



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Jéssica Fernandes Cotta

Avaliação do desempenho da lã de vidro como pozolana e fibra de reforço em compósitos de cimento Portland

Ouro Preto
2018

Jéssica Fernandes Cotta

Avaliação do desempenho da lã de vidro como pozolana e fibra de reforço em compósitos de cimento Portland

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia Civil

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva
Co-orientador: Humberto Dias Andrade, M.Sc.

Ouro Preto
2018

Jessica Fernandes Cotta

Avaliação do desempenho como pozolana e fibra de reforço dos resíduos de lã de vidro em compósitos de cimento Portland

Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenharia Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 20 de julho de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Humberto Dias Andrade, M.Sc. – Co-Orientador – UFOP



Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigoñini Silva – Orientador – UFOP

Wanna Carvalho Fontes

Prof. Dr. Wanna Carvalho Fontes – UFOP

C846a Cotta, Jéssica Fernandes.
Avaliação do desempenho da lã de vidro como pozolana e fibra de reforço em compósitos de cimento Portland [manuscrito] / Jéssica Fernandes Cotta. - 2018.

40f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Coorientador: Prof. MSc. Humberto Dias Andrade.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Resíduo. 2. Lã de vidro. 3. Atividade pozolânica. 4. Fibra de reforço. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini . II. Andrade, Humberto Dias . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Àquele que é fonte inesgotável de amor, bondade e misericórdia, criador da vida e sustentador do Universo, o senhor Deus.

À minha querida mãe Vanda que me ensinou valores, se preocupou comigo e que deu seu apoio em toda e qualquer situação.

Às minhas irmãs Camilla e Gabriela e ao meu pai Lúcio, que compartilharam com estímulo e afeto as minhas lutas.

Ao meu grande amor e companheiro Edson, que me apoiou a cada escolha, vibrou a cada conquista e me consolou nas adversidades.

Aos mestres, doutores, funcionários e colegas do grupo RECICLOS, em especial ao Keoma, Júnio, Humberto e professor Guilherme, que contribuíram para o desenvolvimento e concretização deste projeto.

Reintero o meu apreço e a minha eterna gratidão a todos que mesmo sem saber me ajudaram a concluir mais uma etapa dessa longa jornada que é a vida.

RESUMO

O conceito de desenvolvimento sustentável transcende a sustentabilidade ambiental, para circundar a sustentabilidade econômica e social, que no setor da construção civil consiste em otimizar o consumo de materiais e energia, preservar o ambiente natural e melhorar a qualidade do ambiente construído na prática de reaproveitamento de resíduos industriais. A lã de vidro é um material constituído de finas fibras de vidro, com diâmetro aproximado de 3 a 6 μm e de comprimento variado, aglomerada por resinas sintéticas. Esse material é muito utilizado na construção civil, contribuindo no conforto térmico e acústico das edificações comerciais e residenciais. Entretanto, devido às condições de trabalho, perde as suas características de isolante térmico, sendo depositada em aterros industriais. Este trabalho investiga a utilização de resíduos de lã de vidro como substituto de 25% de cimento Portland em argamassas para avaliação de seu desempenho como pozolana e fibra de reforço na matriz cimentícia. Antes de serem utilizados, os resíduos passaram por um processo de moagem e separação visual. O programa experimental consistiu na aplicação das técnicas de investigação de pozolanicidade de adições minerais pelo método indireto. Para isso, foram realizados ensaios de atividade pozolânica com cimento Portland e de Tração na Flexão em argamassas com 28, 56 e 90 dias de cura. Os resultados revelaram que o resíduo de lã de vidro além de promover atividade pozolânica, contribuiu para formação de uma matriz mais densa, atuando como fibra de reforço no compósito cimentício.

Palavras- chave: resíduo; lã de vidro; atividade pozolânica; fibra de reforço.

ABSTRACT

The concept of sustainable development transcends environmental sustainability, to make a sustainable and social economy, which means that the construction industry is conditioned to the optimization of consumption of materials and energy, preservation of the natural environment and improvement of the quality of the environment in practice reuse of industrial waste. Glass wool is a material consisting of fine glass fibers, with a diameter of approximately 3 μm and of varying length, agglomerated by synthetic resins. This material is widely used in civil construction, contributing to the construction of residential and residential projects. However, due to the working conditions, they are characteristics of thermal insulation and are deposited in industrial landfills. This work investigates the use of firewood residues as a substitute of 25% of Portland cement in mortars to evaluate its performance as pozzolan and reinforcement fiber in the cement matrix. Before being used, the processes by a process of grinding and visual separation. The experimental program consisted in the application of pozzolanic research techniques of additions of articles by the indirect method. For this, tests of pozzolanic Portland activity and flexural traction were performed on mortars with 28, 56 and 90 days of cure. The results showed that the pressure glass residue promoted pozzolanic activity, contributed to the formation of a dense matrix, acting as support for non - compacted growth.

Keywords: waste; glass wool; pozzolanic activity; fiber reinforcement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Esquema Simplificado da Fabricação do Cimento Portland.	7
Figura 2.2: Interação Fibras-Matriz com Matriz não Fissurada: (a) Descarregada (b) Submtida à Tração (c) Submetida à Compressão.	177
Figura 3.1: Amostra de Lã de Vidro.	18
Figura 3.2: Resíduo Pós Beneficiamento.	19
Figura 3.3: Cura em Banho Saturado de Água e Cal.	20
Figura 3.4: Equipamento Utilizado nos Ensaio de Resistência Mecânica.	22
Figura 4.1: Resultados dos Ensaio à Tração na Flexão NBR 13279: 2005.	23
Figura 4.2: Resultados dos Ensaio à Compressão Simples NBR 5752: 2014.	24
Figura 4.3: Determinação do Índice de Consistência da Argamassa de Controle.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição Química dos Resíduos de Lã de Vidro.....	3
Tabela 2.2: Constituição dos Cimentos Portland Normalizados no Brasil.....	5
Tabela 2.3: Nomenclatura dos Cimentos Portland Segundo a ABNT.....	6
Tabela 2.4: Composição em Óxidos do Cimento Portland.	7
Tabela 2.5: Classe das Pozolanas.....	11
Tabela 2.6: Requisitos Químicos dos Materiais Pozolânicos.....	111
Tabela 2.7: Requisitos Físicos dos Materiais Pozolânicos	12
Tabela 3.1: Dosagem das Argamassas (NBR 5752:2014).	200
Tabela 4.1: Índice de Consistência das Argamassas Utilizadas para Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica NBR 5752:2014.....	26
Tabela 4.2: Resultados dos Ensaios à Compressão Simples NBR 5752:2014.....	26

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ARLV – Argamassa de Cimento Portland com Substituição por RLV;
C₂S – Silicato Dicálcico;
C₃A – Aluminato Tricálcico;
C₃S – Silicato Tricálcico;
C₄AF – Ferroaluminato Tetracálcico;
Ca(OH)₂ – Cal hidratada;
CaO – Óxido de Cálcio;
CaSO₄ – Sulfato de Cálcio;
CH – Hidróxido de Cálcio Ca(OH)₂;
CO₂ – Dióxido de Carbono;
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado;
DRX – Difração de Raios X;
DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura;
DTA – Análise Termo Diferencial;
H – Hidrogênio;
IAP – Índice de Atividade Pozolânica;
RLV – Resíduo de Lã de Vidro;
SiO₂ – Óxido de Silício;
TG – Análise Termogravimétrica;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo geral	2
1.1.1	Objetivos específicos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Cimento Portland	4
2.1.1	Compostos do Clínquer de Cimento Portland.....	7
2.1.2	Hidratação do Cimento Portland e Influência das Adições Minerais.....	8
2.1.3	Influência de Materiais Pozolânicos	10
2.2	Pozolanas.....	11
2.2.1	Reação Pozolânica	12
2.2.2	Resistência Mecânica.....	13
2.2.3	Índice de Atividade Pozolânica	15
2.3	Fibras: Definição e Propriedades Mecânicas.....	15
2.3.1	O Compósito e a Interação Fibra- Matriz.....	17
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	Aquisição e Caracterização dos Materiais.....	18
3.2	Beneficiamento	18
3.3	Investigação do Compósito Cimentício com a Incorporação do Resíduo de Lã de Vidro.....	19
3.3.1	Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	19
3.3.2	Determinação da Resistência à Tração na Flexão e a Compressão.....	21
3.3.2.1	Resistência à Tração na Flexão	21
3.3.2.2	Resistência à Compressão Axial	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1	Resistência à Tração na Flexão.....	23
4.2	Resistência à Compressão.....	24
4.3	Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	25
5	CONCLUSÃO.....	27

1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade contempla aspectos sócio-culturais, econômicos e ambientais das atividades humanas, estando ligado ao uso de recursos naturais, aos custos envolvidos e ao impacto que proporciona na sociedade (ORTEGA, 2014).

