4.5.3 Reação Álcali Sílica (ASR)

A reação ASR (reação álcali sílica) afeta de modo particular argamassas e concretos que contenham vidro em sua formulação. Essa reação é um dos principais fatores que restringem o uso do vidro em argamassas e concretos, principalmente, na substituição de areia por vidro, com presença de partículas de diâmetros maiores (ADAWAY; WANG, 2015; TOPÇU; CANBAZ, 2004). Trata-se de uma reação que ocorre em idades mais avançadas na qual o material sofre uma expansão causando sua completa deterioração. Segundo Dron e Brivot (1992), é basicamente uma reação ácido-base, na qual a sílica do vidro reage com hidróxidos de sódio e/ou potássio, presentes no cimento (BAUER, 2000; NEVILLE, 1997) e também na composição dos vidros sodo cálcicos (AKERMAN, 2000), formando hidratos conhecidos como silicato-cálcico-sódico-hidratado (CNaSH) e/ou silicato-cálcico-potássico-hidratado (CKSH), formando um gel amorfo e polimerizado (VIRMANI; FARIDAZAR, 2014), que se

expande, criando tensões internas que acabam rompendo as aderências nas interfaces vidro/cimento, causando reduções consideráveis na resistência mecânica e deteriorando o concreto (RAJABIPOUR; MARAGHECHI; FISCHER, 2010; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

Como exemplo, a reação ASR entre sílica e o metal alcalino sódio, pode ser representada da seguinte forma (1):



Fonte: Adaptado de Saouma, Perotti (2006); Turrizianni (1986); Ulm et al. (2000).

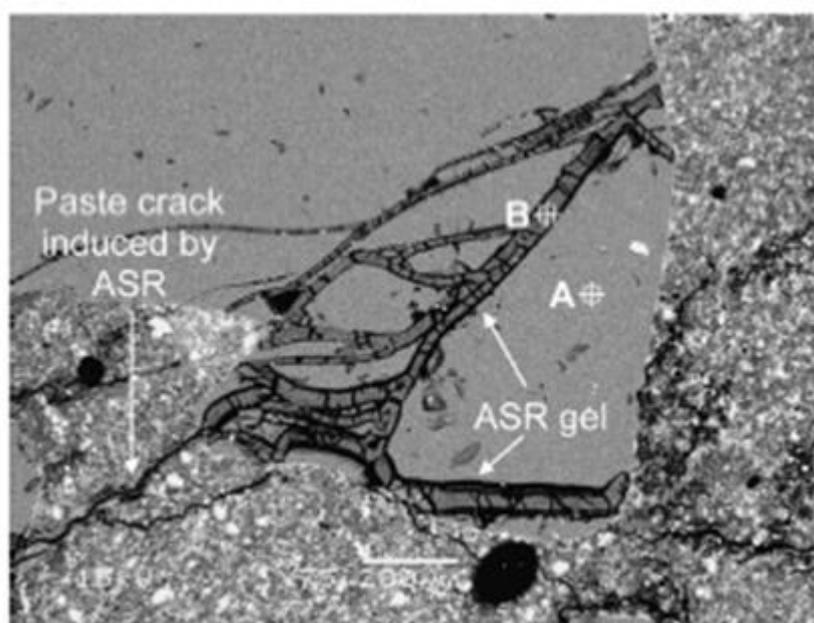
Estudos apontam que o tamanho de partícula do vidro está intimamente relacionado com o desenvolvimento da reação ASR. Concretos e argamassas contendo partículas de vidro consideradas grosseiras, com tamanhos entre 1,25 a 3,15 mm, podem desenvolver expansão, devido à reação ASR, em até sete vezes maior em relação aos que contém partículas entre 80 a 160 μm (MULTON et al., 2008, 2010). Se as partículas tiverem entre 0,63 a 1,25 mm a expansão cai em torno de 0,33%, enquanto que para partículas menores 80 μm nenhuma medida de expansão foi obtida. A referida reação parece não se desenvolver com partículas abaixo dessa faixa (MULTON et al., 2008, 2010).

Segundo Dyer e Dhir (2001), quando se usa vidro em material cimentício, podem ocorrer dois tipos de reação. A reação pozolânica e a reação ASR. Ambas são quimicamente idênticas, porém, com cinéticas diferentes. Partículas muito pequenas de vidro apresentam grande área superficial, o que favorece a rápida progressão da reação pozolânica, refletindo num aumento da resistência mecânica e, portanto, benéfico. Nessa situação, a reação álcali sílica, por ser uma reação lenta, é suplantada pela reação pozolânica quando se utiliza tamanhos de partículas muito pequenas, ou seja, abaixo de 100 μm (DYER; DHIR, 2001; RAJABIPOUR; MARAGHECHI; FISCHER, 2010; VIRMANI; FARIDAZAR, 2014).

Estudos mostraram que a reação ASR ocorre dentro das micro trincas causadas pela moagem do vidro, contrariamente às suposições de que ocorria nas superfícies das partículas de vidro. Partículas de diâmetros maiores apresentam fissuras maiores e mais permeáveis, o que favorece o desenvolvimento da reação

ASR. Em partículas de vidro com tamanhos abaixo de 600 μm as trincas já não são suficientemente grandes para favorecer a reação ASR, que é suplantada pela reação pozolânica. A Figura 8 é uma micrografia de argamassa que desenvolveu a reação ASR. Pode-se ver partículas de vidro contornadas pelo gel cimentício CSH. Nas trincas, a presença do expansivo e destrutivo gel ASR e, à medida que se expande induz tensões que propagam as trincas pelo material (RAJABIPOUR; MARAGHECHI; FISCHER, 2010).

Figura 8 - Gel produzido pela reação álcali sílica.



Fonte: Adaptado de Rajabipour, Maraghechi, Fischer (2010).

2.4.6 Efeitos do pó de vidro em argamassas após altas temperaturas.

Segundo Terro (2006), corpos de prova de concreto contendo vidro como substituinte de agregados grossos e finos foram expostos à temperatura de 700 $^{\circ}\text{C}$ e os resultados dos ensaios de resistência mecânica mostraram que várias formulações contendo vidro apresentaram resistência mecânica semelhante aos respectivos padrões sem vidro e em alguns casos as resistências superaram os padrões, após serem expostos aos mesmos tratamentos térmicos. Foi mantido o critério de resfriamento natural para evitar prejuízos à resistência em função de choques

térmicos. Os melhores resultados foram observados para substituições em torno de 10% de agregados por vidro. Para temperaturas abaixo de 700 °C foram observados efeitos na redução da resistência mecânica, devido à perda da água estrutural do gel silicato de cálcio hidratado, concordando com diversos autores (OLOFINADE; EDE; NDAMBUKI, 2017; WANG; HOW, 2013).

Porém, para a temperatura de 700 °C foi observado que os valores de resistência mecânica dos três tipos de concretos, contendo vidro em suas formulações, convergem para valores muito próximos entre si. O fato foi atribuído à aproximação dessa temperatura ao limiar do ponto de fusão do vidro sodo cálcio, que consideram entre 700 e 800 °C, na qual, a estrutura do vidro sofre grandes transformações, tanto físicas como químicas. Essas transformações iniciam em torno de 700 °C e causa amolecimento do vidro presente na mistura. A similaridade de comportamento dos três tipos de concretos contendo vidro poderia ser, portanto, atribuído à eliminação do efeito de tamanho, uma vez que os agregados de vidro estão no estado amolecido. Como o vidro está mais homoganeamente distribuído e próximo dos poros, as partículas de vidro nesse estado, estão mais propensas a penetrarem nos poros. Isso explica as maiores resistências apresentadas pelos concretos após altas temperaturas em relação aos que permaneceram na temperatura ambiente. Para concentrações de 10% de vidro, após o tratamento térmico em 700 °C, a resistência mecânica foi superior em relação ao padrão de referência que curou em temperatura ambiente e sem tratamento térmico (TERRO, 2006).

Segundo os trabalhos de Wang e How (2013), argamassas contendo 20% de cimento substituído por pó de vidro muito fino, com 6000 cm²/g, e submetidas à temperatura de 800 °C apresentaram uma resistência mecânica em compressão 3,6% maior que a argamassa padrão. Ainda, em termos de microestrutura, as argamassas curadas por sete dias e aquecidas a 800 °C apresentaram as estruturas dos poros mais granuladas e, como consequência, houve um acréscimo significativo na porosidade (WANG; HOW, 2013).

Nos trabalhos de Olofinade, Ede e Ndambuki (2017), em que a maior temperatura de ensaio foi de 500 °C e o pó de vidro foi usado como substituto de parte do cimento, os corpos de prova apresentaram resistência mecânica maior em

relação ao padrão sem vidro, tanto na temperatura ambiente como para temperaturas abaixo de 150 °C. Já, maiores concentrações de pó de vidro reduzem a resistência, inclusive para temperaturas até 500 °C. Ainda, a presença do pó de vidro não evita nem reduz a deterioração das estruturas de silicato de cálcio hidratado (CSH), mas, como material inerte na produção de concreto, pode melhorar a resistência com exposição a altas temperaturas.

3 MATERIAIS

Para esse trabalho, considerou-se como compósito a mistura de argamassa com vidro na forma de pó. Para a argamassa padrão de referência, os materiais utilizados foram: cimento, cal hidratada, areia e água. As proporções encontram-se na Tabela 4.

3.1 DESCRIÇÕES DOS MATERIAIS

O cimento utilizado foi do tipo Portland CP IV-32, marca Votoram, adquirido em loja de material de construção, em sacos de 50 kg, dentro do prazo de validade, acondicionados e armazenados conforme norma NBR 5736:1991.

A cal hidratada ou hidróxido de cálcio utilizado foi da marca DB (Dagoberto Barcellos S/A). Foi adquirida em loja de material de construção, em sacos de 25 kg cada, dentro do prazo de validade e acondicionados de acordo com instruções da embalagem.

A areia utilizada é procedente de rio, da região Sul do Brasil. Foi comprada em loja de material de construção e classificada como areia média.

