

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas

Fernando Augusto Sales

**ESTUDO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA
DE MICROPARTÍCULAS DE VIDRO SODA-CAL,
INCOLOR E ÂMBAR, E SUA INFLUÊNCIA
NO DESEMPENHO DE COMPOSTOS DE
CIMENTO PORTLAND**

Belo Horizonte-MG

2014

S163e Sales, Fernando Augusto.
Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland [manuscrito] / Fernando Augusto Sales. - 2014. xix, 139 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.123-139.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Argamassa -Teses. 4. Cimento Portland - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

“ESTUDO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE MICROPARTÍCULAS DE VIDRO SODA-CAL, INCOLOR E ÂMBAR, E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND”

Fernando Augusto Sales

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Doutor em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino de Aguiar
DEMC – UFMG - (Orientadora)

Prof. Dr. José Márcio Calixto
DEES - UFMG

Prof^a. Dr^a. Nelcy Della Santana Mohallen
ICEX – UFMG

Prof. Dr. Conrado Rodrigues
CEFET - MG

Prof. Dr. Enio José Pazini Figueredo
UFG

Belo Horizonte, 15 de abril de 2014

AGRADECIMENTOS

Esta tese de doutorado não estaria concluída sem os agradecimentos a todos que contribuíram para a sua realização.

Em especial, à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilar, pela dedicação, competência e disponibilidade em todas as etapas deste trabalho.

Também muito especial foi minha esposa, Rosemary Bom Conselho Sales, que contribuiu em todas as fases desta pesquisa com sua experiência, organização, disciplina, dedicação e sabedoria, participando exaustivamente deste trabalho. Aos meus filhos, Cristiane e Daniel, por também colaborarem quando precisei de seus conhecimentos, além da contribuição e incentivo.

À Prof.^a Dr.^a Joana Sousa Coutinho, orientadora em Portugal, pelas contribuições e ensinamentos com competência e dedicação nos ensaios e durante minha permanência em Portugal. À sua equipe, em especial, às engenheiras Ana Mafalda Matos T. Barbosa e Telma de Jesus Ramos e aos profissionais dos laboratórios LEMC e LABEST, que tanto contribuíram.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que me acolheu e disponibilizou sua estrutura para que parte desta pesquisa fosse realizada no Projeto PTDC/ECM/098117/2008 da Fundação Ciência e Tecnologia (FCT).

Ao Programa de Pós-graduação (PPGD) da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), por disponibilizar o equipamento para os ensaios de termografia.

Aos professores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG): Dr. Roberto Galery (Minas e Metalurgia), Dr. Luiz Claudio Pinto (Minas e Metalurgia), Dr. Abdias Magalhães Gomes (Construção Civil) e Dr.^a Nelcy Della Santina Mohalen (Depto de Química) e aos laboratoristas Ricardo, Clever e Alberto, por disponibilizarem sua estrutura para a realização de ensaios necessários a esta pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, que participaram, tanto das disciplinas ministradas, como transmitindo experiência durante a elaboração desta pesquisa.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), pela oportunidade de participar do programa Doutorado Sanduíche em Portugal, e também aos professores Dr. Sidney Nicodemos, Dr^a Elaine Carballo, Dr^a Patricia Santiago de Oliveira Patricio, Dr. Conrado de Sousa Rodrigues, Dr. Paulo Borges e Dr. Flavio dos Santos, na realização de ensaios de caracterização, ensaios mecânicos e durabilidade, assim como ao laboratorista Eng. Mateus Justino da Silva e Bruno.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, que também, de uma forma ou outra, contribuíram para a pesquisa.

Ao meu amigo Esdras Poty França, que disponibilizou seus conhecimentos e contribuiu nos ensaios da pesquisa quando solicitado.

À Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ), na pessoa do Prof. Dr. Tulio Hallak Panzera, que disponibilizou o laboratório de materiais para ensaios desta pesquisa, além de participar da banca de qualificação. Também ao aluno Plinio Santos, pela sua ajuda.

À Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), em especial ao Programa de Pós-graduação em Design (PPGD), pela valiosa contribuição nos ensaios de termografia.

À Supermix, pela realização de ensaios laboratoriais e materiais disponibilizados, nas pessoas do Engenheiro Fábio Leonel e também dos Srs. Álvaro Pacheco e Amon.

Ao Engenheiro Fabrício Carlos França, da Fábrica de Cimentos Holcim, pela contribuição nos ensaios laboratoriais realizados e materiais disponibilizados.

A Cimento Brennand, representada pelo Eng. Tiago Andrade Couto, na realização de vários ensaios e materiais disponibilizados, assim como a experiência transmitida durante o trabalho.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – Federação das Indústrias de Minas Gerais (SENAI-FIEMG), na pessoa dos engenheiros Erica Gonçalves Gravina e Angelo Carlos Maffei, na caracterização de materiais.

Às Sr^{as}. Inês e Patrícia, do Departamento de Estruturas da UFMG, pela colaboração, paciência e dedicação com que sempre nos atenderam quando precisamos.

Aos colegas de estudo: Sandra Moreira Fernandes, Érica Antunes, Ramon Tadeu, Laura Fortes, Victor, Marcela Nascimento, Wanderson Leite, Carolina Zauli, da Pós-graduação, que também contribuíram com esta pesquisa.

À Prof^a. Magda Barbosa Roquette Taranto, pela valiosa e gentil revisão da tese.

À Distribuidora de Vidros Pestana, Sr. Tarcisio e Engenheira Tânia, pela disponibilização dos resíduos de vidro utilizados nesta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo programa de incentivo financeiro Doutorado Sanduíche.

A todos os amigos e familiares que diretamente ou indiretamente participaram deste trabalho, o meu muito obrigado.

*“A verdadeira viagem de descobrimento
não consiste em procurar novas paisagens,
mas em ter novos olhos”.*

Marcel Proust.

RESUMO

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, mas seu uso está associado a elevado custo ambiental. A extração de bilhões de toneladas de recursos naturais para sua fabricação impacta fortemente o meio ambiente. Além disso, a produção de cimento Portland requer alto consumo de energia, além de produzir grande quantidade de dióxido de carbono, que é liberado na atmosfera. O uso de resíduos, industriais, agrícolas ou da própria construção civil, como materiais alternativos em substituição, parcial ou total aos agregados ou aglomerantes do concreto, tem sido uma opção interessante para obtenção de concretos ecoeficientes. Normalmente os resíduos mais utilizados são escória de alto-forno, sílica ativa, cinzas volantes e resíduos de construção e demolição. Uma alternativa seria o resíduo de vidro. Diferentes estudos têm investigado o uso desses resíduos em compostos de cimento Portland, seja como agregado ou material cimentício suplementar. Nesses estudos, parece não haver consenso sobre a influência da cor e do tamanho das partículas de vidro no comportamento dos compostos produzidos, podendo ser a reação da sílica com os álcalis benéfica, se ocorre durante o endurecimento, ou deletéria, se ocorre no concreto endurecido. Além disso, existem informações recentes na literatura sobre a necessidade de se compreender melhor a cinética da reação pozolânica quanto à amorficidade e tamanho das partículas. Nesse contexto, este trabalho estuda a atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. Foi investigado o efeito da substituição parcial do cimento Portland por 10, 15 e 20% de partículas de vidro, de dimensões em torno de 9,5 μm , na atividade pozolânica, no comportamento mecânico e na durabilidade de compostos cimentícios (argamassa e concreto). Os resultados mostram que a substituição de parte do cimento por micropartículas de vidro soda-cal pode contribuir para a produção de argamassas e concretos de trabalhabilidade e desempenho mecânico similar e para a produção de concretos duráveis no que se refere à inibição da reação álcali-agregado. No entanto, o uso das partículas de vidro tornou o composto mais suscetível a carbonatação e diminuiu sua resistência ao desgaste por abrasão. Identificou-se a influência da cor do vidro, traduzida em termos de sua composição química, no calor de hidratação, no tempo de pega, na resistividade elétrica e na capacidade de absorção de calor.

Palavras-chave: Concreto; Argamassa; Cimento Portland; Vidro soda cal; Pozolanicidade Durabilidade; Reação álcali-sílica.

ABSTRACT

Portland cement concrete is the most widely used building construction material worldwide, but its use is associated with high environmental costs. The extraction of billions of tons of natural resources for its manufacture impacts strongly the environment. Furthermore, the production of Portland cement demands high energy consumption and releases large amounts of carbon dioxide into the atmosphere. The use of industrial, agricultural or construction waste as alternative materials to partially or totally replace concrete aggregates or binders for concrete has been being an interesting option to obtain eco-efficient concretes. The most used wastes are usually blast furnace slag, active silica, fly ash and construction and demolition wastes. Another alternative is the use of glass waste. Several studies have investigated the use of these wastes in Portland cement compounds, either as aggregates or as supplementary cementitious materials. From these studies, it seems that there is no consensus about the influence of color and size of glass particles on the behavior of the produced compounds. Therefore, the reaction of silica with alkali can be benefic if it occurs during hardening, or it can be deleterious if it occurs in the hardened concrete. In addition, the literature has recently reported the need to better understand the kinetics of pozzolanic reaction in regard to amorphicity and particle size. Accordingly, this paper addresses the pozzolanic activity of microparticles of soda-lime glass (colorless and amber), and its influence on the performance of Portland cement compounds. The effect of partial replacement of Portland cement by 10, 15 and 20% of glass particles of about 9.5 μ m was investigated on the pozzolanic activity, the mechanical strength and the durability of cementitious compounds (mortar and concrete). Results revealed that the partial replacing of cement with of soda-lime glass microspheres can contribute to the production of mortars and concretes of similar workability and mechanical performance, as well as to the production of a concrete that is durable in terms of inhibition of alkali-aggregate reaction. Nevertheless, the use of glass particles made the compound more susceptible to carbonation and abrasion. We have identified the influence of glass color, which was translated in terms of carbon content, hydration heat, curing time, electrical resistivity and heat absorption capacity.

Keywords: Concrete; Mortar, Portland cement; Soda-lime glass; Pozzolanicity; Durability; Alkali-silica reaction.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

#	Malha de peneiras
%	Porcentagem
<	Menor
>	Maior
°C	Grau Celsius
a/c	Relação água/cimento
ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumino
ASR	Reação álcali-sílica
ASTM	<i>American Society For Testing And Materials</i>
B ₂ O ₃	Óxido de boro
Ba(OH) ₂	Hidróxido de bário
BET	Brunauer, Emmett e Teller
BJH	Barrett, Joyner e Halenda
C	Carbono
C ₃ S	Silicato tricálcico
Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R – Cimento Portland da classe I 42.5 R
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais
CES	<i>Cambridge Engineering Selector</i>
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
CO	Monóxido de carbono

CO ₂	Dióxido de carbono
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Corpo-de-prova
CPV – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
Cr ₂ O ₃	Óxido cromo
CSH	Silicato de cálcio hidratado
CsI	Iodeto de cézio
CTL	Controle – Amostra de referencia
DC	Corrente continua
DRX	Difratometria de raios-X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DTA	Termodiferencial
EDS	Energia dispersiva
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCT	Fundação Ciência e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FEVE	<i>European Container Glass Federation</i>
FIEMG	Federação das Indústrias de Minas Gerais
FTIR	Espectroscopia vibracional de absorção na região do infravermelho
g	Grama
GeO ₂	Dióxido de germânio
h	Hora
Hz	Hertz
IAP	Índice de atividade pozolânica
IPQ	Instituto Português da Qualidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Potássio
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kΩ.cm	Kilo OHM x centímetro (resistividade)
LABEST	Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural
LASER	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LEMC	Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
mg	Miligrama
MG	Minas Gerais
Mg(OH) ₂	Hidróxido de Magnésio
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
mS/cm	Micro Siemens por centímetro
Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
OH ⁻	Íon hidróxido
pH	Potencial hidrogeniônico
PPGD	Programa de Pós-graduação em Design
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SiO ₂	Óxido de sílica
SiO ₄ ⁻⁴	Tetraédrico de silício
Si-OH	Silanol
Si-O-Si	Grupo siloxano
SO ₃	Trióxido de Enxofre
TGA	Análise termogravimétrica
UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFSJ	Universidade Federal de São João Del Rei
ZrF ₄	Fluoreto de zircônio
µm	Micrômetro

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais cerâmicos com base na sua aplicação.	22
Figura 2 - Tetraedro de silício (SiO_4), unidade básica da sílica, representações (a) tridimensional; (b) e (c) bidimensionais.	23
Figura 3 - Tetraedro de sílica cristalina com ordem a longa distância.	24
Figura 4 - Representação bidimensional dos arranjos da sílica (a) cristalino, (b) não cristalino.	24
Figura 5 - Vidro de rede com óxidos modificadores Na_2O	25
Figura 6 - Vidro de rede com óxidos modificadores SiO_2	26
Figura 7 - Funções relativas dos átomos no vidro.	27
Figura 8 - Composição do vidro comum.	33
Figura 9 - Evolução dos índices de reciclagem de vidro no Brasil (% ano).	34
Figura 10 - Etapas do procedimento experimental.	46
Figura 11 - Resíduo de vidro.	47
Figura 12 - Moagem do resíduo de vidro.	48
Figura 13 - Micropartículas de vidro acondicionadas.	48
Figura 14 Equipamento usado para medir expansibilidade. Agulha de Le Chatelier.	55
Figura 15 - Equipamento para ensaio de calorimetria.	56
Figura 16 - Medição da trabalhabilidade por tronco de cone e funil.	57
Figura 17 - Equipamento para medir frequência ressonante: Erudite MKII (Laboratório de Materiais/UFGM).	59
Figura 19 - Equipamento do ensaio de permeabilidade ao oxigênio.	60
Figura 20 - Equipamentos do ensaio da reação álcali-agregado.	63
Figura 21 - Equipamento de resistividade elétrica – Portugal.	64
Figura 22 - Equipamento de resistividade elétrica – Portugal.	65
Figura 23 - Equipamento de resistividade elétrica – Brasil.	65
Figura 24 - Equipamento de resistência ao desgaste.	66
Figura 25 - Termografia amostras antes da exposição solar.	67
Figura 26 - Equipamento de termografia: câmera termográfica.	67
Figura 27 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS) do vidro incolor.	69
Figura 28 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS) do vidro vidros âmbar.	69

Figura 29 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BET para o vidro incolor.	72
Figura 30 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BET para o vidro âmbar.	72
Figura 31 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BJH para o vidro incolor.	73
Figura 32 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BJH para o vidro âmbar.	73
Figura 33 - Distribuição granulométrica das micropartículas de vidro incolor método de espalhamento do feixe de laser – Brasil.	74
Figura 34 - Distribuição granulométrica das micropartículas de vidro âmbar método de espalhamento do feixe de laser — Brasil	75
Figura 35 - Morfologia das partículas de vidro incolor/âmbar.	75
Figura 36 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários) para as amostras com e sem substituição de micropartículas de vidro.	91
Figura 37 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) para as amostras com e sem substituição de micropartículas de vidro.	92
Figura 38 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para as amostras de controle.	93
Figura 39 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de incolor 10%	94
Figura 40 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de âmbar 10%.	95
Figura 41 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de âmbar 20%.	96
Figura 42 - Termogramas das micropartículas âmbar e incolor aos zero e após 10, 30 e 60 minutos de insolação	115
Figura 43 - Termograma das argamassas antes da insolação.	116
Figura 44 - Termograma das argamassas após 30 e 90 minutos de insolação.	116
Figura 45 - Termograma das argamassas após 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos de insolação.	118

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Difratoograma de raios-X – vidro incolor.	76
Gráfico 2 - Difratoograma de raios-X – vidro âmbar.....	76
Gráfico 3 - Resultados da espectroscopia por infravermelho micropartículas de vidro.	77
Gráfico 4 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 10% micropartículas de vidro incolor.....	80
Gráfico 5 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 20% micropartículas de vidro incolor.....	80
Gráfico 6 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 10% micropartículas de vidro âmbar.	81
Gráfico 7- Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 20% micropartículas de vidro âmbar.....	81
Gráfico 8 - Resultado do ensaio do índice de atividade pozolânica realizado - Portugal.	82
Gráfico 9 - Resultado do ensaio do índice de atividade pozolânica realizado - Brasil.	83
Gráfico 10 - Resultados dos ensaios de calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência (DSC) das pastas com e sem 10% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor/âmbar.	87
Gráfico 11 - Resultados dos ensaios de calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência (DSC) das pastas com e sem 20% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor/âmbar.	88
Gráfico 12 - Resultados da resistência à compressão das argamassas – Portugal.	97
Gráfico 13 - Resultados da resistência à compressão das argamassas – Brasil.	98
Gráfico 14 - Resultados da resistência à compressão dos concretos – Portugal.....	99
Gráfico 15 - Resultados da resistência à flexão das argamassas – Portugal.	100
Gráfico 16 - Resultados da resistência à tração por flexão das argamassas aos 28 dias – Brasil.....	100
Gráfico 17 - Resultados do módulo de elasticidade estático dos concretos – Portugal.	101
Gráfico 18 - Resultados do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 e 90 dias de cura – Brasil.	102

Gráfico 19 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigênio.	104
Gráfico 20 - Resultados do ensaio de resistência à compressão x permeabilidade.	104
Gráfico 21 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada após 60 dias de ensaio.....	106
Gráfico 22 - Resultados do ensaio da reação álcali-sílica – Portugal.	107
Gráfico 23 - Resultados do ensaio da reação álcali-sílica – Brasil.	108
Gráfico 24 - Resultados do ensaio resistividade elétrica das argamassas – Portugal.	110
Gráfico 25 - Resultados do ensaio resistividade elétrica dos concretos – Portugal.....	112
Gráfico 26 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica argamassas – Brasil.....	113
Gráfico 27 -Resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão.	114
Gráfico 28 - Resultados da termografia: temperaturas das argamassas na primeira hora de insolação.	117
Gráfico 29 - Temperaturas das argamassas após quatro horas e 30 minutos de insolação.....	119

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Definições de vidros publicadas na década de 90.....	21
QUADRO 2 - Óxidos formadores de reticulado, intermediários e modificadores	25
QUADRO 3 - Composição química de alguns vidros	27
QUADRO 4 - Classificação dos vidros quanto à cor.....	30

TABELAS

TABELA 1 - Granulometria disponíveis das areias normalizadas de Portugal/Brasil	49
TABELA 2 - Propriedades físicas e químicas da água (COPASA).....	50
TABELA 3 - Composição química do cimento Portland usado em Portugal.....	68
TABELA 4 - Composição química do cimento Portland usado no Brasil	68
TABELA 5 - Composição química dos dois tipos de micropartículas de vidro	70
TABELA 6 - Resultado ensaio massa específica pelo frasco Chapman/cimento.....	71
TABELA 7 - Resultados superfície específica (Blaine) dos cimentos e pós de vidro.....	71
TABELA 8 - Principais frequências e modos de vibrações dos vidros	77
TABELA 9 - Resultados do ensaio Chapelle Modificado	78
TABELA 10 - Condutividades soluções saturadas $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com e sem MPV	79
TABELA 11 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial, pontos relevantes das reações	82
TABELA 12 – Ensaio para determinação da pasta de consistência normal	84
TABELA 13- Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas - Le Chatelier – Portugal	84
TABELA 14 - Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas - Le Chatelier - Brasil	85
TABELA 15 - Resultados dos ensaios de tempo de pega da mistura – Portugal	85
TABELA 16 - Resultados dos ensaios de tempo de Pega da mistura – Brasil	86
TABELA 17 - Resultados dos ensaios trabalhabilidade, diâmetro de espalhamento mesa – Portugal	89
TABELA 18 - Resultados dos ensaios trabalhabilidade diâmetro de espalhamento – Brasil	89
TABELA 19 - Resultados do ensaio de espalhamento por tronco de cone do concreto – Portugal	90
TABELA 20 - Resultados do ensaio da trabalhabilidade por funil do concreto – Portugal	90
TABELA 21 - Resultados da permeabilidade ao oxigênio - Brasil	102
TABELA 22 - Resultados do ensaio da expansão álcali-sílica aos 14 dias - Portugal	107
TABELA 23 - Resultados do ensaio da expansão ASR aos 16 e 30 dias - Brasil	108
TABELA 24 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica nas argamassas DC ($\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$) Portugal.....	109

TABELA 25 - Resultados do ensaio da resistividade elétrica dos concretos - DC (k Ω .cm) Portugal.....	112
TABELA 26 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica das argamassas DC (k Ω .cm) - Brasil	113
TABELA 27 - Temperaturas registradas nas micropartículas de vidro incolor e âmbar	115
TABELA 28 - Temperaturas das argamassas aos zero e após 60 e 90 minutos de insolação.....	117
TABELA 29 - Temperaturas das argamassas após 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos de insolação	119

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Estrutura da pesquisa	6
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1Materiais cimentícios suplementares.....	7
2.1.1 Caracterização	7
2.1.2 Adições pozolânicas	8
2.1.3 Composição química	11
2.1.4 Difração de raios-X	11
2.1.5 Teor de sílica vítrea	12
2.1.6 Teste Frattini.....	12
2.1.7 Teste Chapelle	13
2.1.8 Luxan	14
2.1.9 Índice de atividade pozolânica (IAP)	14
2.1.10 Reação álcali-sílica.....	15
2.1.11 Termogravimetria (TGA) e análise termodiferencial (DTA).....	16
2.2 Reação álcali-agregado.....	17
2.3 Vidros de silicato	20
2.3.1 Conceito.....	20
2.3.2 Estrutura do vidro	23
2.3.3 Classificação dos vidros de silicatos	27
2.3.4 Produção e processamento	30
2.3.5 Resíduos de vidro	32
2.3.6 Materiais cimentícios confeccionados com resíduos de vidro	36
3.MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Materiais	47
3.2 Métodos	50
3.2.1 Caracterização físico-química dos cimentos e das micropartículas de vidro	51
3.2.2 Reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio.....	52

3.2.3 Influência das micropartículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco	54
3.2.4 Análise da influência das micropartículas de vidro na microestrutura e no desempenho dos compostos cimentícios no estado endurecido	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 Caracterização físico-química dos cimentos e micropartículas de vidro	68
4.2 Reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio	78
1.3 Influência das partículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco	84
4.4 Análise da influência das micropartículas de vidro na microestrutura no estado endurecido	90
4.4.1 Análise da microestrutura	90
4.4.2 Resistência à compressão	97
4.4.3 Resistência à tração na flexão	99
4.4.4 Módulo de elasticidade	101
4.4.5 Permeabilidade ao oxigênio	102
4.4.6 Carbonatação acelerada	105
4.4.7 Reação álcali-sílica	106
4.4.8 Resistividade elétrica	109
4.4.9 Avaliação do desgaste por abrasão	113
4.4.10 Termografia Infravermelha	114
5. CONCLUSÕES	120
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	122

1 INTRODUÇÃO

Patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, o cimento Portland é o material básico para a fabricação de concretos. Considerando que o concreto é o material mais amplamente utilizado na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2008), pode-se inferir que o cimento é um dos materiais-chave para o desenvolvimento da economia. Segundo Matos e Coutinho (2012), atualmente a produção anual de cimento está em torno de 2,8 bilhões de toneladas e espera-se considerável aumento nos próximos anos. Essa grande produção se deve, principalmente, à versatilidade do aglomerante, à existência de recursos naturais para sua fabricação e a seu custo relativamente baixo. No entanto, a produção de cimento Portland requer grande quantidade de recursos naturais não renováveis e de energia. A produção de 1 tonelada de cimento consome em torno de 1,6 tonelada de recursos naturais (JENNINGS; BULLARD, 2011). Uma planta eficiente de cimento consome perto de 100 kWh por tonelada de cimento produzido (GARTNER; MACPHEE, 2011).

Além disso, a fabricação do cimento é responsável pela emissão de vários gases, especialmente o dióxido de carbono (CO_2). De acordo com Malhotra (2002), cerca de 7% de todas as emissões de CO_2 (aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas/ano) se devem à produção de cimento Portland. Segundo Torgal, Castro Gomes e Jalalis (2005), a produção de 1 tonelada de cimento gera 0,55 tonelada de CO_2 de origem química (reação de descarbonatação do calcário: $3\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{CO}_2$), às quais deve ser adicionada 0,39 tonelada de CO_2 em função do uso de combustíveis fósseis para a produção de energia necessária ao processo. Dado mais recente indica que para cada tonelada de clínquer produzido são lançados na atmosfera 870 kg de CO_2 (RUIZ-SANTAQUITERIA; FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2009). Sá *et al.* (2011) informa que cerca de 670 kg de CO_2 se devem à produção de 1 tonelada de cimento Portland no Brasil. Outro inconveniente associado ao concreto de cimento Portland é a vida útil das estruturas de concreto, que usualmente, não ultrapassa os 60 anos (TORGAL; CASTRO GOMES; JALALIS, 2005).

Nesse contexto, a comunidade científica tem realizado muitas pesquisas que buscam materiais substitutos para o cimento, como o cimento geopolimérico. No entanto, acredita-se que o cimento Portland, em função do custo e disponibilidade da matéria-prima, ainda será um aglomerante largamente utilizado por longo tempo (MONTEIRO, 2011). Outra linha de pesquisa estuda a viabilidade de produção de cimentos Portland de baixo impacto

ambiental. Entre os estudos dessa linha, pode-se destacar a produção de cimento com queima de resíduos para a produção de energia, o uso de nanomateriais e a substituição parcial do clínquer/cimento por outros materiais, em especial resíduos industriais e/ou agrícolas, que poderiam atuar como materiais cimentícios e/ou pozolânicos. Esses materiais são conhecidos classicamente como adições cimentantes ou pozolânicas (SCHMIDT *et al.*, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008; COUTINHO, 1997; NEVILLE, 1997;). Mais recentemente, esses materiais têm sido denominados por diferentes autores como materiais cimentícios suplementares (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MERAL; BENMORE; MONTEIRO, 2011; SCRIVENER; NONAT, 2011; THOMAS, 2011).

De acordo com a granulometria, teor de sílica e grau de cristalinidade, os resíduos podem ser utilizados como agregados ou adições minerais de ação pozolânica ou filer (SCHMIDT *et al.*, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008; COUTINHO, 1997; NEVILLE, 1997). As adições minerais de resíduos mais usuais são as escórias de alto forno, as cinzas volantes, o sílica ativa e as cinzas de casca de arroz (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2010; GASTALDINI, 2009; PRADO *et al.*, 2009; POSSAN; VENQUIARUTO; DAL MOLIN, 2007; FENG *et al.*, 2004; MALHOTRA; MEHTA, 1996; SOKOLOVICZ; ISAIA; TARGAN *et al.*, 2002; SHANNAG, 2000). Pesquisas recentes têm indicado o potencial pozolânico das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2010; KAWABATA, 2008; SANTOS; FORMAGINI, 2008; REGO, 2004; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003; REGO, 2001).

Considerando que os vidros são materiais cerâmicos não cristalinos e que mais de 95% de todos os vidros são fabricados a partir de óxido de sódio, cálcio e dióxido de sílica, a adição de resíduos de vidro no concreto tem despertado o interesse tanto de pesquisadores quanto das indústrias (BABISK, 2009; SANTOS *et al.*, 2009; KRUGER; OLIVEIRA; BRAGA, 2008; FRAGATA *et al.*, 2007; KOLLER, 2007; LÓPEZ; AZEVEDO; BARBOSA NETO, 2005; SMITH, 1998). Além disso, o vidro nas suas diferentes naturezas tem sido considerado um material que muito contribui para o desenvolvimento sustentável (EDWARDS; AXINTE, 2013; SILVA; FERREIRA; FIGUEIRAS, 2011).

O resíduo de vidro é um material inerte não biodegradável - NBR 10.004 (ABNT, 2004a), com alta taxa de aproveitamento e reciclagem, podendo se apresentar na forma de cacos ou

pós. Comumente são utilizados como matéria-prima para a fabricação de novos vidros (REINDL, 2003; AKERMAN, 2000; MAUPIN, 1998). A reciclagem do vidro ocorre basicamente no resíduo na forma de caco. A reciclagem primária de vidro apresenta taxas de reaproveitamento que variam de 47 a 96%, dependendo do continente, país ou estado (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2013; EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION - FEVE, 2013). Dados de 2011 indicam que no Brasil a parcela reciclada foi de 47% e a reutilizada totalizou 33% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2013).

Os primeiros estudos sobre a incorporação de resíduos de vidro aos materiais cimentícios avaliaram seu uso como agregados e se estendem até o dia de hoje (YUKSEL *et al.*, 2013; IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2011; LING; POON, 2011; PHILLIPS; CAHN 1972;). Os dados mostram a possibilidade de ocorrência da reação álcali-agregado nesses compostos e a influência da granulometria, cor e tipo de vidro no desempenho do material (ANTÔNIO; CALMON; TRISTÃO, 2011; SACCANI; BIGNOZZI, 2010; SHI; ZHENG, 2007; BYARS; MORALES-HERNANDEZ; ZHU, 2004; XI *et al.*, 2004; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001; JIN; MEYER; BAXTER, 2000; MEYER; BAXTER, 1997; JOHNSTON, 1974; 1998; PATTENGIL; SHUTT, 1973)

As pesquisas sobre a atividade pozolânica do vidro têm marco importante com o trabalho de Meyer, Baxter e Jin (1996), que relataram que abaixo de 45 μm o vidro poderia ter atividade pozolânica. Outros pesquisadores também descreveram a eficiência do vidro em micropartículas na redução da expansão da reação álcali-sílica, de forma similar às cinzas volantes e escórias (KAWAMURA; FUWA, 2003; CARPENTER; CRAMER, 1999). Diferentes trabalhos mostram que, dependendo da granulometria, podem-se incorporar 5 a 50% de resíduo de vidro em substituição ao cimento sem prejuízo do desempenho do composto (SAMET, 2013; TAGNIT-HAMOU, 2011; CYR; RIVARD; LABRECQUE, 2009; ZHI; CAIJUN; JIANMING, 2009; CARLES GIBERGUES *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2006; AZEVEDO; BARBOSA NETO, 2005; SHI; RIEFLER; WANG, 2005; SHAYAN; XU, 2004; XI *et al.*, 2004; KAWAMURA; FUWA, 2003; KHMIRI; REINDL, 2003; IDIR; CYR; JIN; MEYER; BAXTER, 2000; SHAO *et al.*, 2000; CARPENTER; CRAMER, 1999; BAZANT; JIN; MEYER, 1998; CHAABOUNI; LÓPEZ; MEYER;

BAXTER; JIN, 1996; DIAMOND; THAULOW, 1974). Os estudos relatam que o efeito pozolânico surge para partículas passantes em peneiras de no mínimo 38 μm .

A influência da composição química do vidro, expressa pela cor, no desempenho dos compostos foi ressaltada por diferentes pesquisadores, que obtiveram resultados conflitantes (PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2012; ANTÔNIO; CALMON; TRISTÃO, 2011; SOBOLEV *et al.*, 2007; KARAMBERI; MOUTSATSOU, 2005; PARK; LEE; KIM, 2004; XI *et al.*, 2004; BYARS; MORALES-HERNANDEZ; ZHU, 2004; DHIR *et al.*, 2004; MEYER; BAXTER, 1997; JIN; MEYER; BAXTER, 2000).

Nesse contexto, observa-se que vários trabalhos na literatura apontam a potencialidade do uso do resíduo de vidro na forma de micropartículas como material pozolânico. No entanto, parece não existir consenso sobre a influência do tamanho da partícula no comportamento dos compostos produzidos. Moncea *et al.* (2013) sugerem o efeito filer para os resíduos de vidro utilizados como material cimentícios. Não se encontrou de forma clara na literatura consultada a influência da composição do vidro (expressa pela cor) na atividade pozolânica e no desempenho dos compostos cimentícios. Isto significa que existem muitas lacunas nesse campo de estudo.

Para Scrivener e Nonat (2011), a variabilidade dos resíduos de modo geral é muito grande e é necessário estudo mais extenso da interação dos materiais cimentícios suplementares com o clínquer, pois existem muitas lacunas no conhecimento. Os pesquisadores preconizam que é preciso estudar mais profundamente a relação entre reatividade e a amorficidade dos materiais e a influência oposta dos álcalis na reatividade e na resistência em idades mais avançadas quando se usam vidros em substituição ao cimento/clínquer.

Dessa forma, este trabalho se propõe a investigar a atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. A relevância do trabalho está no estudo associado do efeito da cor do vidro na atividade pozolânica e desempenho de compostos cimentícios de forma a produzir concretos mais duráveis. A pesquisa também poderá contribuir para a compreensão das relações amorficidade-reatividade-granulometria-porosidade dos materiais cimentícios suplementares.

O estudo poderá contribuir para construção civil de menos impacto ambiental, na medida em que se utiliza um resíduo comumente descartado em aterros sanitários para a fabricação de um cimento mais sustentável. Soma-se a isso a possibilidade de produção de concretos mais duráveis devido às modificações estruturais promovidas pela reação pozolânica.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho (resistência/durabilidade) de compostos de cimento Portland. Para se alcançar este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- caracterizar o aspecto físico-químico dos cimentos e das micropartículas de vidro;
- avaliar a reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio;
- identificar a influência das micropartículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco;
- identificar a influência das micropartículas de vidro na microestrutura dos compostos cimentícios;
- interpretar o efeito das micropartículas de vidro no desempenho mecânico dos compostos cimentícios no estado endurecido;
- estudar o efeito da cor do vidro na durabilidade dos compostos (reação álcali-sílica na carbonatação e desgaste por abrasão);
- estudar a influência das micropartículas de vidro no desempenho térmico dos compostos cimentícios.

1.2 Estrutura da pesquisa

O trabalho de pesquisa encontra-se estruturado em cinco capítulos, além das referências bibliográficas. A seguir é apresentada de forma resumida a descrição de cada capítulo.

No capítulo 1 é construída uma introdução, contemplando a importância e relevância do tema estudado, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo consiste de uma revisão da literatura, apresentando os principais aspectos dos materiais cimentícios suplementares, uma introdução teórica acerca dos fundamentos da reação álcali-sílica e os aspectos relacionados aos vidros de silicato.

No capítulo 3 está detalhado o programa experimental, sendo descritos, além dos materiais empregados na pesquisa, o planejamento dos experimentos e os métodos de ensaios utilizados.

O capítulo 4 contém toda a parte de análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, bem como as várias correlações entre os resultados obtidos.

As conclusões estão contidas no capítulo 5, juntamente com as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais cimentícios suplementares

2.1.1 Caracterização

Materiais cimentícios suplementares são silicosos ou silico-aluminosos, com baixo teor de cálcio ou fíler calcário, capazes de substituir parcialmente o cimento Portland (LOTENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MERAL; BENMORE; MONTEIRO, 2011; SCRIVENER; NONAT, 2011; THOMAS, 2011). Tradicionalmente conhecidos como adições minerais, são adicionados em quantidades relativamente grandes, que variam entre 20 e 70% do seu total em peso, podendo ou não substituir parcialmente o cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O uso de materiais cimentícios suplementares, em geral, está associado à melhoria do desempenho dos compostos cimentícios, pois promovem diminuição da porosidade dos mesmos, tanto no que se refere às suas propriedades mecânicas quanto à exsudação e à segregação.

As adições minerais podem ser classificadas segundo seu mecanismo de ação em três grupos: materiais cimentícios, materiais não reativos (fíler calcáreo) e materiais pozolânicos (ISAIA, 2007; MINDES; YOUNG; DAEWIN, 2003). Os materiais cimentícios não necessitam de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ou C-S-H). No entanto, sua auto-hidratação normalmente é lenta e a quantidade de produtos formados na reação não é suficiente para a sua utilização isolada (DAL MOLIN, 2011).

O fíler é um material finamente dividido (em torno de 40 μm) que, geralmente, não possui atividade química. Sua função é física, uma vez que possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento, promovendo o refinamento dos poros, dos produtos de hidratação, além de alterar a estrutura da zona de transição e atuar como ponto de nucleação para a hidratação do cimento (DAL MOLIN, 2011; SILVA, 2007; CORDEIRO, 2006).

As adições pozolânicas, ou simplesmente pozolanas, são adições que por si só não apresentam poder aglomerante hidráulico, mas quando finamente divididas e em presença

de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos hidratados (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 116-R-00 (ACI 2002); DAL MOLIN, 2011; MASSAZZA, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.2 Adições pozolânicas

2.1.2.1 Generalidades

As pozolanas são obtidas de várias fontes e podem ser naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são materiais que possuem atividade pozolânica no seu estado natural. São de origem vulcânica ou de origem sedimentar. Utilizadas durante o período do Império Romano, as pozolanas naturais foram muito usadas como adição em argamassas para melhorar a sua resistência à água e a durabilidade de misturas à base de cal (LAGONEGRO, 2002). As pozolanas artificiais são subprodutos oriundos da indústria: cinzas de fornos e caldeiras, cinzas de coque, cinzas volantes, dentre outras (DONATELLO; TYRER, M.; CHEESEMAM, 2010; MASSAZZA, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008; COUTINHO, 1997). As adições pozolânicas mais comumente utilizadas são cinzas volantes, sílica ativa, cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar (SOKOLOVICZ; ISAIA; GASTALDINI, 2009).

Segundo Coutinho (1997), as pozolanas são adicionadas ao cimento especialmente com duas finalidades: baixar o calor de hidratação e evitar a formação dos sulfoaluminatos expansivos em compósitos sujeitos à ação dos sulfatos. A reação pozolânica acontece de forma lenta, assim como a taxa de liberação de calor, o que repercute na velocidade de desenvolvimento da resistência mecânica do composto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SHI; ZHENG, 2003). De acordo com Donatello, Tyrer e Cheeseman (2010), a reação entre as pozolanas e o Ca(OH)_2 produzido em excesso pela hidratação do cimento forma um gel de silicato hidratado de cálcio, que reduz a porosidade do composto e aumenta a sua resistência mecânica. Segundo Metha e Monteiro (2008), ao consumir os Ca(OH)_2 a reação pozolânica tem função importante na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos, uma vez que elas causam considerável redução na porosidade e propiciam o refinamento dos grãos. Assim, os poros capilares distribuem de forma mais homogênea os

produtos de hidratação do cimento, se comparado ao concreto tradicional, e diminuem o transporte de fluidos para o interior do composto.

Os materiais pozolânicos são classificados, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992b), em três diferentes categorias. A classe N engloba as pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2), terras diatomáceas e argilas calcinadas. Na classe C estão nomeadas as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. A classe E refere-se a pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores (escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral). Tashima (2006) relata que classificar os materiais pozolânicos em função somente da origem do material não é o mais adequado, pois não se faz distinção entre as pozolanas mais reativas como sílica ativa, metacaulim e a cinza de casca de arroz.

2.1.2.2 Características das pozolanas

As principais fases ativas das pozolanas são a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Essas duas fases devem apresentar elevado grau de amorficidade para que haja atividade pozolânica (REGO *et al.*, 2006; JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003; NEVILLE, 1997). De acordo com a NBR 12653 (1992b), a soma dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ presentes nas pozolanas mais reativas não deve ser inferior a 70%. Segundo Cincotto e Kaupatez (1988), para as pozolanas serem consideradas reativas, o teor de SiO_2 deve ser de 44%. Gava (1999) menciona que não se deve considerar apenas esse item, uma vez que a atividade pozolânica é, também, influenciada pela amorficidade do material. No entanto, trabalhos recentes questionam o grau de influência da estrutura amorfa na reatividade das pozolanas, indicando a importância da finura das mesmas (SCRIVENER; NONAT, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2010). Defeitos internos também poderiam potencializar reações químicas (RAJABIPOUR; MARAGHECHI; FISCHER, 2010), podendo ocorrer a reação pozolânica em materiais cristalinos (BENEZET; BENHASSAINE, 1999; ZANNI, *et al.*, 1996).

Materiais finos apresentam maior superfície de contato, o que facilita a ocorrência das reações químicas. Uma superfície específica em torno de 600 a 1.000 m^2/kg pode indicar uma pozolana reativa (COUTINHO, 1997). Há na literatura recomendações de que a quase

totalidade das partículas de pozolanas se encontrem abaixo da peneira de 0,035 mm ou com Blaine superior a 300 m²/kg (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003). Alguns autores consideram que apenas as partículas abaixo de 0,015 mm possuem atividade pozolânica (ISAIA, 2007). Quando isso não ocorre, é necessário haver a moagem, tanto para pozolanas artificiais como para as naturais (GARCÉS *et al.*, 2010). As partículas finas das pozolanas também podem preencher os vazios do composto, promovendo o empacotamento mais eficiente das partículas (efeito fíler).

Segundo Rodrigues *et al.* (2010), a mistura com pozolanas pode exigir maior fator água/aglomerante, em função do tamanho das partículas, visto que quanto mais fina for a adição, maior será a quantidade de água requerida na mistura. Poucos estudos da literatura consultada quantificam os efeitos dessas duas ações (físico/químico) sobre a pasta cimentícia, quando parte do cimento é substituído por adições pozolânicas (ISAIA *et al.*, 2003).

Alguns elementos presentes nas pozolanas devem ter seus teores controlados. Altos teores de carbono em cinzas indicam menor teor de sílica reativa. Teores elevados de sódio e potássio podem favorecer o aparecimento de eflorescências ou a ocorrência da reação álcali-agregado. O teor máximo de álcalis recomendável (equivalente de Na₂O) de acordo com a NBR 12653 (1992b) é de 1,5%.

Um dos fatores limitantes para o uso das pozolanas é a baixa velocidade de reação, se comparada à do cimento *Portland*. É recomendável o uso de sais como ativadores químicos, assim como tratamentos térmicos ou mecânicos (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SHI; RIEFLER; WANG, 2005).

2.1.2.3 Ensaios para determinação da atividade pozolânica

A literatura descreve uma variedade de métodos de ensaio para avaliar a atividade pozolânica. Segundo Coutinho (1997), não existe um método ideal que permita com eficiência determinar correlação perfeita entre a pozolanicidade de determinado composto e os ensaios descritos na literatura. Também deve ser considerado que a temperatura de reação e a superfície específica influenciam a cinética da reação pozolânica e,

consequentemente, os resultados dos ensaios (GUZMAN; GUTIÉRREZ; AMIGÓ, 2011). Apesar desses complicadores, alguns métodos para qualificar e/ou quantificar a atividade pozolânica estão descritos em normas e na literatura. Existem métodos que possibilitam classificar a atividade pozolânica direto e/ou indiretamente. No primeiro caso, eles monitoram $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e sua subsequente redução em relação ao tempo, devido à presença da pozolana (teste Frattini, teste da cal saturada, Chapelle Modificado, condutividade elétrica pelo método Luxan). No segundo caso, os testes avaliam a pozolanicidade medindo-se uma propriedade física da amostra, que indica a extensão da atividade pozolânica (testes de resistência mecânica, resistividade elétrica, termogravimetria, termodiferencial e IAP). A presença e o teor de determinados compostos químicos, a sílica vítrea e a sua quantificação também têm sido considerados indicativos de atividade pozolânica (ABNT, 1992a; ASTM, 2005; DONATELLO; TYRER; CHEESEMAN, 2010). A seguir serão apresentados, de forma sucinta, os métodos empregados para avaliação da atividade pozolânica.

2.1.3 Composição química

O ensaio de análise química permite comparar os dados obtidos com os valores de referência prescritos pela NBR 12653 (ABNT, 1992b) e ASTM C 618 (ASTM, 2005) para avaliar a atividade pozolânica de materiais. Devem ser contabilizados o $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, (50% mínimo), SO_3 (5,0% máximo), teor de umidade (3,0% máximo), perda ao fogo (10% máximo), álcalis disponíveis em Na_2O (1,5% máximo).

2.1.4 Difração de Raios-X

A difração de raios-X é o método usual para a caracterização da estrutura do arranjo atômico dos materiais a partir da análise qualitativa das fases cristalinas presentes no material (VAN VLACK, 1984). Comumente se consideram reativas as pozolanas de estrutura amorfa.

2.1.5 Teor de sílica vítrea

Um método simples pode ser usado para a quantificação da sílica vítrea. (PAYA *et al.*, 2001). Para tal, faz-se a titulação de três diferentes soluções com três diferentes titulantes: a 250 ml de uma solução 0,005M de $\text{Ba}(\text{OH})_2$ aquosa são adicionados: na primeira, 5 ml de glicerol, na segunda 5 ml de glicerol e 30 mg de sílica amorfa (material de referência), e na terceira 5 ml de glicerol e 30 mg de do material a ser estudado. Em seguida a cada solução é adicionada fenolftaleína até que ocorra a mudança de cor. O resultado é baseado na análise comparativa dos três volumes medidos para a mudança de cor da fenolftaleína. O teor de sílica vítrea, também, pode ser avaliado pelo difratograma de raios X, por meio do cálculo da áreas.

2.1.6 Teste Frattini

O teste Frattini é um método utilizado desde 1954 e consiste na determinação da quantidade máxima de hidróxido de sódio com que a pozolana pode reagir. Para sua realização, são misturados 6 g da pozolana com 14 g de cimento e 100 cm³ de água destilada. A mistura é colocada durante sete dias em um forno (40°C). Ao fim desse tempo é filtrada e resfriada naturalmente à temperatura ambiente. No material filtrado determina-se o teor de álcalis, em milimoles de OH^- por litros e o teor em óxido de cálcio. Com a análise de teor de OH^- e Ca^{2+} é possível verificar se a solução está ou não saturada de hidróxido de cálcio, utilizando-se um diagrama da solubilidade do hidróxido de cálcio a 40°C em função do teor de álcalis. Para que a pozolana seja reativa e a sua adição ao cimento aceitável, é necessário que a solução não esteja saturada de hidróxido de cálcio, ou seja, o ponto representativo da solução deve situar-se abaixo da curva de saturação da solução de hidróxido de cálcio (DONATELLO; TYRER; CHEESEMAN, 2010; COUTINHO, 1997).

O teste Frattini pode ser realizado em uma versão simplificada (método da cal saturada), em que a pozolana é combinada com uma solução de cal saturada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cimento Portland e água. A quantidade de cal fixada pela pozolana é determinada pela medição residual de cálcio dissolvido. Donatello, Tyrer e Cheeseman (2010) utilizaram diferentes métodos de determinação da atividade pozolânica (em pozolanas variadas) e a correlação

entre eles. O resultado mostrou que o teste de cal saturada pode ser realizado em diferentes tempos, pois não há necessidade de se esperar a reação de hidratação do cimento se completar.