Esses impactos, no setor de construção civil, estão associados ao consumo apreciável de energia e quantidade de resíduos gerados durante a extração e fabricação dos produtos que em sua maioria possuem inadequado descarte e reaproveitamento ao final da sua vida útil (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Somente a indústria da construção civil é responsável por cerca de 50% do CO₂ lançado na atmosfera e por quase metade da quantidade dos resíduos sólidos gerados no mundo (JOHN, 2000).

Desta forma, por ser um ramo que absorve uma ampla variedade de resíduos sólidos tornou-se corrente a prática do reaproveitamento de resíduos industriais como adições minerais em substituição parcial dos agregados em argamassas e concretos e em produção do cimento Portland. Essas adições, segundo a sua ação físico-químico, podem ser classificadas em três grandes grupos: cimentante, fíler e material pozolânico (ISAIA, 2011).

O material pozolânico é definido pela ABNT NBR 12653: 2014 como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias. Desse modo, quando empregadas no cimento Portland, geram matrizes duráveis devido à reação pozolânica que consome o hidróxido de cálcio e produz compostos de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Dentre os resíduos industriais que apresentaram propriedades pozolânicas pode-se citar a lã de vidro, componente fabricado em alto forno a partir de sílica e sódio, aglomerados por resinas sintéticas, utilizada especificamente nas atividades das indústrias minero-metalúrgicas como revestimento de equipamentos industriais e isolante termo acústico de instalações. É comercializada em rolos e em painéis, havendo uma diversidade de densidades e espessuras, que adequam-se a cada necessidade (BORGES, 2007).

Apenas no Complexo Portuário de Tubarão, pertencente à empresa Vale do Rio Doce são produzidas três mil toneladas de resíduos por mês, tendo como destino final aterros industriais, internos e externos (DEFAVERI, 2016 *apud* VALE, 2014).

Outra tendência que vem sendo disseminada no Brasil é a utilização de fibras originadas de resíduos sólidos para recuperação e reforço estrutural. Compósitos reforçados com fibras apresentam maiores resistências à tração, ao impacto e à fadiga, além de ductilidade e tenacidade (PAIVA, 2013).

Para garantir a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras, algumas técnicas de tratamento têm sido propostas. Uma delas é a modificação da matriz por meio do uso de cimentos com adição de materiais pozolânicos (LIMA & TOLEDO FILHO, 2008).

Posto isso, o conhecimento a respeito dos resíduos de lã de vidro, no que diz respeito às suas características físicas, químicas e o seu comportamento quando adicionados a argamassas, torna-se relevante, tendo em vista os benefícios que estes materiais podem proporcionar.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos causados pela incorporação dos resíduos de lã de vidro, pós-processados, em argamassas, e a partir dos resultados avaliar o seu desempenho como pozolana e/ou fibra de reforço.

1.1.1 Objetivos específicos

- Obter o índice de atividade pozolânica pelo método normativo NBR 5257: Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.
- Analisar a influência do emprego de resíduos de lã de vidro como fibra de reforço em compósitos de cimento Portland.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lã de vidro é um material constituído de finas fibras de vidro, com diâmetro aproximado de 3 a 6 μm e de comprimento variado, aglomerada por resinas sintéticas, obtida por um forte sopro de ar sobre o vidro em fusão e composta basicamente por sílica e sódio. É comercializada em rolos e em painéis, havendo uma diversidade de densidades e espessuras, que se adéquam a cada necessidade (BORGES, 2007).

Dentre as principais propriedades das lãs de vidro é possível destacar o isolamento térmico e acústico, sendo amplamente utilizado no revestimento de equipamentos industriais. Na construção civil, ela pode ser utilizada no miolo de paredes drywall, forros absorventes acústicos, entre telhas metálicas no sistema sanduíche além de outras aplicações (ANTUNES et al, 2013).

O estudo de reaproveitamento do resíduo de lã de vidro é de grande valia pelo fato de ser um resíduo volumoso e com grande geração em escala industrial (SANTOS et al, 2014). Além do mais, esse material apresenta dificuldade no processo de reciclagem, fator que inviabiliza, dentro de uma perspectiva técnica e econômica, o seu reaproveitamento dentro das indústrias e contribui para que grande parte deste material seja depositado em aterros sanitários (FONTES et al, 2014).

No que tange a classificação segundo a ABNT NBR 10004:2004 - Classificação de Resíduos Sólidos, que segue o critério de riscos potenciais ao meio ambiente, os resíduos de lã de vidro são classificados como de classe II-A, não perigosos e não inertes.

Na Tabela 2.1 pode-se verificar a composição do resíduo de lã de vidro em função de óxidos.

Tabela 2.1: Composição Química dos Resíduos de Lã de Vidro

Elementos	%
Fe ₂ O ₃	35,4
CaO	24
SiO ₂	24,0
Al ₂ O ₃	7,3
TiO ₂	3,4
SO ₃	2,2
K ₂ O	1,5
MgO	1,3
MnO	0,9

Fonte: Fontes (2014)

Na composição química dos resíduos, observam-se teores expressivos dos óxidos de ferro e de cálcio mas destacam-se, também, altos teores sílica e alumina.

Conforme Evangelista (2011) as lãs de vidro podem ser utilizadas como reforço de matrizes cimentícias para a produção de concretos e argamassas de alto desempenho quando produzidas com finalidades e competências específicas para o aumento das propriedades de interesse das matrizes cimentícias. Em seus estudos, realizou a avaliação preliminar da atividade pozolânica de resíduos de lã de vidro e lã cerâmica através dos métodos normativos de índice de atividade pozolânica com cimento Portland (ABNT NBR 5752:1992) e índice de atividade pozolânica com cal (NBR 5751:1992). A autora afirma que a aplicação do resíduo de lã de vidro obteve melhor desempenho em argamassas e concreto para o traço de 5% de substituição ao cimento.

Defaveri (2016) ao avaliar as propriedades pozolânicas do resíduo de lã de vidro após seu beneficiamento em substituição de 25% do cimento Portland em argamassas obteve um índice de atividade pozolânica de 98,7% aos 28 dias, atendendo a exigência física mínima imposta pela NBR 12653:2014.

Borges (2007), estudou as propriedades físicas e mecânicas do concreto para diferentes teores de resíduos de lã de vidro incorporados nas matrizes, em adição e em substituição da massa do aglomerante. Os resultados mostraram um ganho de trabalhabilidade, melhora no módulo de elasticidade e uma resistência média à compressão simples inferior ao do concreto de referência.

Ainda segundo o autor a adição de resíduo de lã de vidro retarda as reações de hidratação do concreto, sugerindo ocorrer ação pozolânica, tendo em vista que o efeito pozolânico gera aumento da resistência do concreto em idades mais avançadas.

Ao utilizar resíduos de lã de vidro em substituição à fração fina do agregado miúdo de argamassas, Vieira (2014), demonstrou que a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral aumentaram consideravelmente com a incorporação do resíduo, o que indica que a sua incorporação como fíler contribuiu para o empacotamento granulométrico, melhorando os requisitos de desempenho mecânicos avaliados das argamassas.

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland comum pode ser definido como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio

hidráulicos, usualmente contendo uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição (MEHTA&MONTEIRO, 2014).

Por economia e por questões de sustentabilidade ambiental, o Portland comum tem recebido sistematicamente adições de origem mineral resultando em outros tipos de Portland admitidos pelas normas técnicas da ABNT (CARVALHO, 2012). Somente em 2008, o uso de adições na produção de cimento permitiu a redução de aproximadamente 14 Mt de CO₂ (ISAIA, 2011).