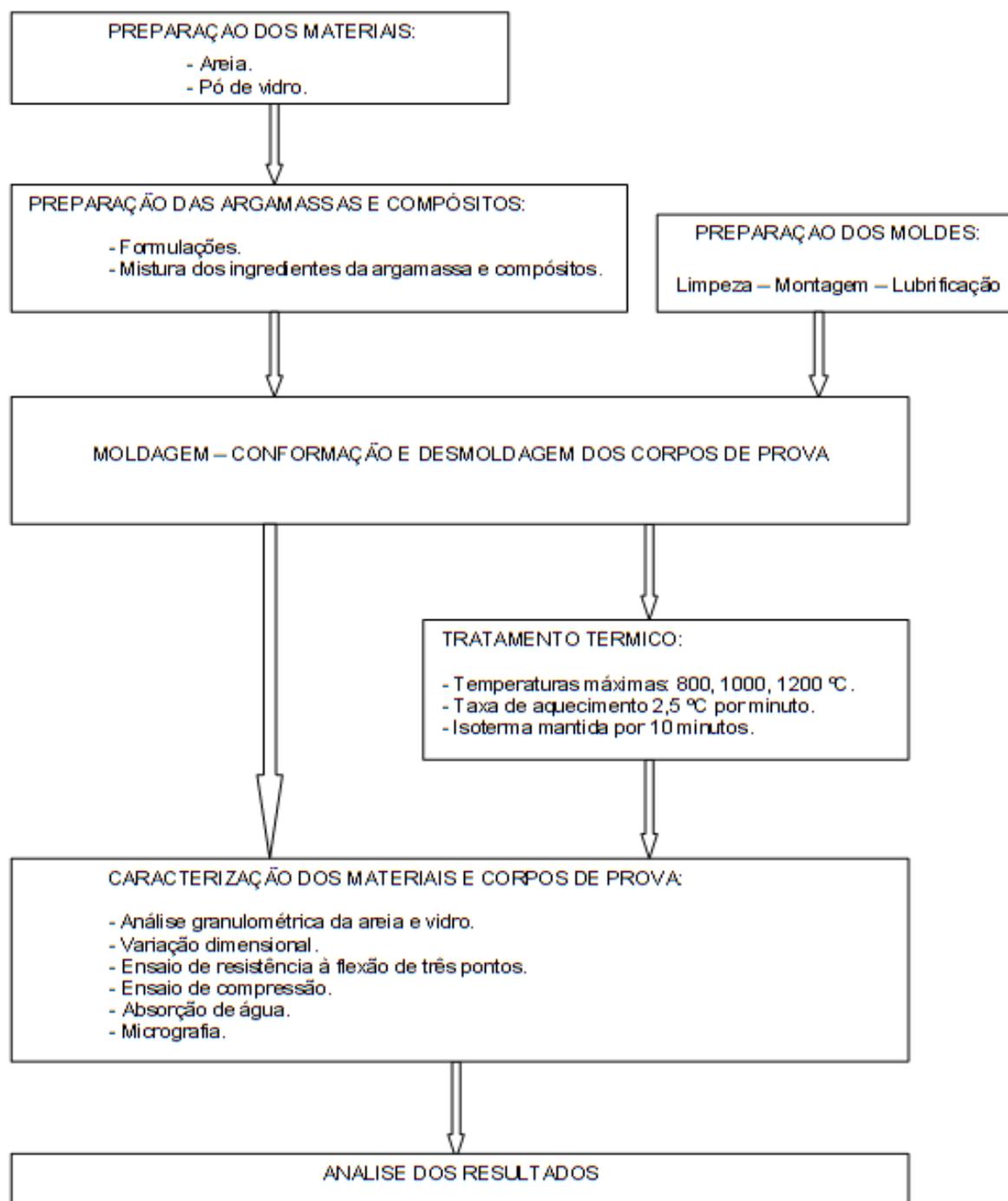
O vidro utilizado foi do tipo sodo cálcico. Mais especificamente, vidro plano de janela transparente. Foi obtido a partir de um lote de retalhos de vidro plano de janela, doados por uma vidraria situada no município de Feliz – Vidraria Vidrolar, (Rua João Bennemann s/n). Esse vidro é oriundo da empresa Guardian.

A água utilizada foi da rede pública. Preenche os requisitos mínimos de qualidade para ser usada na produção de argamassas, conforme norma NBR 13276:2005.

4 METODOLOGIA

4.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA

Figura 9 - Fluxograma da metodologia.



4.2 PREPARAÇÕES DOS MATERIAIS

Alguns materiais, tais como areia e o pó de vidro, passaram por alguns processos de preparação antes de serem utilizados, a fim de configurar certa homogeneidade e padronização, adequados ao uso no presente trabalho. Para isso foi preparado um lote de areia e um de pó de vidro conforme descritos a seguir.

4.2.1 Areia

Foi seca em estufa Med Clave modelo-5, a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem circulação forçada de ar, por 24 horas. A seguir foi peneirada com uma peneira marca Bertel, malha Mesh 8 e armazenada em tambor de plástico.

4.2.2 Pó de vidro

Retalhos de vidro plano transparente foram inicialmente lavados, secos em uma estufa marca Med Clave modelo-5, a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem circulação forçada de ar, por 24 horas. Em seguida, passaram por processo de moagem a seco, em moinho orbital marca BP-Engenharia, utilizando bolas de alumina. O material moído foi peneirado em peneira marca Bertel malha Mesh 200. O pó de vidro foi armazenado em embalagens plásticas, juntamente com sachês de sílica gel para reduzir umidade.

4.3 PREPARAÇÕES DOS MOLDES

A preparação dos moldes prismáticos foi feita com base na norma NBR 13279:2005.

Os moldes foram desmontados e removidas todas as sujidades com escovas macias e panos. A seguir, foram remontados e aplicada uma fina camada de óleo, com pincel, nas partes internas do molde.

4.4 PREPARAÇÕES DAS ARGAMASSAS E COMPÓSITOS

A preparação das argamassas e compósitos foi feita com base na norma NBR 13276:2005, como preparo de argamassa dosada em obra.

4.4.1 Formulações

As formulações e a nomenclatura adotada para identificar as argamassas e os compósitos encontram-se na Tabela 4. As proporções estão em volumes conforme norma NBR 13276:2005.

Tabela 4 - Formulações, proporções e códigos de identificações adotados.

FORMULAÇÕES	PROPORÇÕES EM VOLUME				Observações:
	Cimento	Cal hidratada	Areia	Vidro	
AL0	1	1	6	0	Argamassa padrão de referência.
AL20	1	1	4,8	1,2	Compósito.
AL50	1	1	3	3	Compósito.
AL100	1	1	0	6	Compósito sem areia.

Fonte: O autor.

4.4.2 Homogeneização dos ingredientes das argamassas e compósitos

A argamassa padrão de referência e os compósitos foram preparados da seguinte maneira: para cada formulação, foram pesados os ingredientes, em balança semi-analítica da marca Homis, modelo D5-2000B, capacidade mínima de 0,01 g e máxima de 2000 g. A mistura dos ingredientes secos foi manual, utilizando colheres e espátulas até se obter uma mistura visualmente uniforme. A água foi sendo acrescentada aos poucos até se obter uma mistura homogênea. Foram sempre

mantidos os mesmos procedimentos, condições e as mesmas quantidades de materiais.

4.5 CONFORMAÇÕES E DESMOLDES DOS CORPOS DE PROVA

As conformações dos corpos de prova prismáticos foram feitas em moldes construídos com base na norma NBR13279:2005. As argamassas e compósitos, devidamente preparados, foram introduzidos nos moldes para conformação, medindo 40 mm X 40 mm X 160 mm. O adensamento foi feito em uma mesa vibratória, marca, Fortest-modelo-especial, por 30 segundos em cada ciclo, nivelados com régua metálica e removido os excessos.

Após 48 horas, os corpos de prova foram identificados e desmoldados, conforme a norma NBR 13279:2005. Em seguida, passaram por processos de pesagem e dimensionamento. Os corpos de prova permaneceram em processo de cura por 28 dias, em prateleira de aço, envolvidos em plástico para garantir as mesmas condições de umidade durante o período estabelecido.

Os corpos de prova foram feitos em batelada, utilizando dois moldes com capacidade de moldar três corpos em cada molde. Para cada ensaio foram utilizados 12 corpos de prova de cada formulação.

4.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos foram realizados nas temperaturas de 800, 1000 e 1200 °C, em forno mufla marca Jung modelo 2310, mantendo fixa a taxa de aquecimento em 2,5 °C/minuto. Quando atingida a temperatura, foi mantida a isoterma por 10 minutos. Os critérios para estabelecer estas temperaturas se basearam nos estudos de degradação dos materiais cimentícios (INGHAN, 2009; KIM; YUN; PARK, 2013) e na norma NBR 10636:1989.

4.7 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

A maioria dos ensaios de caracterização foi realizada no laboratório do IFRS – Campus Feliz. As micrografias foram feitas no laboratório do IFRS – Campus Farroupilha. Os ensaios de granulometria a *laser* foram feitos no laboratório LACER-UFRGS – Laboratórios de Materiais Cerâmicos.

As caracterizações granulométricas da areia e pó de vidro foram realizadas através da análise granulométrica feitas em um analisador de tamanho de partícula CILAS 1180.

As caracterizações dos corpos de prova foram realizadas através da variação dimensional, absorção de água, resistência mecânica e micrografia.

4.7.1 Variação dimensional

A variação dimensional dos corpos de prova foi obtida através das medições da largura, altura e comprimento, utilizando paquímetro digital marca Sinzie, com resolução de 0,01 mm e com base na norma NBR15261:2005.

Para os corpos de prova, que não sofreram tratamento térmico, a variação dimensional foi obtida pela diferença das médias entre as medidas efetuadas após a cura e no desmolde. Para os corpos de prova que passaram por tratamento térmico, a variação dimensional foi obtida de maneira semelhante, porém, entre as medidas efetuadas antes e após o tratamento térmico.

4.7.2 Resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica realizados foram, resistência à flexão de três pontos e à compressão, com base na norma NBR13279:2005.

4.7.2.1 Resistencia mecânica à flexão

Os ensaios foram realizados em um equipamento para ensaio de resistência à tração na flexão de três pontos, marca Contenco, com velocidade de ensaio de 5 kgf/s conforme definido pela norma NBR 13279:2005.

4.7.2.2 Resistência mecânica à compressão

Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica manual, marca Contenco, com capacidade máxima de compressão de 100 Ton.

4.7.3 Absorção de água

Os ensaios de absorção de água foram realizados com base na norma NBR 9778:1987, através de imersão por 72 horas em temperatura ambiente, para todos os corpos de prova. As pesagens foram realizadas numa balança semi-analítica da marca Marte modelo AD2000 capacidade máxima 2010 g e mínima de 0,5 g.