2.1.7 Teste Chapelle

O teste de Chapelle foi idealizado em 1959 e permite determinar o teor de óxido de cálcio fixado por um material em meio aquoso. O que o distingue dos demais é a possibilidade de acelerar os resultados. O ensaio consiste basicamente em aquecer em banho-maria (90°C e agitação mecânica) por 16 horas uma suspensão de 1g de CaO puro juntamente com 1g de pozolana e 250 ml de água. Após o resfriamento até a temperatura ambiente adiciona-se à mistura uma solução de sacarose e o teor de CaO livre é medido por meio de titulação de cerca de 50 ml da solução com HCl 0,1 mol/l e fenolftaleína (1g/l). Também é feita a titulação de solução com 1g de óxido de cálcio e 250 ml de água, sem pozolana. O índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle é dado pelo teor de óxido de cálcio fixado. Por último, calcula-se atividade pozolânica pela equação 2.1:

$$mg \frac{CaO}{g} \text{ de material} = \frac{28.(V_3.m_3 - V_2.m_4)}{m_4.m_3.m_2}.f_c \quad (2.1)$$

Sendo m_2 a massa de material pozolânico em g, m_3 a massa de CaO empregado no ensaio com a amostra, m_4 massa de CaO empregado no ensaio sem pozolana, V_2 o volume de HCl 0,1 mol/l consumido no ensaio com pozolana em mililitro, V_3 o volume de HCl 0,1 mol/l consumido no ensaio sem pozolana e f_c o fator de correção volumétrico do HCl para uma concentração de 0,1 mol/l.

2.1.7.1 Chapelle Modificado (IPT)

A norma brasileira NBR 15895 (2010a) propõe o método Chapelle Modificado aperfeiçoado por Raverdy *et al.* (1980) para a determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado. As diferenças dizem respeito basicamente à massa da amostra utilizada (de 2g de CaO para 1g de pozolana) e ao tempo de aquecimento da mistura (de 16 horas para 15

minutos). O resultado é expresso em miligrama de óxido de cálcio por grama. Segundo os pesquisadores, para que um material seja classificado como pozolânico, estipula-se um limite mínimo de 330mg CaO/g; quanto maior o consumo de óxido de cálcio, maior a pozolanicidade do material.

2.1.8 Luxan

A avaliação da pozolanicidade pelo método descrito por Luxan *et al.* (1989) baseia-se na variação de condutividade elétrica de uma solução saturada com hidróxido de cálcio antes e após a adição da pozolana sob condições controladas (5g de pozolanas para 200 ml de solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 40°C). Realizam-se medições da condutividade elétrica a cada dois minutos. Se o material for pozolânico, acredita-se que a condutividade decresce devido à menor quantidade de íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ na solução. Dessa forma, é possível classificar o material: sem atividade pozolânica, obter-se um resultado menor que 0,4 mS/cm; com atividade pozolânica moderada, se o material apresentar valores de condutividade entre 0,4 e 1,2 mS/cm; e boa atividade pozolânica se o resultado obtido for maior do que 1,2 mS/cm. Contudo, os resultados desse ensaio devem ser analisados com cautela. Muitas vezes a diminuição do teor de íons da solução saturada não está relacionada à pozolanalidade do material, pois em função da superfície específica do material analisado, pode ocorrer a adsorção dos íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ na superfície das partículas, o que levaria à interpretação errônea da diminuição da condutividade da mistura (RODRIGUES, 2004).

2.1.9 Índice de atividade pozolânica (IAP)

O teste indireto mais utilizado para determinar a pozolanicidade do material é o teste de resistência aos 28 dias, conforme NBR 5752 (ABNT, 1992a). O ensaio é uma medida direta do IAP do material por meio da determinação da resistência à compressão simples, conforme a NBR 7215 (1996). Utilizam-se corpos-de-prova de argamassas no traço 1:3 (cimento: areia normal), em massa. O índice de atividade pozolânica é calculado conforme equação 2.2:

$$IAP(\%) = \frac{f_{cp}}{f_{cc}} 100 \quad (2.2)$$

Sendo f_{cp} a resistência à compressão média, aos 28 dias, de três amostras moldadas com cimento Portland e pozolana. Utiliza-se substituição de 35% em peso de cimento por material pozolânico; f_{cc} é a resistência à compressão média, aos 28 dias, de três amostras moldadas apenas com cimento Portland. Um fator a ser considerado na análise dos resultados desses ensaios é que o procedimento fixa a trabalhabilidade, o que faz com que a demanda de água para pozolanas muito finas seja muito elevada e, com isso, a resistência das argamassas com pozolanas seja diminuída, em comparação ao traço controle (CORDEIRO, 2006).

2.1.9.1 Índice de atividade pozolânica IAP com cal

A norma brasileira também prescreve a determinação do índice de atividade pozolânica com cal (ABNT, 1992d). Nesse ensaio são comparadas as resistências mecânicas medidas aos sete dias de duas argamassas: uma confeccionada com areia normal e cimento Portland e a outra contendo uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio, nove partes, em massa, de areia normalizada e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponda ao dobro do volume de hidróxido de cálcio.

2.1.10 Reação álcali-sílica

A atividade pozolânica também pode ser avaliada pela análise da aptidão do material pozolânico em evitar a expansão causada pela reação entre determinados constituintes dos agregados e os álcalis existentes no cimento Portland (ABNT NBR 12651, 2012). A redução percentual da expansão da argamassa (R_e) devida à utilização de material pozolânico deve ser calculada conforme a seguinte equação 2.3:

$$R_e = \frac{E_c - E_t}{E_c} 100 \quad (2.3)$$

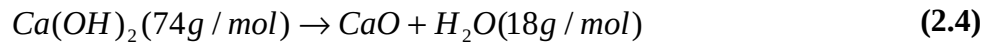
Sendo E_c a expansão média das barras de argamassa moldadas com mistura de referência (com agregados reativos) e E_t a expansão média das barras de argamassa moldadas com mistura sem agregados reativos.

2.1.11 Termogravimetria (TGA) e análise termodiferencial (DTA)

Diferentes trabalhos têm avaliado a atividade pozolânica dos materiais a partir de ensaios de termogravimetria (WEERDT 2011; RODRIGUES *et al.*, 2010; BADANOURI; GEORGESCU; PURU, 2003; PAYA *et al.*, 2003). A análise conjunta das curvas de variação de massa e energia em função da temperatura permite identificar as regiões onde ocorrem as reações de desidratação. A análise comparativa do percentual de perda de massa na temperatura de decomposição da portlandita possibilita avaliar a ocorrência ou não da reação pozolânica. Análise quantitativa da extensão da reação pozolânica pode ser feita derivando-se as curvas obtidas na análise termogravimétrica e identificando-se as zonas de desidratação da portlandita de amostras com e sem adição de pozolanas (IONASHIRO, 2005). Quantifica-se a água perdida na desidroxilação da portlandita H para a mistura com H_P e sem pozolana H_C . A quantidade de hidróxido de sódio na mistura CH com CH_P e sem pozolana CH_C , expressa como porcentagem do peso da amostra seca, é dada pelas equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$CH = \frac{H}{PM_H} PM_{CH} \quad (2.3)$$

Sendo PM_H o peso molecular da água e PM_{CH} o do hidróxido de cálcio e H a perda de água da portlandita.



A atividade pozolânica pode ser avaliada pelo teor de hidróxido de cálcio fixado:

$$Ca(OH)_2 \text{ fixado} = \frac{(CH_c.C) - CH_P}{CH_c.C} . 100 \quad (2.5)$$

Sendo C a porcentagem de cimento utilizado na amostra com pozolanas.

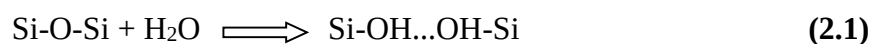
É importante ressaltar que muitas vezes os resultados obtidos com os diferentes métodos podem não ser congruentes. No trabalho de Rodrigues *et al.* (2010) com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, os resultados indicaram que, apesar do caráter cristalino, as cinzas obtidas em temperaturas mais baixas apresentaram significativa reatividade com o hidróxido de cálcio, segundo a termogravimetria. Resultados similares foram obtidos por Paula *et al.* (2010). Em trabalho recente, Scrivener e Nonat (2011) enfatizam que a compreensão dos mecanismos que controlam a velocidade de reação dos materiais cimentícios suplementares com os constituintes do clínquer está no início e ainda não permite generalizações. Ressaltam que, apesar de ser amplamente aceito o fato de que fases amorfas tendem a ser mais reativas que as cristalinas, existem muitas exceções.

2.2 Reação álcali-agregado

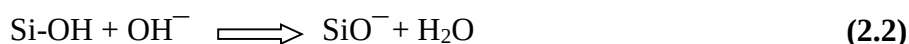
A reação álcali-agregado é um fenômeno químico que ocorre no concreto endurecido, envolvendo certos tipos de minerais silicosos reativos que podem estar presentes no agregado e que reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, aditivos e adições) dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto da reação, forma-se um gel higroscópico expansivo. Esses géis, quando em contato com a água, expandem-se por osmose. Essas expansões podem levar à fissuração da pasta em torno do agregado, levando à movimentações diferenciais nas estruturas, exsudação do gel e redução das resistências à tração e compressão e do módulo de elasticidade. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cimentos contendo menos de 0,6% de óxido de sódio (Na_2O) equivalente e concretos com teor de álcalis abaixo 3 kg/m^3 no concreto não sofrem expansão deletéria devido à reação álcali-agregado. Segundo os mesmos autores, material reativo abaixo de $75\mu\text{m}$, apesar de reagir, não oferece expansão significativa. A reação álcali-agregado pode ser classificada em três tipos: reação álcali-sílica, álcali-silicato e reação álcali-carbonato.

A reação álcali-sílica ocorre quando a sílica ativa do agregado reage com os álcalis do cimento, na presença do hidróxido de cálcio, cal hidratada ou cal extinta $\text{Ca}(\text{OH})_2$, originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo – Norma Brasileira – NBR 15577-4 (ABNT, 2008). Inicialmente, a partícula de sílica reativa é circundada por

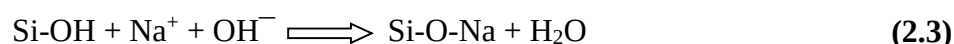
íons Na^+ , K^+ e Ca^{2+} contidos na pasta de cimento em solução básica. Em seguida, devido à alta concentração de Ca^{2+} na pasta, forma-se uma fina camada semi-impermeável de um gel de CaO-álcali-sílica, de caráter não expansivo ao redor da sílica. Posteriormente, os íons Na^+ , K^+ e Ca^{2+} penetram na fina camada que envolve a sílica e reagem com a mesma. Se a concentração de íons de cálcio for alta, de forma a assegurar a formação contínua de um gel não expansivo, uma vez que há consumo de álcalis durante a reação, haverá a redução da alcalinidade do meio. Se a concentração de íons cálcio for baixa, os álcalis reagirão e formarão um gel de álcalis sílica que, em presença de água, se expande (PAULON, 1981). Outro mecanismo que explica esse tipo de reação é a ocorrência de um ataque ao grupo siloxano (Si-O-Si) do agregado pelos íons hidroxilas (OH^-) presentes na solução de poros da pasta, a partir de uma reação ácido-base, formando silanol (Si-OH) na superfície do agregado (equação 2.1):



Em seguida, o silanol (Si-OH) é rompido pelos íons hidroxilas (OH^-) com liberação de água (equação 2.2):



O rompimento das ligações é balanceado pelos íons alcalinos com cargas positivas, sódio e potássio, criando cargas negativas. Os íons SiO^- liberados são atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros, formando um gel sílico alcalino:



Esse gel, na presença de água, expande e causa tensões de tração no composto cimentício. Um segundo tipo de reação álcali-agregado, reação álcali-silicato, acontece por um processo semelhante ao da reação álcali-sílica, com a diferença de se processar mais lentamente devido ao fato de os minerais reativos estarem mais disseminados na matriz (POOLE, 1992). Segundo Van Aardt e Visser (1977), essa reação se origina pela formação uma camada de aderência ao redor do agregado composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais hidróxido de cálcio. Com o passar do tempo e na presença de umidade, o

hidróxido de cálcio (proveniente da hidratação do cimento) reagirá com o silicato, formando um gel expansivo.

A reação álcali-carbonato é um tipo de reação álcali-agregado que ocorre de forma diferente das demais: os álcalis do cimento atacam o calcário dolomítico, formando compostos cristalizados (brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico), ou seja, desdolomitizando o agregado, provocando fissuras devido à perda de aderência dos materiais (HOBBS, 1988). Esses compostos reagem com os produtos da hidratação do cimento, dentro da pasta, formando novamente álcalis, os quais darão continuidade da reação de desdolomitização. Esse ciclo ocorrerá até o consumo total da dolomita ou até que a concentração de álcalis tenha sido reduzida por reações secundárias (ANDRADE, 1997; PAULON, 1981).

Existem diversos métodos de investigação para se avaliar a ocorrência de reação álcali-agregado no concreto endurecido. O método Osipov é um método térmico de ensaio em que agregados com dimensões de 20 a 50 mm são submetidos à alta temperatura, de aproximadamente 1.000° por 60 segundos. Considera-se que o agregado, caso possua mineralógica reativa, se desagregue quando exposto à temperatura elevada. No entanto, se o agregado não desagregar, são necessários ensaios complementares para verificar se ele é reativo (ANDRADE, 1997; VALDUGA, 2002).

Pelo método químico avalia-se a redução da alcalinidade de uma solução alcalina, em que são colocados os agregados reativos por certo tempo. Pode-se, assim, avaliar indiretamente o teor de sílica dissolvida. Os resultados são passados para um gráfico, que representa o limite entre os materiais deletérios e inócuos. Pode ser realizado segundo a norma ASTM C-289 (ASTM, 2003) (PRISZKULNIK, 2005).

Com o método de barras acelerado determina-se, por meio da variação de comprimento de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis do cimento (NBR 15577-4 (ABNT, 2008) e ASTM C 1567-08 (ASTM, 2010). As barras são moldadas com uma relação água-cimento fixa de 0,47 e estocadas em imersão em uma solução alcalina de NaOH com concentração 1N (simulação de "condições péssimas") e temperatura $(80\pm 2)^{\circ}\text{C}$, aquecimento a partir da temperatura ambiente $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e deve ser realizado em

(6±2) horas. Os limites de expansão são medidos (três medidas) a partir de 16 dias e 30 dias, contados desde a moldagem.

O método de comprimento de prismas de concreto é um método de ensaio de longa duração que representa melhor as condições para avaliação da reação álcali-agregados, pois utiliza prisma de concreto e não argamassa como no método acelerado. A solução NaOH é adicionada na água de amassamento, aumentando a concentração dos álcalis da mistura, respeitando o limite especificado. Além dos prismas permanecerem saturados à temperatura de 38°C, em recipientes especiais, os corpos de prova não pode ter contato direto com a água nem paredes do recipiente. As expansões são limitadas por uma taxa de 0,04%, ou seja, para expansões inferiores a 0,04% os agregados são considerados inócuos (ABNT, 2008).

O uso associado da análise petrográfica, análise por difração de raios-X, termodiferencial (DTA), espectroscopia de infravermelho, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de raios-X por energia dispersiva (EDX permite identificar elementos constituintes e propriedades dos agregados e, assim, avaliar sua reatividade).

2.3 Vidros de silicato

2.3.1 Conceito

Na linguagem popular, a palavra vidro é utilizada para designar um material incolor e frágil. Na linguagem científica, vidro é o sólido não cristalino obtido por resfriamento rápido. De acordo com o comitê do U.S. *National Research Council*, “o vidro é, por difração de raios-X, um material amorfo que exibe temperatura de transição vítrea. Esta é definida como o fenômeno pelo qual uma fase amorfa sólida exibe, devido à mudança de temperatura, uma variação repentina na derivada das propriedades termodinâmicas, tais como calor específico e coeficiente de expansão, em relação às suas respectivas fases cristalina e líquida” (WONG; ANGELL, 1976). O QUAD. 1 mostra algumas das definições para vidros encontradas na literatura da década de 1990.

QUADRO 1 - Definições de vidros publicadas na década de 90

Autor	Ano	Definição
Elliott	1990	Vidros são materiais amorfos que não apresentam ordem translacional de longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfo e sólido não cristalinos são sinônimos nessa definição. Um vidro é um sólido amorfo que exibe uma transição vítrea.
Zarzycki	1991	Um vidro é um sólido não cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea.
Doremus	1994	Vidro é um sólido amorfo. Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância, isto é, quando não há uma regularidade no arranjo dos constituintes moleculares, em escala maior do que algumas vezes o tamanho desses grupos. Não é feita distinção entre as palavras vítreo e amorfo.
Varshneya	1994	Vidro é um sólido que tem a estrutura do tipo de um líquido, um sólido não cristalino ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica mostrada pela técnica de difração de raios-X.
Shelby	1997	Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem de longo alcance e de periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro.

Fonte: Alves, Gimenez e Mazali (2001).

Um dos tipos mais tradicionais de vidros é o vidro cerâmico de silicatos, que recebe usualmente apenas a denominação de vidro, gerando muitas interpretações dúbias no vocabulário comercial da construção civil (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008; SICHIERI; ZHENG, 2007; CALLISTER, 2006; SMITH, 1998).

Materiais cerâmicos são compostos inorgânicos não metálicos formados por elementos metálicos e não metálicos, ligados quimicamente entre si por meio de ligações iônicas e/ou covalentes. Apresentam estruturas e composições químicas com variações consideráveis. Comumente, são óxidos, (Fe_3N) nitretos e (Fe_3C) carbetos. Podem ser formados por um único composto, como a alumina (Al_2O_3), ou por misturas de fases complexas, como argila, sílica e feldspato, que formam a porcelana elétrica. Tipicamente são duros e frágeis, apresentando baixa resistência ao impacto e baixa ductilidade. Os materiais cerâmicos, diferentemente dos metais e polímeros, são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes severos. A ausência de elétrons livres torna os cerâmicos bons isolantes térmicos e elétricos. Eles são considerados um dos mais antigos materiais e ao mesmo tempo também representam um dos materiais mais avançados para a indústria aeroespacial e eletrônica (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008; CALLISTER, 2006; SMITH, 1998).

Segundo Callister (2006), os materiais cerâmicos podem ser classificados com base na sua aplicação, como mostrado na FIG. 1.

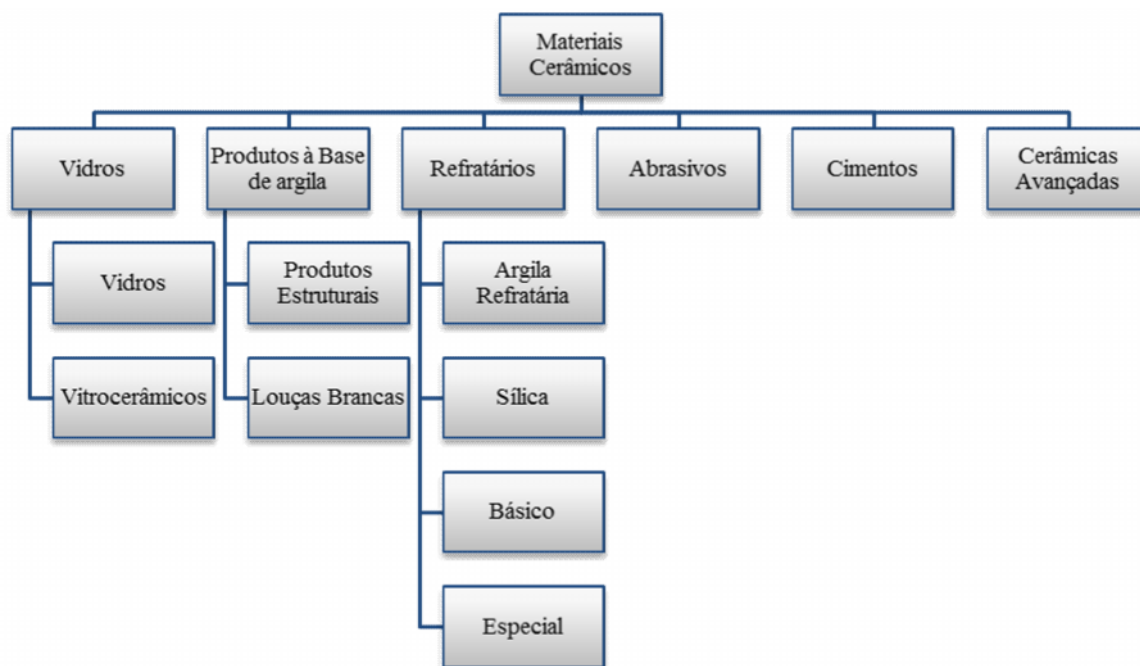


Figura 1 - Classificação dos materiais cerâmicos com base na sua aplicação.
Fonte: adaptado de Callister (2006).

Shackelford (2008) classifica os materiais cerâmicos de acordo com a estrutura do arranjo atômico: cerâmicas cristalinas, vidros e vitrocerâmicos. As cerâmicas cristalinas são os materiais cerâmicos que apresentam arranjo atômico de longo alcance. Os vidros são materiais silicosos que apresentam estrutura não cristalina. Os vitrocerâmicos são cerâmicos formados inicialmente como vidros e depois cristalizados de forma controlada. Smith (1998), assim como Callister (2006), considera que o vitrocerâmico é um dos tipos de vidros que sofrem tratamento de devitrificação.

O vidro cerâmico apresenta em sua constituição a predominância de óxido de silício (SiO_2) com estrutura predominantemente não cristalina, obtido por resfriamento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, sem sofrer cristalização total. Suas principais características são: transparência óptica, baixa tenacidade à fratura e facilidade de fabricação. Existem também outros vidros cerâmicos, como os de óxidos de boro (B_2O_3), dióxido de germânio (GeO_2) e outros. No entanto, alguns desses vidros possuem pouco valor comercial devido à sua reatividade com o ambiente. Outros, como os calcogenetos, por serem semicondutores, têm alto valor comercial, assim como as fibras de vidro ZrF_4 (fluoreto de zircônio), que transmitem a luz na região do infravermelho (SHACKELFORD, 2008; ASKELAND; PHULÉ, 2008; SICHIERI; ZHENG, 2007; CALLISTER, 2006; SMITH, 1998).

Os vidros de silicatos, neste trabalho também denominado apenas vidros, estão presentes no cotidiano do ser humano desde a Idade da Pedra (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001). No entanto, o estudo científico das propriedades físicas e químicas desses materiais só se iniciou por volta do século XIX, quando em 1875 cientistas alemães desenvolveram vidros especiais na Universidade de Jena, na Alemanha (BUNDE; FUNKE; INGRAM, 1998). Contudo, foi nos séculos XX e XXI, com o surgimento de novas tecnologias e das questões ambientais, que emergiram novos interesses na fabricação, utilização e reutilização do vidro.

2.3.2 Estrutura do vidro

O vidro é um material não cristalino cujo constituinte principal é o óxido de silício (SiO_2), comumente chamado de sílica. A unidade da estrutura básica da rede de sílica é o tetraedro (SiO_4)⁻⁴ (FIG. 2), no qual a ligação Si-O é parcialmente iônica e parte covalente. Dessa forma, um átomo/íon de silício (Si^{4+}) no interior do tetraedro está ligado covalentemente e ionicamente a quatro átomos/íons de oxigênio. Por causa da elevada carga do íon Si^{4+} raramente os tetraedros se unem aresta a aresta e nunca face a face. Dependendo do número de vértices compartilhados com outros tetraedros, têm-se os diferentes silicatos. Se, em média, dois e meio vértices de cada tetraedro são compartilhados, tem-se, por exemplo, o mineral tremolita cujo radical silicato é (Si_4O_{11})⁻⁶. Quando se compartilham três dos quatro oxigênios de cada tetraedro, resultam estruturas com radical silicato (Si_2O_5)⁻², sendo a argila caulinita um exemplo típico dessa estrutura, assim como as micas (WULFF *et al.*, 1964).

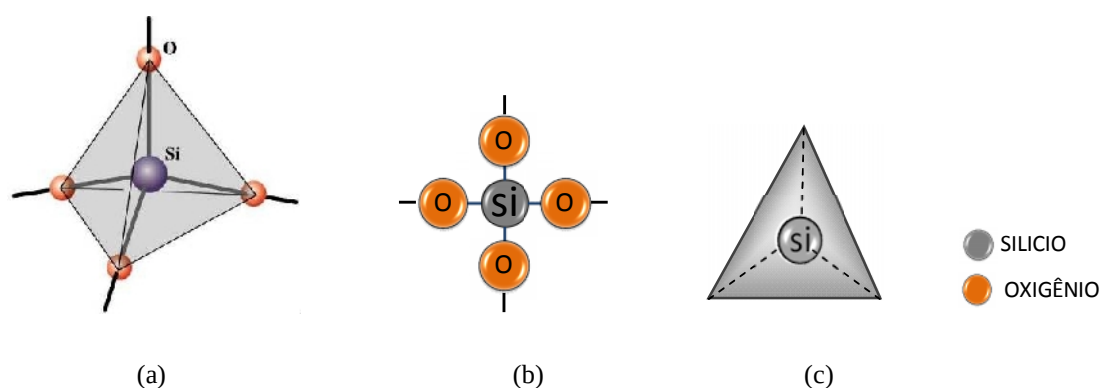


Figura 2 - Tetraedro de silício (SiO_4 -4), unidade básica da sílica, representações (a) tridimensional; (b) e (c) bidimensionais.

Fonte: Adaptado de Sichieri e Zheng (2007).

Quando todos os quatro oxigênios do tetraedro são compartilhados, tendo os tetraedros sempre dois vértices em comum (FIG. 3), tem-se uma estrutura reticular de silicato, sendo a sílica um dos principais exemplos dessa estrutura de silicato (WULFF *et al.*, 1964).

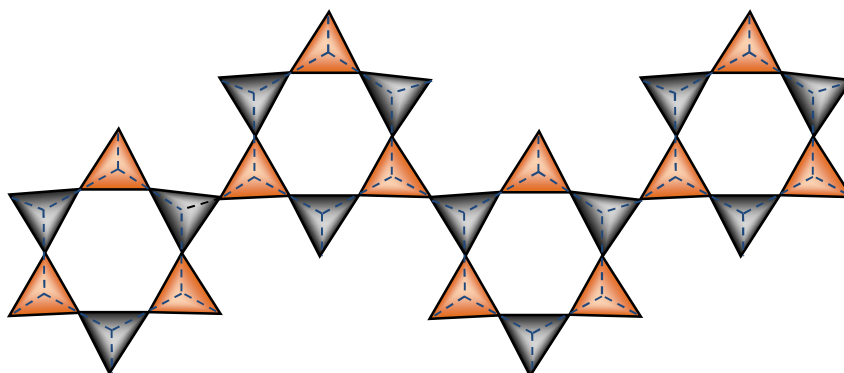


Figura 3 - Tetraedro de sílica cristalina com ordem a longa distância.
Fonte: adaptado de Smith (1996).

Quando a sílica é submetida a um resfriamento lento, a estrutura do arranjo atômico se repete de forma regular a longas distâncias, caracterizando a obtenção de uma sílica cristalina, como mostrado na FIG. 4 - a. Se forem empregadas taxas de resfriamento próximas do resfriamento do ar ou da água, a sílica apresenta apenas arranjos locais, sendo então denominada de sílica não cristalina ou vítrea (FIG. 4 - b). Dessa forma, na sílica cristalina os tetraedros estão ligados em uma disposição regular com ordem de longo alcance. Na sílica vítrea pura ou vidro de sílica pura os tetraedros estão ligados formando uma rede irregular, sem ordem de longa distancia (WULFF *et al.*, 1964).

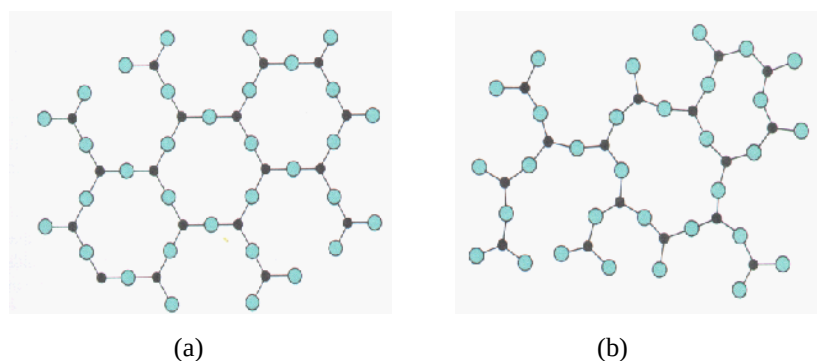


Figura 4 - Representação bidimensional dos arranjos da sílica (a) cristalino, (b) não cristalino.
Fonte: Adaptado de Callister (2006).

Além da sílica, o vidro tem como constituintes outros óxidos (QUAD. 2), que podem atuar como formadores de reticulado ou como óxidos modificadores ou intermediários (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008; SMITH, 1998).

QUADRO 2 - Óxidos formadores de reticulado, intermediários e modificadores

Formadores de reticulado	Intermediários	Modificadores
B ₂ O ₃	TiO ₂	Y ₂ O ₃
SiO ₂	ZnO	MgO
GeO ₂	PbO ₂	CaO
P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	PbO
V ₂ O ₃	BeO	Na ₂ O

Fonte: Askeland e Phulé (2008).

Os óxidos formadores de rede incluem os óxidos que formam poliedros com baixo número de coordenação (números de vizinhos mais próximos à mesma distância). Esses poliedros podem se conectar com os tetraedros da rede. Os principais formadores de vidro são SiO₂, B₂O₃ e P₂O₅. Os óxidos modificadores são responsáveis por quebrarem algumas ligações, rompendo a continuidade da rede de SiO₂. Dessa forma, diminuem a viscosidade do vidro e sua temperatura de fusão, ao mesmo tempo em que aumentam a reatividade do vidro em ambientes de operação. Possuem cátions de baixo valor de intensidade de campo. Entre eles se encontram os óxidos alcalinos (Na₂O e o K₂O) e óxidos alcalino-terrosos (CaO e o MgO). Os átomos de oxigênio provenientes desses óxidos entram na rede da sílica em pontos de junção dos tetraedros e interrompem a rede, dando origem a átomos de oxigênio com um elétron não compartilhado (FIG. 5). Os íons Na⁺ e K⁺ provenientes do Na₂O e do K₂O não entram na rede, mas permanecem nos interstícios como íons metálicos ligados ionicamente. Ao preencherem alguns dos interstícios, estes íons promovem uma maior cristalização do vidro (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008; SMITH, 1998).

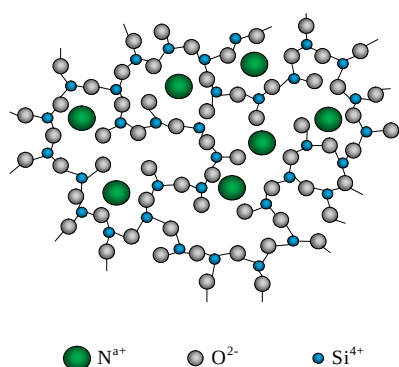


Figura 5 - Vidro de rede com óxidos modificadores Na₂O.
Fonte: adaptado de Smith (1998).

Entre os cátions formadores e os modificadores, encontram-se os cátions intermediários. Eles são óxidos que não podem, por si sós, dar origem à rede de um vidro, mas podem substituir o íon Si⁴⁺ em um tetraedro da rede (FIG. 6), contribuindo, assim, para a

estabilidade da rede (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008; SMITH, 1998).

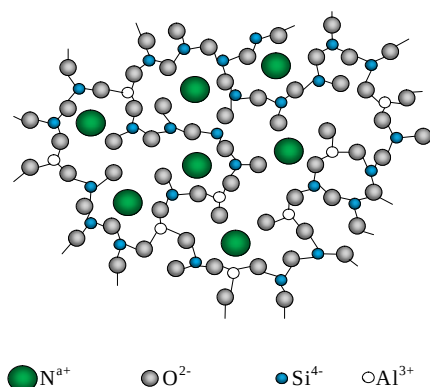


Figura 6 - Vidro de rede com óxidos modificadores SiO₂.
Fonte: adaptado de Smith (1998).

No entanto, a valência de Al é +3, e não +4, que é necessário para o tetraedro, os cátions alcalinos terão de fornecer os outros elétrons necessários à neutralidade elétrica. Ao vidro de sílica adicionam-se óxidos intermediários para se obterem propriedades especiais, como os vidros de alumínio-silicato, que são capazes de resistir a temperaturas mais altas que o vidro normal. O óxido de chumbo é outro óxido intermediário que é adicionado a alguns vidros de sílica. Dependendo da composição do vidro, os óxidos intermediários podem, por vezes, atuar como modificadores da rede, ao mesmo tempo em que fazem parte da rede do vidro (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SMITH, 1998).

Segundo Navarro (1991) e Akerman (2000), a soma de todos os óxidos presentes na composição do vidro deve ser 100%. A diminuição de um óxido implica o aumento do outro (FIG. 7). O aumento do óxido de sódio (Na₂O) acarreta aumento da fluidez, expansão e solubilidade, contudo, reduz a durabilidade do vidro. A alumina ou óxido de alumínio (Al₂O), ao contrário, aumenta a viscosidade e, conseqüentemente, a durabilidade. O óxido de bário (BaO) e o óxido de chumbo (PbO) aumentam a densidade e reduzem a viscosidade, além de aumentar a expansão térmica. O óxido de cálcio (CaO) favorece a devitrificação.

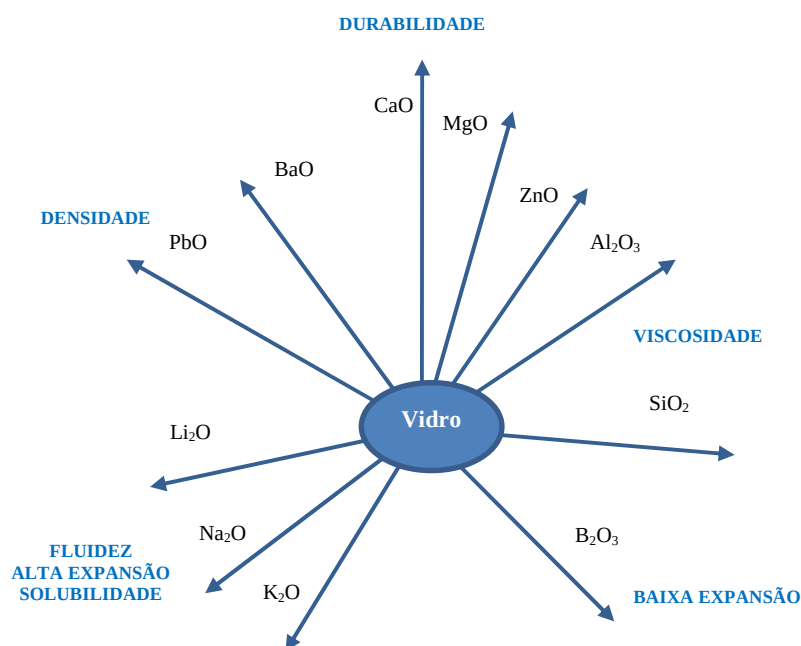


Figura 7 - Funções relativas dos átomos no vidro.
Fonte: adaptado de Navarro (1991).

2.3.3 Classificação dos vidros de silicatos

2.3.3.1 Quanto à composição química

A composição individual dos vidros é muito variada, pequenas alterações químicas podem proporcionar propriedades específicas nos vidros, tais como: índice de refração, coloração, viscosidade e durabilidade. Dessa forma, é usual sua classificação segundo a composição química (QUAD. 3).

QUADRO 3 - Composição química de alguns vidros

Vidro	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Outros
Sílica fundida	99,5+						
Sílica 96%	96,3	>2	>2		2,9	4	
Vidro plano soda-cal	71-73	12-14		10-12		0,5-1,5	1-4 MgO
Silicato de chumbo	63	7,6	6	0,3	0,2	0,6	21 PbO 0,2 MgO
Alto teor de chumbo	35		7,2	4	12		58 PbO
Boro-silicato	80,5	3,8	0,4		12,9	2,2	
Alumínio-boro-silicato: <i>Standard</i>	74,7	6,4	0,5	0,9	9,6	5,6	2,2 B ₂ O
Fibra de vidro(baixo teor de álcalis)	55			16	10	15	4 MgO
Óptico de quartzo	50	1					19 PbO 8K ₂ O 13BaO ZnO
Alumínio - silicato	57	1,0		5,5	4	20,5	12 MgO

Fonte: Smith (1998), Callister (2006).

Os vidros de sílica vítrea ou sílica fundida apresentam elevada transmissão espectral ótica e não estão sujeitos à deterioração por radiação, o que provoca o escurecimento em outros vidros. Necessitam de altas temperaturas de fusão, mas podem trabalhar até temperaturas de 1.000°C. Possuem um coeficiente térmico de expansão baixo, alta inércia química e resistência ao choque térmico. O seu alto ponto de fusão o torna um produto difícil e dispendioso de produzir. São utilizados em laboratórios de alta tecnologia, em janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos, janelas de túneis de vento e para sistemas óticos em dispositivos espectrofotométricos. Os vidros com 96% de sílica são fabricados a partir de vidros de boro-silicato (75% SiO_2 , 20% BeO_3 e 5% de mistura de Na_2O , K_2O e Al_2O_3). São vidros com alta estabilidade térmica. Podem dar origem ao vidro poroso Vycor Glass, quando colocado em meio ácido (lixiviação) (GIMENEZ; FERREIRA; ALVES, 2012).

Os vidros soda-cal representam cerca de 90% de todos os vidros produzidos. São amplamente utilizados para a fabricação da maior parte das garrafas, frascos, potes, janelas, fechamentos, bulbos, produtos para iluminação, ou seja, produtos que não exijam grande resistência química e ao calor. Sua composição básica normalmente é de 71 a 73% em peso de sílica (SiO_2), 10 a 12% de óxido de cálcio (CaO) e 12 a 14% de óxido de sódio. O CaO e Na_2O diminuem o ponto de amolecimento do vidro de 1.600 para cerca de 730°C, melhorando sua trabalhabilidade. É comum a adição de 1 a 4% de MgO para impedir a devitrificação e de 0,5 a 1,5% de Al_2O_3 para aumentar sua durabilidade (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Os vidros ao chumbo (com alto teor de Pb) têm baixas temperaturas de fusão e trabalho. Possuem elevado índice de refração, brilho e densidade, por isso são usados como proteção para radiação, invólucros de lâmpadas fluorescentes, tubos de televisão e na indústria eletroeletrônica. Devido aos seus elevados índices de refração, também são usados como vidros óticos e para produção de artigos finos e objetos decorativos, nos quais recebe popularmente o nome de cristal. Os vidros boros-silicatos apresentam baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e estabilidade química. São largamente utilizados para a fabricação de equipamentos de laboratórios, tubagens, artigos de fornos faróis herméticos e utensílios domésticos (vidro pirex). Os vidros alumino-boro-silicato, por possuírem percentual de alumínio 10 vezes maior do que nos vidros sodo-cálcicos e menor teor de dióxido de boro, têm melhor durabilidade química. Partículas vítreas de alumino-boro-silicato são incorporadas em material odontológico (resina composta) para

melhorar suas propriedades e condições estéticas. Os vidros ópticos possuem alta densidade e alto índice de refração, sendo utilizados para a fabricação de lentes ópticas. Os vidros alumino-silicatos têm resistência à alta temperatura e baixo coeficiente de expansão. São usados em proteção contra calor ou choque térmico (AKERMAN, 2000).

Os vidros com baixo teor de álcalis, vidros alumínio-boro-silicatos de cálcio, são amplamente empregados na forma de fibras (fibras de vidro) em compósitos de matriz polimérica. Atualmente, têm sido obtidos vidros silicatos com propriedades ópticas especiais. O vidro fotocromático possui a característica de escurecer pela luz solar ultravioleta e o vidro fotossensível escurece permanentemente quando exposto à mesma radiação e se tornam resistentes à ação do ácido fluorídrico, permitindo aplicações artísticas. Os vidros policromáticos são sensíveis aos vários comprimentos de onda da luz. Também têm sido produzidos vidros silicatos nos quais são nucleados nanocristais semicondutores de sulfeto de cádmio, dando origem a vidros de cores vivas e propriedades ópticas especiais (ASKELAND; PHULÉ, 2008; ALVES, 2006).

2.3.3.2 Quanto à cor

O vidro pode apresentar colorações que vão do incolor à quase opacidade. A cor é uma característica interessante do vidro. Além do aspecto estético, artístico, decorativo ou de marketing, tem função utilitária de proteção contra a radiação solar. Nas garrafas de bebidas, por exemplo, a cor impede a passagem de radiações (ultravioleta) que interferem na qualidade do produto. Nas edificações, a coloração do vidro tem papel importante, uma vez que vidros especiais destinados a fechamentos, como os termos absorventes e os reflexivos, podem reduzir o consumo de energia elétrica no interior das edificações (MARTINS; PINTO, 2004).

A cor do vidro é função da adição de determinados elementos químicos à sua massa, que vão gerar cores variadas e contribuir para bloquear e/ou refletir a radiação responsável pelo aquecimento (infravermelha) e ao mesmo tempo permitir a passagem da luz visível e a visão através das janelas. As cores de vidros mais comuns são: incolor, verde, azul e âmbar. Estas colorações são obtidas pela interferência de adições durante o processo de fabricação. A adição de Fe_2O_3 impõe ao vidro uma tonalidade ligeiramente amarela

esverdeada. Com o uso de FeO a tonalidade é mais azulada, tendendo ao cerâmico. O óxido cromo Cr_2O_3 é um agente corante primário para todos os vidros verdes, uma vez que o cromo dá grande coloração ao vidro incolor. O verde esmeralda contém aproximadamente 0,125% de Cr_2O_3 , enquanto o verde geórgia contém perto de 0,018% de Cr_2O_3 e 0,002% de CoO. O verde-champanhe contém em torno de 0,20% de Cr_2O_3 , 0,01% de CoO, próximo de 0,025% de NiO. O vidro incolor é obtido pela mistura das tonalidades verdes saturadas pelo ferro e cromo. A adição de selênio dá aspecto rosado ao vidro e o cobalto proporciona uma tonalidade azulada. A cor âmbar é formada pela combinação dos íons Fe^{3+} e S^- juntamente com os íons Na^+ . A tonalidade é obtida com o uso de carbono na forma de carvão: adicionando mais carvão reduz-se mais o enxofre de sulfeto (S^-) e se obtém uma cor mais âmbar escura (MARTINS; PINTO, 2004).

QUADRO 4 - Classificação dos vidros quanto à cor

Cor do Vidro	Fe_2O_3	FeO	Cr_2O_3	Cr_2O_3 CoO	Cr_2O_3 CoO NiO	Cr_2O_3 Fe Cr	Cr_2O_3 Fe Cr Se	Cr_2O_3 FeCr Co	Fe^{3+} S^- Na^+
Amarelo/esverdeado									
Azul/cerâmico									
Verde esmeralda									
Verde geórgia									
Verde champanhe									
Branco									
Rosado									
Azulada									
Âmbar									

2.3.4 Produção e processamento

A matéria-prima natural para a produção de vidros está disponível em jazidas de areia com pureza adequada (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SHACKELFORD, 2008). Essa areia, juntamente com adições químicas específicas, confere aos vidros cores e propriedades adequadas. A massa resultante dessa mistura é aquecida a uma temperatura que corresponde à viscosidade de cerca de 10^2 poises e resfriada até o estado sólido com velocidade que não permite a cristalização do material (SMITH, 1998). Ainda no estado viscoso o vidro é moldado, estirado ou laminado de forma a obter-se a forma desejada.

Para obterem-se garrafas, jarros e invólucros de lâmpadas, o material em temperatura elevada é moldado por sopragem de ar, forçando o vidro fundido a adquirir a forma dos moldes. Peças planas como lentes óticas são produzidas comprimindo-se o material por meio de um êmbolo sobre um molde que contém o vidro fundido. Grandes peças como espelhos de telescópio são produzidas por meio de vazamento da massa do vidro para um molde aberto. Peças com forma de funil, como é o caso de tubos de televisão, são obtidas por moldação centrífuga até obter-se espessura de parede bastante uniforme. A grande maioria das chapas de vidro é produzida por um processo de flutuação conhecido como *float*, no qual uma massa de vidro ao sair do forno flutua na superfície de um banho de estanho fundido. A massa sofre resfriamento controlado enquanto se move sobre o estanho. Quando a superfície está suficientemente endurecida, o vidro passa por um forno de recozimento denominado *Annealing Lehr* e as tensões residuais são removidas, ocorrendo o recozimento do vidro (CALLISTER, 2006; SMITH, 1998).

Os vidros podem ser formados por outros processos, como: método sol-gel, deposição química de vapor, irradiação de nêutrons e *spray-pirólise*, entre outros. Segundo Alves, Gimenez e Mazali (2001), o vidro de silicato de sódio, por exemplo, pode ser obtido por evaporação de uma solução aquosa de silicato de sódio seguida de tratamento térmico para eliminação da água residual. O mais interessante desse processo é que o produto obtido é similar ao vidro de silicato de sódio de mesma composição produzido pelo método clássico de fusão/resfriamento.

Em alguns casos, com a finalidade de torná-los mais resistentes, os vidros são submetidos a tratamentos de tempera térmica. Nesta técnica, o vidro é aquecido até a temperatura de transição vítrea e abaixo do ponto de amolecimento. O vidro então é resfriado até a temperatura ambiente em meio a um jato de ar ou banho de óleo. Se a peça possui espessura adequada, o processo permite que a superfície do vidro se contraia pelo resfriamento enquanto o seu interior permanece quente, reajustando-se as mudanças dimensionais sem que haja tensões internas significativas. Quando o interior do vidro resfria e se contrai, as superfícies já estão rígidas, criando tensões de transição no interior do vidro e tensões de compressão nas superfícies. Esse tratamento de têmpera aumenta quatro vezes a resistência do vidro ao impacto, no caso de fratura, as tensões aplicadas em tração terão que ultrapassar as tensões residuais compressivas na superfície do vidro

(SMITH, 1998). As janelas laterais dos automóveis e os vidros de segurança usados em portas são exemplos de produtos temperados termicamente.