No Brasil, assim como na maioria dos países com produção significativa, são fabricados diversos tipos de cimentos, que correspondem à maior ou menor exaltação dos seus principais componentes e resultam no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas. Atualmente, o mercado nacional dispõe de 11 tipos básicos de cimento Portland, regidos pelas normas da ABNT, e são diferenciados principalmente em função de sua composição (ABCP, 2002). Essa diferenciação se dá de acordo com a proporção do clínquer e sulfatos de cálcio, adições acrescentadas no processo de moagem e propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, a cor branca, entre outras.

As Tabelas 2.2 e 2.3 fornecem a constituição dos cimentos Portland normalizados no Brasil e suas nomenclaturas, respectivamente.

Tabela 2.2: Constituição dos Cimentos Portland Normalizados no Brasil

Tipos de cimento Portland	Sigla	Constituição				Normas da ABNT
		Clínquer + Gesso	Escória	Pozolana	Mat. Carbonático	
Comum	CPI	100%	0%	0%	0%	NBR 5732
Composto	CP II-E	56-94%	6-34%	0	0-10%	NBR 11578
Alto-forno	CP III	25-65%	35-70%	0%	0-5%	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	45-85%	0	15-50%	0-5%	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	95-100%	0%	0%	0-5%	NBR 5733
Resistência aos sulfatos	RS	Idêntica a um dos cinco anteriores, do qual é derivado				NBR 5737
Destinado à Cimentação de Poços Petrolíferos	CPP Classe G	100%	0%	0%	0%	NBR 9831

Fonte: Isaia (2011)

Nota-se que o cimento Portland Pozolânico CP IV, apresenta em sua constituição teores de 15% a 50% de pozolana. O concreto feito com esse produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistências mecânicas à compressão superiores a de concretos feitos com cimento Portland comum a idades avançadas. Além disso, apresentam características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto, devido ao baixo calor de hidratação desprendido (CARVALHO, 2012).

Tabela 2.3: Nomenclatura dos Cimentos Portland Segundo a ABNT

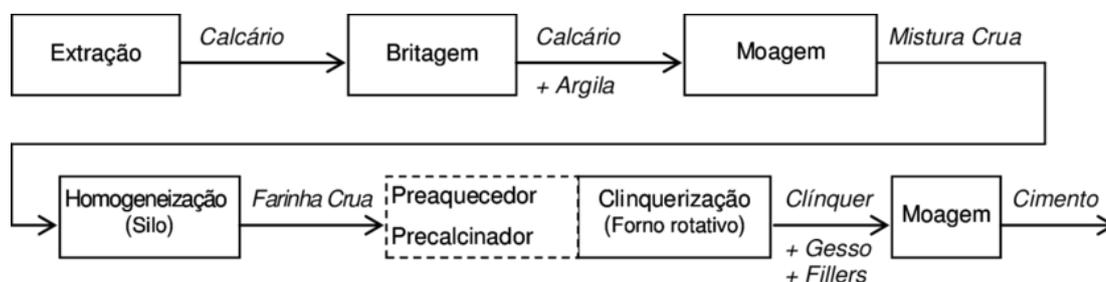
Nome teórico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento Portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
			40	CP I-40
	Cimento Portland comum com adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento Portland composto (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
Cimento Portland composto com filler	CP II-F	25	CP II-F-25	
		32	CP II-F-32	
		40	CP II-F-40	
Cimento Portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
Cimento Portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP III-32
Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	–	CP V-ARI
Cimento Portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		–	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS, etc.
			32	
			40	
Cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		–	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC, etc.
			32	
			40	
Cimento Portland branco (NBR 12989)	Cimento Portland branco estrutural	CPB	25	CPB-25
			32	CPB-32
			40	CPB-40
	Cimento Portland branco não estrutural	CPB	–	CPB
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP- classe G

Fonte: ABCP (2002)

O processo de fabricação do cimento Portland se dá por etapas, resumidas nas seguintes operações: (1) Mineração e britagem do calcário; (2) Preparo e dosagem da mistura crua; (3)

Homogeneização da mistura; (4) Clinquerização, resfriamento e moagem de cimento (ISAIA, 2011), como ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquema Simplificado da Fabricação do Cimento Portland



Fonte: Adaptado de Isaias (2011)

2.1.1 Compostos do Clínquer de Cimento Portland

Embora o cimento Portland consista essencialmente de vários compostos de cálcio, os resultados das análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes (Tabela 2.4) (MEHTA&MONTEIRO, 2014).

Durante o aquecimento, entre temperaturas de 1450 a 1650 °C, estes óxidos se combinam em proporções convenientemente dosadas e homogeneizadas para formar silicatos de cálcio e aluminatos, os quais são designados como clínquer. Após isso, o clínquer é resfriado e moído com a adição de pequenas quantidades de gesso (CaSO_4), a fim de retardar o processo de pega prematura do cimento. O produto final deste processo pode reagir com a água para formar um composto hidratado com propriedades cimentantes (CARVALHO, 2012).

Tabela 2.4: Composição em Óxidos do Cimento Portland

Elementos	%
CaO	61 a 67
SiO ₂	20 a 23
Al ₂ O ₃	4,5 a 7
Fe ₂ O ₃	2 a 3,5
MgO	0,8 a 6
Álcalis	0,3 a 1,5
SO ₃	1 a 2,3
TiO ₂ , Mn ₃ O ₄ e P ₂ O ₅	Aparecem em pequenas quantidades insolúveis no HCL: ≤ 1,0 %

Fonte: Carvalho (2012)

A alita, silicato tricálcico (C_3S), é o maior responsável pelo endurecimento e resistência mecânica do cimento, especialmente às primeiras idades (de 1 a 28 dias). Compreende 40% a

70%, em massa, sendo o principal constituinte do clínquer. A belita, silicato dicálcico (C_2S), desempenha importante papel no ganho de resistência mecânica do cimento, sobretudo a idades mais avançadas (acima de 28 dias), uma vez que apresenta taxa de hidratação mais lenta (SIQUEIRA, 2008).

O aluminato tricálcico (C_3A) é o constituinte do cimento que apresenta o maior calor de hidratação, sendo o grande responsável pela pega e endurecimento da pasta. Apresenta-se, geralmente, como um cimento vítreo junto ao C_4AF no clínquer. Este cimento é denominado fase intersticial do clínquer. Já o C_4AF (ferroaluminato tetracálcico) tem importante papel na resistência química do cimento, em especial ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto (PAIVA, 2013).

Dessa forma, o enrijecimento e pega são devidos ao aluminatos. O endurecimento é associado, quase que exclusivamente, aos silicatos (CARVALHO, 2012).

A cal livre (CaO) é considerada indesejável no clínquer em teores superiores a 2%. A presença de cal livre pode levar a expansão da pasta de cimento no processo de hidratação, mas não existe uma limitação normativa do teor máximo de CaO livre no clínquer ou no cimento, o que se limita efetivamente é a variação volumétrica da pasta de cimento pelo método das agulhas de *Le Chatelier*, seja a frio ou a quente, de acordo com a ABNT NBR 11582:1991 (ISAIA, 2011).

2.1.2 Hidratação do Cimento Portland e Influência das Adições Mineraias

Cada fase que constitui o processo de hidratação do cimento Portland tem uma reação característica com a água, entretanto, o teor relativo em que estão presentes tem efeito sobre a evolução da hidratação como um todo. Por conseguinte, a hidratação do cimento Portland é um sistema complexo com diversos pontos ainda não muito claros (ISAIA, 2011).

Conforme Borges (2007), no processo de hidratação, os grãos de cimento ao serem dissolvidos dão origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Nessa reação, os silicatos tricálcicos e posteriormente os silicatos bicálcicos se dissolvem precipitando os primeiros hidratos. Surgem-se, portanto, as principais características do material. Os silicatos de cálcio hidratados ($C-S-H$) fazem referência a uma família de fases sólidas, de estrutura cristalina imprecisa e de composição química extremamente variada.