4.7.4 Microestrutura

A avaliação da microestrutura foi realizada através de microscopia óptica. Os ensaios de microscopia óptica foram realizados utilizando um microscópio Series Digital Microscope 400X.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

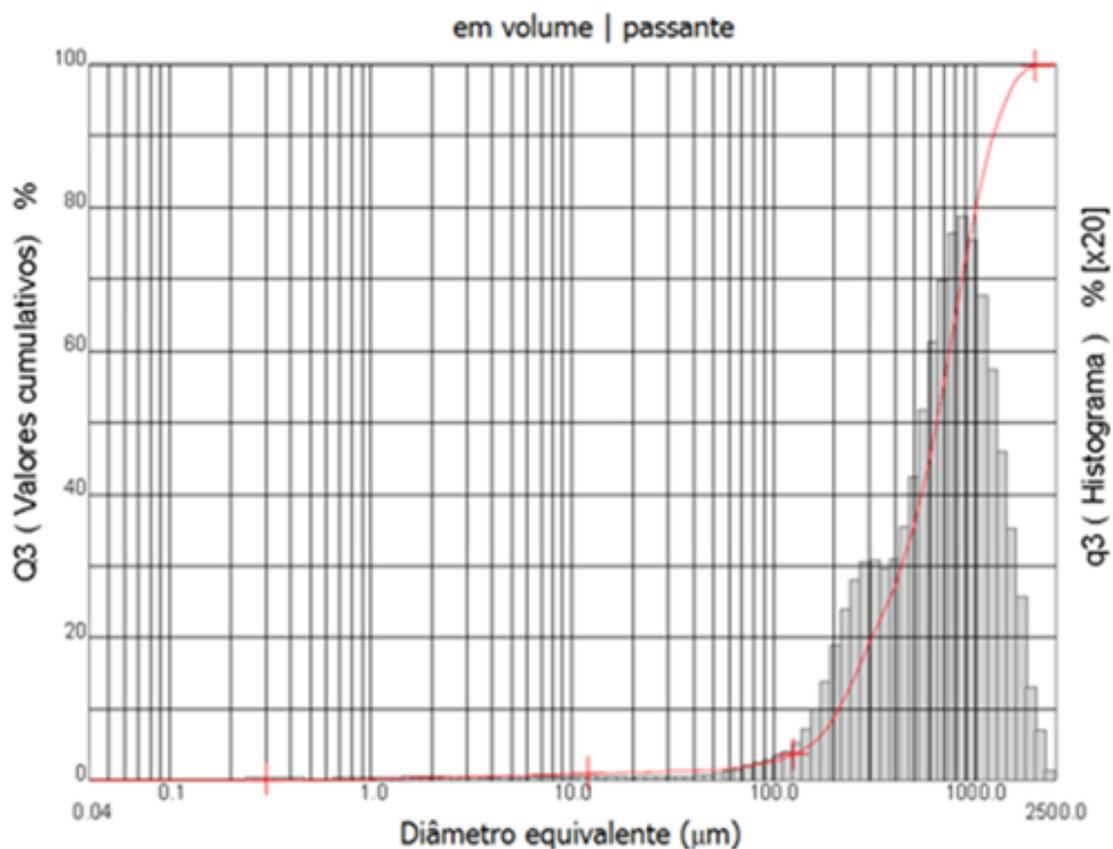
Areia e pó de vidro foram os dois materiais que tiveram suas proporções variadas. As caracterizações desses dois materiais foram feitas a partir das curvas de distribuição granulométrica.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios nos corpos de prova estão avaliados e discutidos, principalmente, em termos de comparações entre a argamassa AL0 e os compósitos AL20, AL50 e AL100.

5.1 ANÁLISES GRANULOMÉTRICA DA AREIA E PÓ DE VIDRO

A Figura 10 e a Figura 11 apresentam as curvas de distribuição granulométrica da areia e do pó de vidro, respectivamente, nas quais se observa a diferença entre os tamanhos máximos e mínimos das partículas dos dois materiais. Na faixa abaixo de 100 μm predominam as partículas de vidro, já as partículas de areia apresentam diâmetros acima de 100 μm . O diâmetro médio das partículas da areia, fornecido pela análise, foi de 686,35 μm . Situação semelhante à utilizada por Nwaubani e Poutos (2013), ao substituir cimento por pó de vidro, em que as curvas de distribuição granulométrica apresentaram granulometrias relativamente diferentes, neste caso, especificamente, o pó de vidro era formado pelas partículas maiores, enquanto o cimento constituído pelas menores partículas.

Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica da areia.

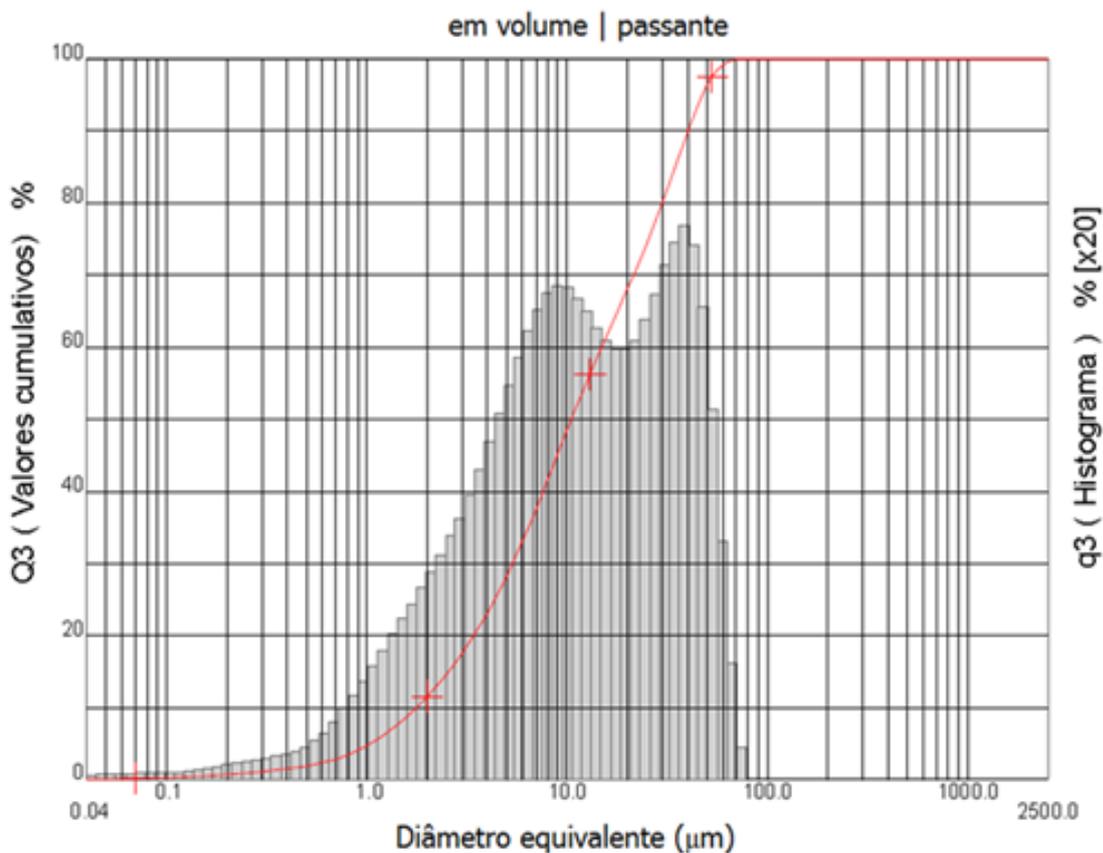


Fonte: Adaptado de LACER - UFRGS

Segundo Nwaubani e Poutos (2013), a distribuição do tamanho das partículas do pó de vidro é um fator chave que influencia o desenvolvimento da resistência mecânica, sendo que atribuiu às partículas menores de 100 µm o aumento observado na resistência mecânica. Pode-se perceber na Figura 11 que o pó de vidro utilizado no presente trabalho possui um tamanho máximo, em torno de 80 µm. O diâmetro médio das partículas do pó de vidro, fornecido pela análise, foi de 16,33 µm. Isto pode favorecer a atividade pozolânica, melhorando a resistência mecânica (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; WANG; HOU, 2013), ao mesmo tempo em que, teoricamente, afasta o risco do desenvolvimento da reação ASR (MULTON, 2010).

No anexo A encontram-se mais detalhes da análise granulométrica da areia e do pó de vidro.

Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do pó de vidro.



Fonte: Adaptado de LACER - UFRGS.

5.2 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

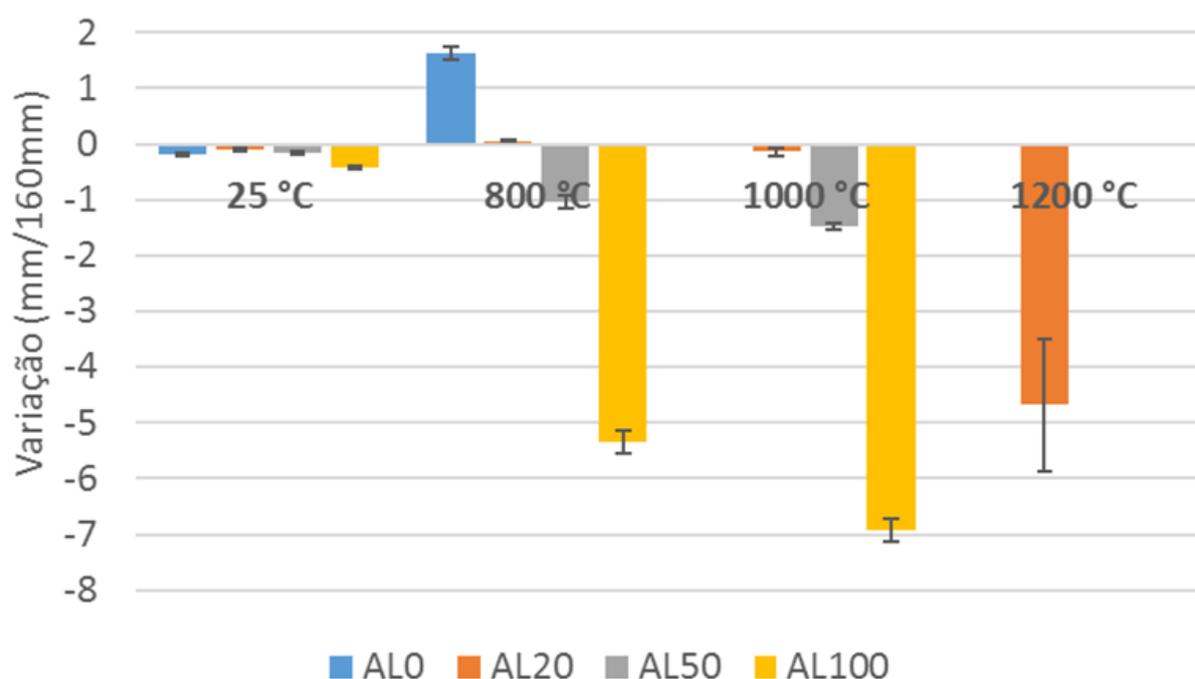
A caracterização pela variação dimensional foi realizada pela avaliação das medidas efetuadas em todos os corpos de prova.

Os resultados estão apresentados apenas em relação à variação de comprimento, pois as variações de espessura e largura ficaram abaixo da margem de erro (0,01 mm) do paquímetro.

A Figura 12 mostra a variação dimensional ocorrida após a cura de 28 dias, nos corpos de prova em temperatura de 25 °C e, também, para aqueles que foram submetidos às elevadas temperaturas de 800, 1000 e 1200 °C. Em 25 °C, todas as formulações apresentaram pequenas variações no sentido de retração. Aparentemente, a incorporação do pó de vidro não afetou significativamente a retração dos corpos de prova. Somente para as amostras com 100% de pó de vidro

(AL100) a retração foi maior em relação ao padrão de referência (AL0), provavelmente, devido à presença do pó de vidro com granulometria menor que da areia, conforme Figuras 10 e 11. Segundo Park, Lee e Kim (2004), as partículas de vidro possuem formato irregular, mais precisamente, com característica angular, o que interfere diretamente no fator de compactação. O que pode ter ocorrido com AL100 por conter somente vidro como agregado.