O vidro também pode ter sua resistência maximizada se for quimicamente fortalecido. Este é o caso do vidro alumino-silicato de sódio, que pode ter sua resistência aumentada por meio de imersão em nitrato de potássio à temperatura de 450°C durante seis a 10 horas. Os pequenos íons de sódio próximos da superfície do vidro são substituídos por íons maiores de potássio. A introdução dos íons de potássio na superfície do vidro dá origem ao aparecimento de tensões junto à superfície e ao aparecimento das correspondentes tensões de tração no interior do material. Esse processo de têmpera química pode ser usado em seções mais finas do que as que permitem a têmpera térmica, uma vez que a camada compressiva é muito mais delicada. O vidro fortalecido quimicamente é usado em janelas de aviões supersônicos e em lentes oftalmológica (SMITH, 1998).

2.3.5 Resíduos de vidro

Resíduos de vidro são partículas de vidros geradas no processo de produção, utilização e descarte dos mesmos. Considerando que o setor vidreiro é composto principalmente de segmentos de embalagem, utensílios domésticos, vidros especiais e vidros planos, os resíduos apresentam-se na forma de garrafas, embalagens com cores e dimensões variadas, de cacos, e pós finos. Trata-se de material não biodegradável, classificado, segundo as NBR 10.004 (ABNT, 2004a); 10.005 (ABNT, 2004b); 10.006 (ABNT, 2004c), como resíduo inerte não perigoso, classe IIA. Segundo dados da Associação Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2013), no Brasil os resíduos de vidro correspondem, em média, a 3% dos resíduos urbanos produzidos, dos quais 1% é proveniente de embalagens e o restante provém de quebras durante o processo de fabricação, tratamento, furação, corte e manuseio de peças de vidro.

O vidro apresenta alta taxa de aproveitamento e reciclagem. Segundo Ashby (2005), os resíduos de vidro apresentam fração reciclável da ordem de 0,7 a 0,8 (CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR SOFTWARE - CES, 2010). Comumente são utilizados como matéria-prima na fabricação de novos vidros (AKERMAN, 2000; MAUPIN, 1998; REINDL, 2003). Segundo Shayan e Xu (2004), o vidro é o único material inerte que pode

ser reciclado inúmeras vezes sem alteração significativa de suas propriedades químicas. Isso o torna um material muito atraente do ponto de vista do desenvolvimento sustentável. Segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro (ABIVIDRO, 2013), o uso de 60% de cacos leva a uma economia de 2/3 em massa de areia, recurso natural utilizado como fonte de sílica na fabricação do vidro (FIG. 8). Para a empresa de reciclagem *Berryman Glass Recycling*, do Reino Unido, 1 tonelada de resíduos de vidro reciclada permite economizar 1,2 tonelada de recursos naturais (BERRYMAN, 2011). Além disso, a adição de 10% de resíduo de vidro na carga de matéria-prima para fabricação de vidro gera economia de cerca de 4% de energia total nos fornos, 5% de emissão de CO₂ e redução de 9,5% no consumo de água na produção de vidro (ABIVIDRO, 2013).

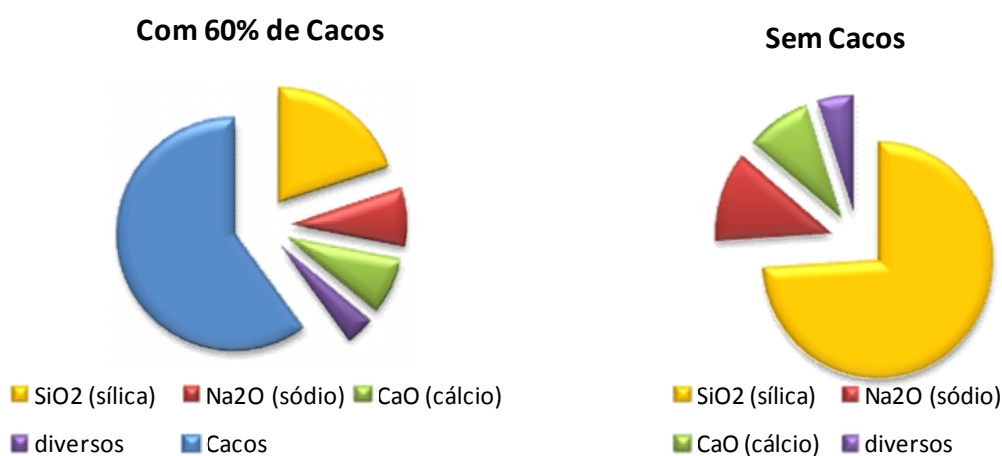


Figura 8 - Composição do vidro comum.
Fonte: adaptado da ABIVIDRO (2013).

Apesar de ser um material com alta taxa de reutilização e reciclagem primária (matéria-prima para novo vidro), sua utilização requer cuidados especiais, ou seja, exige separação seletiva, retirada de contaminantes/impurezas, limpeza e quebra em tamanhos homogêneos antes do reaproveitamento. Para Shayan e Xu (2004), um grande problema na reciclagem de vidros de embalagens é a cor: quando as cores dos resíduos se misturam, eles se tornam impróprios para fabricação de novos recipientes, podendo ser usados para outros fins ou enviados para os aterros.

O uso de embalagens de vidros como sucata é uma realidade em muitos países. Na Europa, em 2011, a reciclagem de vidro superou 70%. Segundo a Federação Europeia de

Recipientes de Vidro, *European Container Glass Federation* (FEVE, 2013), cerca de 11 milhões de toneladas ou 25 bilhões de garrafas e frascos de vidro foram coletados em 2011 em toda a região europeia, o que representa crescimento de 1,4% no índice de reciclagem em relação a 2008. Dos países europeus, destaca-se a Suíça, com taxa de reciclagem de 96%.

Segundo a agência norte-americana de proteção ambiental, *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2013), nos Estados Unidos em 2011, foram recuperados 41,1% das garrafas de refrigerantes/cerveja, 33,9% das garrafas de vinho e bebidas alcoólicas e quase 15% de frascos de alimentos. No total, 34,2% de todos os recipientes de vidro foram reciclados. Em alguns estados, como o da Califórnia, a taxa de reciclagem de garrafas de vidro chegou a 80%. Em Minnesota, essa taxa atingiu 47%. Atualmente, o Brasil produz em torno de 1 milhão de toneladas de embalagens de vidro por ano, utilizando como matéria-prima 470 mil toneladas ano de cacos de vidro e 530 mil toneladas de recurso natural (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRES, 2013). A FIG. 9 apresenta a evolução da reciclagem do vidro no Brasil nos últimos anos.

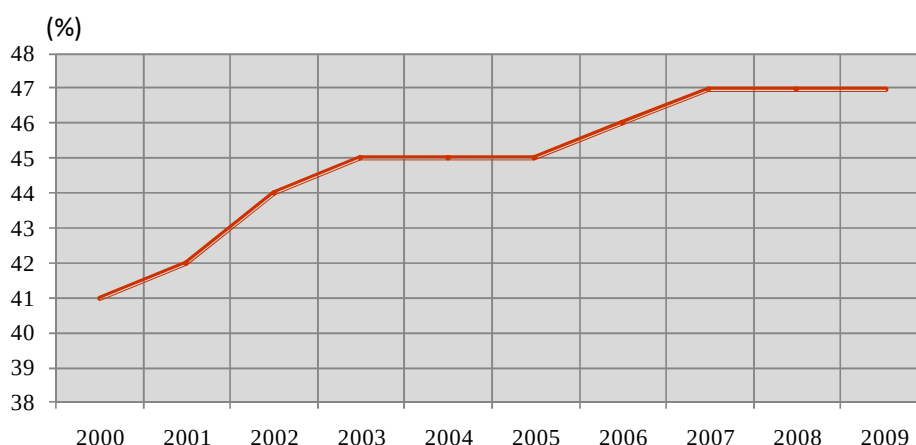


Figura 9 - Evolução dos índices de reciclagem de vidro no Brasil (% ano).
Fonte: ABIVIDROS (2013).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013) preconiza que a reciclagem de vidros no Brasil concentra-se amplamente no segmento de embalagens, sendo interessante ressaltar que apenas 20% do vidro utilizado em embalagens foram destinados aos aterros sanitários ou de forma ignorada. A parcela reciclada atingiu o patamar dos 47%, a parcela reutilizada totalizou 33%, dos quais 24% correspondem a reutilizações consideradas indevidas, em geral como embalagens de produtos fabricados informalmente.

A relativa facilidade de aquisição e seu baixo custo fazem do resíduo de vidro uma opção atraente para aplicação em diferentes setores e produtos da construção civil (SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001). Apesar da importância da reciclagem primária do vidro, a literatura mostra que no mercado de resíduos existem inúmeros potenciais de usos secundários para o resíduo de vidro. Estudo realizado em 2003 por John Reindl descreve diferentes formas de aproveitamento, utilização e reciclagem de resíduos de vidro, tais como: fabricação de fertilizantes agrícolas, louças, lã/espuma de vidro, abrasivos, preenchimento limpo e drenagem.

Como matéria-prima, os resíduos de vidro podem ser utilizados para fabricação de telhas, tijolos de vidro/painéis de parede, como agregados ou filer para o asfalto (*glasphalt*), agregados de concreto e na fabricação do cimento hidráulico (ANTÔNIO; CALMON; TRISTÃO, 2011; PEREIRA, 2011; BAZANT; BYARS; MORALES-HERNANDEZ; ZHU, 2004; POLLERY; REINDL 2003; SHAYAN; XU, 2004; SHI; RIEFLER; WANG, 2005; TOPCU; CANBAZ, 2004; DHIR *et al.*, 2004; HUGHES, 1990; SHAO *et al.*, 2000; JIN; MAUPIN, 1998; 1998; CRAMER; DE LA CRUZ, 1998; MEYER, 1998; MEYER; BAXTER; JIN, 1996). Trabalho recente relata pesquisa sobre a obtenção de solução de silicato de sódio para a produção de geopolímeros, utilizando sucata de vidro puro proveniente de resíduos urbanos (PAVILÍK *et al.*, 2010).

A reciclagem das micropartículas de vidro provenientes da confecção de furos e da lapidação das bordas das chapas de vidro muitas vezes não se concretiza no processo de reciclagem em função da dificuldade de transporte e manuseio. Outro problema do aproveitamento das micropartículas de vidro para fabricação de novos vidros é o processo pelo qual são feitas as furações e lapidações. Emprega-se grande volume de água para resfriamento das ferramentas de corte, ficando as micropartículas de vidro misturadas à água. Apesar de ser considerado um material inerte, se dispostos em rios pode aumentar o potencial hidrogeniônico (pH) e a turbidez da água e provocar o assoreamento dos rios (LUZ; RIBEIRO, 2008). Com o objetivo de reaproveitamento da água do resíduo de vidro, adicionam-se à mesma floclantes que agem de forma a facilitar a decantação das micropartículas de vidro em solução. Dessa forma, tem-se um aglomerado de micropartículas de vidro impregnado pelo floclante. Esse material, além de não ser biodegradável, quando descartado diminui a vida útil de aterros. Segundo Sagoe-Crentsil,

Brown e Taylor (2001), diversos produtos e potenciais mercados poderiam utilizar essas micropartículas em forma de lubrificantes e abrasivos na indústria cerâmica e como aditivos.

Na atual literatura não foram encontrados dados quantitativos de resíduo de micropartículas de vidro gerado nas indústrias. Sabe-se que a quantidade é relativamente pequena, se comparada ao resíduo de “cacos”. Estimativa da Pestana Vidros/Minas Gerais é de que uma indústria gere cerca de 100 kg mensais de micropartículas de vidro (informação verbal).

2.3.6 Materiais cimentícios confeccionados com resíduos de vidro

Os resíduos de vidro têm sido utilizados como agregados para fabricação de concreto e como matéria-prima para o cimento Portland. O uso de resíduo de vidro como agregado para concreto apresenta vantagens estéticas especialmente no caso de vidros coloridos. No entanto, segundo Shi e Zheng (2007), estudos realizados por Pike, Schmidt e Saia, na década de 60, utilizando resíduos de vidro como agregados para concreto, mostraram que os compostos cimentícios trincavam devido à reação química que ocorre entre as partículas de vidro, ricas em sílica, e os álcalis presentes na solução dos poros do concreto, ou seja, a reação álcali-sílica. De modo geral, a reação álcali-sílica está associada a partículas contendo sílica amorfa, que reagem com o álcali dando origem a um gel que sofre expansão na presença de água (item 2.3) e pode levar à fissuração do concreto, comprometendo o seu desempenho pela formação de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em trabalho de 1972, Phillips e Cahn (1972) mostram que o uso de até 35% de resíduo de vidro associado ao cimento de baixos teores de álcalis não provoca efeitos prejudiciais ao concreto. Resultados similares foram obtidos por Pattengil e Shutt, em 1973. Em 1974, Johnston mostrou que é possível a obtenção de resistências satisfatórias com o uso de resíduos de vidro como agregado gráúdo se associado à adição de cinzas volantes e cimentos de baixa alcalinidade.

A partir dos anos 90 os estudos sobre a incorporação de resíduos de vidros em concretos de cimento Portland se intensificaram em função de legislações de proteção ambiental. Meyer e Baxter (1997; 1998) realizaram estudos sobre o uso de vidros triturados e mostraram que seria possível fazer uma mistura de concreto usando 100% de vidros triturados como agregados. Foram utilizados 25% de vidros claros retidos na peneira # 8 e o vidro âmbar nas seguintes proporções: 25% passante pela peneira # 16; 25% peneira # 30; 15% peneira # 50 e 10% peneira #100.

Trabalho de pesquisadores australianos do CSIRO *Building Construction and Engineering*, relatado por Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001), mostra que resíduos de vidro triturados e peneirados têm potencial para serem utilizados como substituto da areia no concreto. Em muitos aspectos, o vidro que foi reduzido ao tamanho de agregado fino (menor que 2,46 milímetros) apresentou propriedades físicas semelhantes às de um agregado arenoso. Os autores mostraram que foi obtido desempenho satisfatório em ensaios de laboratório e testes de campo em que se incorporou ao concreto 20% de vidro triturado em substituição à areia fina. No entanto, foi relatado que os agregados de vidro podem vir contaminados com açúcar, o que poderia interferir no tempo de pega da mistura. Foi relatado que a areia de resíduo de vidro apresenta baixa taxa de absorção e características que podem afetar a trabalhabilidade do concreto. Trabalho anterior já havia ressaltado que para a fabricação de concretos com agregados de vidro é necessário maior teor de água para alcançar a mesma trabalhabilidade de um concreto confeccionado com agregados convencionais (POLLERY; CRAMER; DE LA CRUZ, 1998). Mais recentemente, Chen *et al.* (2006) e Topcu e Canbaz (2004) alertam para tal necessidade.

Xi *et al.* investigaram, em trabalho de 2004, a influência de diferentes tipos de vidro na reação álcali-sílica. Foram testados vidros utilizados na maioria dos recipientes de bebidas, incluindo vidro soda-cal, vidro pyrex e de sílica fundida. No ensaio ASTM C1260 (ASTM, 2001), os vidros planos e de pára-brisa praticamente não apresentaram expansão devido à reação álcali-sílica. Segundo os mesmos autores, as cores dos vidros parecem influenciar na reação álcali-sílica. Vidros incolores foram considerados mais reativos, seguidos pelo vidro âmbar (marrom). Resultado similar foi obtido anteriormente por pesquisadores da *Columbia University*, nos Estados Unidos da América (EUA). Meyer e Baxter (1997) e Jin, Meyer e Baxter (2000) identificaram que o Cr_2O_3 responsável pela coloração do vidro verde poderia inibir a expansão do concreto, contendo agregado de vidro: vidros contendo

1% de óxido de cromo poderiam suprimir a reação álcali-sílica. Isso sugere que o vidro verde em forma de micropartículas tem potencial para ser um inibidor barato da reação álcali-sílica. No entanto, quando o óxido de cromo é adicionado diretamente na mistura de concreto, a reação álcali-sílica não é reduzida (XI *et al.*, 2004). Além disso, estudos da *University of Sheffield*, no Reino Unido, constataram que não houve diferença nos testes com vidros nas cores verde, amarela e incolor (BYARS; MORALES-HERNANDEZ; ZHU, 2004).

Karamberi e Moutsatsou (2005) e Dhir *et al.* (2004) realçam a influência da cor do vidro (âmbar ou marrom, verde e branco) na resistência à compressão de argamassas e concretos: os resultados indicam que o vidro verde e o branco contribuem de forma mais eficaz para o desempenho mecânico do composto aos 28 dias do que o âmbar. No entanto, resultados diferentes foram obtidos por Park, Lee e King (2004) e Sobolev *et al.* (2007), que não encontraram diferença significativa no desempenho dos compostos fabricados com vidros de diferentes cores.

Corinaldesi *et al.* (2005) investigaram as propriedades mecânicas e as microestruturas de argamassas com substituição de 30 a 70% de areia fina por vidro moído. Foi relatado que nenhum efeito deletério pôde ser detectado macroscopicamente, devido à reação entre a pasta de cimento e o vidro moído com granulometria de até 100 µm, sendo observada expressiva melhoria do desempenho mecânico da argamassa.

Terro (2006) mostrou que, em geral, concretos fabricados com 10% de agregados graúdos e/ou miúdos de vidro apresentam melhores propriedades no estado fresco e endurecido à temperatura ambiente e a 70°C do que os fabricados com alto teor de substituição.

A composição química do vidro influencia fortemente o comportamento da expansão de argamassas contendo agregado de vidro miúdo (SACCANI; BIGNOZZI, 2010). Segundo esses autores, é necessário identificar as composições dos diferentes tipos de vidro e fazer um controle do processo de tratamento pós-consumo, a fim de evitar falhas inesperadas e indesejadas no concreto. Testes de solubilidade são sugeridos para realçar correlação direta entre a quantidade de sílica que estará disponível em solução para formação de gel e para a reação álcali-sílica na argamassa.

De acordo com Yuksel *et al.* (2013), a cor dos resíduos de vidro, quando utilizados como agregados (tamanho da partícula maior que 12,5 mm), afeta a reação álcalis agregado. Maiores expansões foram observadas em vidros incolores; amostras com vidro âmbar e verde não apresentaram expansão aos 90 dias.

As propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas fabricadas com resíduos de vidro foram investigadas por Ling e Poon (2011). Os resultados revelaram que é possível a utilização de 100% de areia de vidro para a fabricação de argamassas autoadensáveis. Foram produzidas argamassa com resistências à compressão de 40 MPa e resistência a flexão de 6 MPa aos 28 dias.

No entanto, alguns pesquisadores ressaltam que, dado o estágio de conhecimento da reação álcali-sílica, não é recomendável o emprego do resíduo de vidro como agregado em peças de responsabilidade estrutural (THOMAS, 2011; OLIVEIRA; BRAGA, 2008; SANTOS *et al.*, 2009; FRAGATA *et al.*, 2007; KOLLER *et al.*, 2007; KRUGER; LÓPEZ; AZEVEDO; BARBOSA NETO, 2005; XI *et al.*, 2004). Shayan *et al.* (2004) recomendam que para minimizar esses efeitos devem-se incorporar ao concreto materiais como cinzas volantes, sílica ativa ou escória de alto forno.

Diferentes estudos têm mostrado a influência do tamanho das partículas de vidro sobre a expansão de argamassas e concretos. Para Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), os resultados são difíceis de generalizar: os tamanhos mínimos que promovem expansões deletérias variam de cerca de 150 µm para partículas com mais de 1 mm, dependendo do tipo de vidro (cor, por exemplo) e do tipo de condições utilizadas para os testes (imersão, temperatura, etc.).

No estudo de Diamond e Thaulow (1974), não se detectou um tamanho limite da partícula para a ocorrência da reação álcalis-sílica, mas constatou-se que a taxa de reação é maior quando se utilizam partículas menores. Bazant, Jin e Meyer (1998) verificaram que o tamanho das partículas de vidro de cerca de 1,5 mm causa expansão excessiva no composto, enquanto que partículas menores que 0,25 mm não provocam expansão em testes de laboratório. Reindl (2003) cita que o vidro fosco soda-cal com malha menor que #100 inibe a reação álcali-sílica. Isso está de acordo com os resultados de Cyr, Rivard e Labrecque (2009) e Carles Gibergues *et al.* (2008), que relataram que os agregados de

vidro podem apresentar atividade pozolânica quando são moídos em alguns décimos de micrômetro ou menores.

Com base na resistência à compressão, Meyer, Baxter e Jin (1996) evidenciaram que abaixo de 45 μm o vidro pode ter atividade pozolânica. Carpenter e Cramer (1999) também verificaram que o vidro em micropartículas foi eficaz na redução da expansão da reação álcali-sílica, semelhante aos efeitos de cinzas volantes e escórias. Efeito semelhante foi observado por Kawamura e Fuwa (2003).

Pesquisa desenvolvida por Jin, Meyer e Baxter (2000) mostrou que partículas de cerca de 1,2 mm causam maior expansão das barras de argamassa no teste álcali-sílica do que os resíduos de tamanho compreendido entre 0,15 e 4,75 mm. A maior expansão ocorreu quando se utilizaram 100% de agregado de vidro.

Para Xi *et al.* (2004), quando o resíduo de vidro é triturado até a malha # 50 ou menores, nenhum dano por expansão álcali-sílica é observado. Para eles, isso significa que a reação álcali-sílica aumenta com o aumento da partícula de vidro.

Quando 30% de partículas de vidro menores que 38 μm são utilizados em substituição ao cimento, são necessários 90 dias para se obter resistência similar à de uma mistura sem substituição (SHAO *et al.*, 2000). Com a mesma substituição obtiveram-se resistências superiores às obtidas com o uso de cinzas volantes e inferiores às com sílica ativa. Nos trabalhos de Shi, Riefler e Wang (2005), foram necessários apenas 28 dias para uma substituição de 20% de vidro de finura de 467 m^2/kg para se chegar ao mesmo resultado do material sem substituição. Com o uso de partículas menores que 264 m^2/kg atingiram-se melhores resistências do que as obtidas com o uso de cinzas volantes, em todas as idades estudadas.

Shayan e Xu (2004) concluíram que 30% de resíduo de vidro poderiam ser incorporados em substituição ao cimento ou agregados sem quaisquer efeitos prejudiciais a longo prazo. Seus resultados indicam que o uso do vidro como agregado miúdo (800 m^2/kg) tem efeito mais positivo na resistência do que se utilizada como substituição ao cimento. A resistência máxima relativa foi de 0,87 para a substituição de 10% de vidro. Esses resultados foram atribuídos à menor velocidade da reação pozolânica.

Trabalho de López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) mostrou que na substituição de 5% em peso do agregado miúdo por vidro em uma granulometria variando entre 150 e 300 μm se obtém aumento de 60% na resistência à compressão do concreto, o que seria causado pela ação pozolânica e/ou diminuição da porosidade do concreto devido à penetração do vidro fino nos vazios. Acima dessa percentagem, houve diminuição da resistência à compressão do concreto.

Em 2006, Chen *et al.* (2006) investigaram as propriedades de concretos fabricados com diferentes teores de resíduos de vidro provenientes de tubos de imagens na forma de partículas cilíndricas de tamanho compreendido entre 38 e 300 μm , sendo 40% inferiores a 150 μm . Os resultados registraram melhoria das propriedades com o uso de 40-50% de resíduos.

Em 2009 mostrou-se que a substituição de cimento por micropartículas de vidro em 25% diminui ligeiramente a resistência aos sete e 28 dias, mas não teve qualquer efeito aos 90 dias (ZHI; CAIJUN; JIANMING, 2009). O trabalho mostra, também, que as micropartículas de vidro foram mais eficazes do que a escória de alto forno e cinzas volantes, melhorando a resistência à penetração de cloretos do concreto. Por outro lado, as micropartículas de vidro diminuíram significativamente a resistência aos sete e 90 dias para concretos leves. Os resultados demonstram que a substituição do cimento compreendida entre 10 e 20% reduz a resistência, enquanto a substituição de 40% de agregado fino tem pouco efeito sobre a resistência à compressão.

Em publicações feitas em 2009 e em 2010 por Jain e Neithalath, investigou-se a influência da sílica das micropartículas de vidro (72,4% SiO_2) e sílica ativa (93,4% SiO_2) para substituição ao cimento. A pasta com micropartículas de vidro mostrou menor porosidade, indicando maior resistência à lixiviação de íons Ca devido à presença de NaOH na solução de seus poros, o que reduz a solubilidade de hidróxido de cálcio, devido ao efeito do íon comum. Os autores, em 2010, discutiram a influência do cloreto sobre a microestrutura e a resistência à penetração em concretos contendo cinzas ou micropartículas de vidro como material de substituição parcial ao cimento. Tanto as micropartículas de vidro quanto as cinzas apresentaram permeabilidade menores em relação ao concreto comum, especialmente em maiores idades, indicando a influência desses materiais no refinamento da microestrutura.

Dumitru *et al.* (2010) estudaram o comportamento de compostos cimentícios fabricados com 30, 45 e 60% de resíduo de vidro (3 a 0,3 mm) em substituição à areia natural e de concretos com substituições do cimento por 7,5, 15 e 25% de micropartículas de vidro (diâmetro médio de 54,1 μm). Os vidros estudados foram do tipo branco e verde. Os resultados revelaram que a incorporação de 45% de vidro como agregado fino está associada ao aumento da resistência à compressão e à flexão. No entanto, a resistência à tração por compressão diametral diminuiu. O concreto apresentou menor retração e um coeficiente de difusão de íons cloretos significativamente menor. Concretos confeccionados com micropartículas de vidro em substituição ao cimento apresentaram menores resistência à compressão e maior retração por secagem que a mistura de referência, mas atenderam aos requisitos de projeto. Os autores chamam a atenção para a importância do teor de sódio presente na composição do vidro: altos teores de sódio do vidro podem levar à confecção de um cimento aditivado com alto teor de álcalis, o que poderia prejudicar o composto na presença de agregados reativos.

Pesquisa recente desenvolvida por Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011) mostrou atividade pozolânica de partículas de resíduo de vidro com teores de vidro (10-40% de substituição do cimento) e finura (menores de 40 μm – 540 m^2/kg até 2,5 mm, 2,2 m^2/kg). Os resultados mostraram que resíduos de vidro de cores diferentes apresentam atividade pozolânica, que aumenta com a finura de suas partículas. Os índices de resistência à compressão aumentam quando se utilizam até 40% do vidro de finura 540 m^2/kg . Resistências acima de 90% podem ser obtidas após sete dias de cura para 10% do vidro, seja qual for a finura do vidro. Após 90 dias de cura para 20% do vidro, só quando a superfície específica é superior a 200 m^2/kg . Com finura de transição em torno de 30 m^2/kg (140 μm), a atividade pozolânica se torna importante. Para partículas maiores que (140 μm) foi detectada uma atividade pozolânica pequena, confirmada pelo consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$; a formação de hidratos C-S-H e aumento de 10% (5 MPa) na resistência à compressão em comparação com uma mistura inerte. A reação álcali-sílica foi detectada para superfícies específicas inferiores a 4,5 m^2/kg .

O uso de partículas de vidro *Vycor Glass* (menores que 100 μm) em substituição a 20% de cimento em concretos confeccionados com agregados miúdos e do mesmo vidro foi

recentemente avaliado por Thomas (2011). Os dados indicam que as micropartículas de vidro comportam-se como pozolanas e previnem a expansão devido à reação álcali-sílica.

Moesgaard *et al.* (2011) analisaram a trabalhabilidade e o comportamento mecânico de compostos cimentícios com substituição de 30% de cimento por partículas de vidro cal-alumino-silicato e ou calcário. Eles concluíram que a combinação de calcário e vidro no mesmo cimento proporciona significativo aumento da resistência mecânica se comparado à obtida a partir das contribuições individuais de cada componente. Isso provavelmente está relacionado ao elevado teor de alumina presente no vidro, que faz com que a reação pozolânica ocorra em maior escala. No campo dos materiais cimentícios, uma outra utilização para as micropartículas de vidro seria usar as micropartículas de vidro para corrigir o teor de sílica e cal do metacaulim, de forma a melhorar o desempenho do material após ativação alcalina (PINTO, 2004).

Há que se investigar, ainda, de forma mais aprofundada, a utilização do vidro na reação álcali-sílica, na atividade pozolânica, na resistência e durabilidade dos compostos em seus diferentes usos. No entanto, foi possível constatar, a partir dos vários trabalhos consultados, a potencialidade do uso do resíduo de vidro como material pozolânico. Sua utilização como aglomerante não apresentou desvantagens às propriedades mecânicas dos concretos quando em quantidades controladas. A cor do vidro parece influenciar a reação álcali-sílica, mas não ficou clara a influência da composição do vidro (expressa pela cor) na atividade pozolânica. A constatação de redução da trabalhabilidade em função de maiores quantidades de resíduo nos concretos sugere o controle da relação a/c ou o emprego de aditivos. Contudo, sua utilização em substituição ao cimento Portland requer cuidados especiais. Na literatura consultada parece não haver consenso sobre a influência do tamanho da partícula no desempenho dos compostos produzidos. Isso indica que existem lacunas nesse campo de estudo que devem ser investigadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland foi de caráter experimental. Para determinar as potencialidades da utilização do resíduo de vidro, considerou-se a abordagem habitual de se avaliar as principais propriedades nas pastas e argamassas e concretos fabricadas com 10 e 20% de substituição, em peso, de cimento por micropartículas de vidro incolor e de cor âmbar. Os critérios de substituição do cimento por micropartículas de vidro seguiram orientação da professora Joana Sousa Coutinho, que pesquisa o assunto há mais tempo na Universidade do Porto em Portugal (COUTINHO, 2014). Para desenvolver o programa experimental, além das misturas com adição de micropartículas de vidro, foi feita amostra de controle com 100% de cimento. Após testes preliminares que definiram os caminhos a seguir, o trabalho foi desenvolvido em dois momentos. No primeiro, realizado em Portugal, estudaram-se pastas, argamassas e concretos confeccionados com resíduo de vidro incolor. No segundo, realizada no Brasil, estudou-se, em pastas e argamassas, a influência da composição química do vidro, traduzida neste trabalho pelo uso de vidro incolor e âmbar, na reatividade da sílica presente no vidro com o hidróxido de cálcio. Nesses experimentos foi dada atenção especial para os diferentes ensaios de reatividade com o hidróxido de cálcio relatados na literatura. As etapas do trabalho experimental são apresentadas na FIG. 10.

Os experimentos realizados em Portugal foram feitos no Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST) e no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC), ambos da Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto (FEUP). Também foram realizados ensaios na Indústria de Cimentos Secil. No Brasil, a grande maioria dos ensaios foi realizada na Universidade Federal de Minas Gerais (Laboratório de Ensaios Especiais da Escola de Engenharia, Laboratório de Materiais Nanoestruturados do Departamento de Química e Centro de Microscopia), na Universidade Federal de São João Del Rei (Laboratório de Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica), na Universidade do Estado de Minas Gerais (Centro de Estudos em *Design* e Tecnologia) e no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Laboratório de Materiais, Laboratório de Química e Laboratório de Construção Civil). Foram também realizados ensaios no Laboratório de Controle de Processos e Medição de Partículas do SENAI/ FIEMG, no Laboratório de

Análise da Companhia Nacional de Cimentos, no Laboratório da Supermix e nos Laboratórios de Cimentos Brenand. A metodologia utilizada seguiu os critérios dos laboratórios em que foram realizados, adotando-se normas cabíveis a cada tipo de procedimento (brasileiras, europeias e americanas).

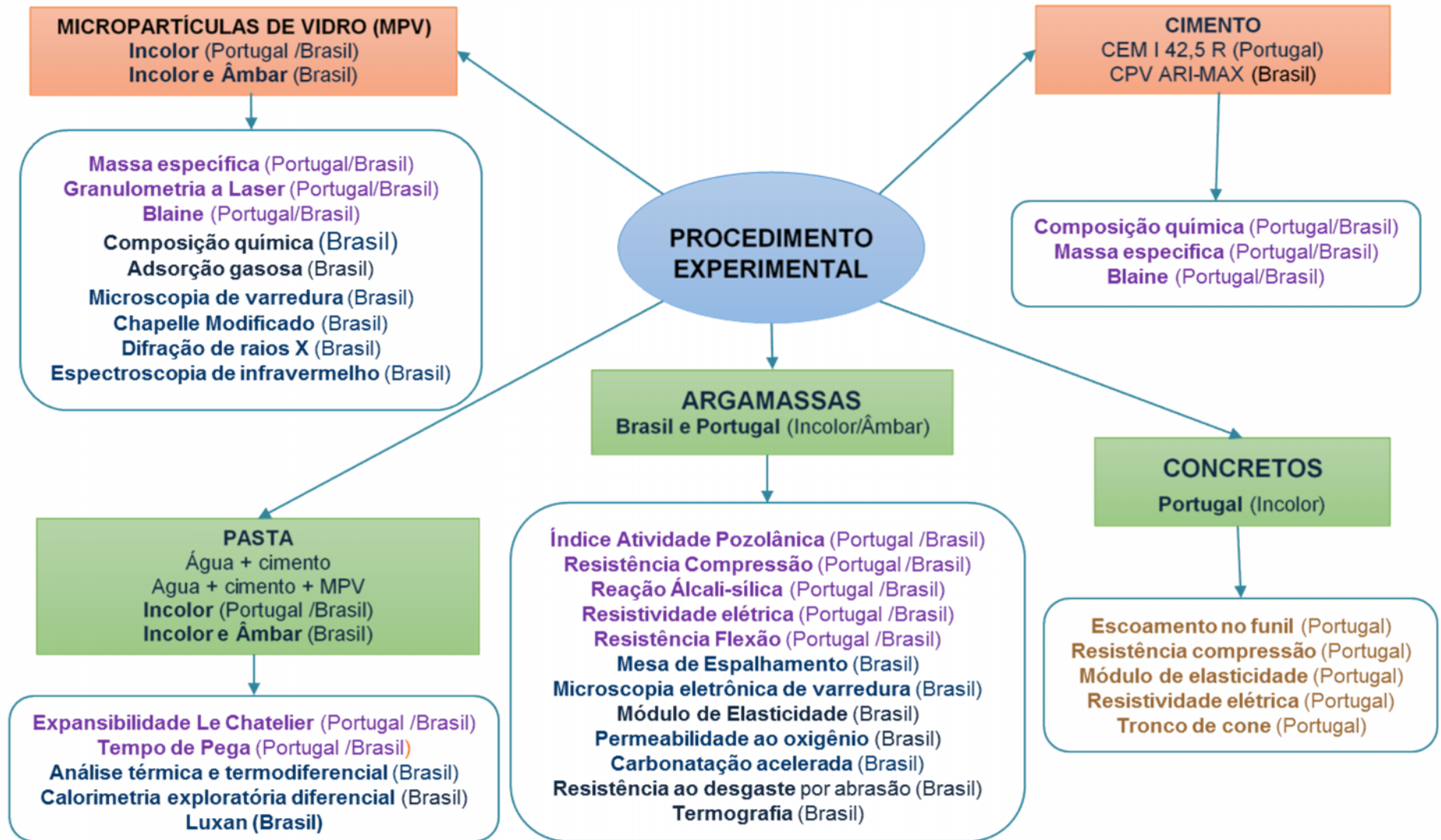


Figura 10 - Etapas do procedimento experimental.

3.1 Materiais

Foram estudados resíduos de vidros incolor e de cor âmbar provenientes da Indústria Brasileira de Vidros Pestana, situada na cidade de Belo Horizonte, MG. Inicialmente pretendia-se trabalhar com o resíduo de vidro produzido diretamente na indústria, oriundo das operações de polimento e furação. No entanto, foi constatado que esses resíduos eram altamente contaminados por lubrificante, floclantes e poeira. A eliminação desses contaminantes só seria possível com lavagem, caso contrário ocorreria o fenômeno de eflorescência no topo dos corpos de prova (SALOMÃO *et al.*, 2010). De forma a se obter melhor controle das variáveis de estudo, optou-se por produzir o material de pesquisa (micropartículas de vidro) em laboratório a partir de pedaços de vidros resultantes de quebra e/ou sobras de cortes. O material foi coletado na empresa, lavado, seco e submetido manualmente a uma primeira redução utilizando-se esferas cerâmicas, de modo a facilitar a etapa seguinte de trituração (FIG. 11).

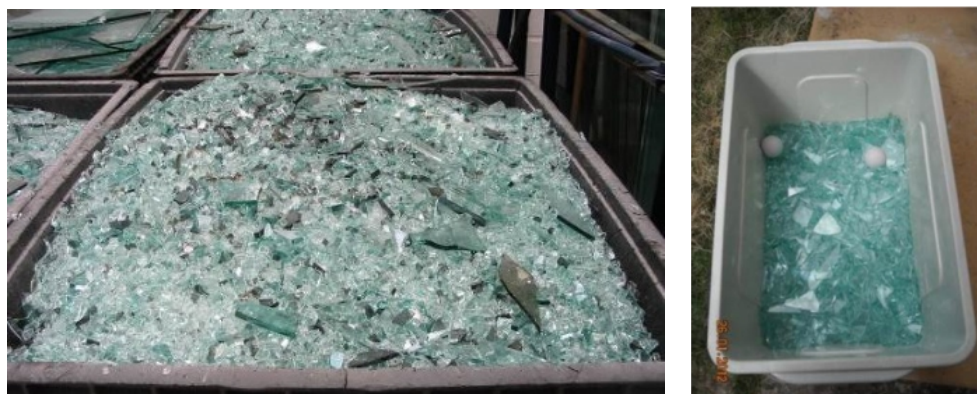


Figura 11 - Resíduo de vidro.

Após o processo de pré-redução, os pedaços de vidro foram triturados em um moinho de bolas de aço, sendo 25 bolas de Ø 32 mm e 15 de Ø 50 mm e massa específica de 7660kg/cm^3 , via seca, previamente preparado (FIG. 12). Foram produzidos 20 kg de cada tipo de resíduo de vidro. O processo de cada moagem durou cerca de 24 horas e foi realizado pelo Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.



Figura 12 - Moagem do resíduo de vidro.

Após o processo de fabricação das micropartículas de vidro em laboratório, o material foi pesado, separado, acondicionado em saco plástico, lacrado, etiquetado e embalados dentro de recipientes plásticos para serem armazenados e transportados (FIG. 13).



Figura 13 - Micropartículas de vidro acondicionadas.

Para a produção das pastas, argamassas e concretos seguiram-se os procedimentos determinados por cada país. Em Portugal, utilizou-se o cimento Portland tipo CEM I 42.5R (EN 197-1, 2012). No Brasil, o cimento utilizado, tanto para as pastas quanto para as argamassas, foi o Portland de alta resistência inicial, tipo CPV-ARI (ABNT NBR 5733, 1991). O emprego desses cimentos justifica-se em virtude de apresentarem baixo teor de adições, o que minimiza as variáveis de análise. Além disso, possuem alto teor de silicato tricálcico (C_3S), o que disponibiliza maior quantidade de hidróxido de cálcio, em menor espaço de tempo para as reações pozolânicas. Utilizaram-se como agregado miúdo areias normalizadas. Nos ensaios de Portugal, a areia empregada foi a normalizada CEN, em conformidade com o Comitê Europeu de Normalização - EN 196-1 (IPQ, 2006a). A areia é

natural, siliciosa, de grãos arredondados, massa específica de 2.620 kg/m^3 , teor de sílica de 98% e distribuição granulométrica utilizada descrita na TAB. 1. A areia utilizada nos experimentos do Brasil foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em conformidade com a norma brasileira vigente NBR 7214 (2012), com massa específica de 2.650 kg/m^3 . A granulometria utilizada é descrita na TAB. 1. Nos ensaios de reação álcali-sílica realizados no Brasil, foi usada areia produzida por moagem de basalto.

Para a produção dos concretos fabricados apenas em Portugal, foi adotado como agregado graúdo de brita gnaiss com diâmetro máximo característico de 16 mm e massa específica de 2.620 kg/m^3 . Para a redução do teor de água e melhora da fluidez da mistura, utilizou-se 1,91% de aditivo Sika Visco Crete 3006 como superplastificante, adicionado como último material na betoneira.

TABELA 1 - Granulometria disponíveis das areias normalizadas de Portugal/Brasil

Portugal		Brasil	
Abertura da peneira (mm)	Resíduo acumulado (%)	Abertura da peneira (mm)	% utilizada
1,6	7 ± 5		
1,0	33 ± 5	1,2	25
0,5	67 ± 5	0,6	25
0,16	87 ± 5	0,3	25
0,08	99 ± 5	0,15	25

Fonte: IPQ (2006a).

Fonte: ABNT (2012).

Em Portugal, a água utilizada estava em conformidade com a norma portuguesa EN 1008 (IPQ, 2003): valor máximo de sólidos totais de $5.000 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$, pH compreendido entre 5,5 e 9,0 e teor máximo de ferro 10^{-6} g/cm^3 . No Brasil, a água foi disponibilizada para consumo na região metropolitana de Belo Horizonte pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). A composição física e química no período dos experimentos é apresentada na TAB. 2. Esses resultados foram obtidos no site www.copasa.com.br em outubro de 2013.

TABELA 2 - Propriedades físicas e químicas da água (COPASA)

Parâmetro	Unidade	Número de Amostras		Valor Médio
		Mínimo	Analisados	
Cloro	mg/L Cl	619	741	1,01
Coliformes totais	NMP/100ml	619	740	97,97
Cor	UH	143	248	0,02
Escherichia Coli	NMP/100ml	619	740	-
Fluoreto	mg/L F	0	106	0,75
Turbidez	UT	619	740	0,32
pH	-	0	248	8,20

Em ambos os países, na confecção das pastas utilizou-se a mesma relação água-cimento ou água-cimento + micropartículas de vidro. Na confecção das argamassas utilizou-se a proporção de 1 de aglomerante (cimento ou cimento + micropartículas de vidro) para 3 de areia e relação água-cimento de 0,5. Nos ensaios de reação álcali-sílica o traço foi de 1:2,25 e fator água-cimento de 0,5. Em algumas situações, em função de procedimentos padronizados, adotaram-se traços diferentes. Nos ensaios de calorimetria exploratória diferencial, a relação água-cimento na pasta foi de 0,4. Os concretos foram produzidos com 1 de aglomerante (cimento ou cimento + micropartículas de vidro), 2 de areia, 2 de brita e 0,45 de filler calcário (o filler foi adicionado para se conseguir um concreto autoadensável), fator água-cimento ou água-cimento + micropartículas de vidro de 0,41 e 0,019 de superplastificante em relação à massa do aglomerante.

3.2 Métodos

O método de pesquisa se deu segundo quatro diferentes linhas de trabalho: caracterização físico-química dos cimentos e das micropartículas de vidro; estudo da reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio; avaliação da influência das partículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco; análise da influência do micropartículas de vidro na microestrutura e no desempenho dos compostos cimentícios no estado endurecido.

3.2.1 Caracterização físico-química dos cimentos e das micropartículas de vidro

A caracterização dos cimentos e das micropartículas de vidro foi feita por análise da composição química, determinação da massa específica, avaliação da granulometria e superfície específica. As micropartículas de vidro também foram caracterizadas quanto a toxicidade, solubilidade e microestrutura.

A composição química do cimento e das micropartículas de vidro foi realizada por volumetria e titulação via úmida, segundo as normas vigentes em cada país. Também foi realizada, no Brasil, a análise qualitativa dos componentes presentes nas micropartículas de vidro. Utilizou-se a técnica de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS), em um equipamento EDX – 720 marca Shimadzu. A toxicidade das micropartículas de vidro foi analisada por ensaios de solubilização e lixiviação, segundo as NBR 10.005 (ABNT, 2004a) e 10.006 (ABNT, 2004b).

Em Portugal, as massas específicas do CEM I 42.5R e das micropartículas de vidro incolor foram determinadas pelo método do frasco de Chapman, segundo a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil E-64 (LNEC, 1979). No Brasil, o ensaio foi realizado segundo o mesmo método, de acordo com as normas do Mercado Comum do Sul (MERCOSUL) NM 23 (2001), tanto para o cimento CPV-ARI quanto para os dois tipos de micropartículas de vidro.

A finura do cimento e dos resíduos de vidro foi avaliada, em Portugal e no Brasil, por meio da superfície específica, utilizando o permeabilímetro de Blaine. No Brasil, usou-se, também, para o vidro, os métodos de adsorção gasosa via Brunauer, Emmett e Teller (BET) (adsorção e dessorção) e via Barrett, Joyner e Halenda (BJH) (desorção), realizada em equipamento Nova 1000E Autosorb-1 MP da Quantachrome com sistema de adsorção e dessorção automatizado com equilíbrio de nitrogênio gasoso. O erro do equipamento é de 5%.

A distribuição granulométrica das micropartículas de vidro foi obtida no Brasil pela técnica de espalhamento do feixe de laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) em um granulômetro Cilas 920. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada na caracterização morfológica (elétrons secundários) e no estudo da

composição elementar (elétrons retroespalhados) dos vidros pulverizados. As amostras foram caracterizadas utilizando microscópio modelo Quanta 200F, do fabricante FEI, com tensão de aceleração de 200 V a 30 kV, corrente do feixe >100 nA, resolução 3,5 nm a 3 kV em baixo vácuo, aumento de 12x a 1.000.000 vezes e detector de elétrons secundários e retroespalhados.

3.2.2 Reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio

O estudo da reatividade das micropartículas de vidro seguiu métodos descritos na literatura, alguns normalizados e outros não. Foram utilizados os métodos chamados de diretos (ensaio Chapelle Modificado e ensaio de condutividade elétrica) e indiretos (avaliação da cristalinidade, análise termogravimétrica - TGA, análise termodiferencial - DTA e índice de atividade pozolânica - IAP).

3.2.2.1 Métodos diretos

A determinação direta da reatividade pozolânica foi realizada apenas no Brasil para os dois tipos de micropartículas de vidro. O ensaio Chapelle Modificado (Item 2.1.7.1) foi realizado em dois laboratórios distintos (Laboratório de Ensaio Especiais da UFMG e Associação Brasileira de Cimento Portland), de forma a se validar os resultados, uma vez que o laboratório da UFMG não possuía rotina para o ensaio. Também foi avaliada, pelo mesmo método, a pozolanicidade da sílica ativa fornecida pela Camargo Corrêa (teor de sílica $> 85\%$ e superfície específica entre 15 e 35 m^2/g) como material de referência. O ensaio baseou-se na NBR 15895 (ABNT, 2010a), que segue as diretrizes gerais propostas por Raverdy *et al.* (1980). Foram ensaiados três corpos de prova para cada tipo de vidro e um para a sílica ativa.