Segundo o mesmo autor, a reação de hidratação dos aluminatos, retardada pela adição de gesso, tem por produto o trissulfato-aluminato que cristaliza sob a forma de agulhas, em forma

de feixes ao redor dos grãos de cimento anidro. A hidratação do ferro-aluminatos ocorre de forma semelhante à hidratação dos aluminatos (BORGES, 2007).

De acordo com Carvalho (2012) o processo de hidratação pode ser enumerado em cinco estágios iniciais:

1) Primeiro estágio: Período da mistura.

Nesse primeiro estágio, acontece uma rápida dissolução dos diferentes íons liberados pelas diversas fases. A natureza é exotérmica, e há geração de dois hidratos que cobrem parcialmente a superfície dos grãos de cimento: C-S-H e etringita.

2) Segundo estágio: Período dormente

A dissolução da fase do clínquer é mais lenta, devido ao rápido aumento do pH e do teor de íons de Ca^{++} da água de mistura. Nesse estágio, uma pequena quantidade de C-S-H é formado, e se existe o equilíbrio certo entre os íons de alumínio e de sulfato, quantidades reduzidas de etringita e de aluminato de cálcio hidratado também são formadas. A fase aquosa torna-se saturada em Ca^{++} , mas não existe precipitação de $Ca(OH)_2$, mais provavelmente por causa de sua baixa velocidade de formação em comparação com a do C-S-H.

3) Terceiro estágio: Início de pega

A reação de hidratação é subitamente ativada quando o hidróxido de cálcio começa a precipitar-se. Isso ocorre quando não existe praticamente mais silicato na fase aquosa. O consumo de íons Ca^{++} e OH^- provoca uma aceleração na dissolução de todos os componentes do cimento Portland. Usualmente, é nesse período que ocorre o início da pega. Algumas ligações interpartículas começam a ser criadas pelas fases dos silicatos e dos aluminatos hidratados, resultando em endurecimento progressivo da pasta.

4) Quarto estágio: Endurecimento

Usualmente, entre 9 e 15 h depois do início da mistura, a etringita formada torna-se uma fonte de sulfato para formar o monossulfoaluminato com a fase aluminato remanescente. Essa reação gera calor e promove a aceleração da hidratação das fases silicatos.

5) Quinto estágio: Redução da velocidade e difusão

Nesse estágio da hidratação, os grãos de cimento estão cobertos por uma camada de hidratos, que se torna mais espessa, dificultando a chegada de água às partes não hidratadas das partículas de cimento. A hidratação vai se reduzindo porque é controlada predominantemente pela difusão das moléculas de água através das camadas de hidratos.

A hidratação é cessada quando não existe mais fase anidra ou quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas, ou ainda quando não existe mais água disponível, caso isso ocorra (relação água/aglomerante muito baixa, insuficiente).

Cota (2013) disserta sobre a influência dos silicatos e produtos da reação de hidratação. Segundo o autor, o C-S-H é o principal responsável pela resistência da pasta endurecida, enquanto que uma maior concentração de cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ representa uma redução na resistência do material a ataques de ácidos e de sulfatos. Assim cimentos com alto teor de C_3S são mais suscetíveis ao ataque químico.

De forma geral, o processo de hidratação do cimento Portland acontece em função do tempo, considerando que 80% do processo acontecerá até o final de 28 dias de cura e se concluirá, praticamente ao final de 365 dias (TAYLOR, 1990).

2.1.3 Influência de Materiais Pozolânicos

São materiais pozolânicos (usados em adições): cinzas vulcânicas, argilas calcinadas, cinzas volantes, microssílica e outros como escória siderúrgica ácidas, rejeito sílico- aluminoso do craqueamento do petróleo, cinzas de resíduos vegetais e rejeito de carvão mineral (CARVALHO, 2012).

Segundo Borges (2007) esses materiais promovem a diluição do aluminato tricálcico (C_3A), provocando, portanto, redução do calor de hidratação.

Tendo em vista a diferença no processo de reação do clínquer do cimento e das pozolanas, Massazza (1993) alega que a adição de pozolanas, naturais e sílica fume, acelera a hidratação inicial do clínquer no cimento. Entretanto, o progresso da hidratação em cimentos pozolânicos não pode ser expresso em função da quantidade de hidróxido de cálcio como feito em cimentos Portland, uma vez que a quantidade do mesmo está relacionado à aceleração da hidrólise dos silicatos de cálcio do clínquer, a reação pozolânica e à modificações na composição das fases hidratadas.

Existem divergências quanto à influência de pozolanas nas reações de hidratação do cimento Portland haja vista a infinidade de adições pozolanas existentes e o efeito que cada uma provoca sobre o processo. Taylor (1990) cita que a sílica ativa acelera a hidratação do silicato tricálcico (C_3S), enquanto Fajun et al (1984) relata que a cinza volante além de retardar a hidratação do C_3S age também como retardador do aluminato tricálcico (C_3A).

2.2 Pozolanas

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA, BARBOSA, 2006).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica as pozolanas quanto à origem em:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ($\geq 65\%$ de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.
- Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

Contudo, tanto os materiais naturais como os artificiais podem necessitar de um processamento adicional (britagem, moagem, entre outros) para se adequar como material pozolânico para uso em cimento e concreto (ISAIA, 2011).

Em virtude de sua origem, requisitos químicos e físicos são divididos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) em três classes: N, C e E, como apresentado na Tabela 2.5, Tabela 2.6 e Tabela 2.7, respectivamente.

Tabela 2.5: Classe das Pozolanas

Classes de material pozolânico	
Classe N-	Pozolanas naturais e artificiais
Classe C-	Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas
Classe E-	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Tabela 2.6: Requisitos Químicos dos Materiais Pozolânicos

Exigências químicas			
Propriedades	Classes de material pozolânico		Método de ensaio (*)
	N	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO_3	≤ 4	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda de fogo	≤ 10	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Tabela 2.7: Requisitos Físicos dos Materiais Pozolânicos

Exigências Físicas			
Propriedades	Classes de material pozolânico		Método de ensaio
	N	E	
Material retido na peneira 45µm	<20 %	<20%	ABNT NBR 15894-3 (*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥90	≥90	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥6	≥6	ABNT NBR 5751

(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

De acordo com Carvalho (2012) as pozolanas como a sílica ativa e metacaulim aumentam significativamente à resistência a compressão dos concretos em todas as idades. O ganho de resistência à tração, sobretudo às idades mais avançadas, também é observado, e pode ser justificado pelo consumo de CH, melhoria na zona de transição e diminuição da porosidade. Além disso, influências no calor de hidratação, na permeabilidade e na resistência ao ataque de sulfatos também podem ser verificadas com o seu uso.

São muitos os fatores que influenciam o ataque por sulfatos. Segundo Mehta & Monteiro (2014), se não se pode impedir a água com sulfato de atingir o concreto, a única defesa contra o ataque está no controle do fator. A qualidade do concreto, especificamente a baixa permeabilidade, é a melhor proteção. Outra opção é a utilização de cimentos contendo pozolanas que promovem potencialmente a redução ou eliminação do hidróxido de cálcio na hidratação e além disso, diminuem a porosidade na matriz possibilitando um melhor preenchimento dos poros e conseqüentemente evitando a penetração por sulfatos.

2.2.1 Reação Pozolânica

A capacidade de determinado material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar componentes com propriedades cimentícias é definida como atividade pozolânica (ABNT NBR 12653: 2014).

Tal atividade depende da área específica da pozolana, dos teores de sílica e da alumina reativas, da estrutura cristalina desordenada e, principalmente da sua capacidade de combinar com a cal para formar compostos com propriedades cimentícias (ISAIA, 2011).

De acordo com Massazza (1993), a reação pozolânica pode ser compreendida como todas as reações que ocorrem entre os constituintes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e água. A avaliação do progresso da reação pozolânica é comumente avaliado pela diminuição da concentração de Ca(OH)_2 livre no sistema.

Isaia (2011) expõe que essa reação se dá na superfície das partículas, sendo a sílica a que dissolve em maior proporção. O produto hidratado predominantemente é o C-S-H.