Figura 12 - Variação dimensional - cura de 28 dias.



Fonte: O autor.

Na temperatura de 800 °C observa-se que AL0 apresentou uma expansão, além de oferecer dificuldade no manuseio, pois os corpos de prova apresentavam inúmeras trincas e fragilidade (integridade física comprometida), o que pode estar relacionado com a perda da água estrutural, que causa degradação da argamassa e o surgimento de trincas que se propagam pelo material (INGHAN, 2009). Segundo Kim, Yun e Park (2013) as trincas podem se formar por volta de 600 °C e se propagar, estando bem definidas em torno de 800 °C.

Nas amostras AL20 e AL50, após serem submetidas a 800 °C e também a 1000 °C, os corpos de prova não apresentaram grandes variações na retração entre

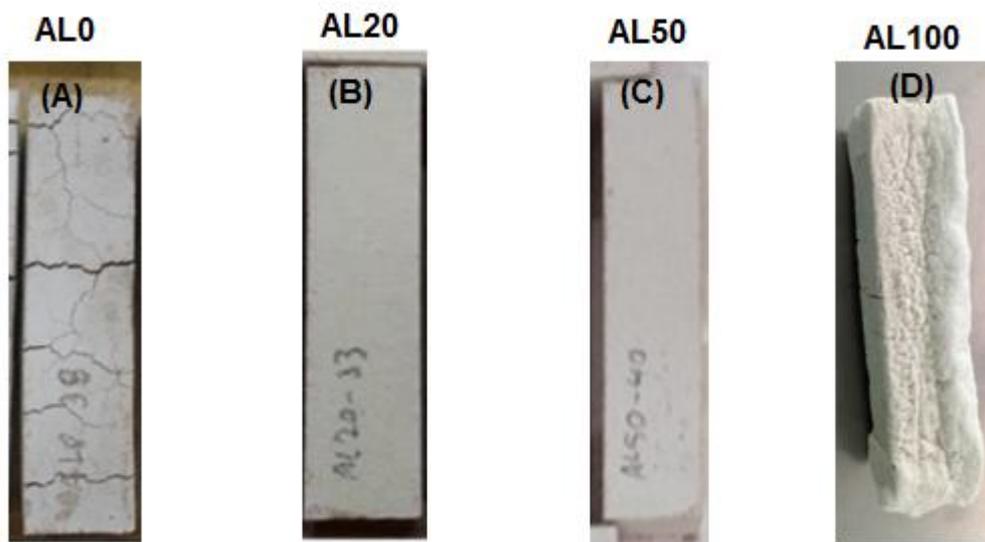
essas duas temperaturas e mantiveram sua integridade física, não foram observadas trincas, sendo possível seu manuseio e obtenção das medidas.

Também, é possível perceber que quanto maior o teor de pó de vidro na formulação, maior foi a retração, o que, provavelmente, pode estar relacionada ao início de um processo de sinterização do pó de vidro e, devido às acomodações nos espaços vazios deixados pela perda de água, pela morfologia das partículas, pela relação entre as quantidades de areia e pó de vidro usadas nas formulações dos compósitos e pela redução da área superficial (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; SANTOS, 2000; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

A Figura 13 apresenta corpos de prova de AL0, AL20, AL50 após serem submetidos a 1000 °C. Pode-se observar que AL0 sofreu deterioração com trincas bem desenvolvidas, impedindo o manuseio, a obtenção das medidas e demais ensaios. As amostras AL20 e AL50 apresentam integridade e aparentemente sem trincas visíveis pela observação direta.

A amostra de AL100, em 1000 °C apresentou uma retração maior em relação ao observado na temperatura de 800 °C, provavelmente, devido à redução dos espaços vazios no interior dos corpos de prova e maior grau de sinterização por conter somente partículas de vidro em temperatura maior (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; KIM; YUN; PARK, 2013; GERMAN, 1996; SÄLAK, 1995; SANTOS, 2000). No entanto, alguns corpos de prova de AL100 não ofereceram condições de ensaio para 1000 °C, conforme pode ser observado na Figura 13, o que pode ser um indicativo de limite para a resistência térmica dessa formulação.

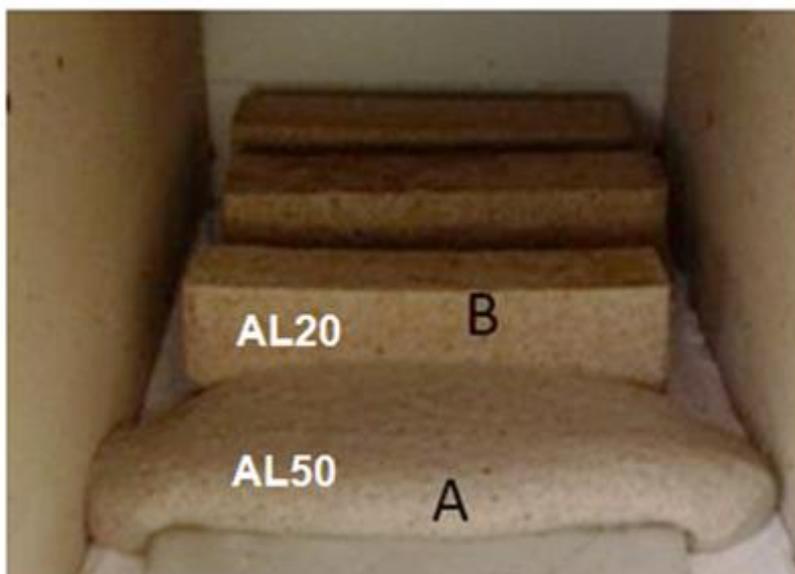
Figura 13 - Corpos de prova após exposição a 1000 °C.



Fonte: O autor.

Na temperatura de 1200 °C foram medidos somente os corpos de prova AL20, enquanto AL50 e AL100 perderam sua forma geométrica. A Figura 14 apresenta corpos de prova AL20 e AL50 após serem submetidos a 1200 °C, na qual se pode observar a integridade de AL20 e a deformação de AL50. AL20 manteve sua forma geométrica, porém, apresentou uma retração maior em relação à temperatura de 1000 °C, possivelmente, devido à fusão das partículas de vidro, o que pode ter reduzido a área superficial (ACKERMAN, 2000; GERMAN, 1996; SÄLAK, 1995). Já AL50 e AL100 perderam sua forma geométrica, possivelmente, em função da quantidade de pó de vidro nas formulações. De acordo com Ackerman (2000); (CALLISTER, 2012), quando o vidro sodo cálcico atinge temperaturas da ordem de 1200 °C, sua viscosidade é muito baixa, a ponto de apresentar fluidez, o que pode ter favorecido migração para o interior dos poros e das trincas do material.

Figura 14 - Corpos de prova AL50 (A) e AL20 (B) após serem submetidos à temperatura de 1200 °C.



Fonte: O autor.

Aparentemente, os compósitos com maior teor de pó de vidro incorporado, apresentam maior retração com a elevação da temperatura. Observa-se que AL20, nas temperaturas de 800 e 1000 °C praticamente não apresentou alterações significativas em suas dimensões, porém, para a temperatura de 1200 °C a retração foi maior, já AL50 perde sua forma geométrica, inferindo que no intervalo entre AL20 e AL50 deve haver um limite nos teores de pó de vidro que mantém a forma geométrica.

5.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os resultados apresentados referentes à resistência mecânica compreendem: ensaio de flexão em três pontos e ensaio de compressão axial, com base na norma NBR 13279:2005.

5.3.1 Análise da resistência mecânica

A Figura 15 apresenta os resultados dos ensaios da resistência à flexão em três pontos. Na temperatura de 25 °C, AL0 apresentou uma resistência em torno de 2 MPa, já AL20 e AL50, apresentaram um aumento da resistência em relação à argamassa padrão de referência. Aproximadamente, AL20 aumentou em 18% enquanto AL50 chegou a ter um acréscimo superior a 60%. Provavelmente, esse aumento de resistência para as amostras contendo pó de vidro, esteja relacionado às atividades pozolânicas (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER; DHIR, 2001; MEYER; XI 1999; MEYER; BAXTER, 1996), uma vez que a granulometria do pó de vidro utilizado é menor que 80 µm e, portanto, está dentro da faixa que favorece o desenvolvimento de reações pozolânicas (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; DYER e DHIR, 2001; MULTON, 2008, 2010). Ganhos de resistência também foram observados por Kou e Xing (2012) em que, maiores teores de pó de vidro na composição do concreto favoreceram o aumento da resistência.

Para AL100, que não contém areia, a resistência ficou abaixo do padrão de referência. O que concorda com os resultados obtidos por Digermeni, Yilmaz e Cakir (2011) que encontraram as menores resistências mecânicas para argamassas com 100% de substituição de areia por vidro. A redução na resistência mecânica para compostos nos quais as proporções de vidro são maiores que areia é atribuída, na literatura consultada, em função das superfícies lisas e planas das partículas de vidro, que enfraquece a aderência da pasta cimentícia e também da morfologia, que dificulta a distribuição homogênea durante a mistura dos componentes (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011; TOPÇU; CANBAZ, 2004).

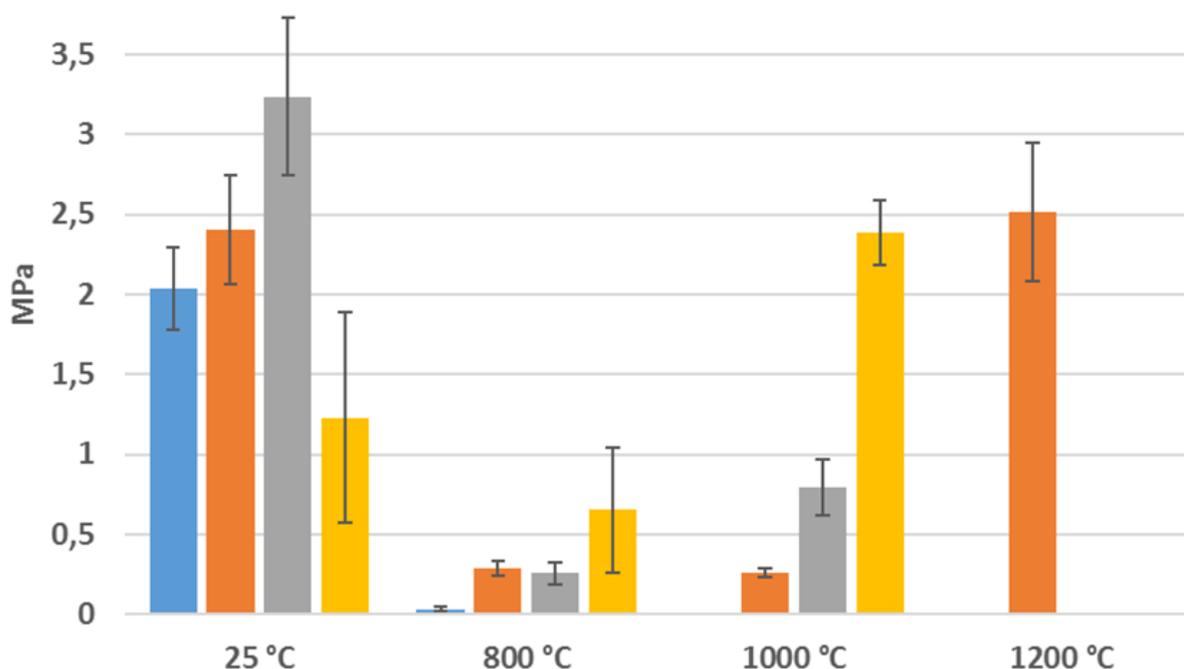
Com relação aos resultados obtidos após os tratamentos térmicos, observa-se a influência da temperatura na resistência à flexão. Para AL0 à medida que a temperatura de exposição aumenta, a resistência diminui, quando comparadas com os resultados obtidos em temperatura de 25 °C, como previsto por Kim, Yun e Park (2013). Porém, observa-se que as amostras contendo pó de vidro não perderam totalmente sua resistência como ocorreu com AL0. Para AL20 e AL50 também se percebe uma redução da resistência nas temperaturas de 800 e 1000 °C quando comparados com temperatura a 25 °C. No entanto, essas resistências são

significativamente maiores em relação ao padrão de referência (AL0) nas mesmas condições, ou seja, amostras de AL0 expostas a temperaturas de 800 °C ou a 1000 °C se degradam.