O ensaio de condutividade elétrica, segundo o método proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989) foi realizado de acordo com o procedimento descrito no item 3.2.3. Foram testadas partículas de cimento e de vidro. O cimento, apesar de não ser pozolânico, foi testado com o objetivo de validar o ensaio no tocante à adsorção dos íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ na superfície das partículas, com a consequente diminuição da condutividade da solução, sem

necessariamente ocorrer a reação pozolânica. Foram realizados três ensaios para cada material a ser analisado.

3.2.2.2 Métodos indiretos

A avaliação da estrutura do arranjo atômico das micropartículas de vidro no Brasil foi realizado por difratometria de raios-X (DRX) e espectroscopia vibracional de absorção na região do infravermelho (FTIR). Para a difração foi utilizado equipamento marca Shimadzu, modelo XRD 7000s com potência 3kW, goniômetro Theta-Theta, raio 200 a 275 mm, passo mínimo 0.0001, grau, faixa -6 a +82, modo -6 a +132, velocidade de retorno 500 graus/min, varredura 0,05 a 25 graus/min, distância dos Raios-X (eixo) 85 mm. A espectroscopia foi realizada em equipamento Perkin-Elmer, modelo 2838, utilizando iodeto de cério (CsI) como veículo, na região de 200-4000 cm^{-1} .

As análises térmicas tipo TGA e DTA foram feitas somente no Brasil, em um aparelho DTG 60 H, marca Shimadzu, que realiza simultaneamente ambas as análises em atmosfera de nitrogênio. O equipamento opera da temperatura ambiente até 1.100°C com precisão de $\pm 1.000 \mu\text{V}$ no DTA e $\pm 0,001 \text{ mg}$ no TGA. A capacidade máxima do TGA é de 1g. Foi utilizada taxa de aquecimento de 10°C por minuto (PÁDUA, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2010; IONASHIRO, 2005). As análises foram realizadas em amostras de 10mg, obtidas de corpos de prova que após 28 dias de cura de foram imersos por 10 minutos em acetona para interromper as reações de hidratação e, em seguida, foram moídos.

Os ensaios para determinação do IAP foram realizados em Portugal segundo a norma portuguesa EN 4220 (IPQ, 2010a), que sugere que seja feita a proporção estudada na mesma idade e condições (10 e 20%). No Brasil esse índice foi medido de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 1992a), sendo o cimento parcialmente substituído por 35% de material de partículas de vidro. Foram realizados três corpos de prova para cada mistura estudada.

3.2.3 Influência das micropartículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco

Para avaliar a influência das micropartículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco, foram realizados, nas pastas de cimento, ensaios de tempo de pega, calorimetria e expansibilidade. Nas argamassas e nos concretos, foram realizados ensaios de trabalhabilidade em mesa de espalhamento, sendo a trabalhabilidade determinada pelo teste de escoamento no funil e espalhamento por tronco de cone. Tais ensaios foram efetuados com e sem substituição do cimento por micropartículas de vidro.

3.2.3.1 Expansibilidade

O ensaio de expansibilidade teve o objetivo de avaliar a contribuição das partículas de vidro para a estabilidade dimensional dos compostos no que diz respeito à eventual ocorrência de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do concreto. Como a expansibilidade pode se manifestar meses e/ou anos depois da fabricação dos compostos cimentícios, optou-se por verificar essa característica por meio do método das agulhas de Le Chatelier (FIG. 14). O ensaio foi realizado em Portugal com base na norma ASTM C 1567-08 (ASTM, 2010) e com as alterações sugeridas pela EN 196-3 (2006a). No Brasil os ensaios seguiram a metodologia adotada em Portugal. Para este ensaio foram fabricadas, em Portugal, duas amostras e, no Brasil, três de cada tipo de pasta, considerando-se a consistência normal. Os moldes foram preenchidos com a pasta, cobertos com duas placas de vidro, comprimidos por um pequeno peso e mantidos em um recipiente contendo água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Elevou-se a temperatura da água a 100°C , após esse tempo mediu-se o afastamento entre as duas agulhas, mantendo-se depois esta temperatura por três horas, onde foi realizada a medição e novamente após duas horas. A diferença registrada entre a primeira e a última medição representa a expansibilidade da pasta de cimento que não deve exceder, de acordo com as normas, o valor de 10 mm.

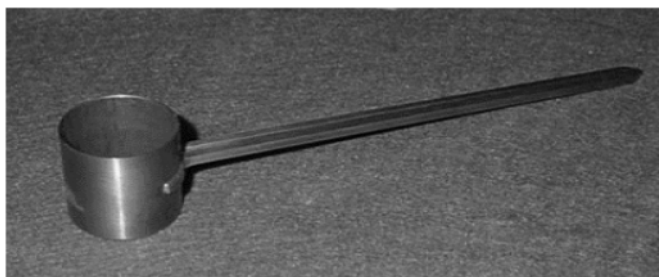


Figura 14 - Equipamento usado para medir expansibilidade. Agulha de Le Chatelier.

3.2.3.2 Tempo de pega e calorimetria

Para definir a influência da adição das micropartículas de vidro no tempo decorrido entre a amassadura e a perda de plasticidade da mistura foi avaliado o tempo de pega da mistura. Os ensaios foram realizados em Portugal segundo as normas portuguesas EN 196-3 (IPQ, 2006c). No Brasil o tempo de pega foi realizado segundo a NBR 11581 (ABNT, 1991b).

O tempo de pega também foi analisado indiretamente pelo ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) com compensação de potência. O ensaio teve como objetivo acompanhar as alterações físicas ou químicas das amostras associadas à geração de calor. Pelo ensaio, pôde-se avaliar qualitativamente a influência das adições no calor de hidratação e no tempo de pega das pastas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Nessa técnica a amostra e o material de referência são mantidos isotermicamente por aquecedores individuais e o parâmetro medido é a diferença na potência de entrada desses aquecedores. O fluxo de calor é medido de forma semiadiabática (amostra mantida em condição de isolamento térmico, sendo as perdas de calor para o ambiente, mínimas). Foram analisadas pastas confeccionadas com relação de 0,4 de água/cimento ou água/cimento + partículas de vidro (procedimento padrão do laboratório). O ensaio foi realizado na Supermix em equipamento de calorimetria marca Grace Adiacal Sn 1272434, em caixa lacrada equipada com quatro canais e quatro termopares, que registram a temperatura das amostras (FIG. 15).



Figura 15 - Equipamento para ensaio de calorimetria.

A facilidade de manuseio e homogeneidade das argamassas confeccionadas com e sem micropartículas de vidro foi avaliada pelo ensaio em mesa de espalhamento nos dois países. Em Portugal o ensaio baseou-se no procedimento descrito pelas normas americanas ASTM C 230 (ASTM, 2009) e no Brasil pela NBR 13276 (ABNT, 1995). Foram realizados, em Portugal, três ensaios por material estudado e, no Brasil, dois ensaios. A argamassa utilizada teve a mesma composição, tanto em Portugal quanto no Brasil: 1 de aglomerante (cimento ou cimento + partículas de vidro) para três de areia, relação água-aglomerante de 0,5.

Para avaliar a trabalhabilidade dos concretos com e sem 15% de micropartículas de vidro incolor, em Portugal, empregou-se os ensaios de espalhamento de tronco de cone e teste do funil, seguindo as normas EN 12350-8 (IPQ, 2010b) e EN 12350-9 de (IPQ, 2010c). Foi feito um ensaio para cada mistura. O teste de espalhamento por tronco de cone permite avaliar a fluidez da mistura a partir da média de dois diâmetros ortogonais. O teste do funil tem por objetivos avaliar a capacidade do concreto de passar por seções estreitas e verificar a sua viscosidade aparente/fluidez a partir da medição do tempo de escoamento do material através do equipamento (FIG. 16).



Figura 16 - Medição da trabalhabilidade por tronco de cone e funil.

3.2.4 Análise da influência das micropartículas de vidro na microestrutura e no desempenho dos compostos cimentícios no estado endurecido

A análise da influência dos resíduos de vidro na microestrutura dos compostos cimentícios (argamassas e concretos) se deu por análise em MEV e, indiretamente, por ensaios de resistência à compressão, resistência na flexão e módulo de elasticidade. Os ensaios para avaliação da durabilidade foram de carbonatação acelerada, permeabilidade ao oxigênio, reação álcali-agregado, resistividade elétrica e ao desgaste. Pela termografia avaliou-se o desempenho térmico das misturas no que se refere à temperatura superficial dos materiais após insolação, com vistas ao conforto térmico proporcionado pelo material.

3.2.4.1 Análise microestrutural

A análise microestrutural dos compostos com e sem uso de micropartículas de vidro foi realizada por MEV no mesmo equipamento utilizado para a caracterização morfológica das partículas de vidro (item 3.2.1). A análise foi feita em amostras cortadas, mas não polidas, utilizando-se detector de elétrons secundários e retroespalhados. Para identificação das diferentes fases por meio da identificação dos seus elementos constituintes foi utilizada, em algumas análises, a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

3.2.4.2 Resistência à compressão

A capacidade portante dos compósitos foi avaliada em ensaios de compressão feitos em Portugal para as argamassas aos 28 e 90 dias de cura; e para os concretos, aos 7, 28 e 90 dias. Utilizou-se uma prensa hidráulica da marca *Form Test Seidner* com capacidade máxima de 200 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga de 0,5 MPa/s. No caso das argamassas foram utilizados corpos de prova prismáticos e, para o concreto, corpos cilíndricos. Foram realizados 6 ensaios por composto analisado. O ensaio obedeceu à norma portuguesa EN 196-1 (IPQ, 2006a). No Brasil, os ensaios nas argamassas, aos 7, 28 e 90 dias de idade, foram feitos em corpos de prova cilíndricos em uma prensa TC-PS 003 (certificado de calibração N° 8639A13), com controle automático de velocidade de aplicação de carga de 0,5 MPa/s. Os ensaios basearam-se na NBR 7215 (1996). Foram realizados dois ensaios por material.

3.2.4.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado apenas para argamassas aos 28 e 90 dias de idade. Em Portugal foi utilizada uma *Form Test Seidner* com capacidade máxima de 200 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga de 0,5 Mpa, de acordo com a norma portuguesa EN 196-1 (2006a). Foram ensaiados três corpos de prova por situação. No Brasil, os testes foram feitos aos 28 dias em uma máquina universal Emic, modelo DL30000N com sistema computadorizado de controle de aplicação de carga (0,8 MPa/s) e de aquisição de dados (*software* Tesc versão 3.04), com base na NBR 12142 (2010b). Foram efetuados dois ensaios por composto analisado.

3.2.4.4 Módulo de elasticidade

Em Portugal determinou-se o módulo de elasticidade estático dos concretos, utilizando uma prensa hidráulica marca *Form Test Seidner* com capacidade máxima de 200 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga de 0,5 MPa/s, segundo a norma alemã GERMAN STANDARD DIN 1048 (2006) parte 5. No Brasil foram realizados os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico de argamassas, com base nas

recomendações da norma americana ASTM C 215 (2008) para determinação do módulo longitudinal. O equipamento utilizado foi Erudite MKII, voltagem de 0,10V, as frequências variam de 13.000–25.000 Hz, segundo um *step* de 10,00 Hz (FIG. 17). Foram realizadas 10 medidas por cada material estudado. Foram realizadas 10 medidas por cada material estudado (duas amostras por tipo de material).

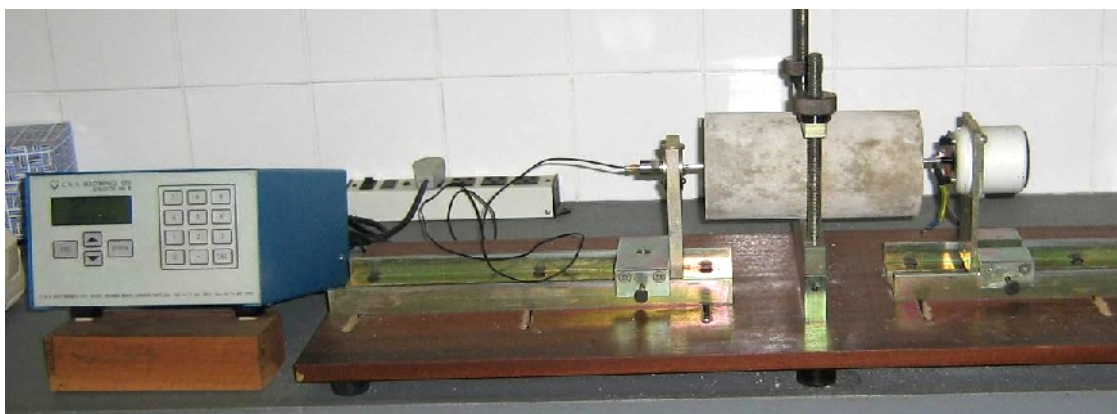


Figura 17 - Equipamento para medir frequência ressonante: Erudite MKII (Laboratório de Materiais/UFGM).

3.2.4.5 Permeabilidade ao oxigênio em amostra seca.

A determinação da permeabilidade ao oxigênio foi realizada com base na recomendação da Rilem (1999) para o estudo da permeabilidade como critério de sua durabilidade. Foi utilizado equipamento (permeabilímetro) construído no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ, com base na célula desenvolvida por Cabrera e Lynsdale, em 1988, conforme descrito por Assis e Panzera (2012). Nesse ensaio, a amostra é vedada lateralmente por um anel de silicone e inserida em uma célula de confinamento (cilindro de aço), cuja tampa, após ser fechada, permite a vedação da parte superior e inferior da câmara. Na parte inferior da câmara de confinamento, uma tubulação originária do cilindro de oxigênio permite um fluxo de gás uniaxial e contínuo através da amostra. Na parte superior da célula de confinamento, uma mangueira permite a saída do gás que atravessou a amostra. Essa mangueira está conectada na parte lateral inferior de um tubo de vidro cilíndrico, delgado e graduado (bolhômetro). Na parte inferior desse tubo é conectado um balão contendo sabão líquido (para produção de bolhas). Quando esse balão é pressionado, as bolhas produzidas são transportadas por meio do fluxo de oxigênio que passou pela amostra até o topo do cilíndrico de vidro (FIG. 18). Em função da quantidade de oxigênio

que atravessou a amostra, as bolhas se aproximam mais ou menos do topo do bolhmetro, podendo-se calcular, assim, a permeabilidade da amostra. No início do ensaio, a válvula do reservatório de oxigênio é aberta de forma que a pressão estabilize em 0,8 bar (30 minutos). As medidas da pressão do gás aplicado à amostra são feitas pelo manômetro situado antes da entrada da célula de confinamento, com variação de medição de 0 a 3 bar, com erro de paralaxe de 3 mm e de medição de $\pm 2,94 \times 10^{-4}$, o que é considerado bastante satisfatório para o experimento.

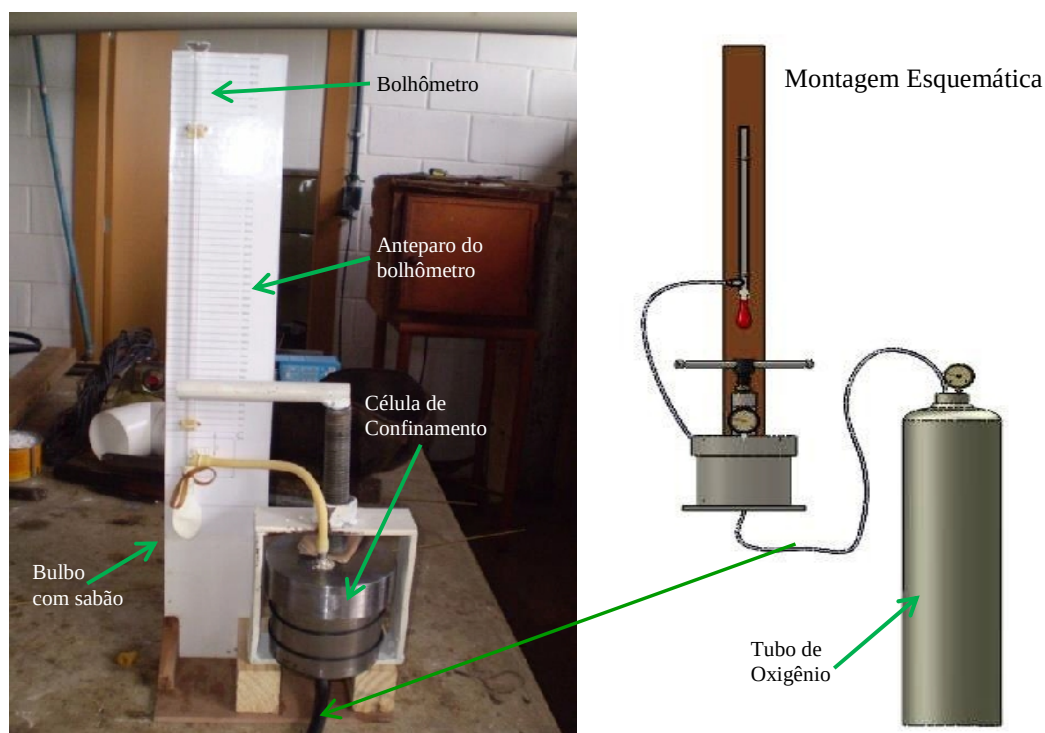


Figura 18 - Equipamento do ensaio de permeabilidade ao oxigênio.
Fonte: adaptado de Assis e Panzera (2012).

Com o auxílio de um cronômetro e de uma fita graduada, mede-se o tempo de percurso das bolhas através do tubo. Esse tempo permite que se calcule a vazão do gás, utilizando-se a equação 3.1:

$$Q = \frac{\pi \phi^2 h}{4t} \quad (3.1)$$

sendo Q a vazão, ϕ o diâmetro interno do tubo, h a distância percorrida e cronometrada e t o tempo para a bolha percorrer a altura h . A permeabilidade da amostra pode ser calculada pela equação 3.2, que leva em conta a compressibilidade e a viscosidade do oxigênio,

assim como as unidades selecionadas (CABRERA; CLAISSE, 1999; CABRERA; LYNDSdale, 1988).

$$k = \frac{4,04 \cdot 10^{-16} \cdot Q \cdot P_2 \cdot L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3.2)$$

sendo k a permeabilidade intrínseca (m^2); L o comprimento da amostra (m); A a área transversal da amostra (m^2); Q a vazão (cm^3/s); P_1 a pressão absoluta aplicada (bar), P_2 a pressão pela qual a vazão é medida, em bar .

Para os testes utilizaram-se 15 corpos de prova fabricados especialmente para esta finalidade, com diâmetro e altura de 5cm. Para cada tipo de mistura foram fabricados três corpos de prova. O traço utilizado foi de 1:3 e a relação a/c foi de 0,5. As amostras foram colocadas em estufa a 80°C durante 24 horas para secagem e depois de resfriadas elas foram envoltas com uma fina película plástica e foram transportadas para o local onde foram realizados os testes.

3.2.4.6 Carbonatação acelerada

O ensaio para determinação da resistência à carbonatação foi realizado apenas no Brasil, em uma câmara climatizada da marca *Thermo Fisher Scientific*, modelo RCO 3000T-5-VBC. Seguiram-se os critérios do Laboratório de Ensaio Especiais da UFMG. As amostras foram imersas em água e curadas durante 28 dias. Após a cura, a superfície das amostras foi escovada e lavada para a remoção de eventuais resíduos de desmoldantes ou nata de cimento presentes e que poderiam dificultar a difusão de dióxido de carbono para o interior dos compostos cimentícios. Antes de serem introduzidos na câmara de carbonatação, as amostras foram secas em estufa. Os parâmetros de ensaio (ambiente saturado dentro do próprio equipamento em atmosfera com teor de 5% de CO₂ a 27,5 °C±2) utilizados neste estudo foram definidos com base no trabalho de Nóbrega e Araújo (2011). As amostras permaneceram em câmara a 48% de umidade relativa e expostas ao CO₂ pelo período de 60 dias. Após esse período, as amostras foram seccionadas no sentido longitudinal. Determinou-se, então, a profundidade carbonatação a partir da aplicação por aspersão de solução de 70% de álcool absoluto, 29% de água destilada e 1% de

fenolftaleína, utilizando-se paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Foram realizadas três medidas por corpo de prova.

3.2.4.7 Reação álcali-sílica

O ensaio de reação álcali-sílica teve dois objetivos. O primeiro foi avaliar se os álcalis presentes no vidro contribuiriam para maior expansão devido à reação álcalis (do vidro) - sílica (do agregado). O segundo foi avaliar se a sílica presente no vidro, que não fosse consumida na reação pozolânica, reagiria em idades tardias com os álcalis do cimento (quando o concreto estivesse endurecido), fenômeno que ocorre quando se utiliza o vidro como agregado (CASTRO; BRITO, 2013; IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2011).

O ensaio de reação álcali-agregado foi realizado em Portugal para avaliar a influência do uso de micropartículas de vidro em substituição ao cimento na expansibilidade dos compostos devido à reação do vidro com o agregado miúdo reativo presente na mistura. Os procedimentos seguiram a ASTM C 1567-8 (ASTM, 2010), porém com algumas alterações na proporção de materiais secos. A norma americana sugere 0,47 de relação água/cimento e 1 de aglomerante para 2,25 de areia. No entanto, foram utilizadas as relações referidas na norma portuguesa EN 196-3(2006c): 0,5 de relação água-cimento e 1 de aglomerante para 3 de areia. A areia usada (CEN) também foi diferente, em termos da granulometria, da sugerida pela mesma norma americana. A mistura foi realizada de acordo com a norma portuguesa EN 196-1 (IPQ, 2006a). Segundo orientação do laboratório LNEC, essas diferenças não acarretariam alterações significativas nos resultados. A leitura da expansão das amostras (com dimensões de 25x25x250 mm) foi feita aos 0, 3, 6, 10, 14, 19 e 26 dias e a expansibilidade do material (10% de vidro incolor) foi avaliada aos 14 dias.

No Brasil, o procedimento para o ensaio da reação álcali-agregado seguiu os procedimentos da NBR 1557-4 (ABNT, 2008), cuja metodologia e parâmetros de análise baseiam-se na ASTM C-1260 (ASTM, 2001). Utilizou-se um conjunto de equipamentos (banho/estufa e extensômetro) da marca Soloteste (FIG. 19). Foram confeccionados três corpos de prova para cada dosagem (CTL, 10 e 20% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor e 10 e 20% âmbar) com dimensões de 25x25x250 mm. O traço utilizado foi de 1:2,25 em massa (440 e 990 g), relação água-cimento de 0,47 e areia

de basalto. O procedimento de mistura e moldagem seguiu a NBR 15577-4 (ABNT, 2008). Os limites de expansão foram medidos aos 16 dias contados a partir da moldagem e outras medidas foram realizadas em datas escalonadas (0, 3, 6, 10, 19 e 30 dias). O valor final foi calculado a partir da média de expansão das três barras de argamassa para cada idade.



Figura 19 -.Equipamentos do ensaio da reação álcali-agregado.

3.2.4.8 Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade dos materiais, especialmente no tocante à contribuição do concreto para a taxa de corrosão da armadura devido à ação de íons de cloretos (SILVA, 2011; GJØRV, 2008; SANTOS, 2006; SENGUL; WHITING; NAGI, 2003; MILLARD; HARRISON; EDWARDS, 1989). A resistividade elétrica dos compostos cimentícios foi calculada pela medida da resistividade volumétrica em condição saturada, utilizando eletrodos posicionados em faces opostas dos corpos de prova, nos quais foi aplicada uma diferença de potencial e, então, medida a corrente gerada entre eles (SPRAGG *et al.*, 2011).

Em Portugal, o ensaio de resistividade elétrica foi realizado nas argamassas e nos concretos, sendo realizadas duas medidas por amostra. Foram ensaiadas duas amostras para cada situação analisada. Para as argamassas, foram utilizadas amostras prismáticas de dimensões 25x25x250 mm, segundo recomendações da ASTM C C 1567-08 (ASTM, 2010), nas quais se inseriram duas telas de aço em cada uma das extremidades. Avaliou-se apenas a amostra de CTL e com 10% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor. As amostras foram mantidas em câmara úmida ($20^{\circ}\pm 1^{\circ}$) até o dia dos

ensaios - aos 2, 7, 14, 21 e 28 dias -, quando se aplicou uma diferença de potencial entre as telas e mediu-se a passagem de corrente elétrica (FIG. 20).



Figura 20 - Equipamento de resistividade elétrica – Portugal.

Com base na lei de Ohm é possível calcular a resistividade do material (equação 3.3).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (3.3)$$

sendo ρ a resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$), R a resistência elétrica (Ω -Ohm), I a corrente (Amperes), V a diferença de potencial (Volt), L o comprimento da amostra (m), A a área transversal da amostra atravessada pela corrente (m^2).

Para o ensaio de resistividade elétrica dos concretos utilizaram-se seis corpos de prova de 150 x 300 mm (três de CTL e três com 15% de micropartículas de vidro incolor). As amostras foram mantidas em câmara úmida ($20^\circ \pm 1^\circ$) até a data dos ensaios - aos 7, 28 e 83 dias. A resistividade foi medida conforme procedimento normal do LABEST. Para a medição da corrente elétrica, as extremidades foram cobertas por um pano molhado pressionado entre duas placas metálicas utilizando um “sargento” (FIG. 21). As medidas de corrente elétrica foram realizadas aplicando-se a diferença de potencial entre as placas.



Figura 21 - Equipamento de resistividade elétrica – Portugal.

No Brasil, foi desenvolvido junto ao Departamento de Engenharia Elétrica um sistema de ensaio (FIG. 22) com base nas recomendações da *International Electrotechnical Commission* para testes de medição da resistividade volumétrica de materiais isolantes elétricos (IEC, 1980) e de Spragg *et al.* (2011). Corpos de prova cilíndricos de argamassas com e sem adição de micropartículas de vidro de 5 cm de diâmetro por 10 cm de comprimento, após 24h de saturação em água da COPASA, foram pressionados no sentido longitudinal entre duas placas de cobre (eletrodos) utilizando-se um sargento. De forma a maximizar o contato, foi introduzida lã de aço entre as placas e as extremidades das amostras. Utilizando-se uma fonte de corrente alternada com ondas senoidais e frequências variadas (10 a 7.500 Hz), foi aplicada uma diferença de potencial (entre 2 e 8 v). Inicialmente foram testadas diferentes frequências de forma a se estabelecer a frequência a partir da qual a resistividade independe da frequência (MILLARD; HARRISON; EDWARDS, 1989). Estabeleceu-se para os ensaios o uso de uma frequência de 50 Hz. Foram realizadas três medidas para cada amostra, sendo dois corpos de prova por mistura analisada.



Figura 22 - Equipamento de resistividade elétrica – Brasil.

3.2.4.9 Resistência ao desgaste por abrasão

Os ensaios de resistência ao desgaste por abrasão foram executados no Brasil segundo procedimentos da NBR 12042 (ABNT, 1992c). Foram confeccionados três corpos de prova de cada tipo de material (CTL, vidro incolor 10 e 20% e vidro âmbar 10 e 20%) na forma prismática, medindo 70x70x30 mm. Após 28 dias de cura as amostras foram submetidas ao desgaste com areia quartzosa sob uma carga de aproximadamente 66 N. As medidas foram realizadas após 500 voltas, o que corresponde a 1.000 metros de percurso. Aos 500 metros as amostras foram invertidas no suporte de acoplamento do aparelho, para evitar distorção (enviesamento) do material em teste. Terminados os 1.000 metros de percurso, foram tomadas as medidas das alturas nos quatro lados das amostras para aferição do desgaste. O ensaio foi feito em um equipamento tipo Amsler de fabricação da Contenco do LABTECRochas do Instituto de Geociências - CPMTC da UFMG (FIG. 23).



Figura 23 - Equipamento de resistência ao desgaste.

3.2.4.10 Termografia infravermelha

Os padrões de distribuição de calor do material em estudo e dos compósitos cimentícios fabricados com e sem adição de micropartículas de vidro foi avaliado por termografia infravermelha apenas no Brasil. Primeiramente avaliaram-se as micropartículas de vidro âmbar e incolor. As amostras foram colocadas dentro de recipientes de mesmo material e expostas à insolação direta por 60 minutos. As temperaturas foram registradas aos 10, 30 e 60 minutos de insolação. Também foram analisadas argamassas confeccionadas com cimento e com substituição de 10 e 20% de micropartículas de vidro âmbar e incolor. Para cada situação foram analisadas duas amostras cilíndricas de 5x10 mm. Antes do ensaio as amostras foram agrupadas por tipo e permaneceram por 24 horas em ambiente estável para

que se estabelecesse o equilíbrio térmico. Teve-se cuidado especial com a área em estudo durante o processo de leitura, pois a câmera infravermelha capta a temperatura do objeto e dos pontos próximos dele e o resultado da leitura é uma média aritmética das temperaturas de todos os pontos lidos na área de influência. Dessa forma, utilizaram-se duas lâminas de isopor (10x10x1 mm) para isolar as amostras do contato com outros materiais e manter uma radiação de fundo uniforme (FIG. 24).



Figura 24 - Termografia amostras antes da exposição solar.

Foi utilizada câmera de infravermelho - *Thermacam* da marca Flir, modelo P640, escala de temperatura de -40°C a 500°C e precisão de $\pm 2\%$ da leitura de medição. Para definição dos parâmetros de estudo, adotou-se temperatura refletida de 50°C , temperatura atmosférica 20°C , umidade relativa do ar 50%, emissividade 0,95. A distância entre o equipamento e as amostras foi de 1,50 m e a temperatura ambiente foi registrada por um termo higrômetro marca Minipa MT-241. O local utilizado para o ensaio foi uma área externa com insolação intensa (FIG. 25).



Figura 25 - Equipamento de termografia: câmera termográfica.

O tempo de duração dos testes foi de quatro horas e trinta minutos. Foram coletadas imagens termográficas a cada 30 minutos de insolação. As imagens foram analisadas pelos programas *softwares QuickReport* e os gráficos foram produzidos pelo *Microsoft Excel*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em quatro blocos, em consonância com os métodos adotados nesta pesquisa. Na quantificação dos parâmetros em que se realizaram mais de um ensaio optou-se por apresentar nos resultados da média, pois reflete todas as observações. O desvio-padrão foi escolhido, uma vez que permite interpretação direta da variação do conjunto de dados.

4.1 Caracterização físico-química dos cimentos e micropartículas de vidro

Nas TABs. 3 e 4 são apresentados os resultados da análise química obtidas para os cimentos de Portugal e do Brasil. Os resultados indicam que os cimentos utilizados estão de acordo com as especificações de cada país: cimento CEM I 42.5R para Portugal - EN 197-1 (IPQ, 2012) e CPV-ARI para o Brasil (ABNT, 1991a).

TABELA 3 - Composição química do cimento Portland usado em Portugal

Ensaio	Sigla	EN 197-1/2012 Limites (% massa)	Resultado
Resíduo Insolúvel	RI	≤ 5,0	1,32
Perda ao fogo	PF	≤ 5,0	2,43
Óxido de Magnésio	MgO	≤ 5,0	1,90
Trióxido de Enxofre	SO ₃	≤ 4,0	3,44
Óxido de silício	SiO ₂	*2	20,39
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	*1	4,78
Óxido de cálcio	CaO	*2	62,17

TABELA 4 - Composição química do cimento Portland usado no Brasil

Ensaio	Sigla	NBR 5733/1991 Limites (% massa)	Resultado
Resíduo Insolúvel	RI	≤1,0	1,00
Perda ao Fogo	PF	≤4,5	3,50
Óxido de Magnésio	MgO	≤6,5	2,43
Trióxido de Enxofre			
Quando C ₃ A do clínquer <8%	SO ₃	≤3,5	2,60
Quando C ₃ A do clínquer >8%		≤4,5	
Óxido de silício	SiO ₂	*2	24,59
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	*1	7,19
Óxido de cálcio	CaO	*2	56,47
Anidrido Carbônico	CO ₂	≤3,0	2,74

As diferenças nas composições refletem as adições de 0 a 5% de calcário permitido pela normalização para a obtenção do CPV-ARI, enquanto o CEM I 42.5R é uma mistura de clínquer e gesso.

Os dados apresentados nas FIGs. 26 e 27 foram obtidos por EDS dos vidros pulverizados com o objetivo de identificar os elementos presentes em cada amostra e nortearam a análise química apresentada na TAB. 5.

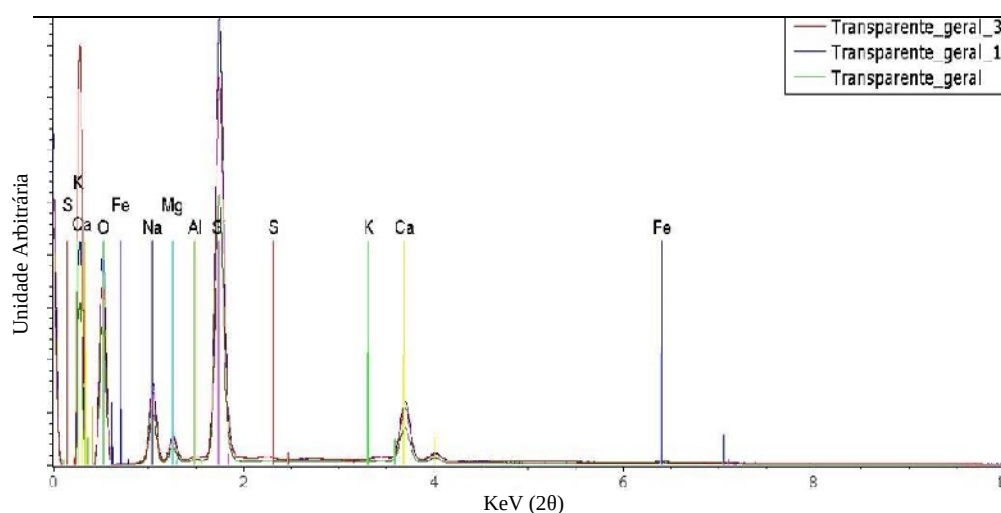


Figura 26 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS) do vidro incolor.

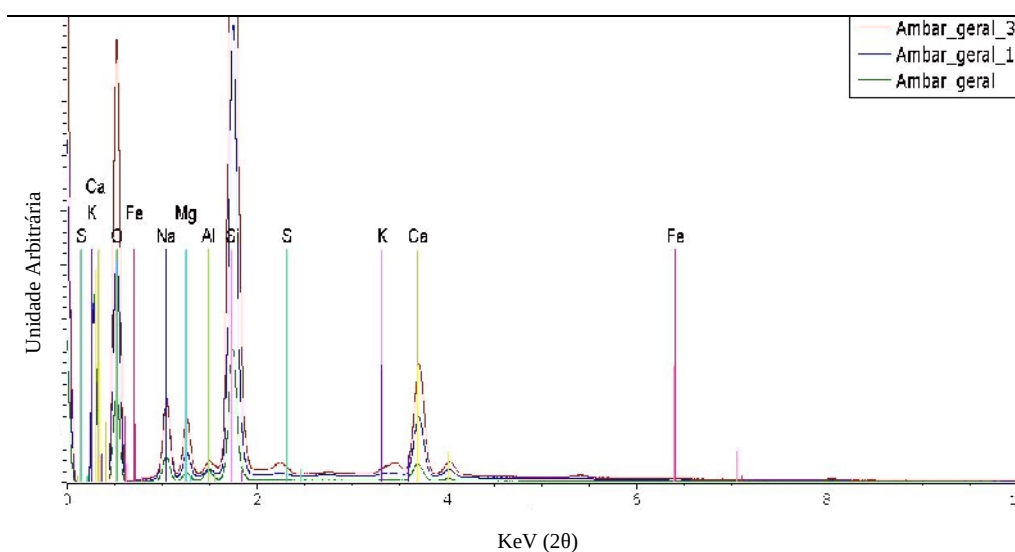


Figura 27 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS) do vidro vidros âmbar.

Comparando-se os dados da TAB. 5 com os dados da literatura, constata-se que as micropartículas de vidro aqui estudadas apresentaram composição típica dos vidros soda cal (CALLISTER, 2006). Observa-se que a composição dos dois tipos de vidros foi muito

semelhante. Variações mais representativas foram registradas nos óxidos de alumínio, óxidos férricos e, mais fortemente, nos teores de óxido de sódio. A diferença no óxido de sódio repercute diretamente no maior valor do equivalente alcalino para o vidro incolor. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992b), os materiais pozolânicos devem apresentar teor máximo de álcalis de 1,5%. As micropartículas apresentam teores mais elevados, o que exigiria rigoroso controle das reações envolvendo os álcalis e os agregados (item 2.3).

TABELA 5 - Composição química dos dois tipos de micropartículas de vidro

Ensaio	Sigla	Vidro Incolor (%)	Vidro Âmbar (%)
Resíduo Insolúvel	RI	92,72	94,39
Perda ao fogo	PF	0,22	0,37
Dióxido de Silício	SiO ₂	73,93	72,95
Óxido de Cálcio	CaO	9,18	9,28
Óxido de Alumino	Al ₂ O ₃	0,25	0,82
Óxido de Férrico	Fe ₂ O ₃	0,92	0,66
Óxido de Magnésio	MgO	3,75	3,58
Trióxido de Enxofre	SO ₃	0,23	0,25
Óxido de Sódio	Na ₂ O	9,18	5,99
Óxido de Potássio	K ₂ O	0,02	0,02
Equivalente Alcalino	Na ₂ Oeq	9,19	6,00

De acordo com Martins e Pinto (2004), o vidro incolor é obtido, basicamente, pela presença do ferro e do cromo. Na análise apresentada, o cromo não foi detectado, sendo considerado material residual. Segundo os mesmos autores, a cor âmbar é obtida pela presença de íons Fe³⁺ juntamente com S⁻ e Na⁺ e do uso de carbono como fonte de controle do potencial de redução do vidro âmbar e, conseqüentemente, de sua cor. O ensaio de perda ao fogo é um indicativo do teor de matéria orgânica presente na amostra e, conseqüentemente, do teor de carbono. Na amostra do vidro âmbar observou-se maior teor de matéria orgânica, o que indicaria ser este elemento o diferencial na composição dos vidros analisados.

A massa específica para as micropartículas de vidro e para os cimentos CEM I 42.5R e CPV-ARI MAX obtidos pelo método do frasco de Chapman encontra-se na TAB. 6. Os dados indicam que as massas específicas dos dois tipos de cimentos foram praticamente as mesmas. Os valores obtidos nos dois países para as micropartículas de vidro incolor foram convergentes. Também se observou que as micropartículas incolor e âmbar tiveram massas específicas muito próximas.

TABELA 6 - Resultado ensaio massa específica pelo frasco Chapman/cimento

Massa específica das micropartículas (g/cm ³)				
País	CEM I 42,5R	CPV ARI MAX	Vidro incolor	Vidro âmbar
Portugal	3,16	*	2,53	*
Brasil	*	3,11	2,60	2,54

Os resultados das superfícies específicas obtidos com o permeabilímetro de Blaine são apresentados na TAB. 7 para os cimentos e as micropartículas de vidro. Os dados indicam que o cimento brasileiro possui partículas 18% mais finas, conseqüentemente ele é mais reativo (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Quanto à superfície específica das micropartículas de vidro, os dois materiais analisados no Brasil apresentaram Blaine similar entre si e com o cimento de Portugal, mas inferior ao do cimento brasileiro. O Blaine das micropartículas analisadas em Portugal foi em torno de 25% maior que o resultado brasileiro. A diferença entre os resultados pode ser atribuída à amostragem. Nesse sentido, no Brasil foram realizados ensaios complementares que confirmaram os valores encontrados. Em relação à superfície específica, era de se esperar uma menor reatividade do aglomerante, quando este fosse constituído por substituição parcial do cimento por micropartículas de vidro de menor superfície específica. Esses resultados devem ser analisados com prudência. Segundo Coutinho (2010), o método Blaine não é aplicável a materiais mais finos que o cimento. De acordo com informação verbal obtida no laboratório de concreto da Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG), o método Blaine é muito sensível à compactação do material e depende muito da experiência do laboratorista com o material a ser analisado (no caso, as partículas de vidro).

TABELA 7 - Resultados superfície específica (Blaine) dos cimentos e pós de vidro

Superfície específica (m ² /kg)				
País	CEM I 42,5R	CPV ARI MAX	Vidro incolor	Vidro âmbar
Portugal	384,8	*	495,4	*
Brasil	*	470,8	371,8	366,3

Os resultados obtidos pelos métodos BET e BJH podem ser vistos nas FIGs. 28, 29, 30 e 31. Os dados permitem calcular a área superficial das micropartículas: 5.218/4.265 m²/kg (BET/BJH) para o vidro incolor e de 3.006/4918 m²/kg (BET/BJH) para o vidro âmbar. Em ambas as técnicas utilizadas pôde-se constatar boa consistência nos resultados. Isso indica que o valor da área superficial específica em torno 3.500 e 5.100 m²/kg para as

micropartículas de vidros incolor e âmbar, respectivamente, não seriam significativas, em função da não homogeneidade de granulometria do material analisado.

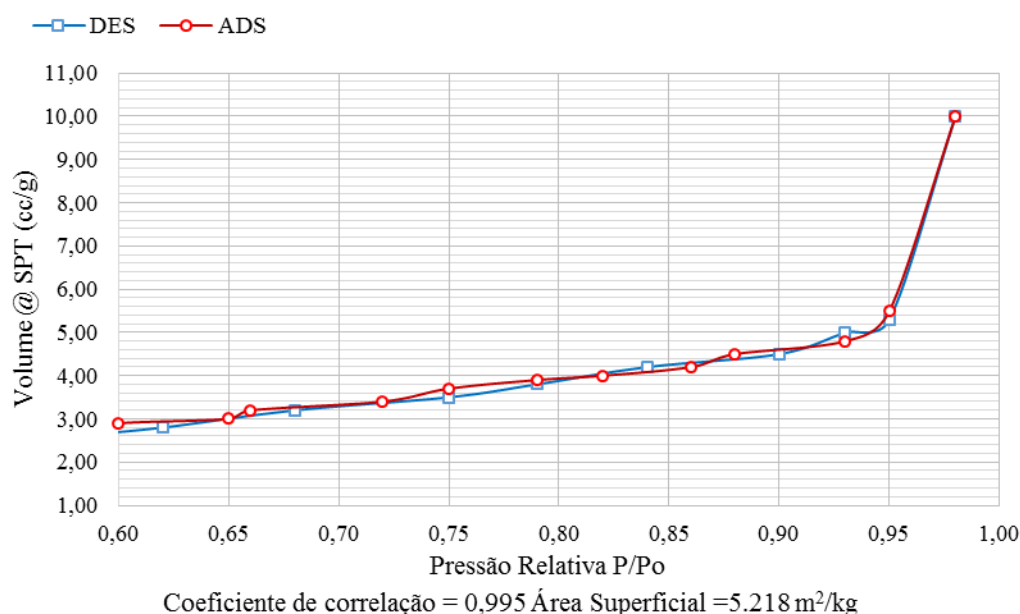


Figura 28 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BET para o vidro incolor.

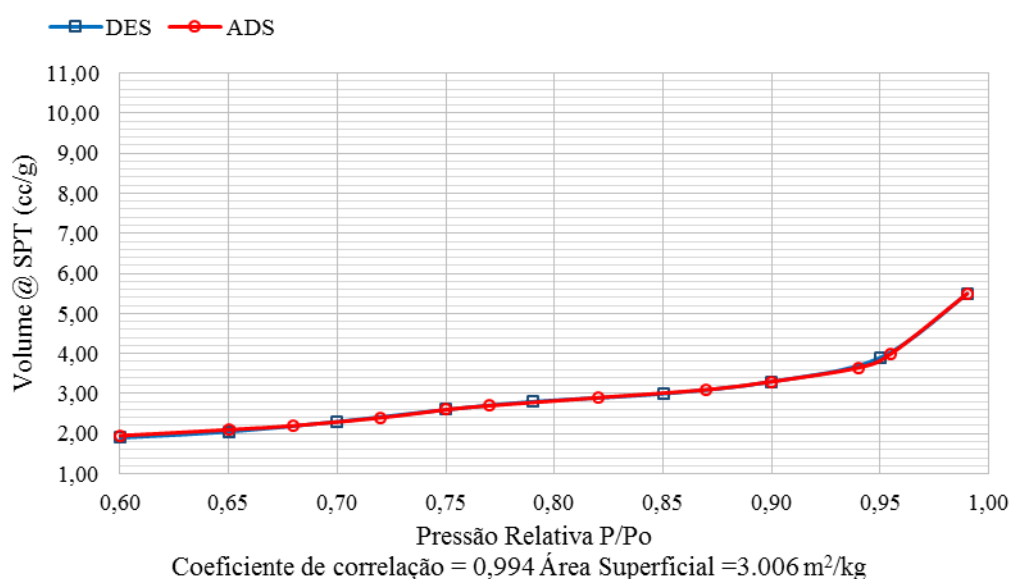
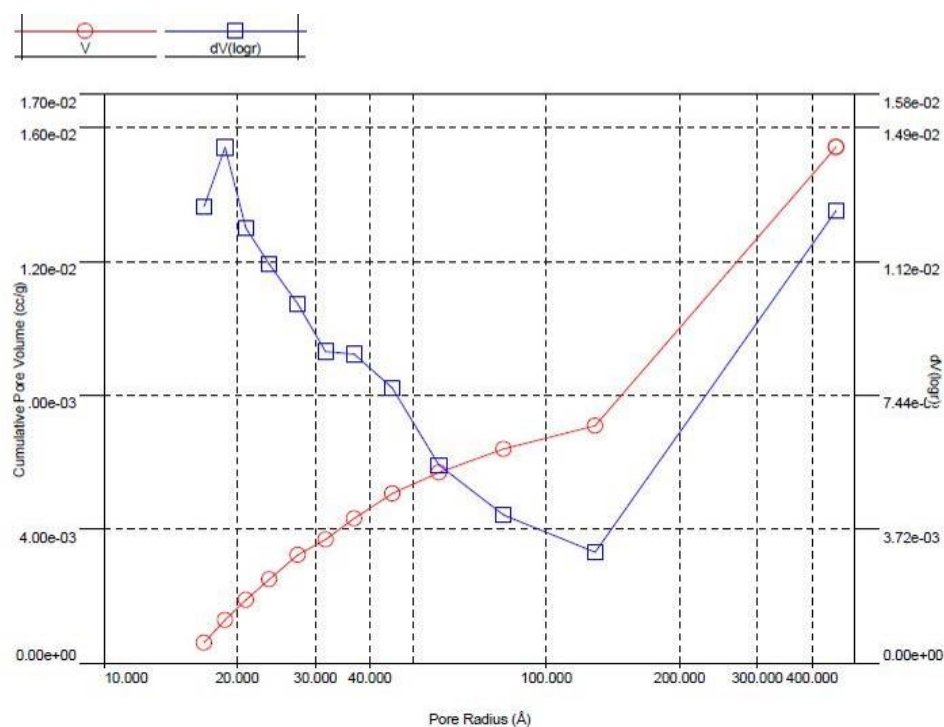


Figura 29 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BET para o vidro âmbar.