Mehta & Monteiro (2014), destaca três aspectos importantes da reação pozolânica nos cimentos. Primeiro, a reação é lenta, e, por conseguinte a taxa de liberação de calor e o ganho de resistência também serão. Segundo o autor, há consumo de hidróxido de cálcio o que favorece o aumento de durabilidade do concreto frente a meios ácidos. Nesse sentido, o uso de adições pozolânicas além de reduzir o teor efetivo de álcalis, resulta na formação de produtos menos expansivos com alta relação sílica/álcalis.

Terceiro, há melhorias na resistência com idades avançadas e uma diminuição da permeabilidade do sistema justificada pelo preenchimento dos espaços capilares grandes pelos produtos da reação.

De acordo com Carvalho (2012) as contribuições da pozolana nas propriedades do cimento, quando adicionadas em teores de até 50%, são: baixa resistência inicial, ganho de resistência às idades avançadas, baixo calor de hidratação e durabilidade alta.

2.2.2 Resistência Mecânica

As pozolanas contribuem para o ganho de resistência mecânica e redução de água para trabalhabilidade, devido ao efeito físico das partículas na distribuição granulométrica do sistema. Tal fenômeno é mais acentuado para pozolanas mais finas, como a sílica ativa e o metacaulim (NITA, 2006).

A medida da atividade pozolânica através da evolução da resistência mecânica de misturas de pozolana com cal ou cimento Portland, em proporções volumétricas definidas de água, areia normal, pozolana, cal ou cimento Portland, pode ser obtida através dos ensaios preconizados pela NBR 5751 (ABNT, 1992) e NBR 5752 (ABNT, 2014).

De acordo com Isaia (2011) a melhora nas resistências mecânicas de argamassas e concretos contendo pozolanas como adição mineral, ocorre em virtude do refinamento dos

poros e dos cristais presentes na pasta de cimento, na medida em que aumenta a resistência na matriz na zona de transição. Complementa ainda, que as adições contribuem para a redução da porosidade da matriz e da zona de transição. Esse fato leva a melhora geral das resistências mecânicas, mas, aparentemente, a magnitude do aumento da resistência à tração se mantém relativamente pequena até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada.

Em outras palavras, o mesmo autor explana:

A resistência à tração do concreto com uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local. Assim, o aumento significativo na resistência à tração se dará somente quando ocorrerem as reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição (ISAIA, 2011, p.294).

Vieira et al (2014), analisou argamassas com diferentes teores de incorporação de resíduo de lã de vidro. O autor verificou uma melhora no desempenho mecânico de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral das argamassas, além de uma diminuição na absorção de água por capilaridade. Os resultados foram atribuídos à diminuição dos raios capilares provocados pelo resíduo, fator que contribuiu para redução da movimentação da água na argamassa endurecida.

Borges (2007) avaliando o mesmo resíduo até a idade de 28 dias afirma não ser uma idade de cura conclusiva para a variação da resistência mecânica, seja para o traço referência, seja para o traço com a incorporação do resíduo. Atesta ainda, com base em seus resultados que a substituição de cimento por lã de vidro em 2,5% se mostrou bastante vantajosa uma vez que a resistência alcançada por este traço chegou a 97% do valor de referência. Valores maiores promoveram resistências bem inferiores o que pode ser justificado pela diminuição da quantidade do aglomerante.

Neste sentido, verifica-se que um excesso de pozolana (por exemplo, mais de 30% por peso em misturas de cimento) pode causar redução substancial na resistência mecânica do produto que pode não ser tolerada, especialmente em concretos com pouca idade ou sob condições de temperatura fria (NETTO, 2006).

De forma geral, Mehta & Monteiro (2014) afirma que a perda de resistência em curtas idades e o seu aumento em idades mais avançadas é provocada pela substituição do cimento e justificada pela reação pozolânica que ocorre de forma lenta. A pozolana começa a reagir tardiamente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 portanto, pelo menos inicialmente, se comporta como um agente diluidor inerte no cimento Portland. Já o ganho de resistência final, muitas

vezes, está associado ao refinamento dos poros e do aumento dos silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) e outros produtos de hidratação.

O autor ressalta ainda que o aumento da resistência e na estanqueidade do concreto verificada pelo uso de pozolanas acontecem devido à redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface.

2.2.3 Índice de Atividade Pozolânica

O índice de atividade pozolânica é obtido através da relação entre a resistência da argamassa com adição de pozolana e uma argamassa de controle, no caso da avaliação com cimento Portland, e para avaliação com a cal, se dá por meio do resultado médio obtido do ensaio de compressão simples. Os métodos para avaliar a atividade pozolânica podem ser subdivididos em (DEFAVERI, 2016 *apud* FRÍAS et al, 2005):

- Métodos indiretos: baseado em ensaios mecânicos ou parâmetros tais como tamanho das partículas e composição química, que influenciam na atividade pozolânica. Como métodos indiretos podem ser citados os métodos de ensaios mecânicos normalizados e condutividade elétrica.
- Métodos diretos: baseados na avaliação da quantidade de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 que não reagiu. Dentro dos métodos diretos temos as análises térmicas (TG/DTA/DSC) e análise por difração de raios X (DRX).

2.3 Fibras: Definição e Propriedades Mecânicas

Fibras são elementos descontínuos e compridos, normalmente apresentadas em várias formas e tamanhos, com comprimento da ordem de 50 mm e diâmetro de 0,5 mm. As fibras destinadas ao reforço do concreto são atualmente chamadas de maneira genérica como microfibras e podem ser de aço ou poliméricas (FIGUEIREDO, 2011).

No entanto, tais adições não têm como objetivo substituir as armaduras de barras, mas sim complementá-las, simplesmente por melhorar algumas das propriedades do concreto, nomeadamente a resistência e o alongamento de ruptura à tração (SOUZA & RIPPER, 1998).

Dessa forma, ao adicionar fibras com resistência e módulo de elasticidade adequados e em teores apropriados, as tensões nas extremidades do concreto são minimizadas e o concreto deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Com a redução da velocidade de propagação das

fissuras o compósito passa a apresentar capacidade resistente após a fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras mais utilizadas em matrizes de concreto são: fibras de metal, como as de aço-carbono e aço inox; fibras de silicatos cristalinos, como o amianto; fibras de carbono; fibras de polímero, como o polipropileno; e o polietileno e fibras de vegetal natural, como sisal, cânhamo, juta, coco, bambu, banana e madeira; além da resina poliéster reforçada com fibra de vidro, dentre outras (BORGES, 2007).

As fibras de vidro são comumente encontradas em forma de lã de vidro, malhas, placas e fios. A capacidade de deformação e suporte de carga oferecida pela adição em compósitos submetidos a esforços de tração, flexo-tração e impacto resultam do efeito de grampeamento das fissuras, em virtude do atrito e aderência existentes entre fibra e matriz cimentícia (PAIVA, 2013).

Segundo Guimarães (1999), a resistência a compressão é o fator inicial quando se deseja direcionar estudos a respeito de compósitos reforçados com fibras. A resistência à tração, à flexão, ao impacto e a tenacidade são aspectos mecânicos otimizados posteriormente.

Resende (2003) observando a influência de fibras de aço na resistência à tração de concretos verificou, ao se utilizar a adição de 2% em volume das fibras, um incremento de 16,62% na resistência à tração da fissuração na matriz e um aumento de 179,29% na máxima resistência à tração pós-fissuração, considerando um concreto de resistência à compressão de 30MPa.

Askeland (2015) aponta alguns fatores que devem ser considerados ao projetar-se um compósito reforçado com fibras. São eles: comprimento, diâmetro, orientação, quantidade e propriedades das fibras, propriedades da matriz e a interação entre fibra e matriz. Ainda segundo o autor, é necessário considerar-se a razão entre o comprimento e o diâmetro denominada (razão de aspecto). Quanto maior a razão de aspecto mais elevada é a resistência do compósito. No que se refere a quantidade, o autor limita a fração volumétrica em 80% e relata que para valores maiores as fibras não podem mais ser envoltas pelas matrizes.

Resultados de estudos experimentais obtidos por Tolêdo Filho (1997), Fujiyama (1997) e Rodrigues (1999) demonstraram um decréscimo na resistência à compressão com fibras vegetais de sisal, acompanhado de ligeiro decréscimo do módulo de elasticidade (PICANÇO, 2005).