A sinterização, que pode iniciar em temperaturas próximas a 650 °C, quando se utiliza pó de vidro com granulometria abaixo de 100 µm (SANTOS, 2009), pode ter contribuído para a resistência mecânica apresentada e manutenção da forma geométrica, como foi observado nos ensaios de variação dimensional e também na Figura 13. Porém, em 1200 °C, AL20 apresentou um aumento na resistência, chegando a ser equivalente à temperatura em 25 °C. Esse aumento na resistência, possivelmente, pode ser resultado do processo de sinterização por fase vítrea (AKERMAN, 2000; SANTOS, 2009; PRADO; ZANOTTO, 2002). Na Figura 16 se observa a fase vítrea (FV) e partícula de quartzo (Q). Esse processo de sinterização pode ter permitido a penetração do vidro em fase líquida nos espaços vazios e envolvido os grãos de quartzo (areia), assumindo, aparentemente, a função de matriz e, conseqüentemente, aumentando a resistência mecânica.

Para AL50 também se percebe a redução da resistência nas temperaturas de 800 e 1000 °C quando comparados com a temperatura de 25 °C, mas, quando a comparação é feita entre as temperaturas de 800 e 1000 °C, o comportamento apresenta aumento na resistência. Esse ganho de resistência pode estar associado ao fato que na AL50 a concentração de pó de vidro é maior, favorecendo o processo de sinterização. Com a elevação da temperatura para 1000 °C, o alcance da sinterização é maior, o que poderia justificar a elevação da resistência apresentada. Na temperatura de 1200 °C, devido à perda da forma geométrica, conforme Figura 14 os ensaios não foram realizados.

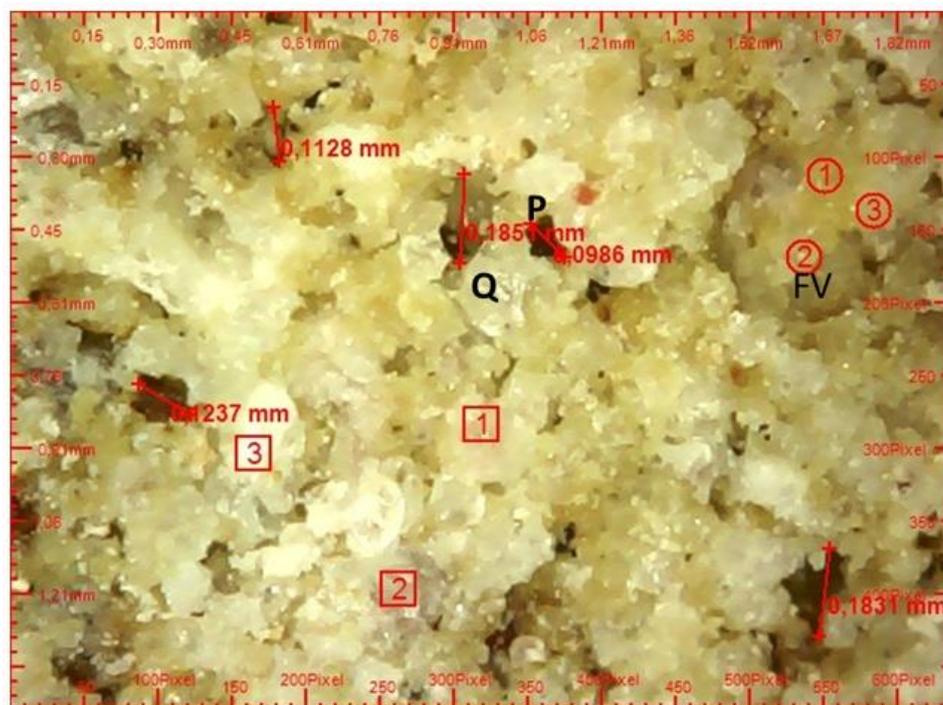
Figura 15 - Resistência à flexão para todas as amostras.



Fonte: O autor.

Para AL100, a menor resistência apresentada na temperatura de 25 °C, pode estar relacionada a dois fatores: um deles é a grande área superficial do vidro que retém mais água e retarda as reações de cura do cimento, segundo Tuncan, Karasu e Yalcin (2001), ganhos de resistência com uso do vidro se tornam mais evidentes em períodos de tempos mais longos, como após 90 dias de cura. O outro é devido à superfície lisa e plana das partículas de vidro, que enfraquece as ligações entre o agregado e o cimento (DEGIRMENCI; YILMAZ; CAKIR, 2011). A comparação entre as temperaturas de 800 °C e 1000 °C apresenta um comportamento semelhante à AL50, ou seja, apresenta aumento na resistência, o que reforça a hipótese do efeito da sinterização por ter somente pó de vidro em sua composição, favorecendo um alcance maior da sinterização (GERMAN, 1996; SÄLAK, 1995; PRADO; ZANOTTO, 2002).

Figura 16 - Micrografia da face interna da amostra AL20 após ser submetida a 1200 °C. (Q) quartzo; (P) poros; (FV) Fase Vítea.

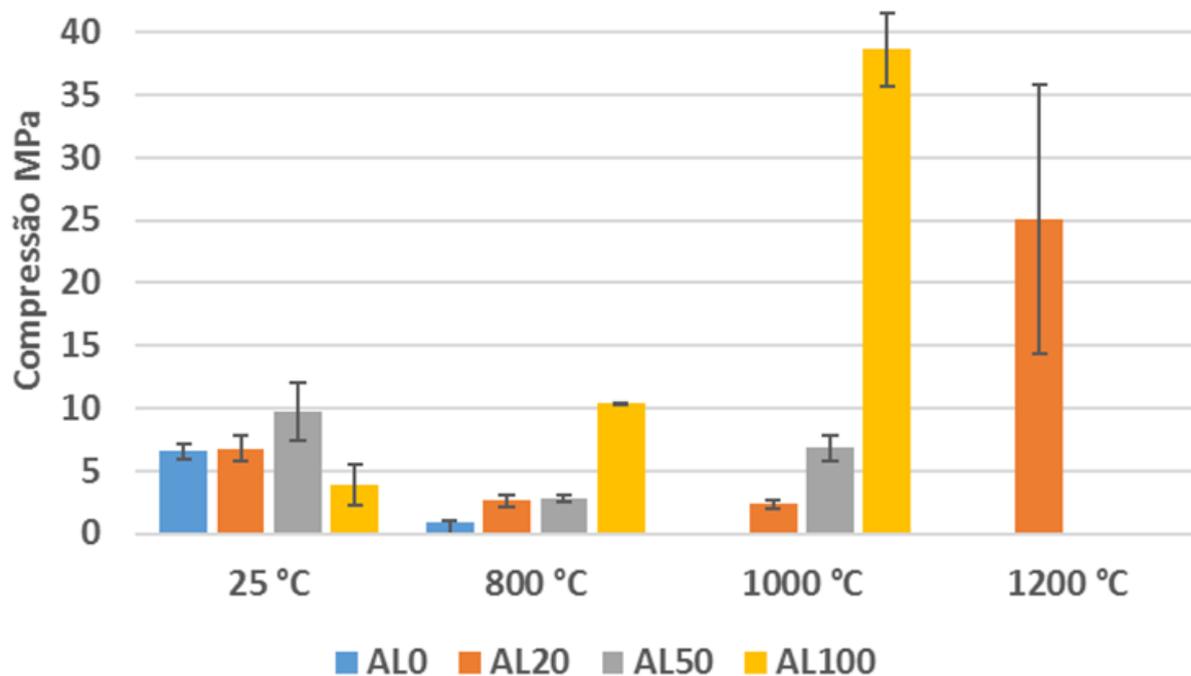


Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

Maiores concentrações de pó de vidro em maior temperatura tendem, aparentemente, favorecer a sinterização formando uma estrutura vítrea que permeia todo o material, apresentando resistência mecânica, uma vez que, segundo Kim, Yun e Park (2013), em temperatura superior a 1000 °C, não ocorrem mais as reações de hidratação secundária, as quais poderiam sugerir o aumento da resistência mecânica.

Na Figura 17 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão para as amostras AL0, AL20, AL50 e AL100 antes e após os tratamentos térmicos. Percebe-se que os resultados são semelhantes aos obtidos nos ensaios de flexão. Nos quais o aumento das concentrações de pó de vidro associados ao aumento da temperatura parecem favorecer a sinterização, formando uma estrutura vítrea que permeia todo o material, apresentando ganhos na resistência mecânica, conforme Figura 16.