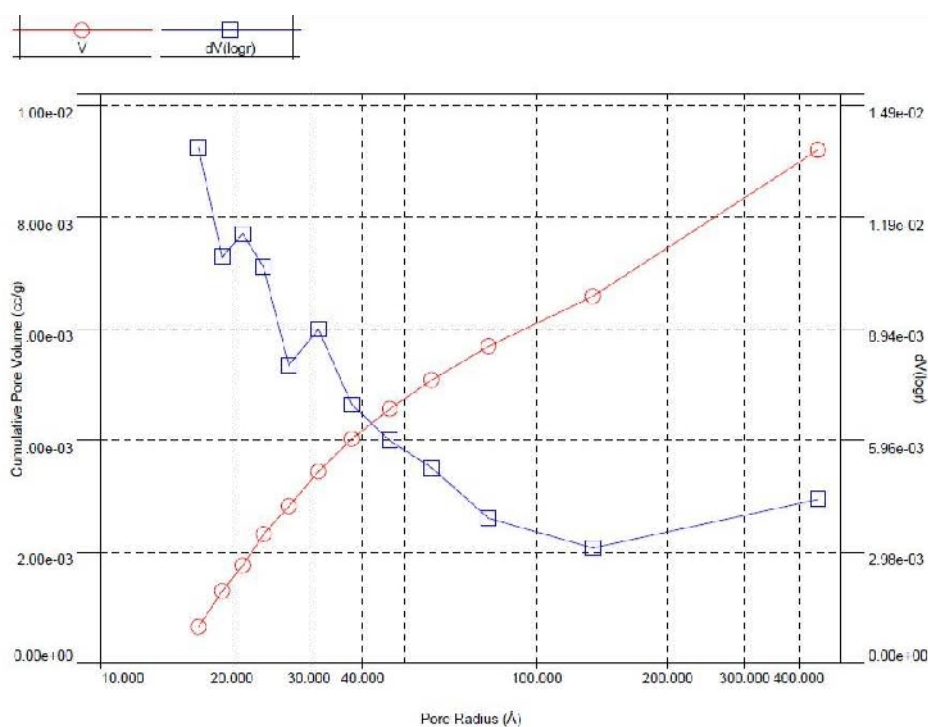
As pequenas diferenças apresentadas possivelmente se devem a diferenças de medição, fato também observado no ensaio de granulometria a laser. Mesmo considerando as limitações do ensaio Blaine para cimentos contendo partículas finas de outros materiais, é importante ressaltar a diferença da ordem de 10 vezes encontrada nos resultados entre os métodos de permeabilímetro de Blaine e BET / BJH. Isso estaria relacionado ao fato de que as técnicas BET e BJH tendem a fornecer um valor mais alto para a área superficial

específica se comparadas com a técnica de Blaine, uma vez que nos primeiros se mede a área superficial dos poros e microsporos das partículas, enquanto no Blaine se mede a área externa, computando-se a rugosidade e apenas os grandes poros (ROCHA; PERES, 2009; PENA, 2002).



Área superficial = 4.265 m²/kg

Figura 30 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BJH para o vidro incolor.



Área superficial = 4.918 m²/kg

Figura 31 - Resultados do ensaio de adsorção gasosa via BJH para o vidro âmbar.

Os resultados para as micropartículas de vidro realizados no Brasil (FIG. 32) mostram, para o vidro incolor, distribuição granulométrica com 10% das partículas de diâmetro igual ou inferior a $0,97\text{ }\mu\text{m}$, 50% das partículas de granulometria $4,70\text{ }\mu\text{m}$ e 90% das partículas são de $22,34\text{ }\mu\text{m}$. Estes resultados diferem dos obtidos em Portugal, provavelmente devido à heterogeneidade inerente das amostras e/ou ao equipamento. Para o vidro âmbar, 10% das partículas medindo $1,07\text{ }\mu\text{m}$, 50% $5,65\text{ }\mu\text{m}$ e 90% $28,35\text{ }\mu\text{m}$ (FIG. 33). O tamanho médio de partículas para o vidro incolor e âmbar foi de $8,93$ e $10,61\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente. Considerando a predominância das partículas (90%) para ambos os tipos de micropartículas de vidro e os resultados do laser, que utiliza amostras maiores, pode-se considerar, com base nos resultados brasileiros, que a finura dos vidros foi semelhante.

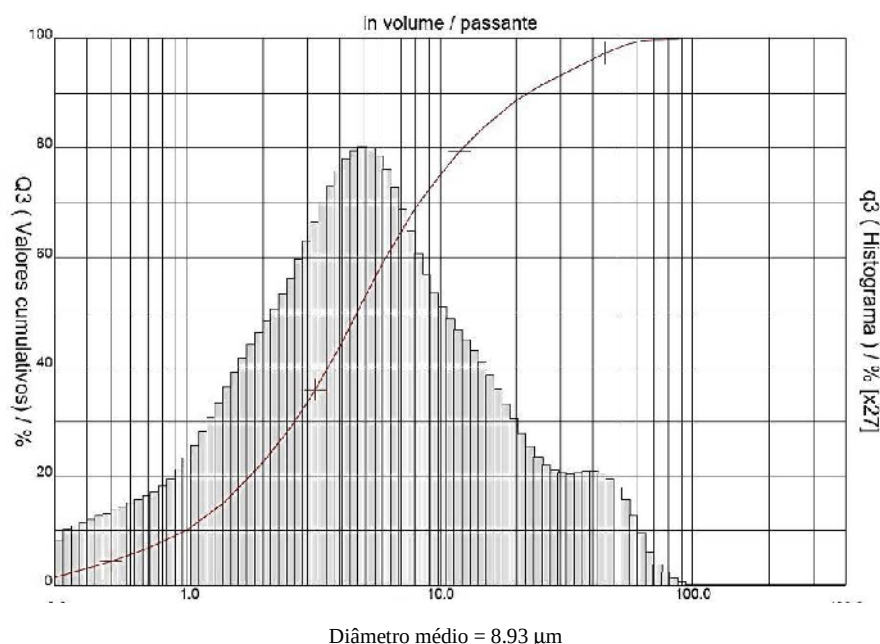


Figura 32 - Distribuição granulométrica das micropartículas de vidro incolor método de espalhamento do feixe de laser – Brasil.

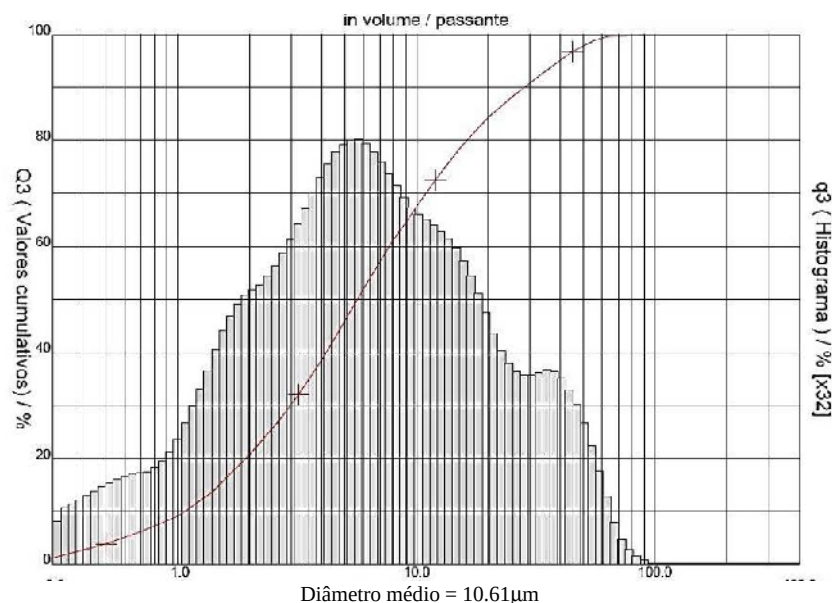
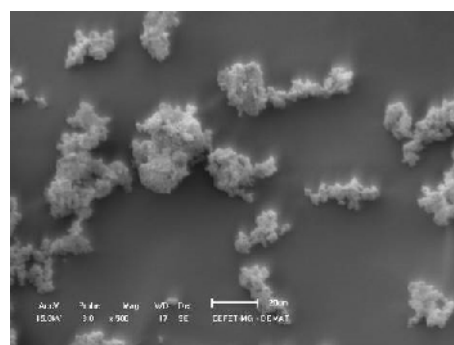
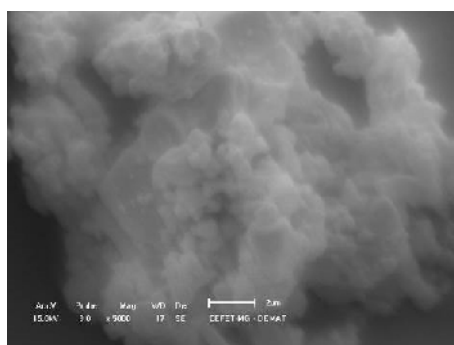


Figura 33 - Distribuição granulométrica das micropartículas de vidro âmbar método de espalhamento do feixe de laser — Brasil

As imagens obtidas por microscopia de varredura, apresentadas na FIG. 34, permitem avaliar a morfologia das partículas. As partículas se apresentaram em aglomerações com formas irregulares. A morfologia das partículas individuais mostra predominância de partículas cúbicas com superfície tendendo a lisa. A distribuição de tamanho de grãos foi variada.

Vidro incolor



Vidro âmbar

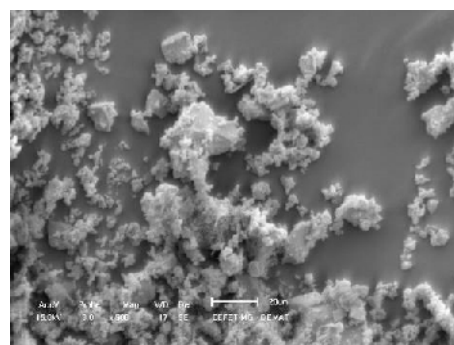


Figura 34 - Morfologia das partículas de vidro incolor/âmbar.

Os GRÁF. 1 e 2 mostram os difratogramas de raio X obtidos para os resíduos de vidro incolor e âmbar. Os dados apresentam similaridade com os padrões de um vidro comum (SHI; ZHENG 2007). Observa-se a ausência de picos isolados, mas a presença de uma região formada pelo desvio da linha de base nos ângulos de 15 a 35 graus. O espectro difuso observado é comumente atribuído às fases vítreas (CALLISTER, 2006; TASHIMA, 2006), o que indicaria que o material apresenta características de material não cristalino.

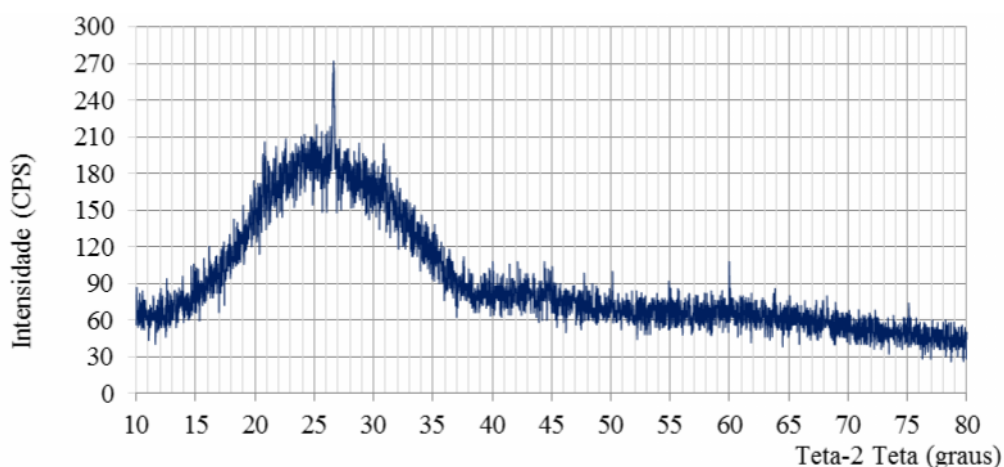


Gráfico 1 - Difratograma de raios-X – vidro incolor.

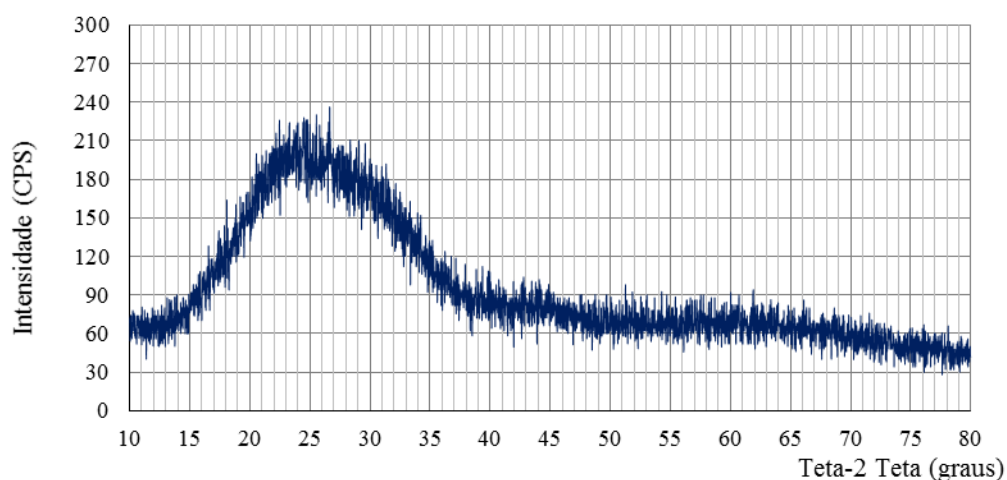


Gráfico 2 - Difratograma de raios-X – vidro âmbar.

Os espectros apresentados no GRÁF. 3, obtidos no ensaio de espectroscopia de absorção no infravermelho, podem ser analisados à luz dos dados da TAB. 8. Os resultados para ambos os vidros mostram três regiões de absorções fortes, em torno de 1200-1080, 810 e 460 cm^{-1} , que são referentes à rede de SiO_2 . A banda de intensidade a 1.080 e 1.160 cm^{-1} provavelmente está relacionada ao estiramento assimétrico das ligações Si-O-Si do SiO_4 tetraédrico, associado como o movimento do oxigênio no estiramento assimétrico Si-O-Si.

Verificou-se banda a 810 cm^{-1} , que poderia ser relacionada ao estiramento simétrico Si-O-Si, e a banda a 460 cm^{-1} , atribuída ao modo de vibração de deformação O-Si-O. Esses seriam indícios da amorficidade dos materiais analisados.

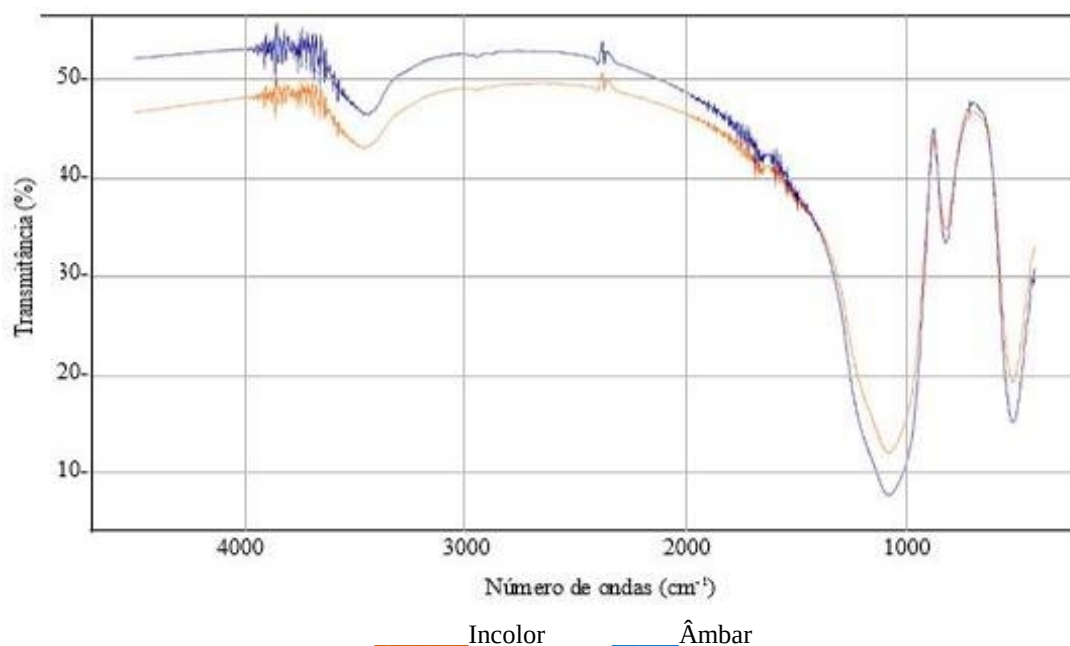


Gráfico 3 - Resultados da espectroscopia por infravermelho micropartículas de vidro.

TABELA 8 - Principais frequências e modos de vibrações dos vidros

Frequências (cm^{-1})	Modos de vibração
1200-1080	Estiramento assimétrico Si-O-Si
950	Si-OH
810	Estiramento simétrico Si-O-Si
460	Deformação O-Si-O
600	M-O (grupo tetraédrico)
370	M-O (grupo octaédrico)

A não cristalinidade observada nas amostras, segundo trabalhos da literatura, poderia indicar maior reatividade das micropartículas de vidro (MEHTA; MONTEIRO, 2008; MURAT; BACHIONGINI, 1982). No entanto, existem evidências de que a granulometria seria tão importante quanto a estrutura do arranjo cristalino (SCRIVENER; NONAT, 2011): materiais cristalinos poderiam promover resultados de desempenho mecânico similares aos não cristalinos (GOLDMAN; BENTUR, 1993) e materiais quartzosos com tamanhos inferiores a $5\text{ }\mu\text{m}$ podem apresentar atividade pozolânica (BENEZET; BENHASSAINE, 1999).

4.2 Reatividade das micropartículas de vidro com o hidróxido de cálcio

Na TAB. 9 são apresentados os resultados obtidos para as micropartículas de vidro no ensaio de Chapelle Modificado, representando média de três medidas. Na mesma tabela é mostrado o resultado do ensaio para uma amostra de sílica ativa adquirida no mercado. A NBR não estipula valores desse parâmetro de medida para se classificar a atividade pozolânica. De acordo com Raverdy *et al.* (1980), o valor mínimo de consumo de hidróxido de cálcio necessário para o material apresentar atividade pozolânica é de 330 mg de Ca(OH)_2 /g de amostra. Considerando os resultados obtidos para o sílica ativa e que a reatividade pozolânica de um metacaulim, de acordo com a normalização francesa NF P18-513 (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2010), não deve ser inferior a 700 mg Ca(OH)_2 /g metacaulim, pode-se considerar que ambas as micropartículas apresentaram atividade pozolânica. A diferença entre os dois tipos de micropartículas não foi significativa considerando-se o ensaio que envolveu titulação.

TABELA 9 - Resultados do ensaio Chapelle Modificado

Amostra	Resultado			Média
	mg de Ca(OH) ₂ /g de material			
Micropartículas incolor	565,83	580,42	540,13	562,13
Micropartículas âmbar	645,06	670,43	650,12	655,20
Sílica ativa	615,45	*	*	615,45

A TAB. 10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de condutividade elétrica para o cimento e para as micropartículas de vidro incolor e âmbar, de acordo com o método proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989). São apresentados os valores referentes à condutividade inicial (solução saturada de Ca(OH)_2) e final (solução saturada de Ca(OH)_2 com micropartículas) após dois minutos de ensaio e as diferenças entre esses dois valores para as três partículas analisadas. Segundo esse ensaio, quando o material é pozolânico, a condutividade tende a diminuir, devido à menor quantidade de íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ dissolvidos na solução. Neste método o material é classificado como: sem atividade pozolânica, se o resultado for inferior a 0,4 mS/cm; com atividade pozolânica moderada, se o material apresentar valores de condutividade entre 0,4 e 1,2 mS/cm; e terá boa atividade pozolânica se o resultado obtido para a amostra for acima de 1,2 mS/cm. Os dados indicam, como era de se esperar, a não pozolanicidade do cimento. Isso indicaria que não houve aglomeração de íons junto às partículas de cimento, devido à sua finura (potencial zeta), o que seria um indício de que o mesmo não ocorreria com as partículas de vidro

cujas dimensões são semelhantes. Ambos os vidros analisados apresentaram atividade pozolânica moderada. Apesar das limitações do ensaio (item 4.4.7), os resultados são coerentes com os obtidos com o método Chapelle.

TABELA 10 - Condutividades soluções saturadas Ca(OH)_2 com e sem MPV

Amostras		Condutividade mS/cm		
		Inicial (0 min)	Final (2 min.)	Resultado (Inicial - Final)
Cimento	CP 1	6,98	6,79	0,19
	Cp 2	6,89	6,73	0,16
	Cp 3	6,93	6,70	0,23
Incolor	CP 1	6,97	6,38	0,59
	Cp 2	6,88	6,44	0,44
	Cp 3	6,92	6,51	0,41
Âmbar	Cp 1	7,01	6,56	0,45
	Cp 2	6,95	6,51	0,44
	CP 3	6,88	6,33	0,55

CP: corpo-de-prova.

Com os dados obtidos no TGA foram construídos os GRÁF. 4, 5, 6 e 7, com o objetivo de evidenciar as variações mais significativas de massa que ocorreram durante o aquecimento das amostras e, assim, identificar a ocorrência e a extensão da reação pozolânica. Os resultados do DTA permitem identificar o calor envolvido nas reações e ajudam a identificar as regiões onde as reações possivelmente ocorrem. Nesses gráficos são marcadas com círculos as regiões em que a variação de massa ocorreu de forma não monotônica e/ou ocorreram reações exotérmicas ou endotérmicas.

Em todas as amostras, com e sem substituição do cimento por 10 e 20% de micropartículas de vidro, foi possível identificar três zonas principais, onde os círculos indicam as regiões em que a variação de massa ocorre de forma não monotônica. Na literatura, as temperaturas em que ocorrem as reações de desidratação devido ao aquecimento comumente variam em função dos estudos. De modo geral, na faixa de 30-105°C ocorre a perda da água livre ou armazenada na estrutura dos capilares do gel, sendo que em até 120°C ocorre o esgotamento completo dessa água; a decomposição da gipsita acontecia de 110-180°C; na faixa de 180-240°C ter-se-ia a desidratação dos aluminatos de cálcio e aluminosilicatos hidratados; a perda de água combinada do silicato de cálcio hidratado seria encontrada de 50 a 300°C; a desidratação desse silicato no que se refere à água interlamelar se daria a 350°C; a saída da água adsorvida do silicato de cálcio hidratado seria em torno de 400°C; entre 410-580°C seria detectada a desidratação do hidróxido de

cálcio; e de 520 a 900°C a decomposição do carbonato de cálcio (ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005; DWECK *et al.*, 2000; KNOPF *et al.*, 1999; PAYA *et al.*, 2003; RODRIGUES *et al.*, 2010). Sendo assim, a zona 2 corresponderia à perda de água do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A perda de água, nessa região, foi praticamente a mesma para todas as amostras, o que indicaria que as pastas com e sem micropartículas de vidro possuem aproximadamente o mesmo teor de portlândita, ou seja, não se detectou a ocorrência da reação pozolânica devido o uso de macropartículas de vidro. A TAB. 11 apresenta as temperaturas características obtidas da análise termogravimétrica.

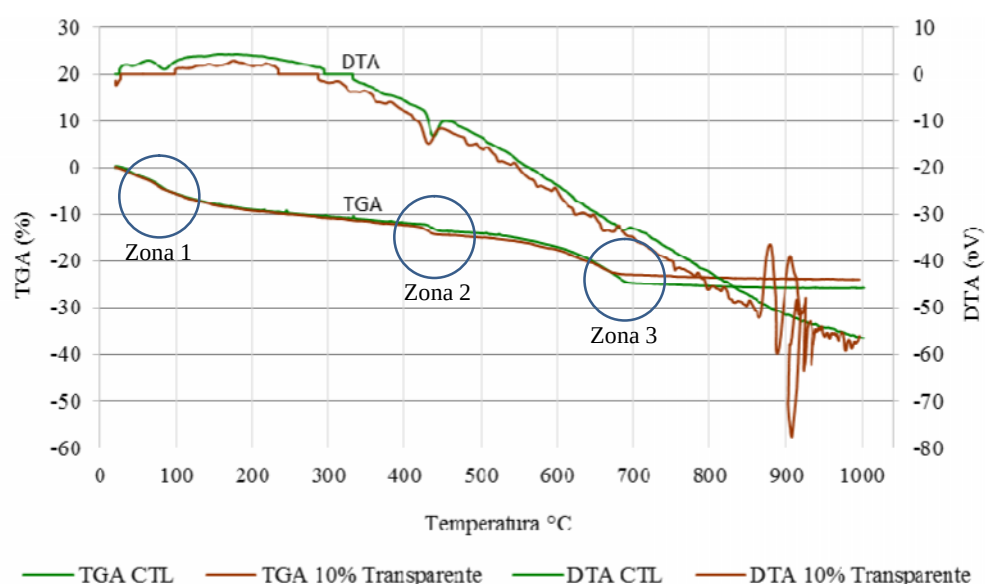


Gráfico 4 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 10% micropartículas de vidro incolor.

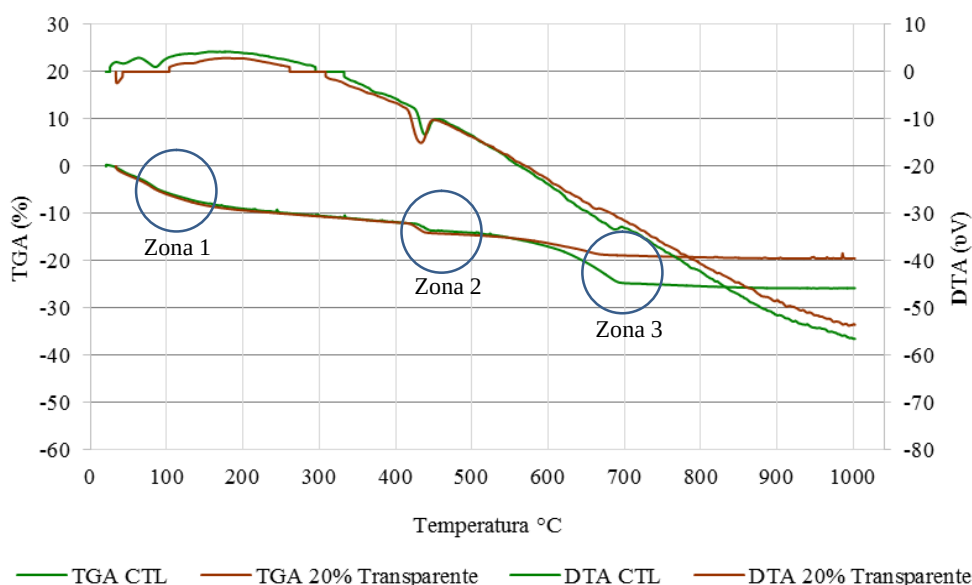


Gráfico 5 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 20% micropartículas de vidro incolor.

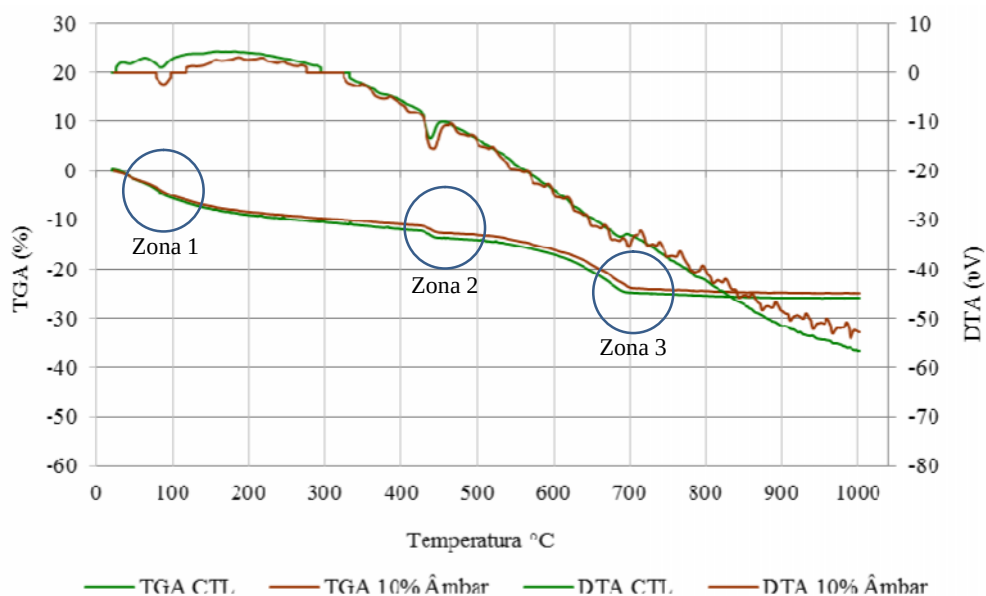


Gráfico 6 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 10% micropartículas de vidro âmbar.

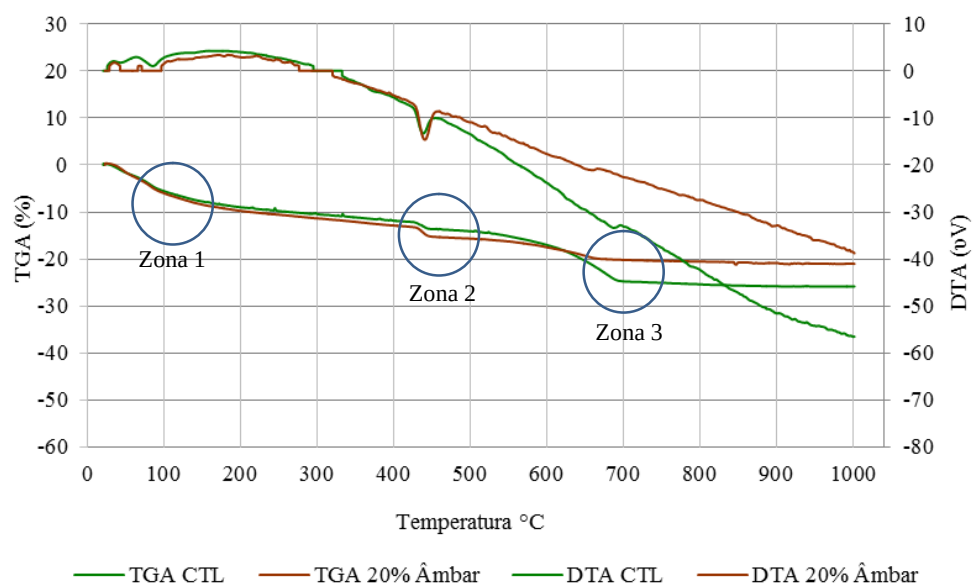


Gráfico 7- Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial da pasta de controle e com substituição de 20% micropartículas de vidro âmbar.

TABELA 11 - Resultados do ensaio de termogravimetria e termodiferencial, pontos relevantes das reações

Material	Zona 1			Zona 2			Zona 3		
	Intervalo de Temperatura	Perda de massa (%)	Reação	Intervalo de Temperatura	Perda de massa (%)	Reação	Intervalo de Temperatura	Perda de massa (%)	Reação
Controle	52,69-146,82	9,1	Endotermica	435,43-441,81	1,9	Endotermica	533,42-547,30	10,7	Endotermica
Incolor 10%	53,80-131,19	9,4		421,29-436,73	2,1		622,37-663,82	7,9	
Incolor 20%	51,89-117,67	9,5		421,56-436,56	2,1		616,85-662,93	4,1	
Âmbar 10%	47,86-112,86	8,4		433,66-444,54	2,2		632,28-695,87	7,0	
Âmbar 20%	51,21-108,51	10,3		430,31-442,77	2,6		614,23-660,53	3,9	

Os resultados do ensaio de índice de atividade pozolânica realizados em Portugal e no Brasil são apresentados nos GRÁF. 8 e 9, nos quais estão locadas para cada ponto as médias de três ensaios e relatados os desvios-padrão referentes a cada conjunto de medidas. Considerando-se os resultados obtidos em Portugal e no Brasil para o vidro incolor, observam-se diferenças em torno de 15% para as amostras analisadas. Isso estaria relacionado ao fato de que, no Brasil, para a confecção das amostras, a substituição foi de 35%, em massa do cimento, por micropartículas de vidro e em Portugal o ensaio foi feito com as mesmas substituições estipuladas no estudo, ou seja, em Portugal a substituição foi em menor quantidade (10 e 20%).

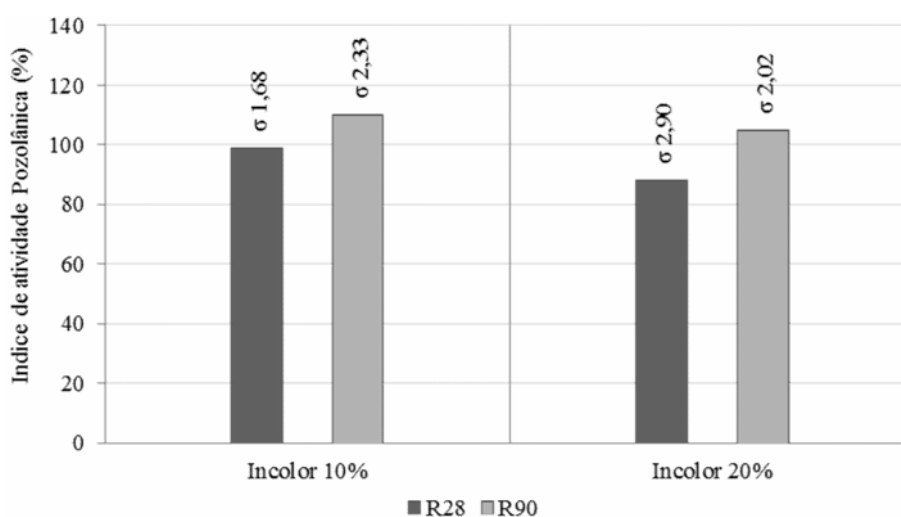


Gráfico 8 - Resultado do ensaio do índice de atividade pozolânica realizado - Portugal.

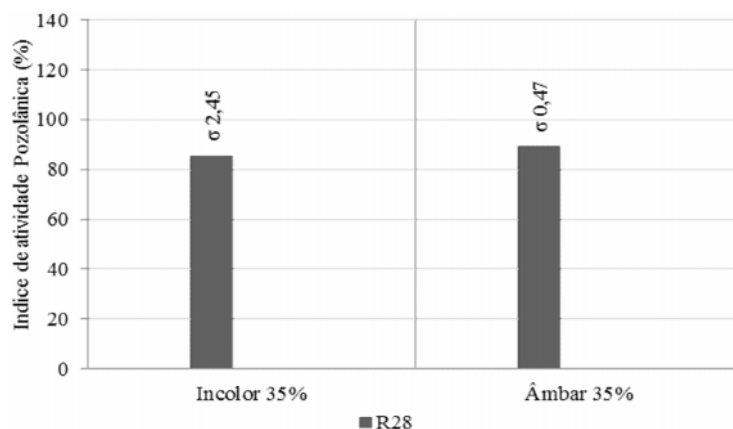


Gráfico 9 - Resultado do ensaio do índice de atividade pozolânica realizado - Brasil.

De acordo com a norma portuguesa EN 4220 (2010a), o material é considerado pozolânico se o índice de atividade pozolânica for igual ou maior à porcentagem de cimento utilizado da mistura. Dessa forma, para serem considerados pozolânicos, os materiais devem ter o IAP no mínimo de 90 e 80% para as misturas com substituição de 10 e 20%, respectivamente. Ou seja, as micropartículas de vidro incolor apresentaram atividade pozolânica.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992b), o material é considerado pozolânico se apresentar valores iguais ou superiores a 75% da resistência do material de referência aos 28 dias. Os dados mostram que as micropartículas de vidro, segundo o IAP, podem ser consideradas pozolânicas, pois apresentam índice de atividade com o cimento de no mínimo 86%. Registrou-se índice mais baixo para as substituições de 20% e aos 90 dias este índice se elevou para todas as situações. Isso provavelmente é devido à maior lentidão das reações pozolânicas em relação ao cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Praticamente não se observa diferenças nos índices quando se avalia a natureza das micropartículas de vidro, incolor ou âmbar. Estudo realizado por Khmiri, Chaabouni e Samet (2013) utilizando vidro oriundo de *containers* de reciclagem concluiu que partículas menores que 20 μm apresentam índice de atividade pozolânica (IAP) de 102%. Recente trabalho realizado no Brasil por Simões *et al.* (2013) constata a pozolanicidade de resíduos de vidro laminado de para-brisas com 98% das partículas menores que 75 μm . No entanto, não avalia sua influência no desempenho de compostos cimentícios.

1.3 Influência das partículas de vidro nas propriedades dos compostos cimentícios no estado fresco

Para o estudo da expansibilidade e do tempo de pega, foi necessário determinar a pasta de consistência normal. Os dados da TAB. 12 mostram que a substituição parcial do cimento por micropartículas de vidro (10 e 20%) praticamente não influenciou a quantidade de água necessária para a obtenção da pasta de consistência normal, tanto nos ensaios em Portugal como no Brasil. Isso se deve, possivelmente, ao fato de os materiais apresentarem superfícies específicas próximas e/ou com mesma porosidade.

TABELA 12 – Ensaios para determinação da pasta de consistência normal

Pasta	Portugal		Brasil	
	a/c	Consistência normal (mm)	a/c	Consistência normal (mm)
Controle	0,28	7	0,30	7
Incolor 10	0,29	8	0,29	7
Incolor 20	0,29	8	0,29	6
Âmbar 10	-	-	0,29	6
Âmbar 20	-	-	0,29	7

Na TAB. 13 apresentam-se os resultados dos ensaios de expansibilidade feitos em Portugal, segundo o método Le Chatelier, para as pastas com e sem micropartículas de vidro incolor. Observa-se que os valores ficaram dentro dos limites preconizados pela norma ASTM C C 1567-08 (2010). Considerando-se a imprecisão das medidas, pode-se considerar que a adição de vidro não afetou a expansibilidade do aglomerante.

TABELA 13- Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas - Le Chatelier – Portugal

Pasta	Medições dos afastamentos entre as agulhas (mm)			Média (mm)
	Primeira	Segunda	Terceira	
Controle	18,0	18,5	19,0	1,0
	10,0	10,5	11,0	
Incolor 10%	10,5	11,5	12,0	1,5
	13,0	14,0	14,5	
Incolor 20%	9,5	10,0	10,0	0,5
	17,0	17,5	17,5	

No Brasil, a expansibilidade volumétrica das pastas foi avaliada com e sem adição de partículas de vidro incolor e âmbar segundo a mesma metodologia adotada em Portugal. Os resultados encontram-se na TAB. 14. Nos ensaios não foi detectada abertura das agulhas para todas as pastas. Os resultados para o cimento foram comparados com os

fornecidos pelo fabricante, que atesta a expansibilidade do cimento em 0 mm. Sabe-se que a cal livre e o óxido de magnésio, ambos no estado cristalino, poderiam hidratar depois da pega do cimento e causar expansões indesejadas (COUTINHO, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997). Os dados mostram que essas fases presentes no vidro, em valores abaixo dos especificados pela norma para o cimento, não afetam os resultados do ensaio (item 4.3). Na literatura não foram encontrados resultados sobre a influência do pó de vidro na expansibilidade das pastas.

TABELA 14 - Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas - Le Chatelier - Brasil

Pasta	Medições dos afastamentos entre as agulhas (mm)			Média (mm)
	Primeira	Segunda	Terceira	
Controle	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Incolor 10%	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Incolor 20%	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Âmbar 10%	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Âmbar 20%	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	

Nos ensaios de tempo de pega realizado em Portugal (TAB. 15), o tempo de início de pega foi semelhante nas três misturas e respeitou o previsto na norma EN 197-1 (IPQ, 2012). Percebe-se ligeiro aumento do início de pega das misturas com substituição de 20% e queda com 10%. O fim de pega foi menor para o Incolor 10% e maior para o Incolor 20%, se comparados ao controle. Tanto o cimento quanto as micropartículas de vidro utilizadas respeitaram o tempo mínimo previsto na norma para início de pega (≥ 1 hora) e fim de pega (≤ 10 horas).

TABELA 15 - Resultados dos ensaios de tempo de pega da mistura – Portugal

Pasta	Tempo de Pega (minutos)	
	Início	Fim
Controle	157	241
Incolor 10%	153	222
Incolor 20%	167	266

Os resultados dos ensaios de tempo de pega realizados no Brasil, para o cimento e para as misturas com as micropartículas de vidro, podem ser vistos na TAB. 16. Os resultados referentes à pasta de consistência normal são similares aos de Portugal. No entanto, os tempos de início e final de pega são sensivelmente diferentes, o que pode estar relacionado à maior superfície específica do cimento brasileiro. Percebe-se que a substituição de 20% de micropartículas de vidro incolor antecipa o início e o fim da pega. Para as micropartículas âmbar, nota-se que o tempo foi retardado e variou o fim de pega em relação ao controle e ao incolor.

TABELA 16 - Resultados dos ensaios de tempo de Pega da mistura – Brasil

Pasta	Tempo de Pega (minutos)	
	Início	Fim
Controle	120	180
Incolor 10%	120	180
Incolor 20%	105	170
Âmbar 10%	125	175
Âmbar 20%	130	190

Nos GRÁFs. 10 e 11 visualizam-se os resultados do ensaio de calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência (DSC) de pastas com e sem substituição de 10 e 20% do cimento Portland por micropartículas de vidro incolor e âmbar, expressos pela variação da temperatura em relação ao tempo. A linha azul representa o compartimento que ficou vazio durante o ensaio (sem amostra). Os dados obtidos podem ser analisados considerando-se que a hidratação das pastas inicia-se pela formação da etringita, fenômeno que normalmente não pode ser detectado por calorimetria, pois ocorre imediatamente após o contato do cimento com a água. Em seguida, ainda no estado fresco, com liberação praticamente nula de calor, inicia-se a formação de silicatos tricálcicos. Após esse período, vários hidratos atingem a condição de supersaturação, o progresso da hidratação é acelerado e torna-se controlado pela nucleação e crescimento dos produtos de hidratação, com a formação de C-H e C-S-H. O período de pós-aceleração acontece em seguida. Nesses estágios, a taxa de hidratação diminui gradualmente, reduzindo o fluxo de calor (BIANCHINI, 2010).

Nos resultados com substituição de 10% (GRÁF. 11) observa-se um período de incubação de aproximadamente duas horas, tanto para o material com micropartículas de vidro incolor e âmbar como para a mostra de referência. Isso indicaria que o tempo de início de

pega do composto cimentício não é afetado pelo uso de 10% de micropartículas de vidro. Após 2h verificou-se elevação da temperatura das amostras, relacionada à liberação de calor (calor de hidratação). A temperatura máxima é atingida, nas três amostras, em aproximadamente 7:30 horas de ensaio. Na pasta de controle, produzida sem a substituição do cimento por micropartículas de vidro, observa-se o maior valor de temperatura 43,8°C. A pasta contendo 10% de micropartículas de vidro incolor apresentou valor de 41,9°C e a pasta com 10% de micropartículas de vidro âmbar apresentou o menor valor de calor de hidratação - 41°C. Isso indicaria que o uso de micropartículas de vidro diminui o calor de hidratação da pasta, tendência esperada, visto que quanto maior o teor de substituição do cimento por micropartículas de vidro, maior a quantidade de sílica ativa presente na pasta. Langan, Wang e Ward (1976) observaram que quando se adiciona sílica em concretos com baixa relação água-cimento a hidratação do cimento é retardada e o período de dormência do concreto é aumentado. O tempo de final de pega não seria afetado pelo uso de 10% de micropartículas de vidro.

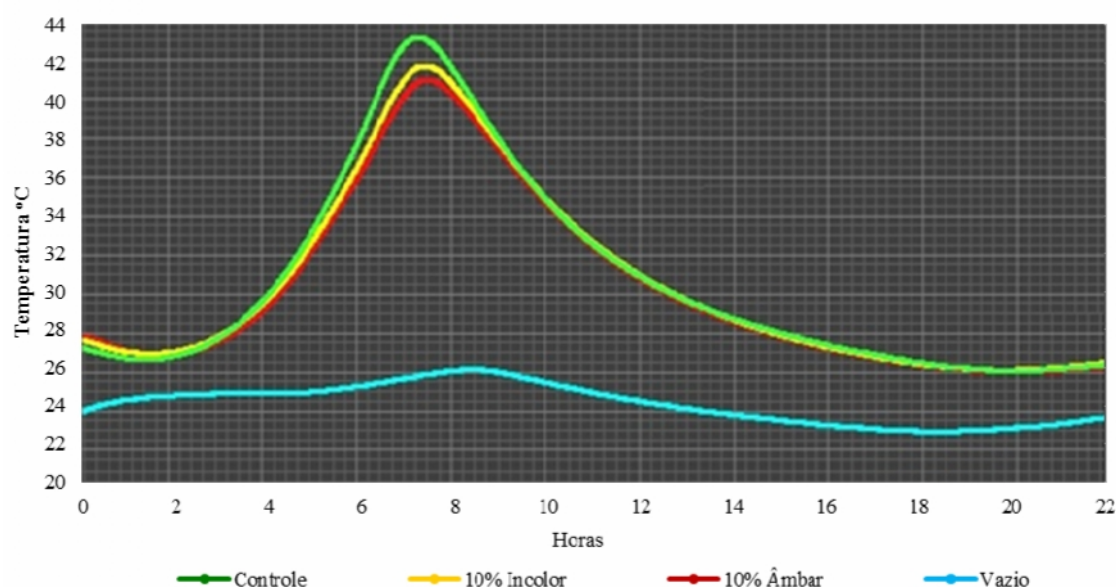


Gráfico 10 - Resultados dos ensaios de calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência (DSC) das pastas com e sem 10% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor/âmbar.