De acordo com o autor a diminuição da resistência foi promovida para frações volumétricas aumentadas, refletindo o fato de que, sob esforços de compressão, as fibras não

exercem a função de reforço e, além disso, podem contribuir para o aumento do teor de falhas no material.

2.3.1 O compósito e a Interação Fibra- Matriz

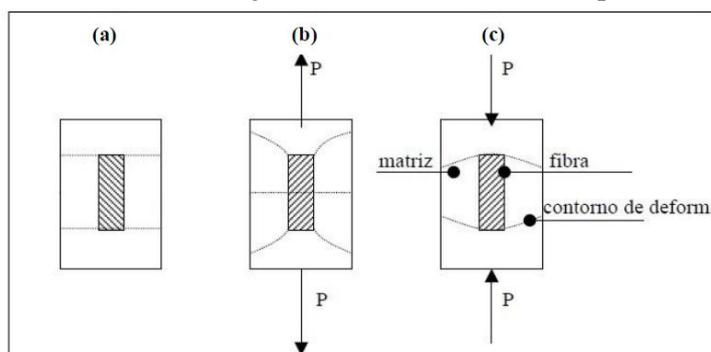
Askeland (2015) disserta a respeito da interação fibra-matriz. Segundo o autor, o material da matriz transmite as tensões às fibras que resistem à força aplicada. Por sua vez, a matriz protege as fibras contra degradação de suas propriedades mecânicas, minimizando a difusão de espécies, como oxigênio ou umidade.

Para Paiva (2013) alguns fatores influenciam diretamente a interação fibra-matriz. São eles: as condições da matriz (fissurada e não fissurada), a composição da matriz, a geometria da fibra, o tipo de fibra, as características de superfície da fibra, a rigidez da fibra comparada à matriz, a orientação da fibra (alinhada ou distribuídas aleatoriamente), a quantidade de fibras adicionadas e a durabilidade das fibras no compósito.

De acordo com Guimarães (1999), tensões de cisalhamento ocorrem ao longo da superfície da fibra e são decorrentes da diferença de rigidez estabelecida entre fibra e a matriz. Caso a fibra seja mais rígida que a matriz, como a fibra de vidro, a deformação ao longo da fibra será menor (Figuras 2.2b e 2.2c).

Banthia e Yan (1996) realizaram ensaio de arrancamento de fibras de aço em matriz cimentícia com adição de material pozolânico com teores de 10% de substituição. Obteram após 7 e 28 dias um aumento na resistência de aderência entre a fibra e a matriz. Soroushian e Marikunte (1992) também verificaram em seus trabalhos um aumento na resistência à flexão em compósitos de cimento reforçado com fibras de celulose em teores de 30% de sílica ativa (NITA, 2006).

Figura 2.2: Interação Fibras-Matriz com Matriz não Fissurada: (a) Descarregada, (b) Submetida à Tração e (c) Submetida à Compressão



Fonte: Paiva (2013)

3 METODOLOGIA

O plano experimental apresentado neste trabalho é composto pelas seguintes etapas: beneficiamento dos resíduos de lã de vidro e investigação acerca do potencial para atividade pozolânica e fibra desses materiais.

3.1 Aquisição e Caracterização dos Materiais

Os resíduos de lã de vidro utilizados no trabalho foram fornecidos por uma mineradora localizada na Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. Os resíduos atualmente são estocados em células e monitorados.

A Figura 3.1, a seguir, apresenta o resíduo de lã de vidro (RLV) sem beneficiamento.

Figura 3.1: Amostra de Lã de Vidro



3.2 Beneficiamento

A etapa de beneficiamento foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

Inicialmente, todos os resíduos passaram por inspeção visual para retirada das partes metálicas, ou seja, arames ou resíduos misturados ao material, proveniente de seu uso nas indústrias. Logo em seguida foram colocados em estufa à temperatura de 110° C por 24 horas até a constância de massa. Após esse período, os resíduos de lã de vidro passaram pelo processo de cominuição que se procedeu por meio de moinho de bolas horizontal Marconi (R), utilizando 35 esferas de aço inoxidável de diferentes diâmetros, durante 30 minutos, 500g por tempo de moagem. Por fim, os resíduos de lã de vidro foram peneirados. O material utilizado no trabalho

foi o passante na peneira de número 200 mesh (75 μ m), conforme apresentado na figura 3.2, a seguir.

Figura 3.2: Resíduo Pós Beneficiamento



3.3 Investigação do Compósito Cimentício com a Incorporação do Resíduo de Lã de Vidro

3.3.1 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

Para avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de vidro adotou-se o método indireto normativo proposto pela ABNT NBR 5752:2014.

O Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland foi baseado na adaptação da NBR 5752:2014. Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP II-F-32 conforme NBR 11578:1991, areia normal conforme condições exigíveis pela NBR 7214:1982, água potável e resíduos de lã de vidro. Foram confeccionadas argamassas com duas dosagens diferentes (Tabela 3.1):

- Argamassa de controle: cimento Portland, areia normal e água.
- Argamassas com resíduo (ARLV): 25% em massa de material pozolânico, em substituição à igual porcentagem de cimento Portland, areia normal e água.

A execução do ensaio difere da norma utilizada em dois aspectos. Primeiro, na relação água/cimento adotada para todas as argamassas, e segundo, as argamassas foram moldadas em corpos de prova prismáticos de (4x4x16) cm seguindo o procedimento de moldagem da ABNT NBR 13279: 2005. Para tal, foi necessário uma quantidade maior de material, em massa, para moldagem de seis corpos de prova, sem alteração do traço.

Tabela 3.1: Dosagem das Argamassas (NBR 5752:2014)

Argamassa	RLV	Cimento	Areia normal*	Água	SP**
Controle	0	936	2808	514,95	0
ARLV	234,15	702	2808	514,95	1,4

*Quatro frações de 702 g da série normal

**Superplastificante

A NBR 5752:2014 estabelece a correção do índice de consistência mantendo-se a quantidade de água e adicionando aditivo superplastificante, sendo necessária uma quantidade suficiente para manter o índice de consistência da ARLV em ± 10 mm do obtido com a argamassa de controle. Neste trabalho, foi utilizado o superplastificante comercial MC-Powerflow 1180 (Bauchemie), conforme NBR EB-1763:1992, na dosagem mínima de 0.2% em relação à massa de cimento, como especificada pelo fabricante.

A mistura dos materiais procedeu-se de acordo com a NBR 7215:1996, em argamassadeira automática de bancada (Forteste -VC 370). Os ensaios foram realizados em dois dias consecutivos em conformidade com as condições ambientais do laboratório prevista na mesma norma. Após a mistura, foi realizado o ensaio para determinação do índice de consistência conforme a ABNT NBR 7215: 1996.

Determinado o índice de consistência, foram moldados 6 corpos de prova prismáticos de cada referência para as idades de 28, 56 e 90 dias.

Após a moldagem, os corpos de prova foram levados para câmara úmida a temperatura aproximada de 40° C onde permaneceram por 24 horas. Terminado o período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e submetidas a cura em banho saturado de água e cal (Figura 3.3), onde permaneceram até o momento do ensaio. Para esse trabalho, utilizou-se a cal hidratada especial aditivada (CH I).

Figura 3.3: Cura em Banho Saturado de Água e Cal



O índice de atividade pozolânica foi determinado por meio da relação entre os valores obtidos para a resistência à compressão simples, conforme Equação 3.1, das argamassas produzidas com substituição parcial do cimento e a argamassa de controle, utilizando somente cimento Portland como aglomerante, conforme NBR 5752:2014.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{F_{cB}}{F_{cA}} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

F_{cB} = Resistência média em cada uma das idades dos corpos de prova moldados com substituição parcial do cimento Portland.

F_{cA} = Resistência média em cada uma das idades dos corpos de prova moldados apenas com cimento Portland.

I_{cimento} = Índice de desempenho com cimento Portland.

3.3.2 Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

Os ensaios de tração na flexão e à compressão realizados nos corpos de prova prismáticos seguiram as recomendações da ABNT NBR 13279: 2005.

3.3.2.1 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão das argamassas de controle e argamassas com RLV foi determinada para diferentes tempos de cura (28, 56 e 90 dias). Foram ensaiados seis corpos de prova, para cada dosagem (Tabela 3.1) e idade de cura. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC modelo DL 20000, célula de carga de 20 kN e velocidade de carregamento de 50 N/s (NBR 13279:2005).