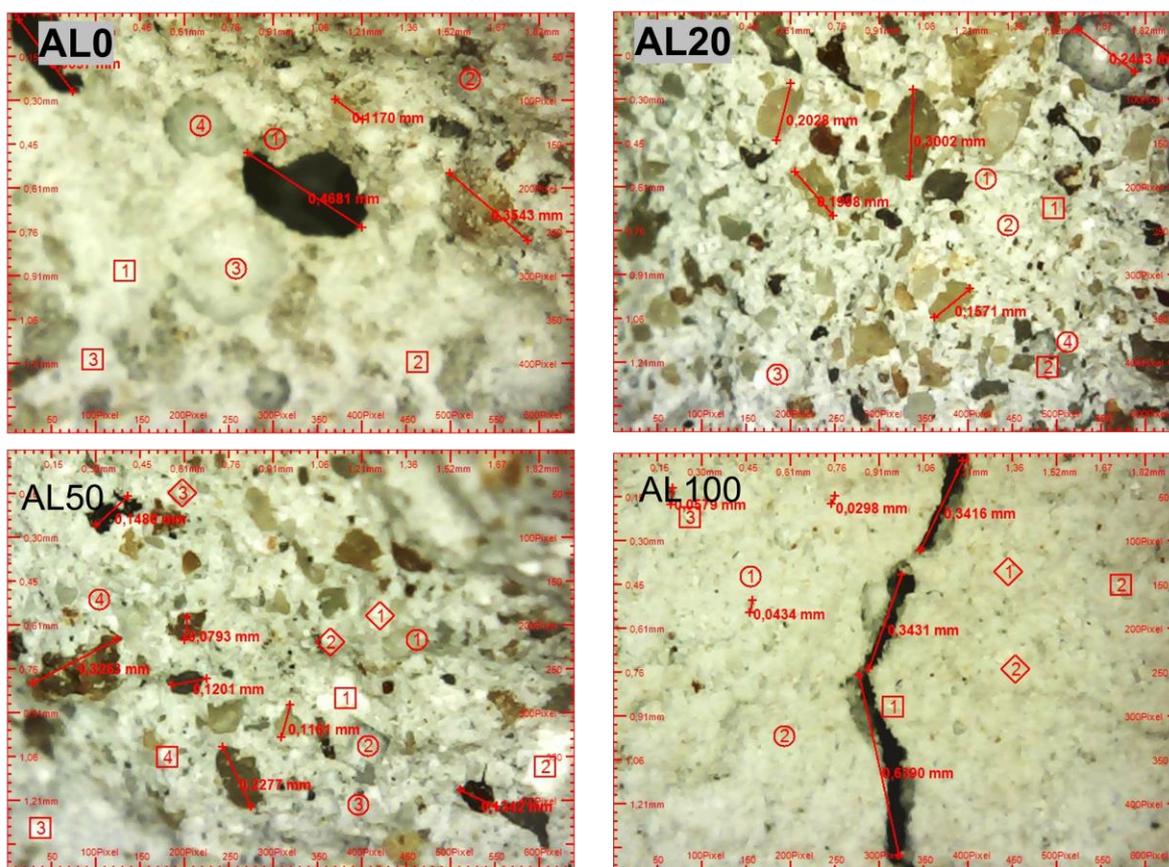
Figura 17 - Resistência à compressão para todas as amostras.



Fonte: O autor.

A Figura 18 mostra micrografias obtidas da face interna dos corpos de prova das amostras AL0, AL20, AL50 e AL100, após cura de 28 dias na temperatura de 25 °C. Em AL0 pode-se ver o gel CSH envolvendo as partículas de areia e na região escura mais ao centro, pode-se ver um poro. Em AL20 e AL50 o gel CSH se confunde com o pó de vidro e envolvem as partículas de areia. Também se percebe maior quantidade de pequenos poros. Em AL100 observa-se o gel CSH e o pó de vidro com aspecto homogêneo. Pode-se perceber minúsculos poros e uma pronunciada trinca que se formou no centro, mas não se propagou até a parte externa.

Figura 18 - Micrografias da face interna das amostras AL0, AL20, AL50 e AL100 após cura de 28 dias em temperatura de 25 °C.



Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

A Figura 19 mostra uma micrografia obtida da face interna de um corpo de prova da amostra AL20, após exposição em temperatura de 800 °C. Pode-se ver a presença de poros maiores, material de decomposição do CSH misturado com partículas de vidro envolvendo areia. Na região delimitada por um círculo preto, uma estrutura de partículas de pó de vidro, aparentemente ligadas entre si, sobre a abertura do poro, o que pode ser indício de sinterização no estado sólido.

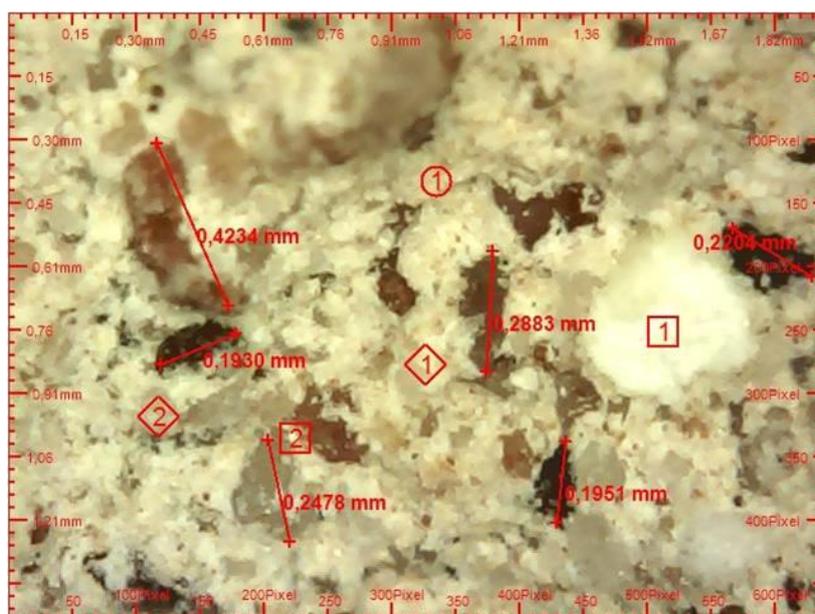
Figura 19 - Micrografia da face interna da amostra de AL20 após exposição a 800 °C.



Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

A Figura 20 é uma micrografia da face interna de um corpo de prova de AL20 após 1000 °C, na qual não se percebe alterações significativas em relação à Figura 19 como também não se obteve variações significativas em relação à resistência mecânica dessa amostra nas temperaturas de 800 e 1000 °C.

Figura 20 - Micrografia da face interna da amostra AL20 após exposição a 1000 °C.

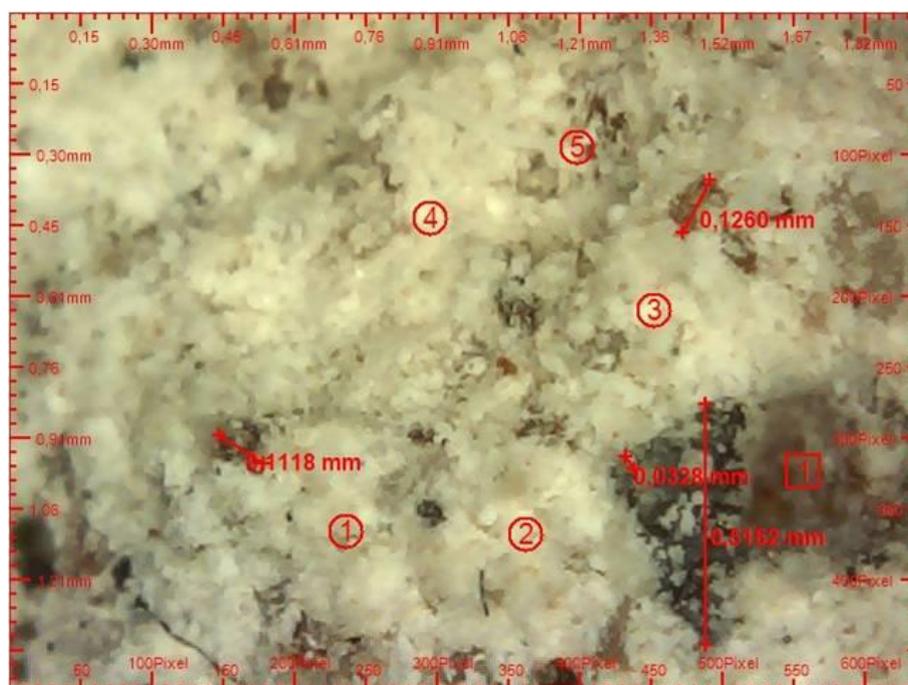


Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

A Figura 21 é uma micrografia da face interna de um corpo de prova de AL50 após 1000 °C

Nos círculos 4 e 5 pode-se perceber partículas de vidro aparentemente ligadas, possivelmente por sinterização, envolvendo em maior grau as partículas de areia, em relação à Figura 20. Presença de pequenos poros e, em maior quantidade.

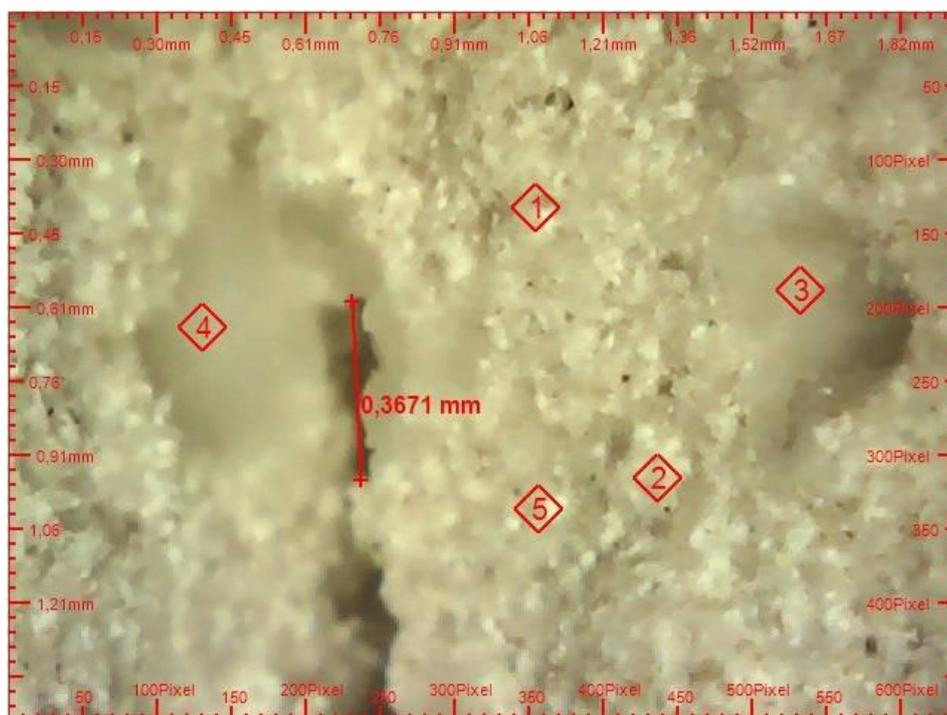
Figura 21 - Micrografia da face interna da amostra AL50 após exposição a 1000 °C.



Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

A Figura 22 é uma micrografia da face interna de um corpo de prova de AL100 após 1000 °C. Observa-se partículas de vidro aparentemente ligadas supostamente por efeito da sinterização e regiões com formação de fase vítrea, principalmente as regiões assinaladas pelos números 3 e 4. Pode-se ver, também, minúsculos poros e uma trinca bem pronunciada.

Figura 22 - Micrografia da face interna da amostra AL100 após exposição a 1000 °C.



Fonte: Autoria de Edson Francisquetti e Nivaldo Moser (2019).

5.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na Figura 23 estão apresentados os dados de absorção de água para todas as amostras.