O GRÁF. 11 apresenta os resultado do DSC para as pastas com e sem substituição do cimento por 20% de micropartículas de vidro. Observa-se também período de incubação de aproximadamente duas horas e valor máximo de temperatura entre sete e oito horas de ensaio. Para a pasta de controle, o pico máximo de temperatura foi de 41°C. Para as pastas com substituição de 20% de micropartículas de vidro incolor a temperatura foi de 39°C e

para 20% de micropartículas de vidro âmbar o pico máximo foi de 37°C. Dessa forma, observa-se que o maior teor de substituição promove atraso na reação de hidratação sem afetar o tempo final de pega. Ambos os fatores são característicos de cimentos com adições pozolânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os resultados obtidos com o DSC, quando se analisam as pastas e os tempos de pega com argamassa, indicam, de modo geral, que o uso de 10% de micropartículas de vidro, incolor ou âmbar, não afetam significativamente a hidratação do cimento, que seria mais afetada pelo uso de 20% de micropartículas de vidro.

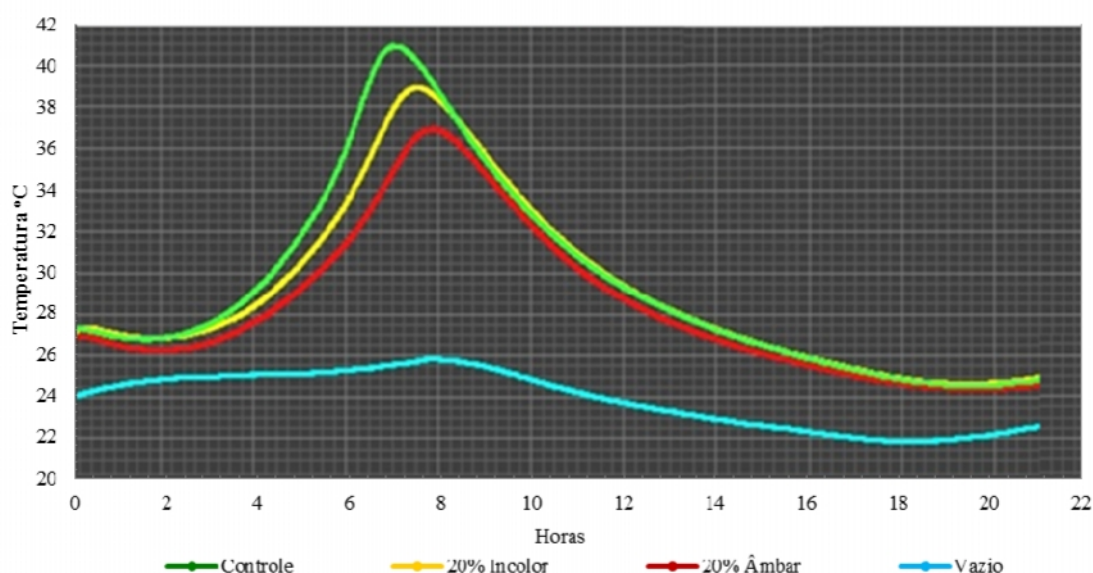


Gráfico 11 - Resultados dos ensaios de calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência (DSC) das pastas com e sem 20% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor/âmbar.

Percebe-se que quanto maior o teor de substituição das micropartículas de vidro, menor o calor de hidratação gerado, o que pode ser atribuído ao menor teor de cimento presente nas amostras. Isso era esperado, em função das menores quantidades de cimento empregadas. Nota-se que houve redução de calor de hidratação quando se aumentou o teor de micropartículas de vidro em 10%. A diferença foi ainda mais significativa para a substituição das micropartículas de vidro âmbar, sendo a redução de 2,8°C se comparado ao controle. A redução se fez mais presente quando se aumentou a substituição para 20% também para as micropartículas de vidro âmbar, sendo a redução do calor de hidratação de 4°C se comparado ao controle.

A TAB. 17 apresenta os resultados de trabalhabilidade das argamassas descrita pelo teste de espalhamento realizado em Portugal. Os valores nas amostras de controle e incolor 20% foram semelhantes, mas o espalhamento na amostra contendo 10% de vidro incolor foi

maior. Estes valores obtidos sugerem que argamassas produzidas com substituição parcial do cimento por 10% de resíduos de vidro poderiam melhorar a trabalhabilidade (7,28%), mas para maiores percentuais de substituição a trabalhabilidade não é afetada (0,05%).

TABELA 17 - Resultados dos ensaios trabalhabilidade, diâmetro de espalhamento mesa – Portugal

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio-Padrão
	1	2	3		
Controle	212	205	205	206	3,30
Incolor 10%	220	223	222	221	1,25
Incolor 20%	207	207	208	207	0,47

O ensaio de trabalhabilidade realizado no Brasil encontra-se na TAB. 18. O valor do diâmetro médio de espalhamento da amostra de controle foi próximo do de Portugal. As amostras contendo as micropartículas de vidro apresentaram menor trabalhabilidade. Observa-se que as micropartículas incolores mostram menor espalhamento e que o uso de maior teor de vidro tende a aumentar a trabalhabilidade. Gomes, Nero e Appleton (1995) ressaltaram que a simples presença de ligantes muito finos, como cal hidratada ou pozolanas, propicia a obtenção de valores do espalhamento muito abaixo do esperado. Kazmierczak e Arnold (2012) também constataram que a diferença de forma dos grãos exerce forte influência na trabalhabilidade das argamassas. Oliveira e Santos (2010), trabalhando com micropartículas de vidro de forma predominantemente laminar, não observaram diferenças significativas na consistência das argamassas, o que indicaria que partículas esféricas poderiam contribuir para a melhoria da trabalhabilidade.

TABELA 18 - Resultados dos ensaios trabalhabilidade diâmetro de espalhamento – Brasil

Argamassas	Diâmetros (mm)		Média
	1	2	
Controle	200	200	200
Incolor 10%	160	160	160
Incolor 20%	170	160	165
Âmbar 10%	185	185	185
Âmbar 20%	188	188	188

Os resultados da trabalhabilidade para os concretos realizados apenas em Portugal, descritos pelo ensaio de funil e tronco de cone, são apresentados nas TAB. 19 e 20. O concreto produzido com substituição do cimento por 15% de vidro incolor teve sua trabalhabilidade aumentada em 11,7% se comparada ao controle. Isso significa que as micropartículas de vidro poderiam levar à economia no uso de superplastificante. De acordo com a literatura (CASTRO, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2008), quando se

utilizam adições finamente divididas, normalmente se melhora a trabalhabilidade no tocante à coesão, pela redução de tamanho e volume de vazios. No caso das micropartículas de vidro, suas dimensões são similares à do cimento. Dessa forma, o efeito filer não seria esperado. Mas a ocorrência da atividade pozolânica poderia afetar o volume e a dimensão dos vazios, na medida em que seriam parcialmente preenchidos pelo silicato resultante da reação. Resultados similares foram obtidos por Kara (2013), quando avaliou a influência de diferentes resíduos de vidros (garrafas, lâmpadas comuns e fluorescentes, etc.) e de diferentes granulometrias adicionadas na forma de lamas (20 e 30% de substituição em massa no cimento) na trabalhabilidade do concreto.

TABELA 19 - Resultados do ensaio de espalhamento por tronco de cone do concreto – Portugal

Concreto	Diâmetros ortogonais (mm)		Média
Controle	595	600	597,5
Incolor 15%	665	670	667,5

TABELA 20 - Resultados do ensaio da trabalhabilidade por funil do concreto – Portugal

Concreto	Tempo (s)
Controle	13,19
Incolor 15%	10,12

4.4 Análise da influência das micropartículas de vidro na microestrutura no estado endurecido

A análise da influência das micropartículas de vidro na microestrutura do concreto se deu diretamente utilizando microscopia de varredura e indiretamente por meio de ensaios mecânicos e de durabilidade.

4.4.1 Análise da microestrutura

Nas FIG. 36 e 37 podem ser visualizadas as imagens, com aumentos de 350 vezes, das amostras com e sem substituição de micropartículas de vidro obtidas com detector de elétrons secundários e retoespalhados, respectivamente. Aumento de menor magnitude foi escolhido de forma a se ter a descrição mais geral da microestrutura do material analisado.

Nas imagens obtidas com elétrons secundários (FIG 35), em todas as amostras, não foram observadas diferenças significativas nas microestruturas em função do uso de micropartículas de vidro. Foi constatada a presença de quartzo em todas as amostras, provavelmente devido à areia utilizada. Não foram observados partículas de vidro distribuídas na pasta, como sugerem Matos e Coutinho (2012). Sobolev *et al.* (2007) constatam que argamassa contendo partículas de vidro em substituição parcial do cimento apresentam menores cristais e baixos teores de hidróxido de cálcio se comparados à argamassa confeccionadas apenas com cimento, devido à ocorrência da reação pozolânica. Nas imagens analisadas, mesmo com grandes aumentos, não foi possível notar diferenças no tamanho do hidróxido de cálcio.

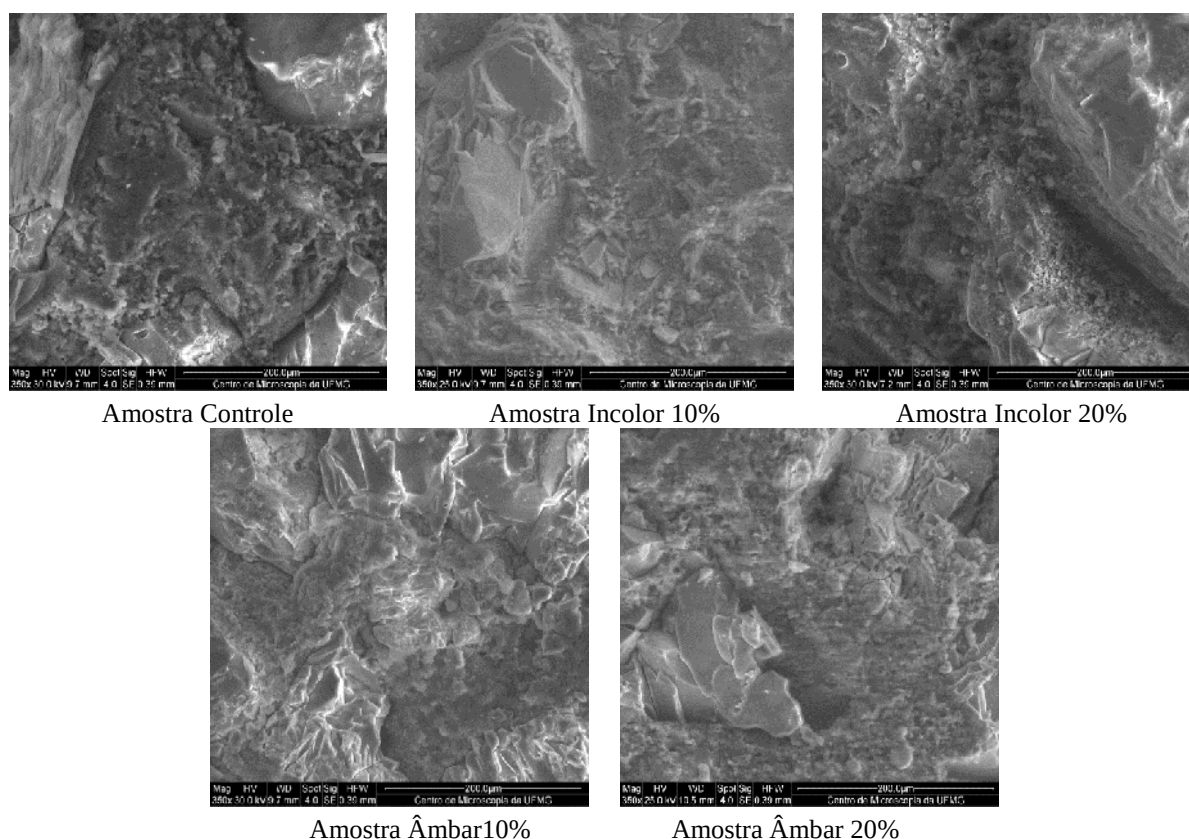


Figura 35 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários) para as amostras com e sem substituição de micropartículas de vidro.

Nas imagens obtidas com detector de elétrons retroespalhados podem-se identificar regiões de cor cinza na tonalidade mais clara. Essas regiões foram mais visíveis na amostra de controle (FIG. 36), em menor quantidade e maior finura na amostra com 20% de vidro incolor. Nessa técnica, as regiões da amostra com átomos de maior número atômico emitem mais sinais de retroespalhamento e aparecem mais claras na imagem. De acordo

com Kjellsen, Detwiler e Gjo (1990), nas imagens obtidas com elétrons retroespalhados, comparativamente, o cimento anidro apresenta-se com a tonalidade mais clara (branco), o hidróxido de cálcio mostra-se na tonalidade cinza claro, outros produtos da hidratação e os poros apresentam-se na cor preta.

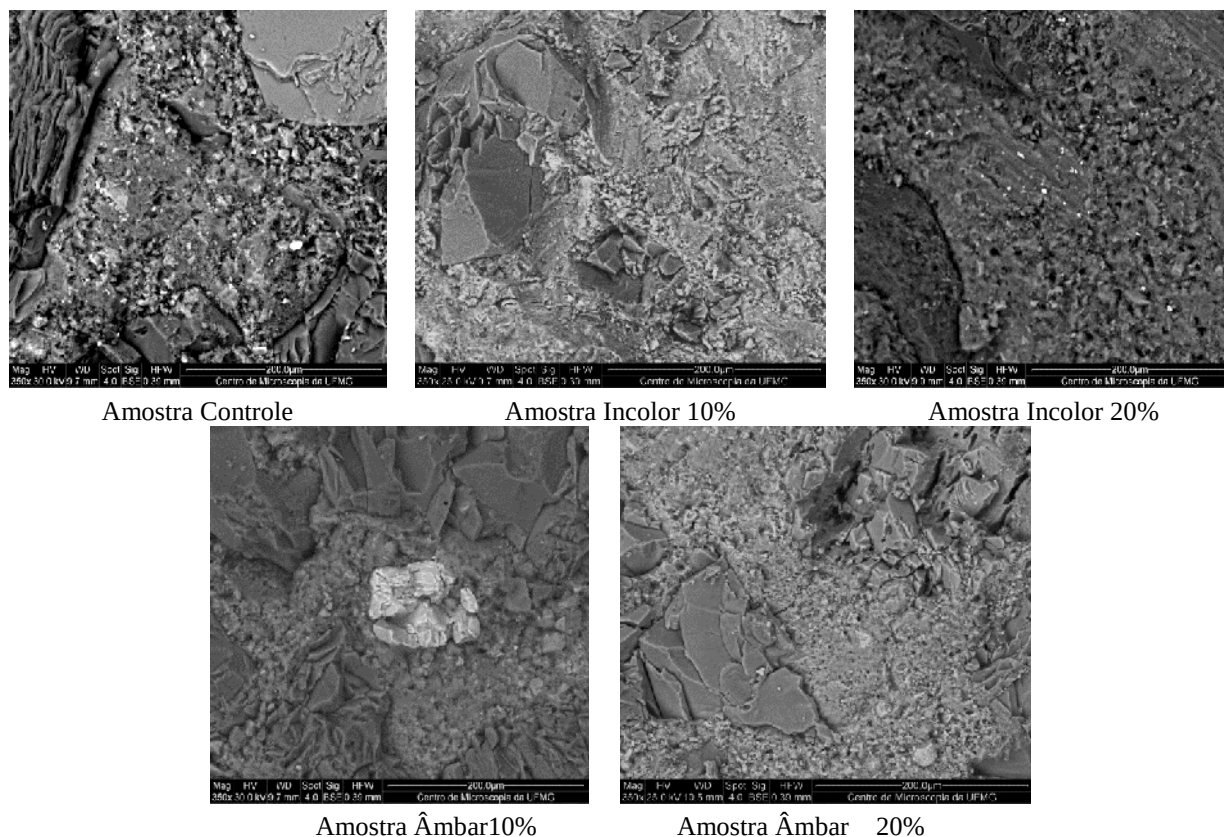


Figura 36 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) para as amostras com e sem substituição de micropartículas de vidro.

O uso do EDS ao longo de determinadas regiões das diferentes amostras (FIG. 37, 38, 39 e 40) permitiu identificar a presença de quartzo e a predominância do silício e do cálcio na maioria das regiões analisadas. Contudo, não foi possível distinguir os silicatos de cálcio e dos hidróxidos de cálcio, pois a análise computa fases que estão abaixo da superfície. Mais estudos são necessários para que se tenha melhor interpretação dos resultados, pois mesmo na literatura as análises microestruturais não são conclusivas. Sugere-se estudo com base em eletros retroespalhados no tocante apenas à coloração.

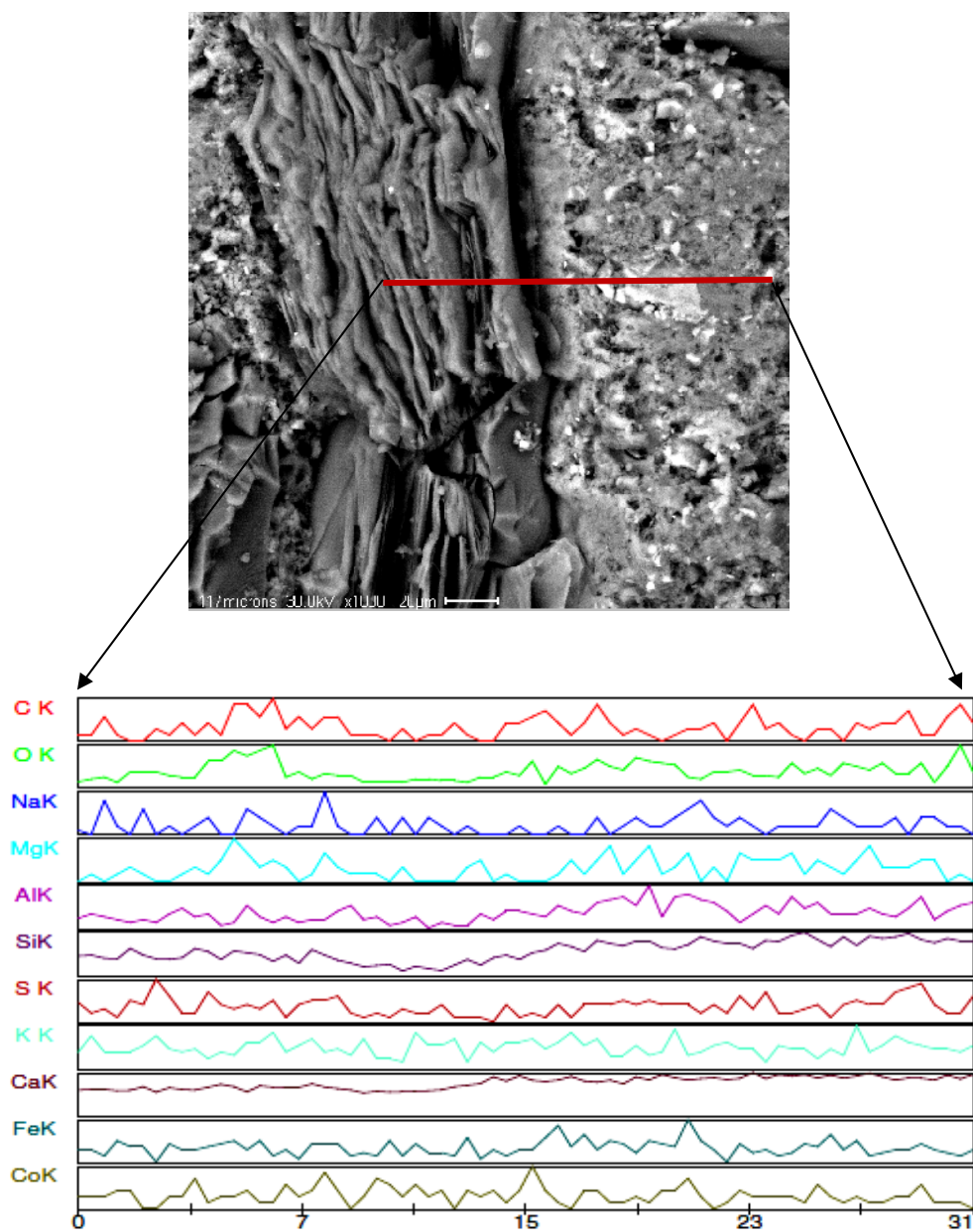


Figura 37 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para as amostras de controle.

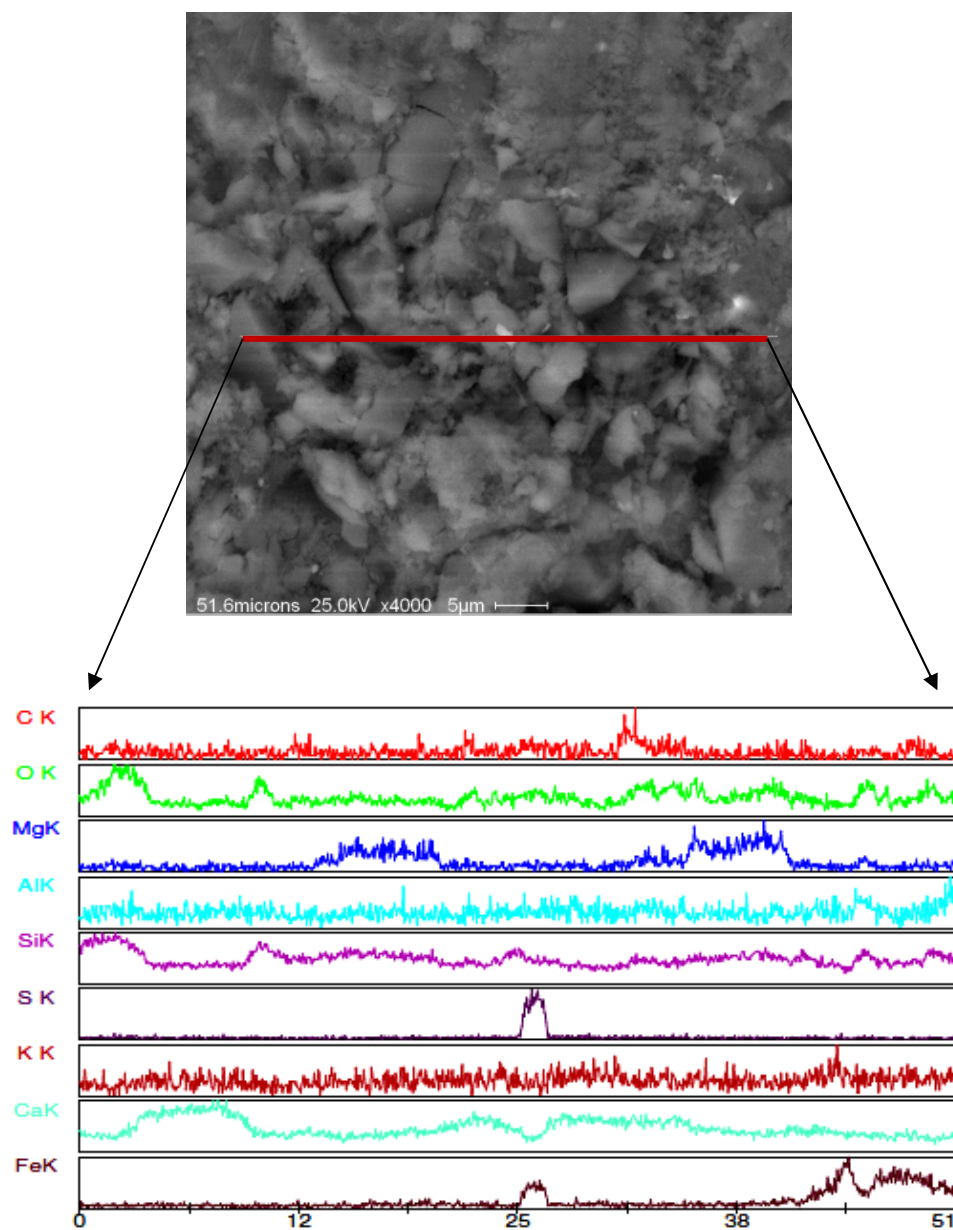


Figura 38 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de incolor 10%

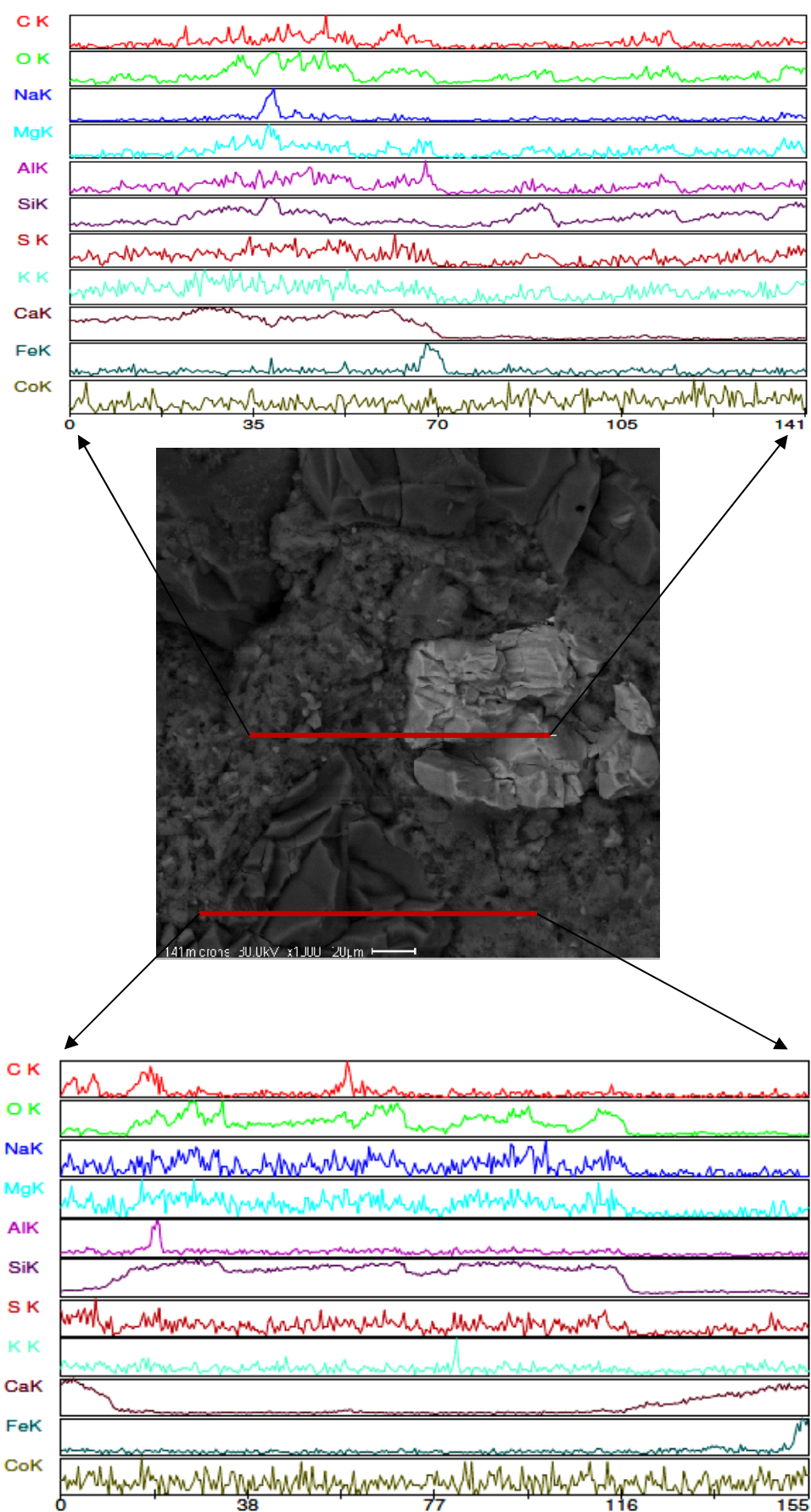


Figura 39 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de âmbar 10%.

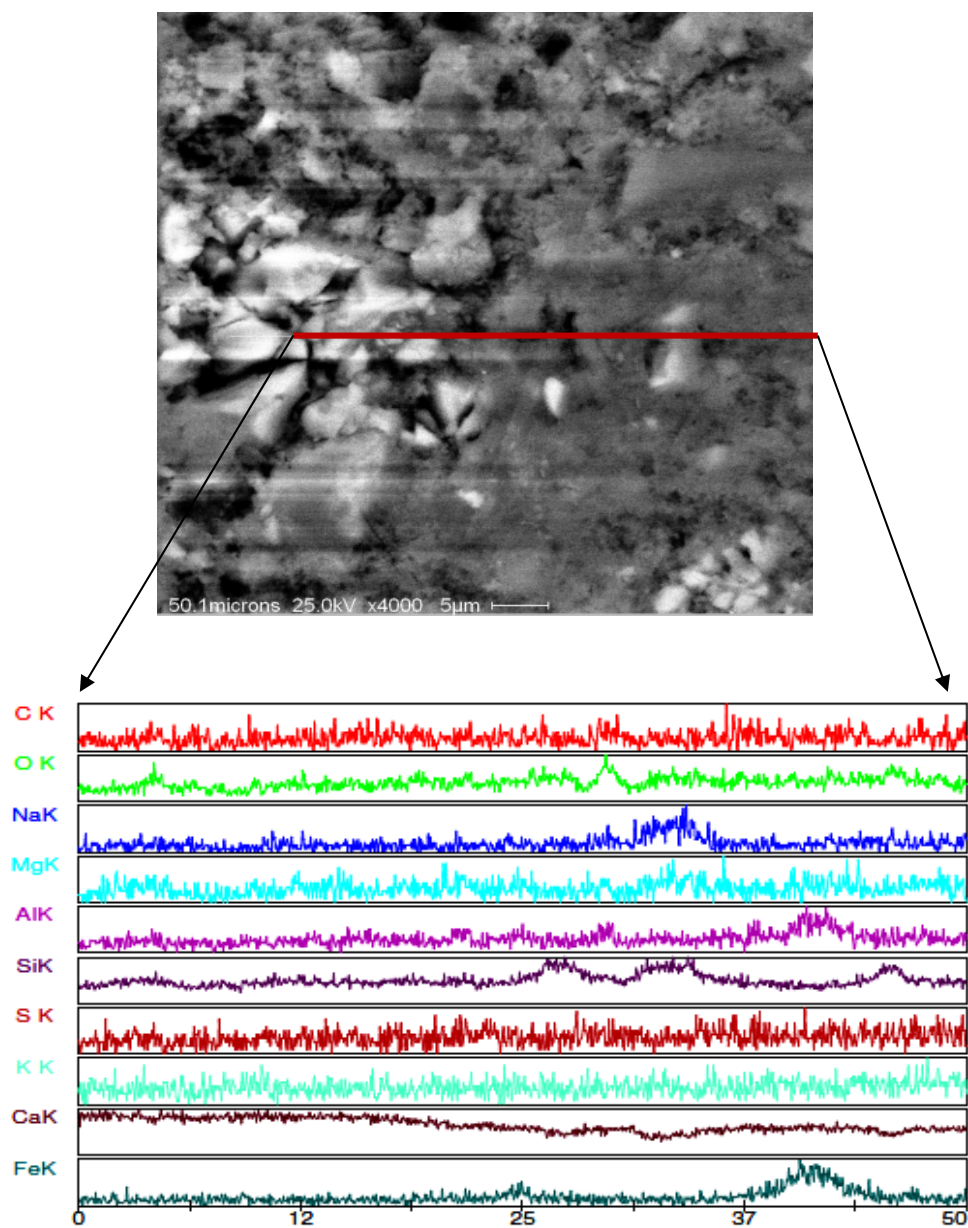


Figura 40 - Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de âmbar 20%.

4.4.2 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados em Portugal para argamassas, em corpos de prova prismáticos, são mostrados no GRÁF. 12, no qual estão localadas as médias aritméticas de seis resultados individuais para cada tipo de composto. Os valores mostram que aos 28 dias a amostra contendo 20% de vidro incolor foi a que apresentou menor resistência. As amostras de controle e contendo 10% de vidro incolor tiveram praticamente a mesma resistência mecânica. Aos 90 dias praticamente teve-se o mesmo valor de resistência para as amostras com e sem micropartículas de vidro. O desenvolvimento mais lento da resistência para as amostras com 20% de vidro seria devido à reação pozolânica, que afeta a cinética de hidratação do cimento.

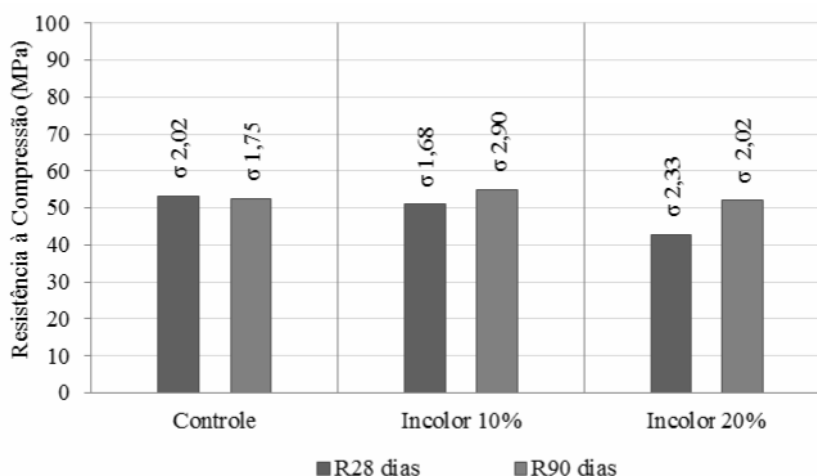


Gráfico 12 - Resultados da resistência à compressão das argamassas – Portugal.

Os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão realizados no Brasil são apresentados, no GRÁF. 13. Observa-se crescimento monotônico da resistência com o tempo de cura para todas as combinações. Aos sete dias a adição de 10% de vidro incolor ou âmbar aumentou ligeiramente a resistência mecânica das amostras. Aos 28 dias as amostras com e sem adição de 10 e 20% de vidro incolor como âmbar apresentaram o mesmo valor de resistência mecânica. De forma geral, percebe-se lentidão nas reações de hidratação quando se usam 20% de micropartículas de vidro, o que evidenciaria o caráter pozolânico das micropartículas de vidro (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esses resultados são similares com os obtidos em Portugal e por Shayan e Xu (2004), Zhi, Caijun e Jianming (2009) e Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011).

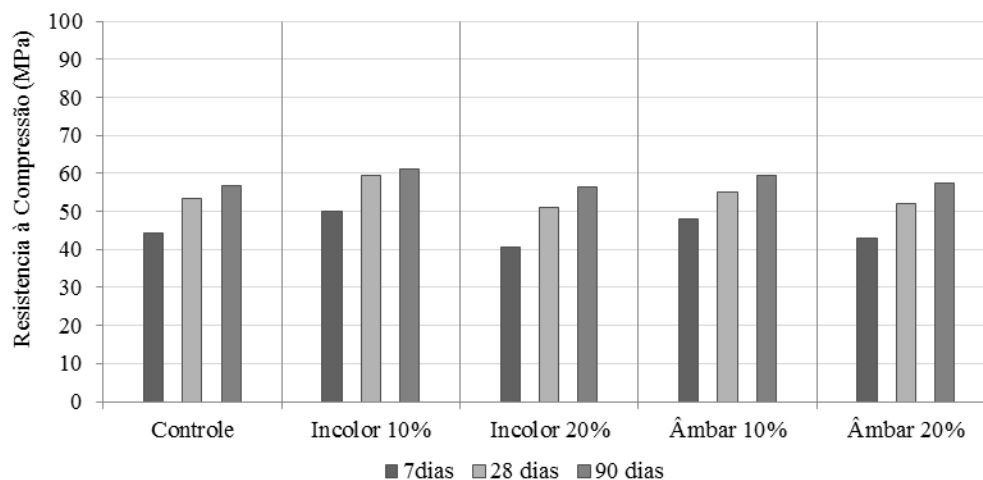


Gráfico 13 - Resultados da resistência à compressão das argamassas – Brasil.

Os resultados de resistência à compressão (médias e desvios-padrão) dos concretos confeccionados com e sem 15% de micropartículas de vidro incolor encontram-se no GRÁF. 14. Percebe-se que nas amostras de controle, como era de se esperar, a resistência mecânica aumentou conforme aumentou a idade das amostras. O mesmo pode ser percebido na amostra com vidro. Os valores encontrados mostram bom desempenho dos concretos com adições de micropartículas de vidro em todas as idades estudadas. No entanto, o crescimento foi mais lento nas amostras com 15% de substituição. Esses resultados são similares aos obtidos por Kara (2013), que utilizou substituições de 20% de micropartículas de vidro de cacos de garrafa incolores e âmbar, produzidos em ambiente saturado, e indicam o efeito benéfico das micropartículas sobre a porosidade dos concretos (VAN VLACK, 1984). Os resultados de Moncea *et al.* (2013), que utilizaram resíduos de vidro provenientes de tubos de raios catódicos em argamassa confeccionadas com e sem escória e cinzas volantes, também mostram que a resistência à compressão das amostras com resíduo de vidro, na maioria dos casos, é semelhante à do composto sem vidro. De acordo com os autores isso estaria relacionado ao efeito filler dos resíduos. Goldman e Bentur (1993) analisaram matrizes com e sem adição de sílica ativa ou carbono não reativo e relataram que as adições causaram significativas modificações nas microestruturas das pastas. Os autores observaram que a substituição parcial do cimento por sílica ativa não alterou a resistência à compressão. No caso da adição de carbono, a resistência foi reduzida, passou de 86 MPa para ≈ 70 MPa.

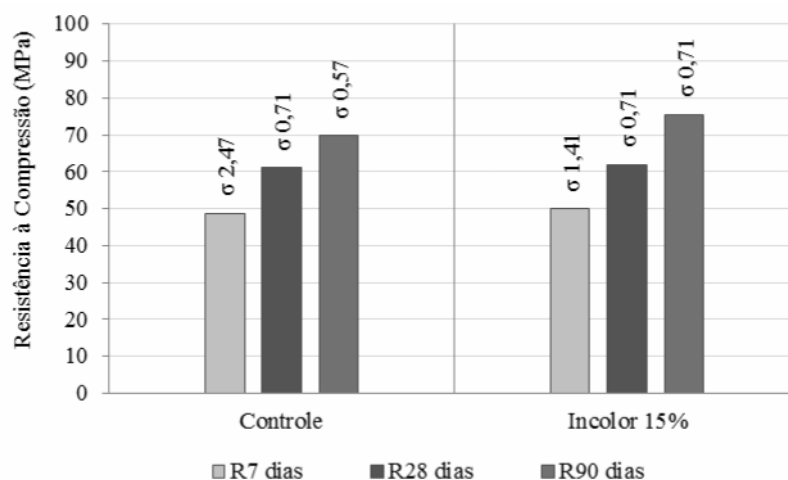
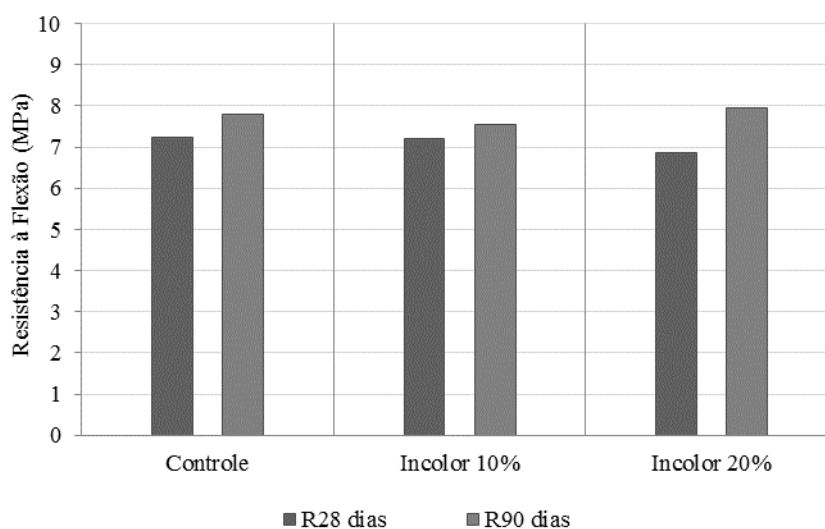


Gráfico 14 - Resultados da resistência à compressão dos concretos – Portugal.

4.4.3 Resistência à tração na flexão

Nos GRÁF. 15 e 16 são apresentados os resultados do ensaio da resistência à flexão de argamassas, realizados em Portugal, aos 28 e 90 dias, e no Brasil aos 28 dias. De forma similar aos resultados da compressão, são apresentados os valores médios e os desvios-padrão. Observa-se, nos dados de Portugal, que o crescimento da resistência com a idade foi mais perceptível para as amostras com 20% de resíduo de vidro. Além disso, o desempenho da argamassa de controle, aos 28 e 90 dias, foi praticamente o mesmo das argamassas contendo 10% de partículas incolores.



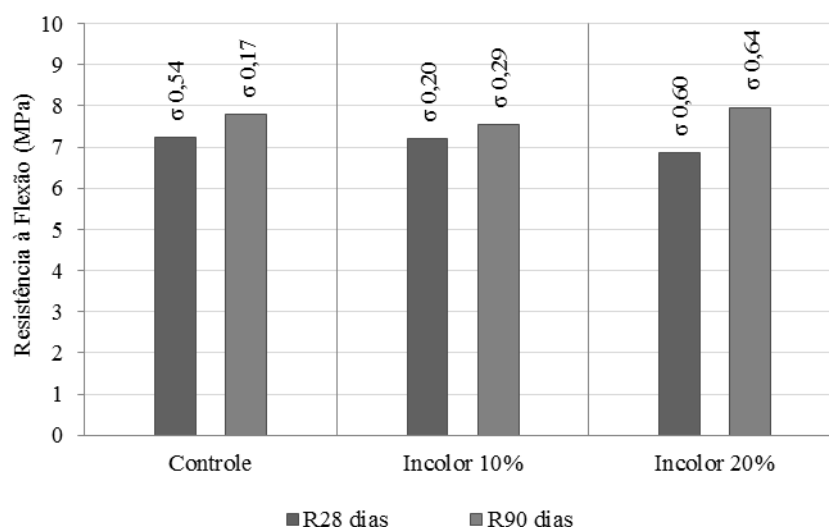


Gráfico 15 - Resultados da resistência à flexão das argamassas – Portugal.

Os valores obtidos no Brasil são ligeiramente mais baixos se comparados aos de Portugal, mas as mesmas tendências foram observadas. Os resultados evidenciam que o uso de micropartículas de vidro praticamente não afetou a resistência à flexão. Os resultados são similares aos obtidos por Nassar e Soroushian (2012) em estudo desenvolvido com resíduo de vidro de diferentes cores e com granulometria de 13 μm como substituo ao cimento. Se comparados aos dados brasileiros para 28 dias, a resistência à compressão foi mais sensível ao uso de micropartículas de vidro em substituição ao cimento.

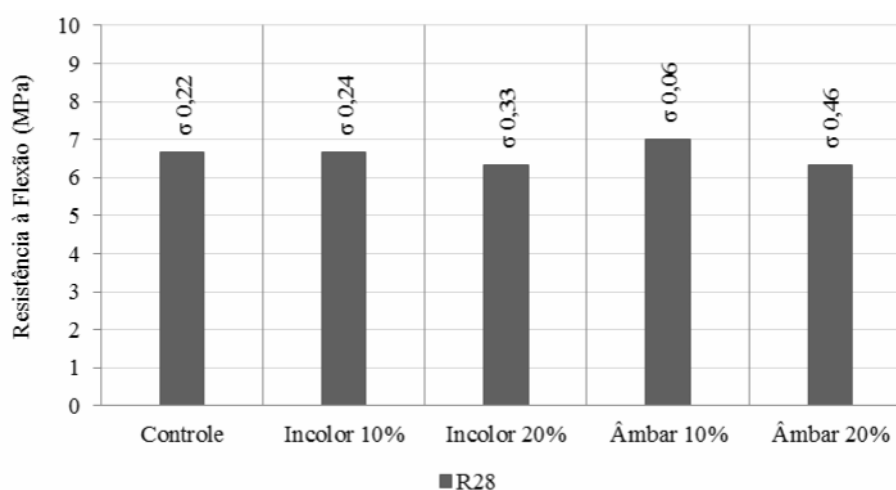


Gráfico 16 - Resultados da resistência à tração por flexão das argamassas aos 28 dias – Brasil.

4.4.4 Módulo de elasticidade

Os valores obtidos aos 7, 28 e 90 dias para módulo de elasticidade estático dos concretos com e sem adição de 15% de micropartículas de vidro incolor realizados em Portugal são apresentados no GRÁF. 17. A introdução de 15% de micropartículas de vidro nos concretos praticamente não afetou o módulo de elasticidade aos 7, 28 e aos 90 dias. Não se observa, como na resistência à compressão, crescimento significativamente mais lento nas amostras com 15% de substituição.