A resistência à tração na flexão foi obtida através da Equação (3.2).

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (3.2)$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons;

L é a distância entre suportes, em milímetros.

3.3.2.2 Resistência à Compressão Axial

A resistência à compressão axial foi obtida nos corpos de prova anteriormente submetidos ao ensaio de tração à flexão. Portanto, obteve-se os valores de resistência de doze corpos de prova para cada dosagem (Tabela 3.1) e tempo de cura, analisado nesse trabalho.

Para isso, utilizou-se a prensa EMIC modelo DL 20000 (Figura 3.4), célula de carga de 200 kN e velocidade de carregamento de 500 N/s (NBR 13279:2005).

Figura 3.4: Equipamento Utilizado nos Ensaio de Resistência Mecânica

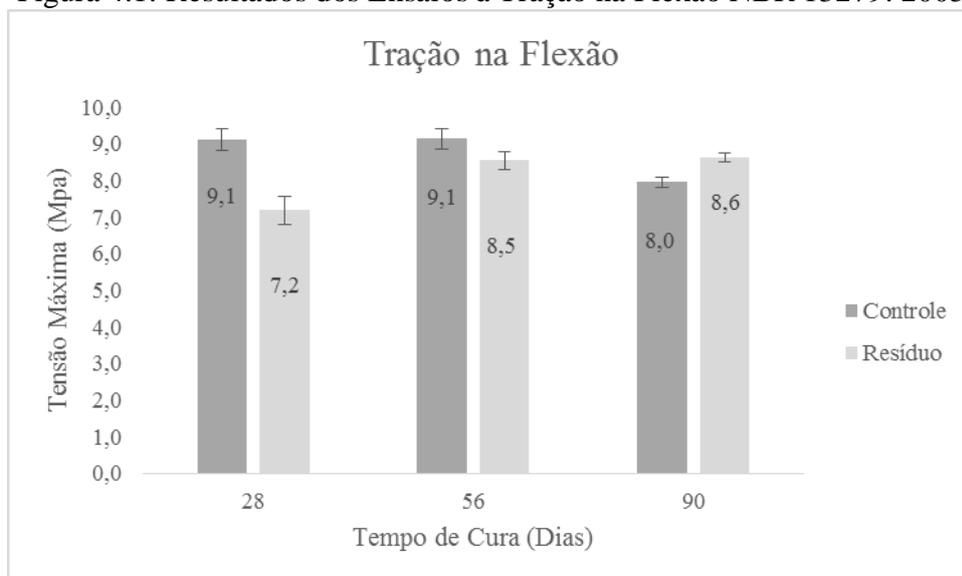


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados obtidos seguem apresentados na Figura 4.1 a seguir. Verifica-se uma perda de resistência de 20,9% para argamassa com RLV com tempo de cura de 28 dias, comparada à argamassa de controle de mesma idade. Essa perda também é observada aos 56 dias, porém relativamente menor, correspondendo a 6,6%. Após esse período, houve uma estabilização da resistência da argamassa com o resíduo. O baixo valor da argamassa de controle para a idade de cura de 90 dias pode estar relacionada à problemas de moldagem. De forma geral, a contribuição do resíduo já se torna significativa apenas pelo fato da substituição do clínquer por um material que seria descartado ao final de sua vida útil, e contribuiu para o desempenho mecânico das argamassas.

Figura 4.1: Resultados dos Ensaio à Tração na Flexão NBR 13279: 2005



Atribui-se o desempenho das argamassas com RLV às idades avançadas ao comportamento pozolânico do resíduo. Acredita-se que como resultado da reação pozolânica os vazios capilares foram eliminados ou reduzidos em tamanho, e os cristais de hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H e outros produtos de hidratação, melhorando a aderência entre fibra-matriz e conseqüentemente gerando uma matriz mais densa (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

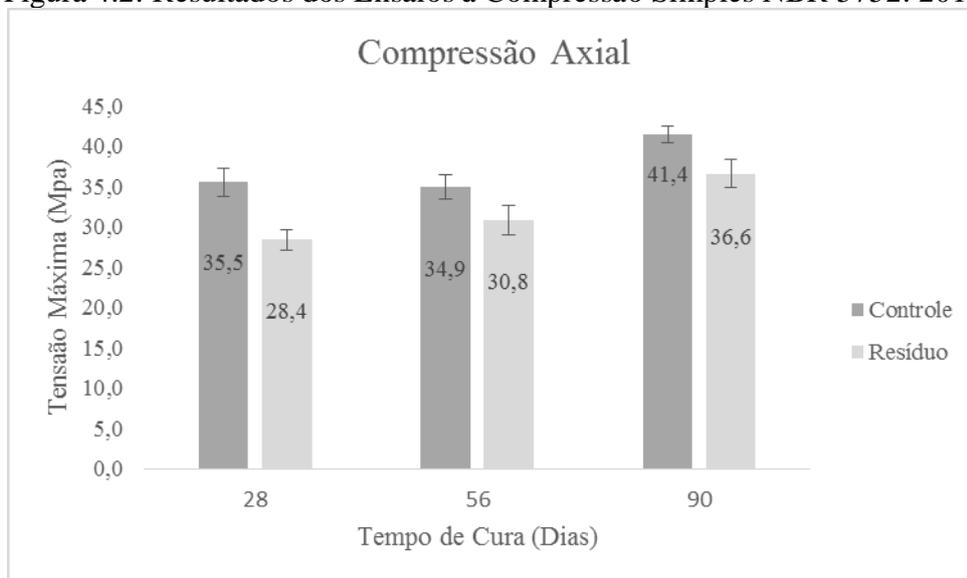
Esse comportamento já era previsto na literatura. Materiais pozolânicos quando usados como uma substituição parcial para o cimento Portland costumam ter um efeito retardador sobre a resistência das primeiras idades. Entretanto, a capacidade da pozolana reagir com o hidróxido de cálcio e de formar silicato de cálcio hidratado adicional pode levar a uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface. Como consequência, têm-se melhorias consideráveis na resistência final e na estanqueidade do compósito, aumentando efetivamente à resistência a tração (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

4.2 Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão seguem conforme apresentado na Figura 4.2 a seguir.

As argamassas com substituição parcial do cimento Portland por RLV apresentaram uma diminuição da resistência à compressão, se comparadas às respectivas argamassas de referência, da ordem de 20% para idade de cura de 28 dias e aproximadamente 11,5% para as idades de 56 e 90 dias. Em contrapartida, para as mesmas condições de cura e dosagem, observa-se um acréscimo da resistência entre as argamassas com o resíduo.

Figura 4.2: Resultados dos Ensaios à Compressão Simples NBR 5752: 2014



Essa perda de resistência nas argamassas com o RLV comparadas com as argamassas de referência, com mesma idade de cura, se deve possivelmente a redução do cimento, e o seu aumento em idades mais avançadas pode ser justificada pela reação pozolânica que ocorre de

forma lenta. Concomitantemente, verifica-se uma diferença de porosidade e densidade provocada pela reação pozolânica, visto que a substituição do cimento por materiais pozolânicos causa uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface, promovendo a estanqueidade do compósito e conseqüentemente gerando uma matriz mais durável.

Segundo Mehta & Monteiro (2014) o ganho de resistência final é consequência do refinamento dos poros e do aumento dos silicatos cálcio hidratado (C-S-H) e outros produtos de hidratação em decorrência da atividade pozolânica do resíduo.

O preenchimento dos poros pelas partículas mais finas, e conseqüentemente o aumento na resistência à compressão, é característico do efeito físico causado pelo comportamento filler dos resíduos (CARVALHO, 2012). Essa afirmação é coerente aos resultados apresentados por Vieira (2014), que utilizando o mesmo resíduo em substituição parcial do cimento, atribuiu o aumento da resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral ao efeito filler apresentado pelo RLV que contribuiu para o empacotamento granulométrico e melhorou o desempenho mecânico da argamassa.

4.3 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

O índice de consistência das argamassas foi determinado em conformidade com a NBR 7215:1996 (Figura 4.3) e os resultados obtidos seguem apresentados na Tabela 4.1 a seguir.