Para os corpos de prova em 25 °C, observa-se que a absorção de água aumenta com o aumento do teor de pó de vidro nos compósitos. Isto pode estar associado à granulometria do pó de vidro ser menor que 100 μm , enquanto que da areia está acima de 100 μm , conforme Figuras 10 e 11; logo, a área superficial do pó de vidro é maior que da areia. Uma área superficial maior exige uma quantidade maior de moléculas de água para cobrir essa superfície o que favorece a retenção de água (KOU; XING, 2012; TUNCAN; KARASU; YALCIN, 2001). A hipótese pode ser reforçada pelos resultados da absorção de AL100 que, por ter somente pó de vidro, a área superficial é muito maior em relação às outras amostras, sendo necessária maior quantidade de água para cobrir as superfícies.

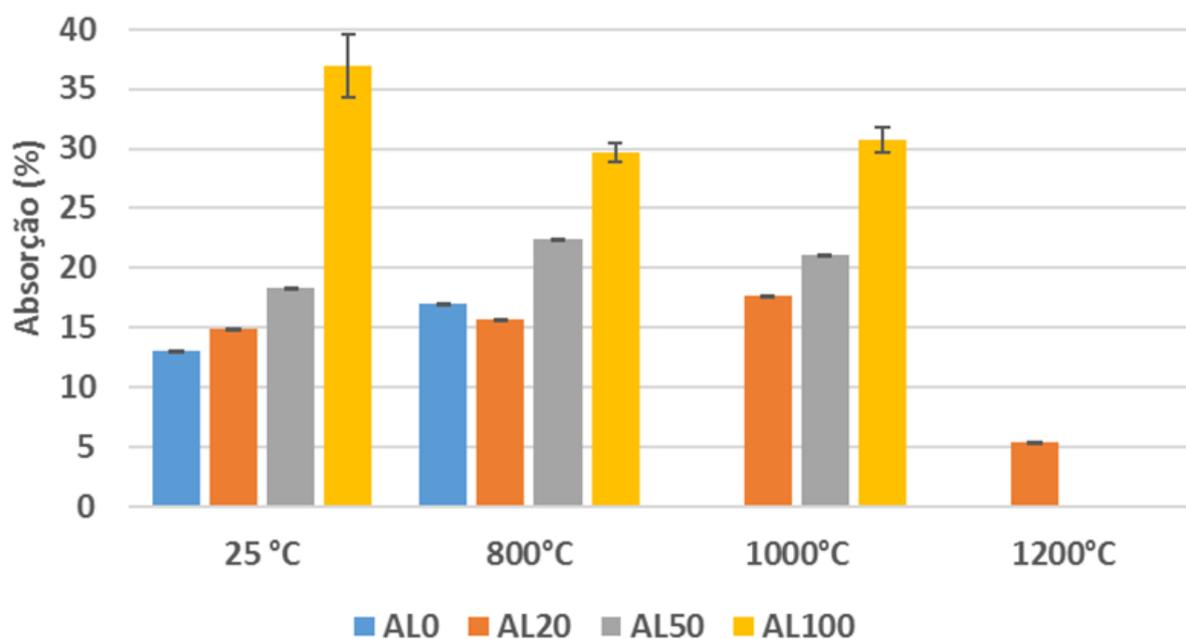
Para os corpos de prova que sofreram tratamento a 800 °C observa-se que, para AL0, aumentou a absorção da água, em relação à temperatura de 25 °C, possivelmente, devido à degradação sofrida pela estrutura cimentícia (CSH) que promove a formação de trincas e fissuras, de acordo com (KIM; YUN; PARK, 2013). Para as demais temperaturas não foi possível realização do ensaio devido à degradação das amostras, conforme Figura 13.

Para AL20, observa-se que praticamente não ocorreu variação na absorção da água em comparação entre 25 °C e 800 °C. Possivelmente, durante o tratamento térmico, muitas microfissuras foram preenchidas ou seladas pela sinterização e consequente redução da área superficial do pó de vidro (GERMAN, 1996; SÄLAK, 1995; PRADO; ZANOTTO, 2002; SANTOS, 2009). Também, pode ter ocorrido a obstrução de poros, compensando a redução da área superficial.

Na temperatura de 1000 °C observa-se um aumento na absorção da água, possivelmente devido à maioria das partículas do vidro já estarem praticamente sinterizadas. Segundo German (1996), Sälak (1995), Prado e Zanotto (2002) e Santos (2009), a sinterização pode iniciar em torno de 650 °C, o que pode ter aumentado a porosidade no interior das amostras, favorecendo a absorção da água. Em 1200 °C, a absorção de água diminuiu, provavelmente, o vidro na fase líquida preencheu os espaços vazios existentes entre os diferentes tamanhos de partícula, envolvendo os grãos de quartzo tornando-se matriz, conforme Figura 14. A pequena absorção de água, provavelmente, se deve a poros que ainda permaneceram como os que podem ser observados na Figura 14.

Para AL50, ocorre um aumento na absorção de água após 800 °C em relação à temperatura de 25 °C, possivelmente, devido à presença de maior quantidade do pó de vidro presente. Teores maiores de pó de vidro favorecem a sinterização em maior grau, reduzindo a área superficial, apontada por Prado e Zanotto (2002), German (1996), Sälak (1995) e Santos (2009), o que pode favorecer a formação de vazios e aumentar a absorção da água. Na temperatura de 1000 °C a AL50 não apresentou variação significativa na absorção de água em relação a 800 °C o que pode estar relacionado ao preenchimento ou fechamento de alguns poros e canais, compensando os vazios deixados pela sinterização. Na temperatura de 1200 °C os corpos de prova não foram ensaiados devido à perda da forma geométrica.

Figura 23 - Absorção de água.



Fonte: O autor.

Para AL100, observa-se uma diminuição na absorção de água, nas temperaturas de 800 e 1000 °C, em relação à temperatura de 25 °C. Possivelmente pelo fato da argamassa ser composta apenas por cimento e pó de vidro, a redução na absorção da água se deve à sinterização em maior nível e consequente fechamento de poros (GERMAN, 1996; SÄLAK, 1995; PRADO; ZANOTTO, 2002; SANTOS, 2009). Não foram avaliados os corpos de prova submetidos a 1200 °C por perda de sua forma geométrica.

6 CONCLUSÕES

A avaliação dos diferentes compósitos estudados no presente trabalho mostrou que o teor de pó de vidro tem influência na resistência mecânica dos corpos de prova tanto em temperatura ambiente como após tratamento térmico.

Os resultados demonstraram que:

- A análise granulométrica:
 - As menores partículas da areia utilizada correspondem às maiores do pó de vidro.
 - A areia apresentou um pico para os diâmetros, aproximadamente, entre 800 e 1000 μm , com diâmetro médio das partículas de 686,35 μm . O pó de vidro apresentou as maiores quantidades para os diâmetros entre 5 e 80 μm , com diâmetro médio das partículas de 16,33 μm .

- A argamassa utilizada como padrão de referência, constituída somente por cimento, cal hidratada, areia e água, se comportou dentro do previsto na literatura, tanto a 25 °C como nos tratamentos térmicos.
- A incorporação do pó de vidro nas condições granulométricas permite a obtenção de diferentes compósitos que se comportam como argamassas em temperatura de 25 °C.

- Resistência Mecânica em temperatura ambiente (25 °C):
 - A presença do pó de vidro nos compósitos, nas proporções de 20% e 50%, mantidos em temperatura ambiente e cura de 28 dias, aumentou a resistência mecânica em relação à argamassa padrão de referência.
 - Maiores concentrações de pó de vidro, nas condições utilizadas, apresentaram maiores resistências. Exceto para o caso em que toda areia foi substituída por pó de vidro, a qual resultou em resistência abaixo do padrão de referência.

- Resistência Mecânica após tratamento térmico – temperaturas de 800, 1000 e 1200 °C:
 - As amostras contendo pó de vidro apresentaram resistência mecânica maior que a argamassa padrão de referência, após exposição a elevadas temperaturas.
 - A argamassa constituída somente por pó de vidro apresentou as maiores resistências. Temperaturas mais elevadas geraram maiores resistências nessa argamassa, porém, limitado à temperatura de 1000 °C.
 - A amostra contendo 50% de pó de vidro apresentou resistências maiores em relação à argamassa padrão de referência e aumentaram com elevação da temperatura, limitadas à temperatura de 1000 °C.
 - Amostras com 50% e 100% de pó de vidro perdem sua forma geométrica após exposição a 1200 °C.
 - A amostra contendo 20% de pó de vidro apresentou as menores resistências entre as amostras contendo vidro. Porém, foi a única formulação que manteve resistência térmica em todas as temperaturas ensaiadas.
 - Entre as amostras com 20% e as com 50% de pó de vidro, deve haver um limite nessa proporção que mantém a resistência térmica.
- A amostra contendo 50% de pó de vidro apresentou os melhores resultados em termos de resistência mecânica, em relação ao padrão de referência, tanto em temperatura de 25 °C como nas elevadas temperaturas. Porém, não resiste à temperatura de 1200 °C.
- A amostra contendo 20% de pó de vidro apresentou resultados menores de resistência em relação à de 50%, porém, resiste à temperatura de 1200 °C.

Os resultados obtidos demonstraram que o vidro sodo cálcico, na forma de pó, com a granulometria usada, apresenta potencial para ser utilizado no desenvolvimento de uma argamassa com a finalidade de resistir temperaturas entre

800 e 1200 °C, sem diminuir seu desempenho em temperatura ambiente. Também, contribui significativamente para as questões ambientais, pois pode reduzir o consumo de cimento nas argamassas, o que reduz a emissão de CO₂, recoloca esse tipo de vidro na cadeia produtiva, reduzindo depósitos em aterros e economizando as jazidas naturais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Além dos estudos necessários para o desenvolvimento de uma argamassa resistente a elevadas temperaturas, previsto no trabalho, outras sugestões surgiram, tais como:

- No presente trabalho foi admitida a hipótese de que a resistência apresentada pelos corpos de prova, contendo vidro na formulação após exposição a elevadas temperaturas, se deve à sinterização. É necessário aprofundar os estudos para comprovar a hipótese admitida bem como esclarecer os mecanismos, situações, tipos de sinterização que ocorre. Envolve estudos de microestrutura para elucidar a construção dessa resistência.
- Outra questão é estudar o comportamento dessa resistência em ensaio dinâmico. Ou seja, submeter corpos de prova contendo pó de vidro, sob carga, em elevadas temperaturas. De forma preliminar se fez um experimento no qual, corpos de prova de AL0 e AL50 foram submetidos à temperatura de 1000 °C sob a ação de uma força de 5 Newtons aplicada no centro dos corpos de prova. AL0 não resistiu, enquanto AL50 manteve sua forma. No entanto, apresentou uma pequena curvatura, semelhante ao comportamento de um material dúctil.
- Por se tratar de vidro incorporado a material cimentício, é necessário desenvolver estudos sobre o comportamento em idades mais avançadas. Estudos sobre as possibilidades do desenvolvimento de reações ASR, dissolução/migração de cátions alcalinos, ocorrência de eflorescência e demais patologias que podem se manifestar com o passar do tempo.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Guia básico de utilização do cimento Portland**, 7ª edição, São Paulo, 2002, 28p., Boletim Técnico n. 106, 2002.