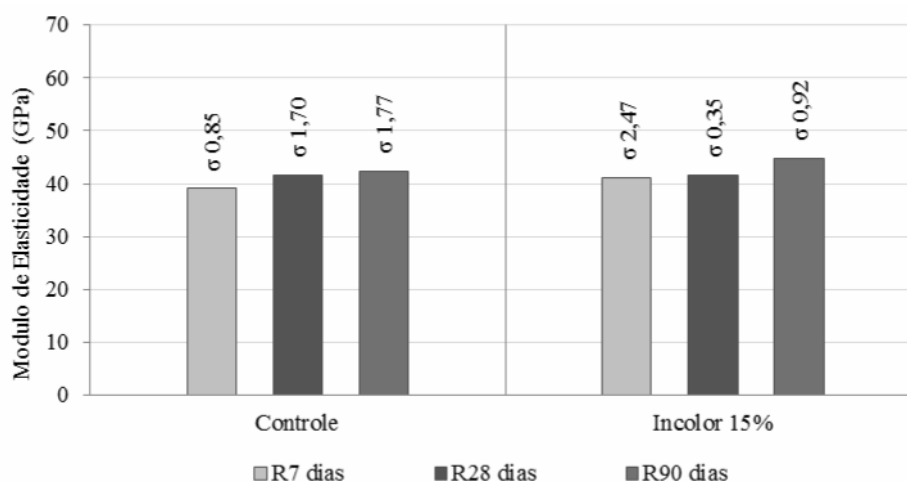


Gráfico 17 - Resultados do módulo de elasticidade estático dos concretos – Portugal.

No Brasil, o módulo de elasticidade dinâmico foi realizado em argamassas dos compostos cimentícios de referência e com substituição parcial de 10 e 20% de cimento por micropartículas de vidro incolor e âmbar, após 28 e 90 dias de cura. O GRÁF. 18 apresenta os valores considerando-se a média de 10 medidas de cada tipo de argamassa. Apesar de haver correlação entre os módulos estático e dinâmico, não foi possível comparar os resultados dos dois países, pois o agregado graúdo afeta significativamente a medida do módulo de elasticidade (COUTINHO, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Nas argamassas o módulo de elasticidade praticamente não foi afetado pelo uso de micropartículas de vidro aos 28 e 90 dias, sendo os resultados muito próximos dos de referência, independentemente da natureza e quantidade de substituição. Isso significaria que a porosidade da amostra não foi afetada pelo uso de micropartículas de vidro e/ou que a reação pozolânica, com a diminuição o hidróxido de cálcio e o maior teor de silicatos de cálcio hidratados, não alterou o módulo. Ou seja, o módulo não seria sensível ao teor de hidróxido de cálcio.

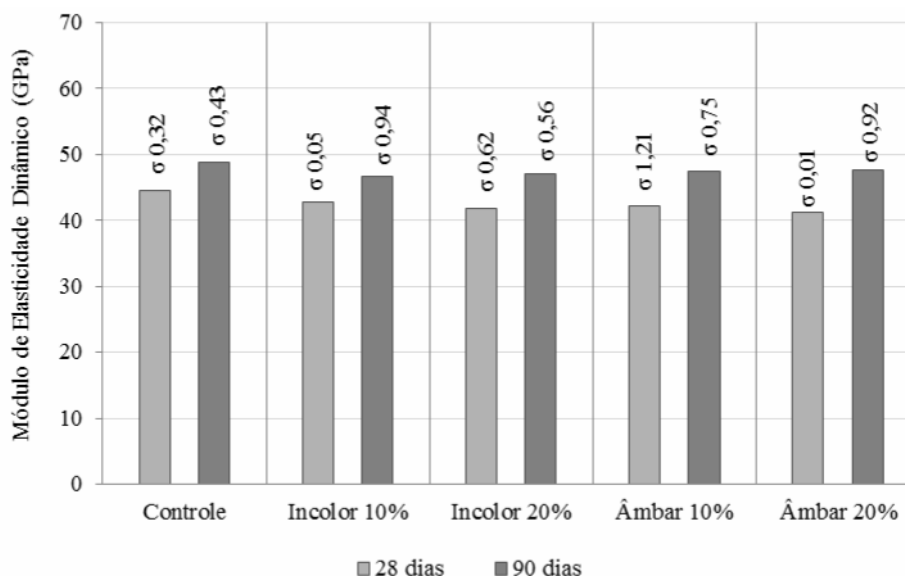


Gráfico 18 - Resultados módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 e 90 dias de cura – Brasil.

4.4.5 Permeabilidade ao oxigênio

Na TAB. 21 são apresentados os valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigênio calculados a partir da equação 3.2. O coeficiente está relacionado à velocidade de percolação do fluido através do meio poroso da argamassa e sujeito à diferença de pressão entre os pontos considerados.

TABELA 21 - Resultados da permeabilidade ao oxigênio - Brasil

Permeabilidade ao oxigênio $K(10^{-16} \text{ m}^2)$			
Amostra	K	Média	Desvio-Padrão
Controle	1,86	1,96	0,09
	1,96		
	2,05		
Incolor 10%	1,47	1,73	0,24
	1,96		
	1,78		
Incolor 20%	1,61	1,48	0,17
	1,29		
	1,55		
Âmbar 10%	1,27	1,09	0,24
	1,20		
	0,81		
Âmbar 20%	1,29	1,04	0,23
	1,02		
	0,82		

No GRÁF. 19 são apresentados os valores médios obtidos do coeficiente de permeabilidade ao oxigênio das amostras e o desvio-padrão das medidas realizadas. Para Neville (1997), a permeabilidade ao oxigênio reproduz melhor as condições reais no que diz respeito à armadura, sendo mais representativa para avaliar o concreto em serviço. De acordo com Lee, McCarthy e Dhir (1997), em relação à durabilidade, um concreto com coeficiente de permeabilidade ao oxigênio abaixo de $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ é considerado bom; entre 1×10^{-16} e $3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, é moderado; e acima de $3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ é pobre. Os dados mostram que o uso de micropartículas de vidro em substituição ao cimento não alterou a classe de desempenho dos compostos cimentícios (moderada) no tocante à durabilidade, avaliada pelo ensaio de permeabilidade ao oxigênio. Já a adição de vidro melhorou a durabilidade dos compósitos neste requisito, diminuindo a permeabilidade das amostras.

O uso de maior teor de substituição parece contribuir para a diminuição da permeabilidade. A utilização de 20% de partículas de vidro âmbar foi, entre as amostras, a que apresentou menor permeabilidade ao oxigênio, indicando que a natureza das micropartículas de vidro âmbar (e em maior quantidade) pode contribuir para uma menor porosidade da mistura. Jain e Neithalath (2009) estudaram pastas de cimento e micropartículas de vidro em que a substituição do cimento pelo vidro levou a mistura uma menor porosidade. Provavelmente devido à composição química e à estrutura não cristalina da sílica, que favorecem a ocorrência da reação pozolânica quando o vidro é colocado em contato com o hidróxido de cálcio, e os produtos da reação promoveriam um refinamento e aumento na tortuosidade da rede de poros, assim como a diminuição da conectividade (JAIN; NEITHALATH, 2010; McCARTER; TRAN, 1996; SHI; ZHENG, 2007).

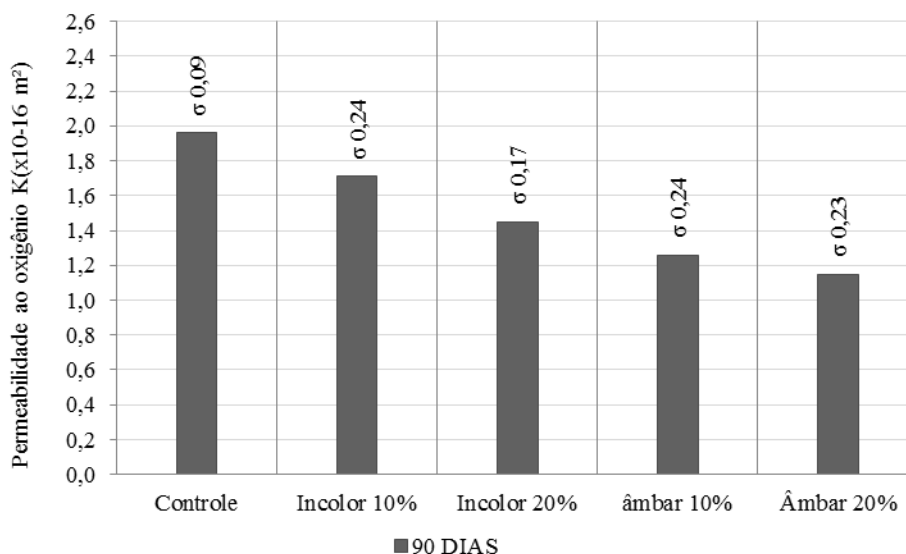


Gráfico 19 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigênio.

Com base no GRÁF. 20, não foi possível correlacionar a permeabilidade dos compostos com a resistência mecânica aos 90 dias. A queda na permeabilidade devido ao uso de micropartículas de vidro não reflete uma melhoria na resistência à compressão, como relatado por Frizzo (2001). Isso poderia ser explicado, uma vez que as diferenças encontradas nos ensaios de permeabilidade, não seriam significativas, mantendo-se a resistência praticamente constante, independente do teor de substituição. Esse argumento seria coerente com o fato de que, em termos de permeabilidade, o uso de partículas de vidro não alterou a classe de desempenho dos compostos cimentícios (moderada) no tocante à durabilidade (NEVILLE, 1997).

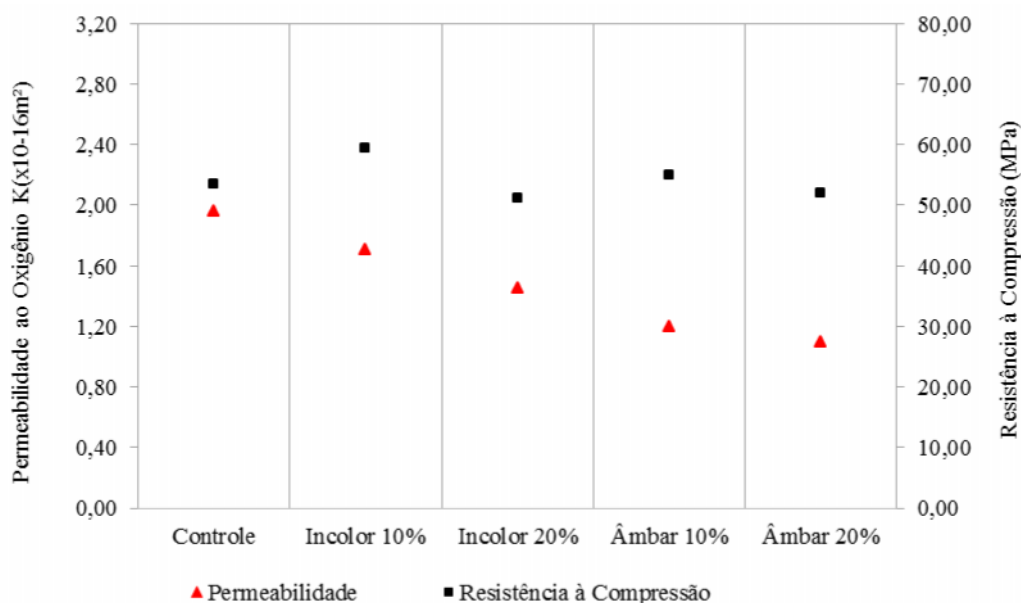


Gráfico 20 - Resultados do ensaio de resistência à compressão x permeabilidade.

4.4.6 Carbonatação acelerada

O GRÁF. 21 apresenta os resultados de ensaio de carbonatação acelerada realizado no Brasil de amostras de controle e com substituição por micropartículas de vidro incolor e âmbar (10 e 20%). No gráfico são apresentadas as médias das medidas e o seu respectivo desvio-padrão, após 60 dias de cura em câmara de carbonatação. Observa-se que todas as amostras sofreram carbonatação. No entanto, a profundidade nas amostras confeccionadas com micropartículas de vidro foi maior do que nas amostras sem micropartículas de vidro e a profundidade foi maior, tanto quanto o maior teor de vidro utilizado. Após 60 dias na camara de carbonatação, a adição das micropartículas de vidro promoveu aumento da espessura da camada carbonatada em aproximadamente 1,3 mm em relação à amostra de controle. Isso indicaria serem as amostras com vidro mais permeáveis. Não foi possível identificar a influência do teor e da natureza das micropartículas de vidro (diferenças de 0,25 mm). Deve ser ressaltado que os valores de avanço da carbonatação foram pequenos porque as amostras encontram-se com 48% de umidade, condição que dificulta a difusão do CO₂ nos poros. As maiores velocidades de carbonatação ocorrem com umidade relativa entre 50 e 75%, conforme relatado na literatura por Parrot (1987), Ceukelaire e Nieuwenburg (1993) e Neville (1997).

De acordo com a literatura, os produtos da reação pozolânica alteram a estrutura de poros, que se tornam mais refinados, menos conectados e mais tortuosos, promovendo atraso no avanço da carbonatação. Isso ocorreria para fatores água/aglomerante inferiores a 0,45. De modo geral, em compostos com adições pozolânicas, tem-se menor quantidade de Ca(OH)₂ precipitado na pasta de cimento, devido às reações pozolânicas. Dessa forma, tem-se diminuição da capacidade de proteção da pasta em relação à frente de carbonatação (McCARTER; TRAN, 1996).

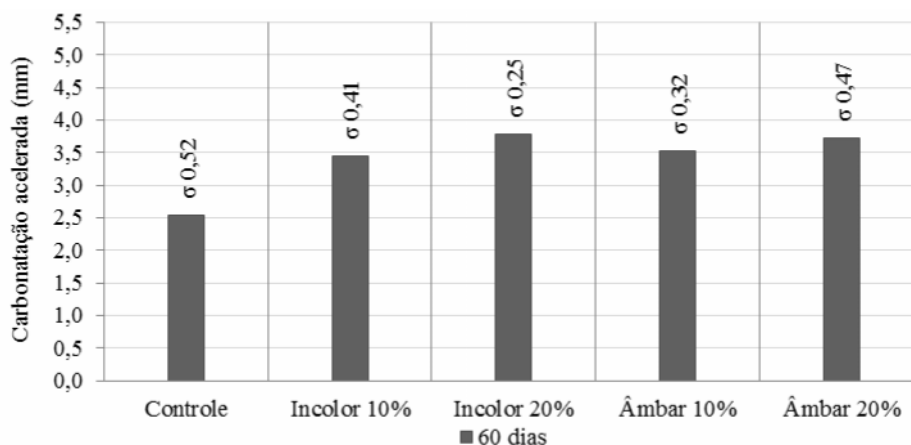


Gráfico 21 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada após 60 dias de ensaio.

Resultados similares de carbonatação foram obtidos por Matos e Coutinho (2012) no estudo utilizando resíduos de vidro de diferentes naturezas. Segundo alguns autores, o consumo de hidróxido de cálcio, devido a ocorrência da reação pozolânica nos compostos contendo resíduo de vidro, poderia ser responsável por essa maior profundidade de carbonatação (MATOS; COUTINHO, 2012; KULAKOWSKI, 2002; SILVA *et al.*, 2009).

4.4.7 Reação álcali-sílica

Os valores médios, relativos a duas medidas dos ensaios realizados em Portugal para avaliar a expansão devido à reação álcali-sílica, para cada mistura e idade, são apresentados no GRÁF. 22, no qual também são indicados os valores de referência. Na TAB. 22 estão alocados os dados obtidos para cada amostra aos 14 dias, que é a data de referência para a classificação do material quanto à gravidade da ocorrência da reação álcali-sílica: classe I - inferior a 0,10% (agregado não reativo), classe II - entre 0,10 e 0,20% (agregado potencialmente reativo), classe III - se superior a 0,20% (agregado mais potencialmente reativo), sendo que os da classe III são mais reativos do que os da classe II, conforme especificação E-461-3 (LNEC 2007).

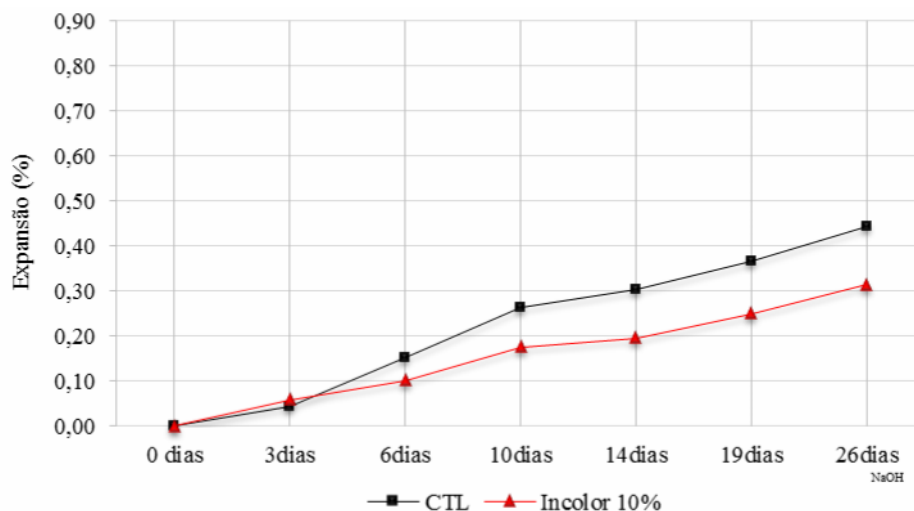


Gráfico 22 - Resultados do ensaio da reação álcali-sílica – Portugal.

TABELA 22 - Resultados do ensaio da expansão álcali-sílica aos 14 dias - Portugal

Misturas	$e_{\text{médio}}$ (%)	Desvio-padrão
Controle	0,30	0,02
Incolor 10%	0,19	0,01

Os dados indicam que a expansão devido à reação álcali-sílica enquadra o agregado na classe III quando se utilizou a areia CEN natural siliciosa associada a 100% de cimento CEM I 42,5R. Quando se utilizou 10% de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor, ocorre uma inibição da reação álcali-sílica e a reatividade passa a ser classe II. A melhoria quanto à ocorrência da reação álcali-sílica devida ao uso de micropartículas de vidro também foi constatada por diferentes autores, como Shayan e Xu (2004; 2006), Taha e Nounu (2007) e Matos e Coutinho (2012).

Os resultados médios (referentes a três medidas) dos ensaios de reação álcali-sílica realizados no Brasil são mostrados no GRÁF. 23 e na TAB. 23. Neles estão especificados os valores de classificação da reatividade dos agregados conforme as recomendações da NBR 15577-4 (ABNT, 2008). As classes foram as mesmas adotadas em Portugal, só que se considerou a leitura da expansão aos 16 dias. Como na ASTM C-1260 (ASTM, 2001) a expansão entre 0,10 e 0,20% aos 16 dias de idade pode indicar agregados, tanto com comportamento inócuo como reativo, neste estudo optou-se por levar o ensaio até 30 dias de idade, conforme sugerido por essas normas. Aos 16 dias, a amostra contendo 20% de vidro âmbar ficou na classe dos não reativos. As amostras com 10 e 20% de micropartículas de vidro incolor e 10% de âmbar ficaram na classe II, como em Portugal:

material potencialmente reativo. Aos 30 dias o uso de 20% de vidro âmbar associou-se à classe II. Todas as demais misturas mudaram para uma classe mais alta da reação álcali-sílica, ficando na faixa dos materiais potencialmente reativos, acompanhando a tendência do material avaliado em Portugal aos 26 dias. Resultados de Kara (2013) mostram que a menor expansão devida à reação álcali-sílica se deu quando se substituiu o cimento por ~30% partículas de vidro âmbar (Blaine de 542 m²/kg).

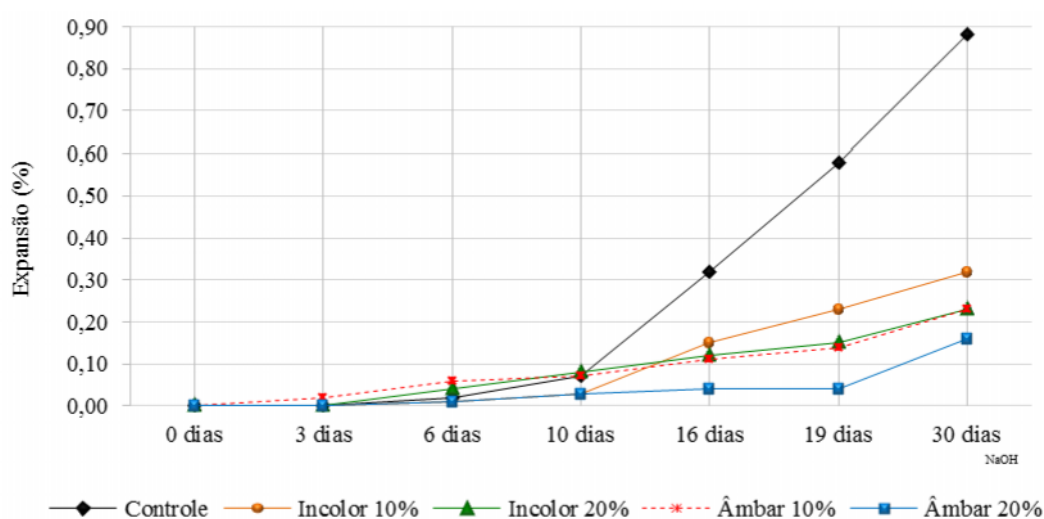


Gráfico 23 - Resultados do ensaio da reação álcali-sílica – Brasil.

TABELA 23 - Resultados do ensaio da expansão ASR aos 16 e 30 dias - Brasil

Misturas	Média (%)			
	16 dias	Desvio-padrão	30 dias	Desvio-padrão
Controle	0,32	0,01	0,88	0,01
Incolor 10%	0,15	0,01	0,32	0,02
Incolor 20%	0,12	0,00	0,23	0,01
Âmbar10%	0,11	0,00	0,23	0,05
Âmbar20 %	0,04	0,01	0,16	0,02

ASR: reação álcali-sílica.

Ficou evidente que o uso do micropartículas de vidro inibe a reação álcali-sílica mesmo utilizando-se agregados altamente reativos. Resultados da literatura indicam que o uso de micropartículas de vidro como material cimentício suplementar é eficaz na redução da expansão da reação álcali-sílica (NASSAR; SOROUSHIAN, 2012; THOMAS, 2011; RIVARD; LABRECQUE, 2009; CARLES GIBERGUES *et al.*, 2008; XI *et al.*, 2004; CYR; KAWAMURA; FUWA, 2003; REINDL, 2003; CARPENTER; CRAMER, 1999; BAZANT; JIN; MEYER, 1998; MEYER; BAXTER; JIN, 1996; DIAMOND; THAULOW, 1974). Primeiramente, isso indicaria que os álcalis presentes no vidro em quantidade superior à indicada para materiais pozolânicos (item 2.1.2) não contribuiriam

para a ocorrência da reação álcali do vidro. Essa afirmativa pode estar relacionada ao fato de que os álcalis ficaram encapsulados nos géis da pasta, impedidos de reagir (SHAYAN; XU, 2006). Em segundo lugar, o alto teor de sílica do vidro (item 2.2) parece não ter promovido a ocorrência da reação álcali-sílica do cimento. Esses efeitos estariam relacionados ao fato de que a alta superfície específica e a amorficidade da sílica fizeram com que a sílica presente no vidro reagisse com o hidróxido de cálcio logo nas primeiras idades, não sobrando sílica para reações posteriores, quando o concreto estivesse endurecido e sem poder acomodar os produtos da reação.

4.4.8 Resistividade elétrica

Os valores médios referentes às duas medidas de resistividade elétrica realizados em Portugal nos corpos de prova de argamassa (controle e com incolor 10%), nas idades de 2, 7, 14, 21 e 28 dias, são mostrados na TAB. 24 e no GRÁF. 24, em que o perfil de evolução da resistividade média para todas as idades e os desvios-padrão referentes às medidas realizadas a cada idade são apresentados. Nas primeiras idades os materiais com e sem micropartículas de vidro apresentam resistividades similares. A partir dos 14 dias, observa-se que a resistividade elétrica das amostras contendo incolor 10% foi maior que a registrada pela amostra de controle, aos 28 dias os valores registrados foram de 54,30 e 35,77 k Ω .cm para as amostras com e sem micropartículas de vidro, respectivamente.

TABELA 24 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica nas argamassas DC (K Ω .cm) Portugal

Idade (dias)	Controle	Incolor 10%
2	16,09	16,30
7	26,88	28,43
14	32,89	38,89
21	35,88	47,26
28	35,77	54,30

DC: corrente contínua.

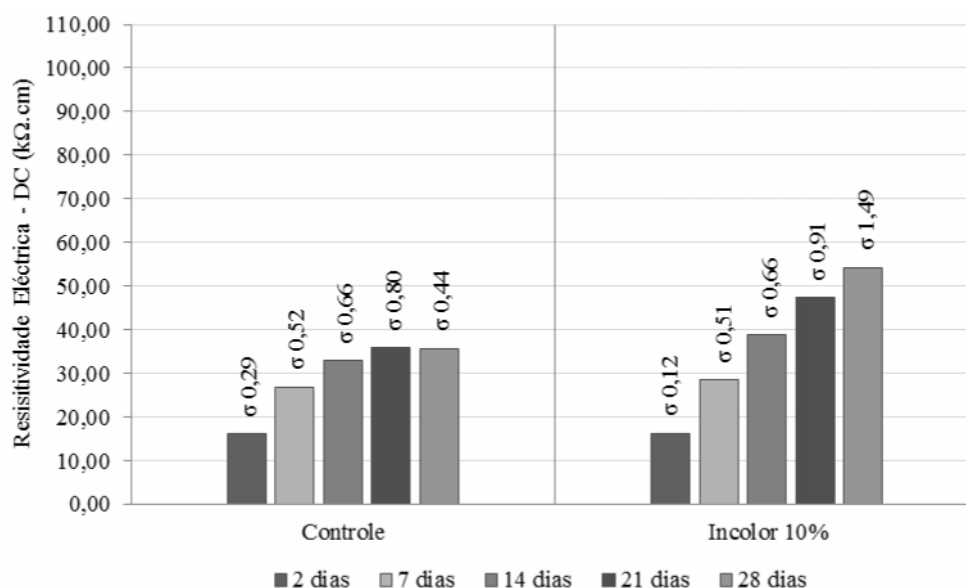


Gráfico 24 - Resultados do ensaio resistividade elétrica das argamassas – Portugal.

A resistividade elétrica está relacionada à microestrutura dos compostos, em especial à porosidade (tamanho, distribuição e conectividade) e à presença de íons, ou seja, a resistividade está relacionada ao fluxo de íons que se difundem nos compostos cimentícios por meio da água presente nos poros. Segundo Gowers e Millard (1999), o fluxo iônico entre as regiões anódica e catódica da armadura é regulado pela resistência elétrica do concreto. Quanto menor a resistividade elétrica do concreto, maior a corrente elétrica circulante e maior a velocidade do processo corrosivo, ou seja, quanto maior a resistividade elétrica, maior a dificuldade dos íons em atravessar o concreto, sendo mais baixo o risco de corrosão. Dessa forma, é possível, por meio da resistividade elétrica, avaliar o risco de ocorrência de corrosão das armaduras (SILVA, 2011; SENGUL; GJØRV, 2008; MILLARD; SANTOS, 2006; HARRISON; EDWARDS, 1989).

De acordo Whiting e Nagi (2003), a faixa de corrosão muito alta corresponde a resistividades menores que 5 kΩ.cm, a faixa de corrosão alta é de 5 a 10 KΩ.cm, a faixa de corrosão moderada a baixa é de 10 a 20 KΩ.cm e a baixa faixa de corrosão é acima de 20 kΩ.cm. Segundo o *European Concerted Action CE - COST 509 - Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete* e Lacerda e Helene (2005), a faixa de alta corrosão corresponde a resistividades < 10 kΩ.cm, a faixa de corrosão moderada entre 10 e 50 KΩ.cm, a baixa faixa de corrosão > 50 até 100 kΩ.cm e a insignificante > 100 kΩ.cm. Hoppe (2005) ressalta a alta sensibilidade da resistividade aos diversos fatores intrínsecos como relação água/aglomerante, consumo e tipo de cimento, o agregado e adições minerais

e aditivos, pois os mesmos promovem alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, entre outras (LUBECK, 2008).

Os valores obtidos demonstram que as amostras contendo o resíduo de micropartículas de vidro estão dentro da faixa de corrosão considerada moderada a baixa, assim como a amostra de controle. No entanto, constata-se que o uso de micropartículas de vidro contribuiu para aumento da resistividade elétrica e, conseqüentemente, para menor taxa de corrosão. De acordo com Hunkeler (1996), o aumento da resistividade da solução dos poros e uma menor fração da fase condutora, hidróxido de cálcio, explicam a maior resistividade de concretos com adições pozolânicas. A maior resistividade devida ao uso de pozolanas também poderia ser devida ao refinamento e aumento na tortuosidade da rede de poros, que dificulta a mobilidade iônica e interações entre íons (McCARTER; TRAN, 1996).

Os dados de resistividade elétrica, valores médios (de duas amostras) obtidos aos 7, 28 e 83 dias, juntamente com o desvio-padrão, para os concretos fabricados em Portugal com 15% de micropartículas de vidro incolor estão reunidos na TAB. 25 e no GRÁF. 25. Os valores obtidos mostram que a introdução de 15% de vidro incolor nos concretos conduz à maior resistência à passagem de corrente elétrica aos 28 e 83 dias, se comparados às amostras de controle. O concreto com vidro se apresentou dentro da faixa de corrosão considerada aos 28 dias, baixa/moderada aos 83 dias (11,85 e 26,90 $k\Omega.cm$, respectivamente), enquanto a amostra de controle esteve na faixa de corrosão considerada alta em todas as idades (5,36, 7,51 e 10,00 $k\Omega.cm$). Outra observação interessante diz respeito à influência do agregado graúdo na resistividade: sua presença leva à diminuição em torno de 50% da resistividade. De acordo com a literatura, a resistividade elétrica dos agregados utilizados no concreto é muito maior do que a resistividade elétrica da pasta de cimento. E com o aumento do teor de agregado, eleva-se a resistividade elétrica do concreto (SANTOS, 2011). Isso acontece devido à diluição do efeito condutivo dos íons na solução aquosa dos poros e absorção de álcalis na superfície dos agregados. No entanto, alguns íons condutivos podem ser extraídos do agregado, diminuindo a resistividade elétrica (SHI, 2004).

TABELA 25 - Resultados do ensaio da resistividade elétrica dos concretos - DC (kΩ.cm) Portugal

Idade (dias)	Controle	Incolor 15%
7	5,36	5,31
28	7,51	11,85
83	10,00	26,90

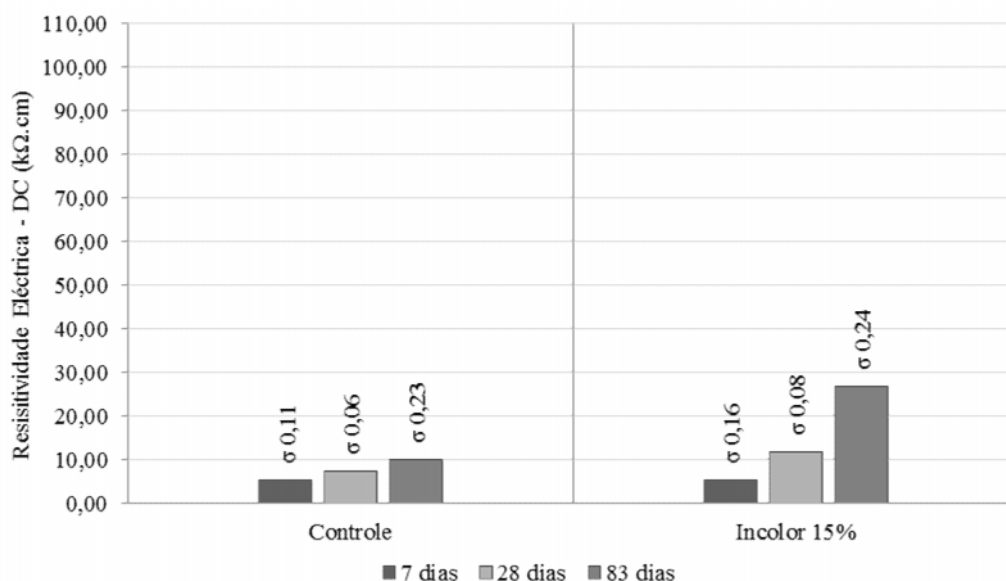


Gráfico 25 - Resultados do ensaio resistividade elétrica dos concretos – Portugal.

Os resultados de Portugal tanto para o concreto como para argamassas mostram de forma indireta a pozolanicidade dos resíduos de vidro. As amostras com e sem resíduos de vidro aos dois dias (argamassas) e aos sete dias (concreto) apresentam a mesma resistividade elétrica. Isso indicaria a não ocorrência do efeito filer devido ao uso do vidro. No entanto, com o passar dos dias, os compostos com vidro têm sua resistividade aumentada de forma acentuada em relação ao composto sem vidro. Ou seja, com a reação pozolânica os íons Ca^{2+} e OH^- são consumidos e a condutividade diminui (McCARTER; TRAN, 1996).

No Brasil, os valores médios e os desvios-padrão relativos aos ensaios de resistividade elétrica na idade de 28 dias são apresentados na TAB. 26 e no GRAF. 26. Os resultados obtidos no Brasil são semelhantes aos obtidos em Portugal para as argamassas com e sem 10% de micropartículas de vidro. O uso das micropartículas de vidro tende a aumentar a resistividade e, conseqüentemente, diminui a taxa de corrosão. Os valores obtidos demonstram que as amostras com e sem micropartículas de vidro estão dentro da faixa de corrosão moderada/baixa. No entanto, as amostras contendo o resíduo de micropartículas de vidro seriam mais resistentes à corrosão.

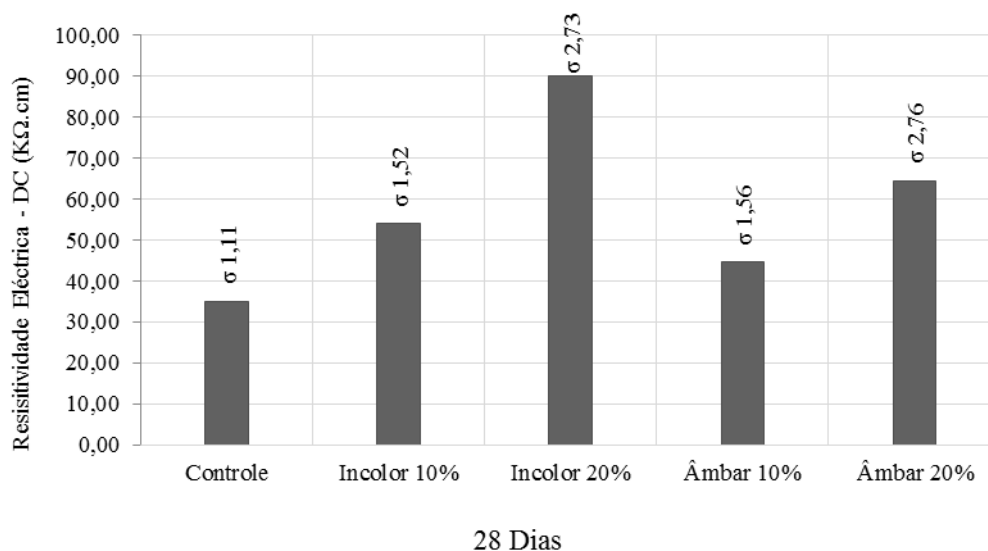


Gráfico 26 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica argamassas – Brasil.

TABELA 26 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica das argamassas DC (kΩ.cm) - Brasil

Idade (dias)	Controle	Incolor 10%	Incolor 20%	Âmbar10%	Âmbar20%
28	34,94	53,93	87,02	44,63	64,51

O aumento da resistividade elétrica devido ao uso de micropartículas de vidro pode ser explicado em função de que, dentro dos concretos com vidro, haveria menor fluxo de íons, devido à reação pozolânica, que consome os íons Ca_{2+} e OH^- , ou como consequência da mudança da estrutura dos poros devido à reação pozolânica.

4.4.9 Avaliação do desgaste por abrasão

Os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão realizados no Brasil após 1.000 metros de percurso encontram-se no GRAF. 27, no qual estão locados os valores médios da variação de espessura de três corpos de prova, medidos transversalmente nos quatro pontos da amostra, após 28 dias de cura em câmara úmida, e o ensaio foi realizado aos 90 dias. A substituição do cimento por 10 e 20% de micropartículas de vidro incolor e âmbar promoveu queda na resistência ao desgaste. Percebe-se que tanto o tipo quanto a quantidade do vidro utilizado tiveram influência nesse resultado. Esses dados indicariam que se formou uma camada mais fraca na superfície do concreto, provavelmente devido à maior exsudação, acentuada pela presença das partículas de vidro (MEHTA; MONTEIRO, 2008; COUTINHO, 1997).

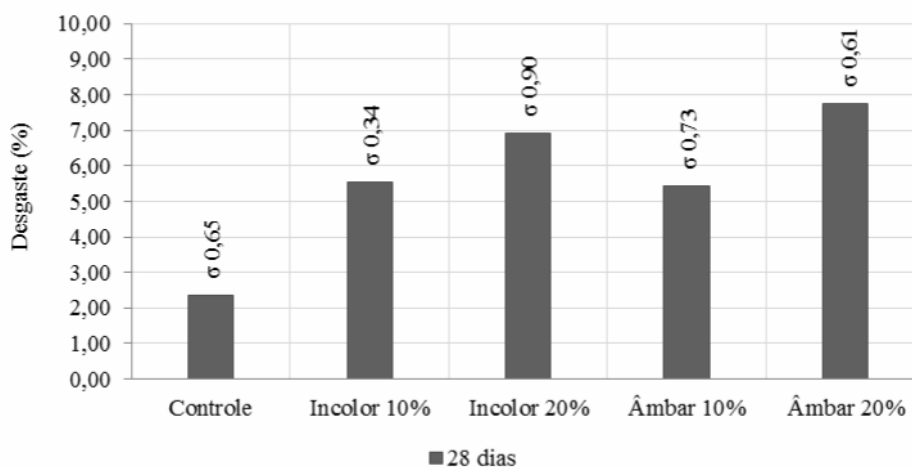


Gráfico 27 -Resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão.

4.4.10 Termografia infravermelha

Os termogramas da FIG. 41 mostram os resultados referentes à temperatura das micropartículas de vidro incolor e âmbar e da região onde foram feitas as medidas da temperatura durante o ensaio (quadrado), juntamente com a escala de cores que representa a amplitude observada no momento da medição (mínima/máxima). Na análise dos resultados deve-se dar especial atenção à escala de cores: as cores em cada figura referem-se a temperaturas distintas, sendo impossível adotar uma única escala de cores, em função dos intervalos analisados.

No início dos testes as amostras exibiram temperaturas similares, com tendência ao equilíbrio térmico com o ambiente. Após 10, 30 e 60 minutos de insolação, a análise visual revelou que as temperaturas das micropartículas de vidro âmbar permaneceram mais baixas do que as de vidro incolor. Na TAB. 27 são mostrados os valores registrados pelas medições. A temperatura inicial de 26,7°C nas micropartículas de vidro incolor passou para 57,9°C e na micropartículas âmbar de 26,2°C passou para 50,5°C, um ganho de 31,2°C e 24,3°C, respectivamente. Os dois tipos de material absorveram/emitem calor de forma distinta: as micropartículas de vidro âmbar ficaram 6,9°C abaixo das micropartículas incolores.

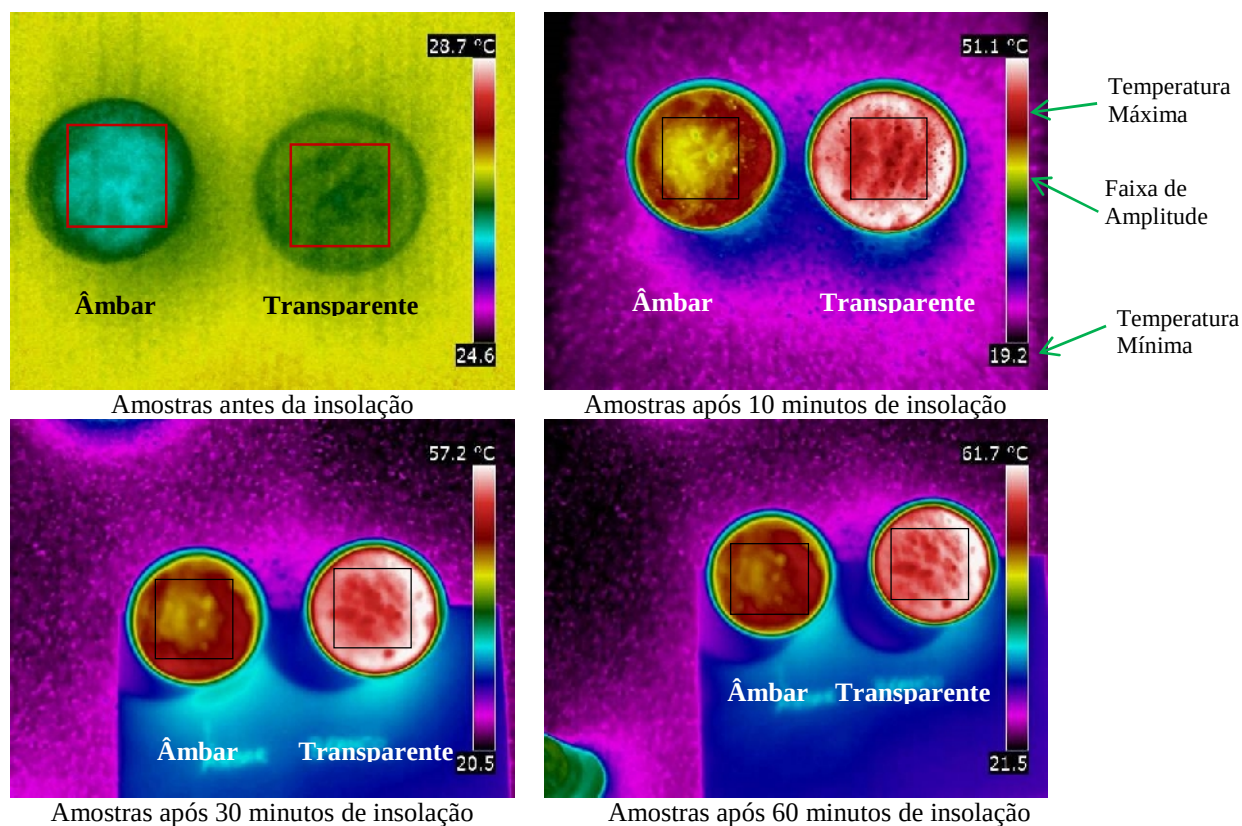


Figura 41 - Termogramas das micropartículas âmbar e incolor aos zero e após 10, 30 e 60 minutos de insolação

TABELA 27 - Temperaturas registradas nas micropartículas de vidro incolor e âmbar

Amostras	Temperaturas °C			
	Aos 0 minutos	Após 30 minutos	Após 60 minutos	Após 90 minutos
Incolor	26,7	46,5	53,7	57,9
Âmbar	26,2	40,7	46,6	50,5

A FIG. 42 mostra o termograma das argamassas com e sem substituição do cimento pelas micropartículas de vidro antes da insolação. Corpos de prova confeccionados com a mesma mistura encontram-se uns sobre os outros. Para cada amostra é indicada uma linha ao longo da qual foram feitas as medidas da temperatura durante os ensaios (linha de perfil). Observa-se que todas as amostras encontram-se na mesma tonalidade, o que sugere que as amostras encontram-se em uma mesma faixa de temperatura da escala cromática, ou seja, o material encontra-se em equilíbrio térmico. Também se constata que o isopor contribui para uma imagem com baixa interferência no alvo de leitura.

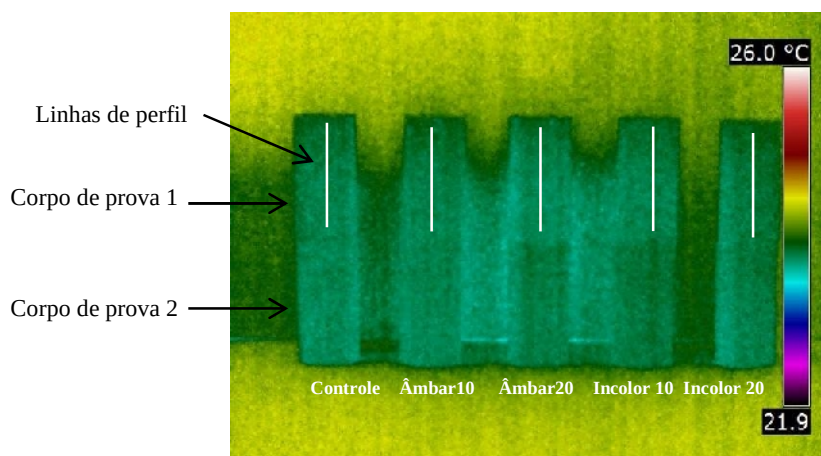


Figura 42 - Termograma das argamassas antes da insolação.

A análise das imagens da FIG. 43 permite inferir, pelas escalas cromáticas, que a temperatura ao longo da superfície das amostras foi uniforme aos 30 minutos tanto nas amostras de mesma composição como naquelas com substituição do cimento por micropartículas de vidro. Situação similar é observada aos 90 minutos. Apesar de visualmente se perceber diferença de tonalidade entre algumas amostras de uma mesma mistura, essa diferença não é significativa em termos de temperatura.

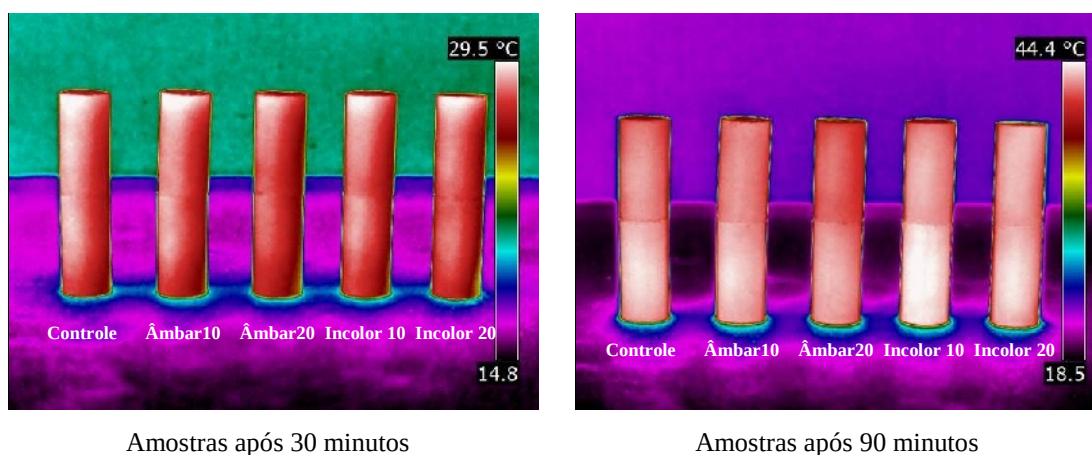


Figura 43 - Termograma das argamassas após 30 e 90 minutos de insolação.

Os dados do GRÁF. 28 e da TAB. 28 apresentam os valores coletados na superfície da amostra (linha de perfil). No gráfico é possível perceber que todos os materiais encontram-se em equilíbrio térmico no início do teste (23,7°C). Aos 30 minutos nota-se elevação em torno de 5°C da temperatura, que continuou crescente nos 60 minutos. Aos 90 de insolação a elevação foi mais significativa, em torno de 19°C. Esses resultados estão em conformidade com os estudos de Silva (2013) em compósitos poliméricos à base de fibra natural de curauá e de Alvarenga e Borges (2013) em microconcretos geopoliméricos,

cujos compostos tiveram significativo aumento da temperatura nas primeiras horas de insolação. Contudo, os valores da amostra contendo 20% de substituição do cimento por micropartículas de vidro âmbar teve ligeira queda de temperatura se comparada às demais amostras, mas pode ser considerada dentro da incerteza de medição da câmera, que é de $\pm 2\%$.

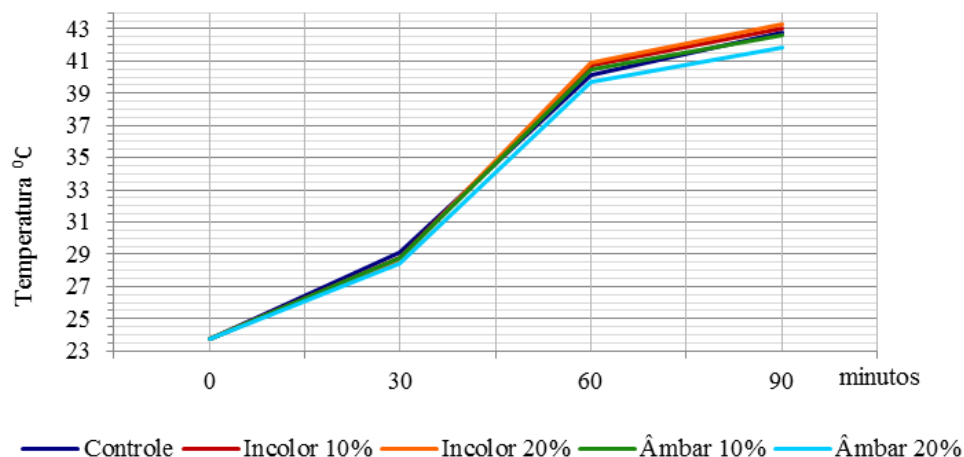


Gráfico 28 - Resultados da termografia: temperaturas das argamassas na primeira hora de insolação.

TABELA 28 - Temperaturas das argamassas aos zero e após 60 e 90 minutos de insolação

Amostras	Temperaturas °C			
	Aos 0 minutos	Após 30 minutos	Após 60 minutos	Após 90 minutos
Controle	23,7	29,1	40,1	42,8
Incolor 10%	23,7	28,8	40,5	43,0
Incolor 20%	23,7	28,7	39,7	43,3
Âmbar 10%	23,7	28,8	40,7	42,6
Âmbar 20%	23,7	28,4	40,9	41,8

Na FIG. 44 visibilizam-se os resultados das medições termográficas realizadas dos 120 aos 270 minutos seguintes de insolação. Com base na escala cromática é possível perceber visualmente o comportamento diferenciado das argamassas.

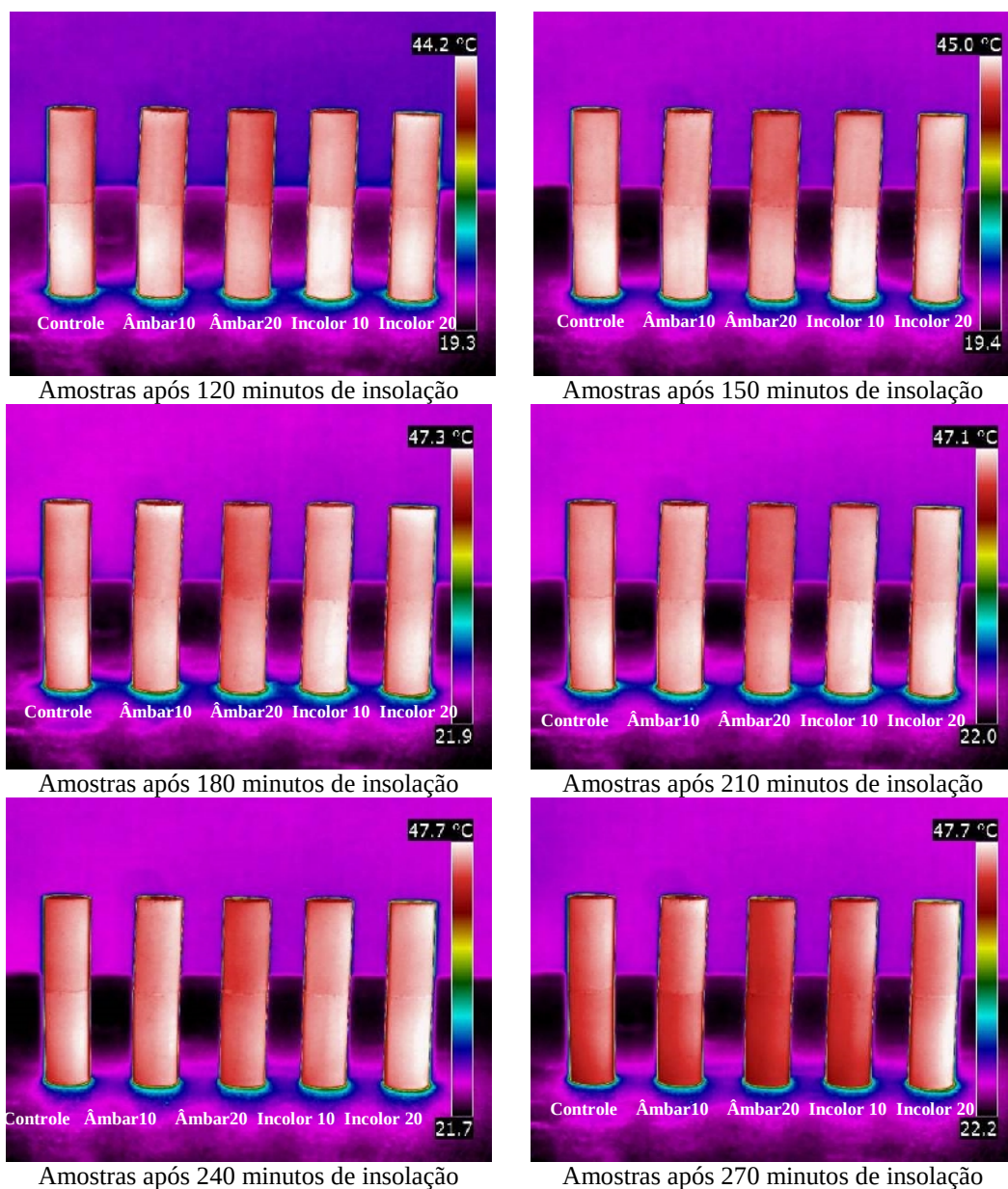


Figura 44 - Termograma das argamassas após 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos de insolação.

O GRÁF. 29 e a TAB. 29 (referente aos valores coletados na linha de perfil das amostras após 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos de insolação) mostra de forma clara que a temperatura das argamassas continuou em elevação aos 120, 150 e 180 minutos; e nos períodos seguintes 210, 240 e 270, com menor intensidade. Nota-se, para todas as amostras, queda de temperatura aos 210 minutos, possivelmente devido ao surgimento de nuvens no céu (o que também pode ser percebido no termograma do mesmo período - FIG. 45). A temperatura máxima atingida durante o ensaio foi aos 240 minutos. Apesar das amostras absorverem/emitem calor de forma semelhante, o corpo de prova contendo 20% de micropartículas de vidro âmbar apresentou temperaturas inferiores às das demais

amostras. A amostra contendo 20% de micropartículas de vidro incolor ficou ligeiramente acima das demais. Isso poderia indicar que maiores teores de substituição do cimento por micropartículas de vidro incolor contribuiriam para compostos que emitissem maior quantidade de calor. As amostras de controle, incolor 10% e âmbar 10% tiveram temperaturas próximas. Foi realizado uma réplica dos ensaios e o mesmo resultado foi encontrado. Dessa forma, pode-se inferir que o uso de micropartículas de vidro, em especial as de vidro âmbar, pode ser um caminho para o controle do desempenho térmico de argamassas/concretos.

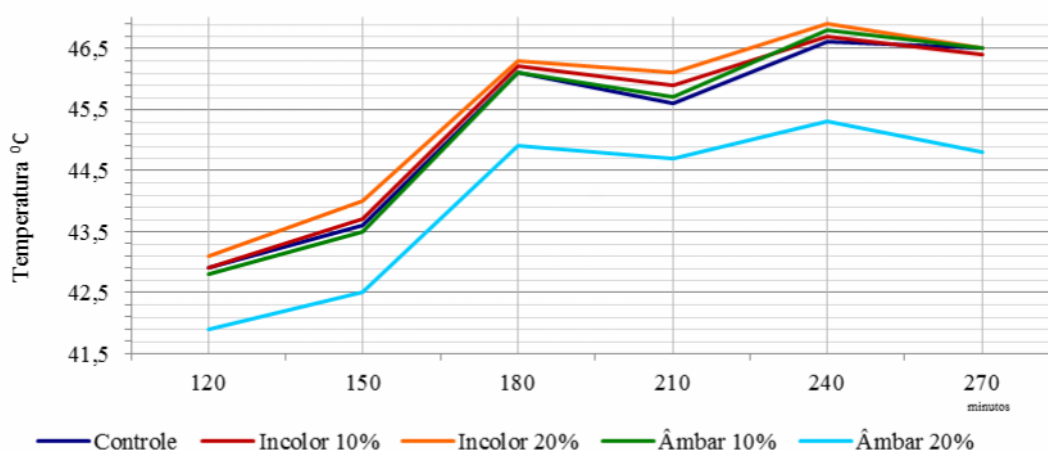


Gráfico 29 - Temperaturas das argamassas após quatro horas e 30 minutos de insolação.

TABELA 29 - Temperaturas das argamassas após 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos de insolação

Amostras	Temperaturas °C					
	Após 120 min.	Após 150 min.	Após 180 min.	Após 210 min.	Após 240 min.	Após 270 min.
Controle	42,9	43,6	46,1	45,6	46,6	46,5
Incolor 10%	42,9	43,7	46,2	45,9	46,7	46,4
Incolor 20%	43,1	44,0	46,3	46,1	46,9	46,5
Âmbar 10%	42,8	43,5	46,1	45,7	46,8	46,5
Âmbar 20%	41,9	42,5	44,9	44,7	45,3	44,8

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para o estudo da atividade pozolânica de micropartículas ($\approx 10 \mu\text{m}$) de vidro soda-cal, incolor e âmbar, com alto teor de álcalis e estrutura vítrea, e sua influência no desempenho de compostos cimentícios permitem as conclusões listadas a seguir.

- a) Pelo método Chapelle pode-se considerar que as micropartículas de vidro âmbar e incolor apresentaram atividade pozolânica, no entanto, a diferença de pozolanicidade entre os dois tipos de vidro não foi significativa, considerando-se as características do ensaio.
- b) Ambos os vidros analisados apresentaram atividade pozolânica moderada no ensaio de condutividade elétrica, conforme método proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989).
- c) A termogravimetria mostrou que, na região onde se observou a perda de água da portlandita, apenas as amostras contendo 20% de micropartículas de vidro âmbar e incolor perderam menos massa. Isso indica menos quantidade de hidróxido de cálcio nessas amostras, sugerindo a ocorrência da reação pozolânica. Não se observaram quantidades significativas de silicatos que revelassem maior perda de massa nas temperaturas em torno de 450°C .
- d) Os resultados do IAP revelam que os dois tipos de micropartículas de vidro são pozolânicas, não sendo possível avaliar a influência e/ou natureza das mesmas na atividade pozolânica.
- e) A expansibilidade das pastas pelo método Le Chatelier não foi afetada com o uso das micropartículas de vidro.
- f) A substituição de 20% de micropartículas de vidro incolor antecipou o início e o fim da pega e as de cor âmbar retardaram o fim de pega.
- g) Maior substituição de cimento por micropartículas de vidro (20%) contribuiu para menos calor de hidratação, sendo a diferença maior para o vidro âmbar, se comparado às demais substituições e à amostra de controle.
- h) O uso de micropartículas de vidro diminuiu a trabalhabilidade das argamassas no tocante à fluidez. No concreto, a substituição de 15% de cimento por vidro incolor melhorou em 11,7% a trabalhabilidade, se comparada ao controle.

- i) As imagens obtidas com elétrons secundários e retroespalhados do vidro na microestrutura dos compósitos (EDS) permitiram identificar a presença de quartzo e a predominância do silício e do cálcio na maioria das regiões analisadas. No entanto, não foi possível distinguir os silicatos de cálcio dos hidróxidos de cálcio, sendo necessários novos estudos para melhor investigação dos resultados.
- j) De modo geral, a resistência à compressão e à flexão das argamassas aos 28 dias apresentou valores similares. Contudo, nos concretos, a substituição de 15% do cimento por micropartículas de vidro evidenciou melhora da resistência mecânica em todas as idades estudadas (sete, 28 e 90 dias), porém com crescimento mais lento.
- k) O módulo de elasticidade nas argamassas e concretos praticamente não foi afetado pelo uso de micropartículas de vidro, ficando próximo da amostra de controle, independentemente da natureza e quantidade de substituição.
- l) O uso de micropartículas de vidro em substituição ao cimento não alterou a classe de desempenho dos compostos cimentícios (moderada) no tocante à durabilidade avaliada pelo ensaio de permeabilidade ao oxigênio. No entanto, observou-se que o uso de maior teor de substituição pareceu contribuir para a diminuição da permeabilidade.
- m) A adição das micropartículas de vidro promoveu aumento da espessura da camada carbonatada em relação à amostra de controle. Não foi possível identificar a influência do teor e da natureza das micropartículas de vidro (diferenças de 0,25 mm).
- n) O uso de micropartículas de vidro inibiu a reação álcali-sílica mesmo com o uso de agregados reativos. O alto teor de sílica presente no vidro não promoveu a reação álcali-sílica do cimento, possivelmente em função da superfície específica e da amorficidade da sílica que fizeram com que a sílica reagisse com o hidróxido de cálcio nas primeiras idades, não restando sílica para reações posteriores.
- o) Os valores obtidos para a resistividade elétrica demonstraram que as amostras com e sem micropartículas de vidro estavam dentro da faixa de risco de corrosão moderada/baixa. Entretanto, a introdução de 15% de vidro incolor nos concretos conduz à maior resistência à passagem de corrente elétrica se comparados com as amostras de controle.

- p) O uso de micropartículas de vidro incolor e âmbar promoveu queda na resistência ao desgaste possivelmente devido à maior exsudação pela presença das partículas de vidro.
- q) Pela termografia, foi possível perceber diferenças significativas nas temperaturas dos compósitos com maior substituição. As amostras contendo 20% de vidro, especialmente a de cor âmbar, apresentaram temperaturas diferenciadas em relação às demais.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Estudo da microestrutura de pastas fabricadas com e sem uso de micropartículas de vidro e fator água-cimento de 0,4.
- Estudo da resistência aos sulfatos com micropartículas de vidro.
- Estudo de concretos autoadensáveis com micropartículas de vidro.
- Estudo da microestrutura dos compostos, com e sem vidros, utilizando escala de cores.
- Estudo do desempenho térmico de argamassas/concretos utilizando a termografia infravermelha.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO. ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. Disponível em: www.abividro.org.br. Acesso em: outubro de 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13276*: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NBR 15577-4*: Agregados. Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: 2008.

_____. *NBR 15895*: Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado-Método Chapelle modificado I. Rio de Janeiro, 2010a.

_____. *NBR 12142*: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. *NBR 5733*: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. *NBR 11581*: Cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991b.

_____. *NBR 5752*: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992a.

_____. *NBR 12653*: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992b.

_____. *NBR 12651*: Materiais pozolânicos - Determinação da eficiência de materiais pozolânicos em evitar a expansão do concreto devido à reação álcali-agregado - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. *NBR 12042*: Materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992c.

_____. *NBR 5751*: Materiais pozolânicos-Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland- Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992d.

_____. *NBR 10.004*: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. *NBR 10.005*: Procedimentos para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. *NBR 10.006*: Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. *NBR 7214*: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. *NBR 7215: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Disponível em: www.abrelpe.org.br. Acesso em: outubro de 2013.

AKERMAN, M. *Natureza, estrutura e propriedades do vidro*. Centro Técnico de Elaboração do Vidro - CETEV. Saint-Gobain Vidros do Brasil, 2000.

ALARCON-RUIZ, L. *et al.* The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 609-613, 2005.

ALVARENGA, C.B.C.S.; BORGES, P.H.R. *Análise termográfica de geopolímeros*. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Civil. CEFET-MG, 2013.

ALVES, O.L. *Modernas aplicações do vidro*. LQES – Laboratório de Química do Estado Sólido. Instituto de Química da UNICAMP, São Paulo, 2006.

ALVES, O.L.; GIMENEZ, I.F.; MAZALI, I.O. *Vidros, cadernos temáticos: química nova na escola*. Instituto de Química da UNICAMP, São Paulo, edição especial, 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 116.R-00. Cement and concrete terminology. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Detroit: American Concrete Institute, 2002.

ANDRADE, W.P. (ed.). *Concretos, massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo: Pini, 1997.

ANTÔNIO, A.P.; CALMON, J.L.; TRISTÃO, F.A. *Resíduo de estação de tratamento de efluentes provenientes da lapidação do vidro plano na produção de concretos*. ISSN 2175-8182. 53º IBRACON - Congresso Brasileiro de Concreto. Florianópolis-SC, 2011.

ASHBY, M.F. *Seleção de materiais de construção mecânica*. 3. edição, Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 2005. ISBN 0-7506-6168-2.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. *Ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASSIS, J.V.B.; PANZERA, T.H. *Construção de um permeâmetro a oxigênio para a determinação da permeabilidade de materiais porosos*. Relatório Final de Iniciação Científica. Universidade Federal de São João del-Rei. 2012.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. *Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons: Définitions, spécifications, critères de conformité*. La Plaine Saint-Denis. NF P18-513, 2010.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 215*. Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2008.

_____. *ASTM C 230 M-03*- Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. Annual Book, American Society for Testing and Materials, 2009.

_____. *ASTM C 289-03* - Standard Test Method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (Chemical Method), 2003.

_____. *ASTM C 618*. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. ASTM, Philadelphia, 2005.

_____. *ASTM C 1260*. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method). Annual Book of ASTM Standards, v. 11.14, Philadelphia, 2001.

_____. *ASTM C 1567-08*, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards V 04.02 (Concrete and Aggregates), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 2010.

BABISK, M.P. *Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.

BADANOURI, A.; GEORGESCU, M; PURU, A. Binding systems by termogravimetry and differential thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 74, p. 65-75. 2003.

BAZANT, Z.P.; JIN, W.; MEYER, C. Fracture mechanics of concrete structures, *Proc. FRA MCOS*, v. 3, p. 1687-1693, 1998.

BENEZET J.C.; BENHASSAINE A. The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. *Powder Technology*, p. 10326-29, 1999.

BERRYMAN GLASS RECYCLING. Disponível em: <http://www.berrymanglassrecycling.com>. Acesso em: 2011 (empresa do grupo de reutilização de vidros reciclados do Reino Unido).

BIANCHINI, M. *Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto*. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em construção civil. Universidade Federal do Paraná 2010.

BUNDE, A.; FUNKE, K.; INGRAM, M.D. Ionic glasses: history and challenges. *Solid State Ionics*, Amsterdam, v. 105, n. 1-4, p. 1-13, 1998.

BYARS, E.A.; MORALES-HERNANDEZ, B.; ZHU, H.Y. Waste glass as concrete aggregate and pozzolan. *Concrete*, v. 38, n. 1, p. 41-4, 2004.

CABRERA, J.G. and LYNDSdale, P.A. A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete. *Magazine of Concrete Research*, Volume 40, Issue 144, pages 177–182, September, 1988.

CABRERA, J.G. and CLAISSE, P.A. Oxygen and water vapour transport in cement–silica fume pastes. *Construction and Building Materials*. Volume 13, Issue 7, 1, Pages 405–414, October 1999.

CALLISTER, W.D. Ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. 2 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

CARLES GIBERGUES. A. *et al.* A simple way to mitigate alkali–silica reaction. *Mater Struct*, v. 40, n. 1, p. 73-83, 2008.

CARPENTER, A.J.; CRAMER, S.M. Mitigation of ASR in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate. *Transportation Research Record 1668*, Paper n. 99-1087, pp. 60-67, 1999.

CASTRO, A.L. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. Tese Doutorado Ciência e Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos - Instituto de Física e Química de São Carlos - Universidade de São Paulo 2007.

CASTRO, S.; BRITO, J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass ggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 7-14, 2013.

CEMPRE. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. *Associação sem fins lucrativos*. Disponível em: www.cempre.org.br. Acesso em: novembro de 2013.

CES. CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR. Disponível em: www.grantadesign.com site dos criadores do CES. Acesso em: outubro de 2013 (software de seleção de materiais baseado na metodologia de Ashby. Versão 2010), 2010.

CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, V. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 23, p. 442-452, 1993.

CHEN C.H. *et al.* Waste E-glass Particles used in cementitious mixtures. *Cement Concrete Research*, v. 36, p. 449-56, 2006.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 3352-3358, 2009.

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. Cap. 3. In: PINI *et al.* *Tecnologia de edificações*. IPT. São Paulo: p. 23-26, 1988.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Cinza ultrafine do bagaço de cana-de-açúcar: material pozolânico de alto potencial para países tropicais. *Revista Ibracon Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 1, p. 50-67, 2010.

CORDEIRO, G.C. *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*. 2006. 445 f. Tese Ciências em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORINALDESI, V. *et al.* Reuse of ground waste glass as aggregate for mortar. *Waste Manage*, V. 25, n. 2, p. 197-201, 2005.

COUTINHO, A.S. *Fabrico e propriedades do betão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 1, Lisboa, 1997.

COUTINHO, J.S. *Materiais de construção: ligantes*. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Porto, v. 2, Lisboa, 2010.

COUTINHO, J.S. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Publicações de Joana Souza Coutinho. *Artigos em Revistas Científicas Internacionais*. Disponíveis em http://sigarra.up.pt/feup/pt/PUBLS_PESQUISA.QUERYLIST?p_codigo=207539 Acesso em 2014.

CYR, M.; RIVARD, P.; LABRECQUE, F. Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates. *Cem Concr Compos*, v. 31, n. 7, p. 438-46, 2009.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. A simple model to explain compressive strength of high-performance concrete. In: High-performance concrete. international conference, 3., Recife, 2002. *Proceedings... Performance and Quality of Concrete Structures*. SP 207. Recife, PE, Brasil, 2002, SP 207-9, p. 139-150, 2002.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais. Cap. 08 In: ISAIA, G.C. (ed.) *et al. Concreto: Ciencia e Tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, p. 261-309, 2011.

DHIR, R. *et al.* Towards maximising the value and sustainable use of glass. *Concrete*, v. 1, n. p. 38-40, 2004.

DIAMOND, S.; THAULOW, N. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cement Concrete Research*, v. 4, n. 4, p. 591-607, 1974.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement & Concrete Composites*, v. 32, p. 121-127, 2010.

DUMITRU, T.S. *et al.* Incorporation of recycled glass for durable concrete ion. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECNOLOGIES. *Anais...*, Ancona, Italy. June 2010.

DWECK, J. *et al.* Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, v. 346, p. 105-113, 2000.

EDWARDS, K.L.; AXINTE, E. A critical study of the emergence of glass and glassy metals as “green” materials. *Materials & Design*, v. 50, p. 713-723, Sept. 2013.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Disponível em: <http://www.epa.gov>. Acesso em: novembro de 2013.

FENG, Q. *et al.* Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete Research*, n. 34, p. 521-526, 2004..

FEVE. EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. Disponível em: <http://www.scrapmonster.com/news/european-glass-recycling-rises-67-in-2009/2/844>. Acesso em: 2013.

FRAGATA, A. *et al.* Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento. Avaliação da sua influência nas características da argamassa. In: II CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, Lisboa, APFAC, Nov. 2007.

FRIZZO, B.T. *Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2001.

GARCÉS, P. *et al.* The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars. *Cement & Concrete Composites*, v. 32, p. 204-210, 2010.

GARTNER, E.M.; MACPHEE, D.E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and concrete*, v. 41, p. 736-749. 2011.

GAVA, G.P. *Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica*. Dissertação de (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 118 p, 1999.

GERMAN STANDARD DIN 1048 *Testing concrete*. Water permeability. Section 5, 2005.

GIMENEZ, I.F.; FERREIRA O.P.; ALVES, O.L. *Desenvolvimento de ecomateriais: materiais porosos para aplicação em green chemistry*. Laboratório de Química do Estado Sólido, Instituto de Química UNICAMP, CP 6154 Campinas, SP 13081-970, Brasil. Disponível em: http://lqes.iqm.unicamp.br/images/publicacoes_teses_livros_resumo_nanoecomateriais.pdf

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. Influence of microfillers on enhancement of concrete strength. *Cem Concr Res*, v. 23, n. 4, p. 962-972, 1993.

GOMES, A.M.; NERO, J.M.G.; APPLETON, J.A.S. Novo método para a avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I. Goiânia: *Anais...*, p. 83-91, 1995.

GOWERS, K.R.; MILLARD, S.G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. *ACI Materials Journal*, v. 96, n. 5, p. 536-541, 1999.

GUZMAN, A.; GUTIÉRREZ, C.; AMIGÓ, V. Valoración puzolánica de La hoja de La caña de azúcar. *Materiales de Construcción*, v. 61, n. 302, p. 213-225, 2011.

HOBBS, D.W. *Alkali-silica reaction in concrete*. London: Thomas Telford, 1988.

HOPPE, T.F. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

HUGHES, C.S. *Feasibility of using recycled glass in asphalt*. Report VTRC 90-R3. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 1990.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution: a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 5, p. 381-389, 1996.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 19-29, 2011.

IEC. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Technical committee 80: Current publications issued by TC 80 with the reference to the IMO performance standards where applicable. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems*, 1980.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

IONASHIRO, M. Giolito. *Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial*. Giz Editorial: São Paulo, 2005.

IPQ. INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. *NP EN 4220: Pozolanas para betão, argamassa e caldas - definições, requisitos e verificação da conformidade*. Lisboa, IPQ, 2010a.

_____. *NP EN 12350-8. Ensaios do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento*. Instituto Português da Qualidade, IPQ, 2010b.

_____. *NP EN 12350-9. Ensaios do betão fresco. Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V*. Instituto Português da Qualidade, IPQ, 2010c.

_____. *NP EN 1008: água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão*. IPQ, 2003.

_____. *NP EN 196-1: Método de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. Lisboa, IPQ, 2006a.

_____. *NP EN 196-2: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos*. Lisboa, IPQ, 2006b.

_____. *NP EN 196-3: Método de ensaios de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade*. Lisboa, IPQ, 2006c.

_____. *NP EN 197-1: Cimento. Parte 1 Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Lisboa, IPQ, 2012.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 25, p. 69-76, 2003.

ISAIA, G.C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e Engenharia de Materiais*. 1. edição, v. 1 e 2. São Paulo: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto), 2007.

JAIN, J.; NEITHALATH, N. Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, Issue 3, pp. 176-185, 2009.

JAIN, J.; NEITHALATH, N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes: Influence of test methods on microstructure. *Cement & Concrete Composites*, v. 32, p. 148-156, 2010.

JENNINGS, H.M.; BULLARD, J.W. From electrons to infrastructure: Engineering concrete from the bottom up. *Cement and concrete*, v. 41, p. 727-735, 2011.

JIN, W.; MEYER, C.; BAXTER, S. Glascrete: concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*, v. 97, n. 2, p. 208-213, Mar-Apr. 2000.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.G. Cinza e aglomerantes alternativos. Cap. 6, *In: FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. Tecnologia e materiais alternativos de construção*. Campinas: UNICAMP, p. 145-190, 2003.

JOHNSTON, CD. Waste glass as coarse aggregate for concrete. *J Test Eval*, v. 2, n. 5, p. 344-50, 1974.

KARA, P. The influence of waste glass slurry on the properties of concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, v. 2, Issue 8, Aug. 2013. ISSN 2319-4847.

KARAMBERI, A.; MOUTSATSOU, A. Participation of coloured glass cullet in cementitious materials. *Cem Concr Compos*, v. 27, p. 319-27, 2005.

KAWABATA, C.Y. *Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural*. 181 f. Tese (doutorado em Zootecnia)-Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

KAWAMURA, M.; FUWA H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. *Cement Concrete Research*, v. 33. n. 6, p. 913-9, 2003.

KAZMIERCZAK, C.S.; ARNOLD, D.C.M. Influência da forma dos grãos e do teor de filler na trabalhabilidade de argamassas de revestimento. *In: IV CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS E ETICS*. Universidade de Coimbra, APFAC / ITecons. Março de 2012, *Anais...*, Coimbra, Portugal.

KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 74-80, 2013.

KJELSEN, K.O.; DETWILER, R.J.; GJORV, O.E. Backscattered electron imaging of cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, v. 20, pp. 308-3011, 1990.

KNOPF, F.C. *et al.* High-Pressure Molding and Carbonation of Cementitious Materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 38, n.7, p. 2641-49, 1999.

KOLLER, D.R.P. *et al.* Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído. *Disc Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas*, S. Maria, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2007.

KRUGER F.R.; OLIVEIRA D.L.A.; BRAGA S.R.O.Q. Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto. In: XXXI REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA. Águas de Lindoia, São Paulo, *Anais...*, Sociedade Brasileira de Química (SBQ), 2008.

KULAKOWSKI, M.P. *Contribuição ao estudo da carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LACERDA, C.S.; HELENE, P.R.L. *Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC419, 2005.

LAGONEGRO, M. A. (ed.), Marco Vitruvius Polião. *Da Architectura*, São Paulo, Hucitec - Annablume, 1999. 2.^a edição: 2002.

LANGAN, B.W.; WENG, K.; WARD, M.A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, v. 32, 2002.

LEE, C.Y.; MCCARTHY, M.J.; DHIR, R.K. Intrinsic permeability of fly ash concrete. In: MALHOTRA, V.M. (ed). INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 4th, Sydney, 1997. *Proceedings*. American Concrete Institute, v. 2, v. 1, p. 247-266 (SP-170), 1997.

LING, T.C.; POON C.S. Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes. *Materials and Design*, v. 32, p. 2675-2684, 2011.

LNEC. LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. E 64 - *Cimentos: determinação da massa volúmica*. LNEC, 1979.

_____. E 461-3: Metodologias para Prevenir Reações Expansivas Internas. Lisboa, LNEC, 2007.

LÓPEZ, D.A.R.; AZEVEDO, C.A.P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. *Cerâmica*, [on line]. São Paulo, v. 51, n. 320, 2005, p. 318-324.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 217-229, 2011.

LUBECK, A. *Resistividade elétrica de concreto de cimento Portland branco e elevados teores de escoria de alto forno*. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: UFMS-RS, 2008.

LUPING, T.; NILSSON, L.O. A study of the quantitative relationship between permeability and pore size distribution of hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, USA: Pergamon Press, v. 22, p. 541-549, 1992.

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*, v. 19, Issue 1, p. 63-68, Jan. 1989.

LUZ A.P.; RIBEIRO S. *Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato*. *Matéria* (Rio J.) (online), v. 13, n. 1, pp. 96-103, 2008. ISSN 1517-7076.

MALHOTRA, V.M. Introduction: sustainable development and concrete technology. *Concrete International*, v. 24, n. 7, pp. 22, 2002.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. *Pozzolanic and cementitious materials*. Advances in Concrete Technology, 1 ed, Amsterdam: Gordon and Breach Publishers. 1996.

MARTINS, J.G.; PINTO E.L. *Materiais de construção I: o vidro – material didático da Academia Militar*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Instituto Superior Técnico de Lisboa. Portugal 2004.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. Cap. 10 In: HEWLETT, P.C. (ed) *et al. Lea's chemistry of cement and concrete*. 5. edição, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, pp.471-602, UK 2008.

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

MAUPIN JR. G.W. *Effect of glass concentration on stripping of glasphalt*. Cooperation with the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Charlottesville, Virginia 1998.

McCARTER, W.J.; TRAN, D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide. *Construction and Building Materials*, v. 10, Issue 3, p. 179-184, Apr. 1996.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto), 2008.

MERAL, C.; BENMORE, C.J.; MONTEIRO, P.J.M. The study of disorder and nanocrystallinity in C-S-H, supplementary cementitious materials and geopolymers using pair distribution function analysis. *Cement and concrete*, v. 41, p. 696-710, 2011.

MEYER, C.; BAXTER, S.; JIN W. Potential of waste glass for concrete masonry blocks. *In: PROCEEDINGS OF THE FOURTH MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE. Washington, Proceedings...*, p. 666-73, 1996.

MEYER, C.; BAXTER, S. Use of recycled glass and fly ash for precast concrete. *Report*, v. 98, p. 18, Oct. 1998.

MEYER, C.; BAXTER, S. Use of recycled glass for concrete masonry blocks. *Report*, v. 97, p. 15, Nov. 1997.

MILLARD, S.G.; HARRISON, J.A.; EDWARDS, A.J. Measurement of the electrical-resistivity of reinforced-concrete structures for the assessment of corrosion risk. *British Journal of Non-Destructive Testing*, v. 31, issue 11, pp. 617-621, 1989.

MINDES, S.; YOUNG, F.; DAEWIN, D. *Concrete*. 2. edição. Cidade de Publicação: Pearson Education, 2003. 644 p.

MOESGAARD, M. *et al.* Physical performances of blended cements containing calcium aluminosilicate glass powder and limestone. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 359-364, 2011.

MONCEA, A.M. *et al.* Cementitious composites with glass waste from recycling of cathode ray tubes. *Materials and Structures*, v. 46, p. 2135-2144, 2013. DOI 10.1617/s11527-013-0041-5.

MONTEIRO, P. Personalidade entrevistada. *Revista Concreto & Construção*, Instituto Brasileiro do Concreto, Ibracon. Ano XXXIX. ISSN 1809-7197, jun. 2011.

MURAT, M.; BACHIONGINI, A. Corrélations entre l'état d'amorphisation et l'hydraulicité du métakaolin. *Bull. Mineral*, v. 105, p. 543-555, 1982.

NASSAR, R.D.; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 368-377, 2012.

NAVARRO, J.M.F. *El vidrio*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Fundación Centro Nacional del Vidrio. 2. ed., Espana. 1991.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NÓBREGA, A.F.; ARAÚJO, F.W.C. Câmaras de carbonatação aceleradas desenvolvidas nos principais centros de pesquisa no Brasil. *In: 53º IBRACON (CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO). Anais...*, 2011.

OLIVEIRA, L.A. SANTOS P. *Resíduos reciclados como componentes de argamassas*. Ubi Thesis - Conhecimento Online. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. FE–DECA–Artigos em revistas nacionais, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.6/586>. Acesso em: outubro de 2013.

PÁDUA, P.G.L. *Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cinza de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas*. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia de estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. 2012.

PARK, S.B.; LEE, B.C.; KIM, J.H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement Concrete Research*, v. 34, n. 12, p. 2181-9, 2004.

PARROT, L.J. *A review of carbonation in reinforced concrete*. C&CA – Cement and concrete association, 1987. 42 p.

PATTENGIL, M.; SHUTT, T.C. Use of ground glass as a pozzolan. In: Albuquerque SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF WASTE GLASS IN SECONDARY PRODUCTS. Jan. 24-25, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 137-153. *Anais...*, 1973.

PAULA, M.O. *et al.* Sugarcane bagasse ash as a partial-Portland-cement-replacement material. *Dyna*, v. 77, n. 163, pp. 47-54, Sept. 2010.

PAULON, V.A. *Reações álcali-agregado no concreto*. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PAVILÍK, Z. *et al.* Use of municipal solid waste incineration waste materials as admixtures in concrete. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES. Ancona, Italy. June 2010, *Anais...*, 2010.

PAYA, J. *et al.* Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. *Cement and Concrete Research* 31, p. 227-231, 2001.

PAYA, J. *et al.* Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue (FC3R), Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. *Cement Concrete Research*, v. 33, p. 603-609, 2003.

PEREIRA, M.A. *Influência da temperatura e umidade nos ciclos de degradação acelerada de fibrocimentos com cinza de casca de arroz como adição mineral*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG. 2011.

PENA, E.Q. *Caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade e de superfície específica de pellet feed de minério de ferro do quadrilátero ferrífero empregando o método de adsorção de nitrogênio*. Dissertação em Engenharia de Materiais. REDEMAT, 2002.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.A.; CASTRO-GOMES J.P.; SANTOS, P.M.S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars componentes. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 197-203, 2012.

PHILLIPS, J.C.; CAHN, D.S. Refuse glass aggregate in Portland cement. *In: PROCEEDINGS OF THE 3RD MINERAL WASTE UTILISATION SYMPOSIUM*. Mar. 14-16, US Bureau of Mines, Chicago, IL, pp. 386-390, 1972. *Proceeding...*, 1972.

PINTO, A.T. *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia da Universidade do Ninho, Portugal, 2004.

POLLERY, C.; CRAMER, S.M.; DE LA CRUZ, R.V. Potential for using waste glass in Portland cement concrete. *Journal of Materials Civil Engineering*, v. 10, n. 4, p. 210-9, 1998.

POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. *In: SWAMY, R.N. (ed.). The alkali-silica reaction in concrete*. Glasgow: Blackie and Son, p. 16-44, 1992.

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S.D.; DAL MOLIN, D.C.C. Adição de cinza de casca de arroz no concreto: benefícios de durabilidade. *In: VI ENCONTRO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA (ENTECA)*, Maringá, Brasil. *Anais...*, 2007.

PRADO, L.P. *et al.* Análise das propriedades do concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) residual. *In: 51º IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*. Curitiba-PR, *Anais...*, 2009.

PRISZKULNIK, S. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado. *In: ISAIA, G.C. (ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1017-1070, 2005.

RAJABIPOUR, F.; MARAGHECHI, H.; FISCHER, G. Investigating the Alkali silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials'. *ASCE Journal of Materials*, v. 22, n. 12, p. 1201-1208, 2010.

RAVERDY, M. *et al.* Appreciation de l'actvite pouzzolanique dos constituents secondaires. *In: 7th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT*, Paris, 1980, v. 3, p. 36-41. *Anais...*, 1980.

REGO, J.H.S. *As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas*. Tese Doutorado em Eng. Civil. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2004. 274p.

REGO, J.H.S. *et al.* Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimentos compostos com cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina. *In: 48º IBRACON. CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*. 2006. *Anais...*, 2006.

REGO, J.H.S. *Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento*. Dissertação de Mestrado em Eng. Civil CMEC/UFG, Goiânia, 2001, 200 p.

REINDL, J. Reuse/recycling of glass cullet from non-container uses. Madison: Dane County. Department of PublicWorks, 1998/2003, 2003.

RILEM. Recomendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. *Revista Materials and Structures*, v. 32, n. 217, p. 163-179, apr. 1999.

ROCHA, L.; PERES A.E.C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. *Rev Esc Minas*, v. 62, n. 3, pp. 291-295, 2009.

RODRIGUES, M.S. *et al.* Characterization and pozzolanic evaluation of sugar cane bagasse ashes. IC-NOCMAT 2010, *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES*. Cairo-Egypt, p. 1-9. *Anais...*, 2010.

RODRIGUES, C.S. *Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu*. Tese. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos. *In: X CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA Y XII CONGRESO DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN*. CONPAT 2009. Valparaíso - Chile. 2009. *Anais...*, 2009.

SÁ, J.S. *et al.* Cinza do bagaço de cana-de-açúcar para utilização em concretos: aplicação experimental. *In: 53º IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*. Florianópolis-SC. 2011. *Anais...*, 2011.

SACCANI, A.; BIGNOZZI, M.C. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 531-536, 2010.

SAGOE-CRENTSIL, K.S.; BROWN, T.; TAYLOR, A. *Recycled glass as sand replacement in premix concrete*. Eco-Recycled Australia and CSIRO, 2001.

SALOMÃO, M.C.F. *et al.* Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. *In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. Fortaleza, 2010, Fortaleza: IBRACON. *Anais...*, 2010.

SANTOS, G.C. *et al.* Material vitrocerâmico sinterizado a partir de resíduo de indústria de vidros planos. *In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, v. 17, 2009, UF São Carlos, v. 5, p. 1093, *Anais...*, 2009.

SANTOS, L. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Dissertação de mestrado em Estruturas e Construção Civil. Brasília/DF: Abril de 2006.

SANTOS, M. *Influência de materiais de proteção superficial na resistividade elétrica e absorção capilar do concreto*. Dissertação de Mestrado Porto Alegre: UFSM-RS, 2011.

SANTOS, M.R.; FORMAGINI, S. *High performance concrete with addition of ultra fine sugarcane bagasse ashes*. HPC011-V International ACI. American Concrete Institute, 2008.

SCHMIDT, B. *et al.* Aplicação de tratamento térmico em resíduos de pó de pedra para substituição parcial do cimento. In: 53º IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. 2011. Florianópolis-SC. *Anais...*, 2011. ISSN 2175-8182.

SCRIVENER, K.L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 651-665, 2011.

SENGUL, O.; GJØRV, O.E. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Mater Journal*, v. 105, n. 6, p. 541-547, 2008.

SHACKELFORD, J.F. *Ciência dos materiais*. 6. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHANNAG, M.J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 22, p. 399-406, 2000.

SHAO, Y. *et al.* Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91-100, 2000.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material a Field trial on concrete slabs. *Cement Concrete Research*, v. 36, n. 2, p. 457-68, 2006.

SHAYAN, A.; XU, A. Value added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 81-89, 2004.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 3, p. 537-545, 2004.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement Concrete Research*, v. 35, n. 5, p. 987-93, 2005.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 234-247, 2007.

SICHERI, E.P.; CARAM, R.; SANTOS J.C.P. Vidros na construção civil. In: ISAIA, G.C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e Engenharia de Materiais*. IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto), v. 1, 2007.

SILVA, A.J.C. *et al.* Utilização de vidro reciclado para produção de concreto verde em Fernando de Noronha. In: VI ENCONTRO NACIONAL E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. Vitória, Espírito Santo, 2011. *Anais...*, 2011.

SILVA, F. *et al.* Sources of variations when comparing concrete carbonation results. *Journal of Materials Civil Engineers*, v. 21, n. 7, p. 333-342, 2009.

SILVA JÚNIOR, O. G. *Produção e caracterização de compósitos à base de fibra de curauá, amido termoplástico e polietileno utilizando a termografia*. Dissertação (Mestrado). Escola de Design, Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, M.G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G.C. (Ed). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

SILVA, P.C.; FERREIRA, R.M.; FIGUEIRAS, H. *Electrical resistivity as a means of quality control of concrete*. Influence of Test Procedure. XII DBMC. Porto. Portugal, 2011.

SIMÕES, L.J. *et al.* Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substitute parcial do cimento em matrizes cimentícios. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n. 22, p. 43-49, Out. 2013.

SMITH, W.F. *Princípios de ciência e Engenharia dos Materiais*. 3. ed. McGraw-Hill, Lisboa, 1998.

SOBOLEV, K. *et al.* Utilization of waste glass in ECOcement: strength properties and microstructural observations. *Waste Manage*, v. 27, p. 971-6, 2007.

SOKOLOVICZ, B.C.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Concreto com cinza de casca de arroz natural: estudo da penetração de cloretos em protótipos de concreto. In: X CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA Y XII CONGRESO DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN. CONPAT. 2009. Valparaíso-Chile. *Anais...*, 2009.

SPRAGG, R.P. *et al.* Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. Publication FHWA/IN/JTRP-2011/21. *Joint Transportation Research Program*, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2011. doi: 10.5703/1288284314646.

TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 21, Mar. 2007.

TARGAN, S. *et al.* Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 1551-1558, 2002.

TASHIMA, M.M. *Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland*. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2006.

TERRO, M.J. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Build Environ*, v. 41, p. 633-9, 2006.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 209-216, 2011.

TOPCU, I.B.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. *Cement Concrete Research*, v. 34, p. 267-74, 2004.

TORGAL, F.M.A.S.P.; CASTRO GOMES, J.P.; JALALIS, S. Ligantes geopoliméricos: Uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono. *Revista Betão*, ano V, n. 10, maio 2005.

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo*. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VAN AARDT, J.H.P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, p. 567, 1984.

VILLAR-COCIÑA, E. *et al.* Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A Kinetic-diffusive model. *Cement and concrete research*, v. 33, p. 517-524, 2003.

WEERDT, K. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 279-291, 2011.

WHITING, D.A.; NAGI, M.A. *Electrical resistivity of concrete: A literature review*. R&D Serial n. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57 p.

WONG, J.; ANGELL, C.A. *Glass structure by spectroscopy*. New York: Dekker 1976.

WULFF, J. *et al.* *Ciência dos materiais*. Instituto Tecnológico de Massachusetts, v. 1, junho de 1964.

XI, Y. *et al.* Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY. 2004. Beijing, May 20–21. *Anais...*, 2004.

YUKSEL, C. *et al.* Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate. *Cement & Concrete Composites*, v. 38, p. 57-64, 2013.

ZANNI, H. *et al.* Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (PRC) using Si NMR. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 1, pp. 93-100, 1996.

ZHI, W.; CAIJUN, S.; JIANMING S. Effect of glass powder on chloride ion transport and alkali-aggregate reaction expansion of lightweight aggregate concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, v. 24, n. 2, p. 312-317, 2009.