Figura 4.1: Determinação do Índice de Consistência da Argamassa de Controle



Tabela 4.1: Índice de Consistência das Argamassas Utilizadas para Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica NBR 5752:2014

Argamassa (Idade)		1ª Medição (mm)	2ª Medição (mm)	Média (mm)	Diferença (mm)
28 dias	Controle	186,40	187,30	186,85	–
	ARES*	190,75	192,40	191,58	4,7
56 dias	Controle	201,10	204,60	202,85	–
	ARES	199,40	203,40	201,40	1,45
90 dias	Controle	190,60	191,80	191,20	–
	ARES	191,70	188,80	190,25	0,9

ARES*: Argamassa com resíduo

O Índice de Atividade Pozolânica (IAP) para as argamassas produzidas no trabalho, segundo a NBR 5752:2014 são apresentados na Tabela 4.2. Observa-se que os resultados obtidos para as argamassas com substituição por RLV apresentaram um IAP inferior a 90%, não atendendo a exigência física mínima imposta pela NBR 12653:2014. Entretanto, a literatura nos apresenta pozolanas com grande reatividade, como a sílica ativa e o metacaulim, que possuem IAP de 83% e 89% respectivamente, bem próximos aos valores encontrados neste estudo (GOBBI, 2014).

Tabela 4.2: Resultados dos Ensaios à Compressão Simples NBR 5752:2014

Argamassa (Idade)		Compressão Simples (Mpa)	IAP (%)
28 dias	Controle	35,5	80
	ARES*	28,4	
56 dias	Controle	35,0	88
	ARES	30,8	
90 dias	Controle	41,4	88
	ARES	36,6	

*ARES: Argamassa com resíduo de lã de vidro.

A critério de comparação, os valores de IAP apresentados foram inferiores aos atingidos nos estudos realizados com o RLV por Defaveri (2016), que para idade de 28 dias e, granulometria de 45 µm, apresentou um IAP com cimento Portland de 98,7%. A diminuição na resistência pode ser justificada pela diferença de granulometria do RLV que foi utilizada, uma vez que materiais mais finos promovem um aumento na resistência à compressão devido a melhora no empacotamento das partículas.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no ensaio à tração demonstraram uma diminuição da resistência nas argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de lã de vidro, aos 28 e 56 dias. Após esse período, uma estabilização é observada. Atribui-se tal comportamento a reação pozolânica caracterizada por uma diminuição da resistência à idades iniciais e um ganho à idades avançadas. Como resultado da reação, tem-se uma melhora na densidade e aderência entre fibra-matriz, causada pela diminuição ou eliminação dos vazios capilares e pela substituição dos cristais de hidróxido de cálcio por silicatos de cálcio hidratados e outros produtos de hidratação.

Já os valores obtidos no ensaio à compressão apresentaram uma perda de resistência para as argamassas com resíduo se comparadas as argamassas de referência, o que pode estar relacionado a diminuição do cimento. Em contrapartida, para as mesmas condições de cura e dosagem, observa-se um acréscimo da resistência entre as argamassas com o resíduo que possivelmente ocorre pela diminuição da porosidade da matriz e da zona de transição na interface e também pela melhora no empacotamento das partículas, caracterizado pelo efeito fíler apresentado pelo resíduo.

Através do ensaio de compressão obteve-se, também, valores de IAP da ordem de 80% e 88%, inferiores à 90%.

Com base nos objetivos propostos nesse trabalho e resultados exibidos, pode-se afirmar que o resíduo de lã de vidro não atendeu os requisitos físicos impostos pela NBR 12653: 2014, portanto, segundo a norma, não pode-se atribuir pozolanicidade ao resíduo. Contudo, o desempenho mecânico verificado as idades avançadas, tanto para os ensaios de compressão como de tração, é indicativo de que o resíduo além de atuar como material pozolânico na matriz exerceu a função de fibra de reforço.

REFERÊNCIAS

- Antunes, M.; Pieroni, B. Aproveitamento de resíduo de lâ de vidro em placas de gesso. 4th International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2013.
- Askeland, Donald R.; J. Wright, Wendelin. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: CENGAGE, 2015.
- Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP – Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. Boletim Técnico. 7 Ed. São Paulo, 2002.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – NBR 10004:2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – NBR 13279: 2005.
- ____ NBR 11578 – Cimento Portland Composto – Especificação. Rio de Janeiro. 1991.
- ____ NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro. 1991.
- ____ NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro. 1991.
- ____ NBR 5751 – Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica – Índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro. 1992.
- ____ NBR 5752 - Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro. 2014.
- ____ NBR 7214 – Areia Normal para Ensaio de Cimento – Especificação. Rio de Janeiro. 1982.
- ____ NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1996.
- ____ NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro. 2014.
- ____ NBR EB-1763 – Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro. 1992.
- Borges, P. Utilização de resíduo de lâ de vidro em fabricação de concreto. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. REDEMAT/UFOP. 2007.
- Brasileiro, L. L. and Matos, J. M. E. Reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. Cerâmica, Jun 2015, vol.61, no.358, p.178-189. ISSN 0366-6913
- Carvalho, E. O concreto sem mistérios. Ouro Preto: UFOP, 2012.
- Cota, F. Efeito da incorporação de resíduos vítreos nas propriedades físico – mecânicas de compósitos cimentícios. São João Del Rei. Dissertação de Mestrado. PROPEC/UFOP. 2016. Universidade Federal de São João del-Rei. 2013.

Defaveri, K. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. PROPEC/UFOP. 2016.

Evangelista, N. Estudo da utilização de resíduos industriais de lã cerâmica e lã de vidro em argamassas e concretos. Tese de Doutorado. REDEMAT/UFOP. 2011.

Figueiredo, A. Concreto reforçado com fibras. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2011.

Fontes, W.; Dutra, M.; Okada, E.; Silva, G.; Peixoto, R. Argamassas com resíduos de lã de vidro e lã de rocha pós-processados. 56º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON. 2014.

Gobbi, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Curitiba. Dissertação de Mestrado. PPGCEC/ Universidade Federal do Paraná Setor de Tecnologia. 2014.

Guimarães, A. E. P.- Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada. Tese de Doutorado. Escola de São Carlos. USP. São Paulo. 1999.

Isaia, G. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v

ISOVER. Site. Disponível em: <www.isover.com.br/isover/sigi_residuos.htm>. Acesso em: 08 abr. 2017.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

Lima, P. R. L.; Toledo Filho, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Estadual de Feira de Santana. 2008.

Massazza, F. Pozzolanic Cements. Cement & Concrete. V. 15, p.185-214.1993.

Mehta, P. ; Monteiro, P. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª Edição. IBRACON. 2014.

Netto, R. Materiais Pozolânicos. Monografia de Curso de Especialização em Construção Civil. UFMG. Belo Horizonte. 2006.

Nita, C. A utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006. Disponível em <http://www.agriambi.com.br/revista/v10n2/490.pdf> . Acessado em novembro/2017.

ORTEGA, S. Sustentabilidade na construção civil: significados, práticas e ideologia. Organizações e Sustentabilidade, Londrina, v. 2, n. 1, p. 112-137, jan./jun. 2018.

Paiva, L. Efeito da adição de microfibras de lã de vidro na tenacidade à ruptura de pastas de cimento para poços de petróleo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2013.

Picanço, M. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. 2005.

Resende, F. Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. 2003.

Santos, N.A.; Vieira, P.L.C; Louzada, D.M.; Araújo, G.S.; Della, V. P. Incorporação do resíduo de lã de vidro em argamassas para produção de placas cimentícias. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. CBECIMAT. 2014.

Siqueira, L. Laboratório de materiais de construção. 1º Parte: Cimento. Departamento de Engenharia Civil/UDESC. 2008.

Souza, Vicente Custódio. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. V. 1, p. 83-94. 1998.

Taylor, H. Cement Chemistry. ACADEMIC PRESS. LONDON. 1990.

Vieira, P.L.C.; Santos, N.A.; Louzada, D.M.; Araújo, G.S.; Della, V. P. Reaproveitamento do resíduo de lã de vidro na produção de argamassa. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. CBECIMAT. 2014.