ADAWAY, M.; WANG, Y. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v.14, n.1, p. 116-122, 2015.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro. Saint-Gobain Vidros do Brasil, 2000.

ANDREINI, M.; SASSU, M. Mechanical behavior of full unit masonry panels under fire action. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 7, p. 440-450, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14323**: Projeto de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR13281:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR13279:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13276:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10636:1989**. Paredes divisórias sem função estrutural – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5736:1991**. Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 9778:2005**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água– Índice de vazios e massa específica - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15261:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos –Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

BAILEY, C. Structural fire design: core or specialist subject? **The Structural Engineer**, v. 82, n.9, p. 32-38, 2004.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**, 5ª edição, Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000.

BENTCHIKOW, M.; BOURIAH, S.; HAMDANE, N.; DEBIED, F.; BOUKENDAKDJI, O. Comparative study of the properties of mortars with recycled glass aggregates incorporated by addition and substitution. **Energy Procedia**, v.139, p. 499-504, 2017.

BHANDARY, P. S.; TAJNE, K. M. Use of waste glass in cement mortar. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, v.3, n. 4, p. 704-711, 2013.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**.8ª edição, LTC editora, Rio de Janeiro, 2012.

DEGIRMENCI, N.; YILMAZ, A.; CAKIR, O. A.; Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 18, p. 303-308, 2011.

DRON, R.; BRIVOT, F. Thermodynamic and kinetic approach to the Alkali silica reaction-concepts. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p 941-948, 1992.

DYER, D. T.; DHIR, K. R. Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 13, p. 412-417, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 2005-1, 2: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design**. Brussel, 2005.

FREIRE, L. L. R. Indústria de vidros planos, **Caderno Setorial ETENE**, ano 1, n.3, 2016. Disponível em

>https://www.bnb.gov.br/documents/80223/1218176/2_vidros.pdf/d8f77da8-9f00-7968-f918-9068e4fc560e> Acesso: 13/01/2018 – 20h.

GARCIA, C. R.; SANTOS, E. M. B.; RIBEIRO, S. Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento Portland. **Cerâmica** 57, p. 94-99, 2011.

GERMAN, R. M. **Sintering theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, edição 18ª, p. 568.

GRUBBA, D. Argamassa – Materiais de Construção. **Slide Share**. Publicado em 31/05/2016, disponível em: <https://www.slideshare.net/davidgrubba/argamassa-materiais-de-construo>.

HAGER, I. Behavior of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Science: Technical Sciences**, v. 61, pp.145, 2013.

INGHAN, J. Forensic engineering of fire-damaged structures. **ICE – Institution of Civil Engineers**. v. 162, p. 12-17, 2009.

KALIL, S. B., LEGGERINI, M. R., BONACHESKI, V. Alvenaria estrutural, **PUC RS**, 2007.

KHOURY, G. A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, n. 161, pp. 291-309, 1992.

KIM, K. Y.; YUN, T. S.; PARK, K. P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed at high temperatures by X-ray computed tomography. **Cement and Thermographic Research**. v. 50, p. 34-40, 2013.

KOU, S. C.; XING, F. The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fiber-reinforced ultrahigh performance concrete. **Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering**. v. Article ID 263243, 8 pages, 2012.

LIMA, R. C. A.; HAESBAERT, F. M.; CAETANO, L. F.; BERGAMANN, C. P.; SILVA FILHO, L. C. P. Microstructural changes in high density concretes exposed to high temperatures. **IBRACON Materials Journal**. v. 1, n. 1, p. 7-14, 2005.

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

MEYER, C.; XI, Y. Use of recycled glass and fly ash for precast concrete. **Journal of materials in Civil Engineering**, n. 2, p. 89-90, 1999.

MEYER, C.; BAXTER, S.; JIN, W. Potential of waste glass for concrete masonry blocks. Proceedings of the **4th Materials Engineering Conference**, p. 666-673, Washington, DC, USA, 1996.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. M. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, 2011.

MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A.; LEKLOU, N.; PETIT, L. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 28, issue 3, p. 350-359, 2008.

MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A.; DIEDERICH, P.; PETIT, L. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 508-516, 2010.

NADJAI, A.; O'GARA, M.; ALI, F.; JURGEN, R. Compartment masonry walls in fire situation, **Fire Technology**, v. 42, n.3, p. 211-231, 2006.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**, 2^a Edição, São Paulo, Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2^a edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NWAUBANI, S. O.; POUTOS, K. I. The influence of waste glass powder fineness on the properties of cement mortars. **International Journal of Application on Innovation in Engineering and Management (IJAIEM)**. v. 2, issue 2, p. 110-116, 2013.

OLOFINADE, O. M.; EDE, A. N.; NDAMBUKI, J. M. Experimental investigation on the effect of elevated temperature on compressive strength of concrete containing waste glass powder. **International Journal of Engineering and Technology innovation**, vol. 7, n. 4, p. 280-291, 2017.

PANCAR, E. B. Reducing high temperature effect on concrete by changing concrete mixture, **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 6, n.4, 2017.

PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. **Ninth Annual International Conference on Composites Engineering in: D. Hui (Ed)**, Sponsored by Community for Composite Engineering and College of Engineering, University of New Orleans, Califórnia, p. 603-604, 2004.

PRADO, M. O.; ZANOTTO, E. D. Glass sintering with concurrent crystallization. **C.R. Chimiev.5**, p.773-786, 2002.

RAJABIPOUR, F.; MARAGHECHI, H.; FISCHER, G. Investigating the Alkali-Silica Reaction of recycled glass aggregates in concrete materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1201-1208, 2010.

RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. Studies on recycled aggregates-based concrete. **Waste Management & Research**, v. 24, n. 3, p. 225-233, 2006.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**. Santa Maria, 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2012.

ROMANO, C. A. Manual de tecnologia do concreto. **Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná**, Engenharia de Produção Civil, 2004.

SADIQUL ISLAM, G. M.; RAHMAN, M.H.; KNAYEM KAZI, Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**. v. 6, p. 37-44, 2017.

SANTOS, W. J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **Scientia Plena**. v. 5, n. 2, p. 1-5, 2009.

SAOUMA, V., PEROTTI, L. Constitutive model for alkali-aggregate reaction. **ACI Materials Journal**, v.103, ed. 3, p. 194-202, 2006.

SÄLAK, A. **Ferrous powder metallurgy**. Cambridge International Science Publishing, p. 453, 1995.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 128-136, 2008.

SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, S. RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Elsevier Science Ltd**. All Rights reserved. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 91-100, 2000.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v.125, p. 600-612. 2016.

TERRO, M. J. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. **Building and Environment**, v. 41, p. 633-639, 2006.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**. v.34, p. 267-274, 2004.

TUNCAN, M.; KARASU, B. YALCIN, M. The sustainability for using glass and fly ash in Portland cement concrete. The Proceedings of the **Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE-2001)**, Stavanger, Norway, v.4, p. 146-152, 2001.

TURRIZIANI, R. Internal degradation of concrete: alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion. In **8th International Congress of the Chemistry of Cement**, Rio de Janeiro, 1986.

ULM, F. J., COUSSY, O., LI, K., LARIVE, C. Thermo- chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures. **Journal of Engineering Mechanics**. v.126 ed.3, p. 233-242, 2000.

VIRMANI, P.; FARIDAZAR, F. Alkali-Silica Reaction mechanisms and detection: an advanced understanding. **U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration-Research, Development and Technology**. P. 1-12, 2014.

WANG, H. Y.; HOU, T. C. A study of elevated temperatures on the strength properties of LCD glass powder cement mortars. Published by **INTECH**, <www.intechopen.com>, 2013.

ANEXO A

CILAS

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Areia
 Type produit : Areia
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Natália
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 23/11/2017 Hora : 09:42:37
 Índice med. : 4870

Ultrason : 60 s
 Concentração : 163
 Diâmetro a 10% : 211.29 mu
 Diâmetro a 50% : 644.74 mu
 Diâmetro a 90% : 1230.04mu
 Diâmetro médio : 686.35 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.07	0.09	0.10	0.12	0.15
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.32	0.36	0.39	0.42
q3	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.45	0.47	0.52	0.60	0.67	0.72	0.75	0.77	0.80	0.82
q3	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	0.84	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06
q3	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.08	1.09	1.11	1.14	1.19	1.23	1.28	1.32	1.34	1.36
q3	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	1.41	1.47	1.51	1.56	1.70	1.89	2.00	2.14	2.28	2.43
q3	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13	0.18	0.23	0.24	0.26	0.29
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	2.58	2.74	2.93	3.13	3.61	3.82	4.29	4.56	4.84	5.47
q3	0.31	0.35	0.37	0.41	0.49	0.60	0.71	0.86	0.93	1.10
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	6.19	6.99	7.89	8.85	10.07	13.29	14.15	19.21	27.17	35.63
q3	1.33	1.57	1.87	2.10	2.35	2.73	2.97	3.11	3.10	4.25
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	45.33	55.34	64.80	72.98	79.66	84.93	89.03	92.17	94.58	96.43
q3	5.97	7.28	7.95	7.79	7.11	6.20	5.29	4.40	3.65	3.01
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	97.83	98.64	99.22	99.62	99.87	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	2.43	1.50	1.14	0.83	0.55	0.28	0.02	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

CILAS**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA****CILAS 1180 Líquido**

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Pó de Vidro
 Type produit : Vidro
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Natália
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 23/11/2017 Hora : 09:32:16
 Índice med. : 4869

Ultrason : 60 s
 Concentração : 123
 Diâmetro a 10% : 1.77 mu
 Diâmetro a 50% : 10.51 mu
 Diâmetro a 90% : 40.11 mu
 Diâmetro médio : 16.33 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.05	0.19	0.30	0.66	1.09	1.49	1.88	2.33	2.84	3.43
q3	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10	0.13	0.17	0.24	0.32	0.42
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	4.06	4.71	5.39	6.08	6.77	7.47	8.84	10.18	11.49	12.76
q3	0.51	0.59	0.68	0.76	0.83	0.90	0.98	1.09	1.19	1.28
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	14.00	15.21	17.54	23.07	28.26	33.09	35.37	37.55	39.62	41.60
q3	1.37	1.45	1.56	1.84	2.23	2.54	2.73	2.82	2.87	2.94
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	43.47	45.24	48.49	51.37	53.95	56.25	58.33	60.23	61.98	63.61
q3	2.96	2.97	2.96	2.90	2.84	2.75	2.69	2.64	2.60	2.58
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	65.14	66.60	67.99	70.63	74.35	77.86	82.25	86.29	88.17	89.91
q3	2.56	2.59	2.60	2.65	2.79	2.97	3.15	3.29	3.33	3.25
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	93.62	96.36	97.56	98.46	99.59	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	3.02	2.49	1.97	1.57	0.92	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %