



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

**“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE LÃ DE VIDRO EM
FABRICAÇÃO DE CONCRETO.”**



Autor: Paulo Roberto Borges

Co-Orientador: Prof. Dsc. José Roberto de Oliveira

Orientador: Prof. Dsc. Jorge Alberto Soares Tenório

Setembro de 2007



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Paulo Roberto Borges

"Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e seleção de materiais

Co-Orientador: Prof. Dsc. José Roberto de Oliveira

Orientador: Prof. Dsc. Jorge Alberto Soares Tenório

Ouro Preto, 14 de setembro de 2007

B732u Borges, Paulo Roberto.
 Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto
 [manuscrito] / Paulo Roberto Borges. – 2007.
 xvii, 129 f. : il. color., graf., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório.
 Co-orientador: Prof. Dr. José Roberto de Oliveira.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Rede
 Temática em Engenharia de Materiais.

 Área de concentração: Processo de fabricação.

Lã de vidro - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Refugo de vidro -
 Reaproveitamento - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.
 II. Título.

CDU: 624.012.4

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - CETEC - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



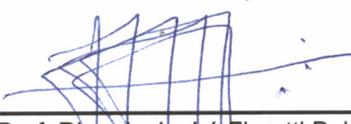
“Utilização de Resíduo de Lã de Vidro na Fabricação de Concreto”

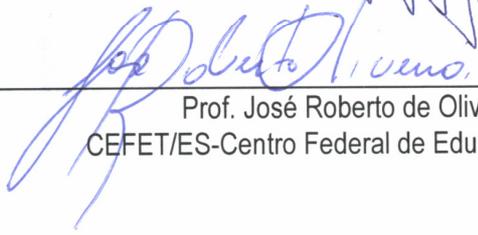
Autor: Paulo Roberto Borges

Dissertação defendida e aprovada, em 14 de setembro de 2007, pela banca examinadora constituída pelos professores:


Prof. Jorge Alberto Soares Tenório (DSc) - Orientador
REDEMAT / Universidade de São Paulo


Prof. Humberto Naoyuki Yoshimura (DSc.)
IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas


Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto (DSc.)
CEFET/MG-Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais


Prof. José Roberto de Oliveira (DSc.) Co-Orientador
CEFET/ES-Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo

A você Juliana, minha linda, agradeço a compreensão, estímulo e dedicação, fundamentais para a conclusão deste trabalho, com todo o carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me iluminou, abriu portas e me encorajou sempre, sua presença foi sentida em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Jorge Tenório, pela confiança, incentivo e compreensão demonstrada durante toda a trajetória.

Ao Prof. Dr. José Roberto de Oliveira pela força, amizade, e grande incentivo, seu inestimável apoio foi imprescindível no decorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Fiorotti – CEFET-MG por sua oportuna e fundamental orientação no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão – UFES, exemplo de servidor público, sua colaboração foi decisiva.

Aos alunos de iniciação científica Edno, Victor, Eduardo, Maria Maria pelo incentivo e ajuda preciosa na realização dos ensaios.

Ao Xerife, grande colaborador.

Ao CEFET-ES, pela disponibilização dos equipamentos para ensaios. Aos professores da coordenação do curso de construção civil, Pavan e Lívia, em especial ao Prof. Ronaldo Pacheco pela colaboração e conhecimentos transmitidos.

Ao CEFET Ouro Preto pela iniciativa da parceria com a REDEMAT, por ter proporcionado minha participação, aos “professores-colegas” na parceria CEFET-REDEMAT.

Aos professores da CODAMIN do CEFET Ouro Preto.

Aos Professores da REDEMAT pelos conhecimentos transmitidos em especial ao Prof. Fernando Gabriel.

Aos funcionários da HOLCIM, em especial ao Engenheiro Marcelo Singulani que viabilizou a realização de importantes ensaios.

Aos professores Ermínio e Gandini e toda equipe de funcionários e bolsistas dos laboratórios do DEGEO, pela presteza na realização de ensaios.

Aos engenheiros Fábio e Renata da CVRD.

À Ana Maria de Souza Alves e Silva, pela dedicação, presteza e paciência.

Ao Mateus pela força e ajuda preciosa na realização dos ensaios.

Ao meu filho Bruno que por diversas vezes abriu mão de momentos destinados ao convívio familiar.

A minha grande família que sempre me apoiou. Aos meus pais, meus maiores mestres, Alayde e Toninho, alicerce seguro, presença constante mesmo à distância, todo meu respeito e admiração.

À Pif-Paf querida, pedra angular, a todos os irmãos pifpafianos.

Enfim, aos que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse possível, mas não foram citados, minhas desculpas e meu mais sincero agradecimento.

Um país que não cuida da educação de seu povo está condenando o seu futuro.
(Içami Tiba 2006).

RESUMO

A geração de resíduos em processos industriais é muitas vezes inevitável. A lã de vidro, largamente utilizada nas atividades das indústrias minero-metalúrgicas, devido às condições de trabalho, perde as características de isolante térmico, transformando-se em um resíduo industrial. O objetivo principal deste estudo é a pesquisa do aproveitamento do resíduo industrial de lã de vidro, através da incorporação em matriz de concreto que é empregada com a finalidade de encapsulamento do resíduo - uma prática comum e em muitos casos vantajosa, com ganho nas propriedades mecânicas, e melhoria na trabalhabilidade das misturas. Neste sentido, as propriedades mecânicas do concreto foram avaliadas para diferentes incorporações de lã de vidro, em adição e em substituição da massa do aglomerante, para teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%. Este trabalho apresenta os resultados dos ensaios experimentais realizados nas propriedades do concreto, como resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e trabalhabilidade de um traço de referência em comparação a traços com misturas de lã de vidro pulverizada e natural. Os resultados mostram um aumento na trabalhabilidade das misturas com substituição de resíduo acima de 300% e em adição de resíduo acima de 350%. Obteve-se também uma melhora no módulo de elasticidade de 20 % para o traço com 10% de resíduo adicionado. Acredita-se que este estudo – uma vez que não existem outros publicados - irá fornecer subsídios importantes para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Engenharia de Materiais – Resíduo industrial – Concreto – Lã de Vidro – Adição - Substituição.

ABSTRACT

The waste generation in industrial processes is mostly unavoidable. The glass wool, greatly used in mineral-metallurgical activities, loses its thermal insulating features turning into an industrial waste due to work conditions. The prime goal of this work is to research the use of industrial waste of glass wool, though the incorporation in concrete matrix, which is used for the waste encasement – it is a common practice and also advantageous in most cases with gain in mechanic properties and improvement of the mixture workability development. In this way, the mechanical properties of the concrete were evaluated for different incorporations, in addition or substitution of the mass agglomerate, for contents of 2.5%, 5%, 7.5% and 10%. This work shows the results of the experimental tests accomplished to measure the concrete properties, such as compressive strength, traction in flexural strength, elasticity modulus and the workability of referential trace compared to pulverized and natural mixtures of glass wool. The results show a raise of the workability of the mixtures in waste substitution above 300% and in waste addition above 350%. An expressive enhancement of the elasticity modulus (20%) in trace with 10% of added waste was also obtained. Since there are not any similar works published, it is believed that this work will be very useful to future researches.

Keywords: Material's engineering – Compressive strength – Industrial's residue – Concrete – Glass wool – Addition – Substitution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos modificado de NBR 10004/2004 ² .	23
Figura 3-2 - Fluxograma de gerenciamento de resíduos sólidos modificado de Maroun 2006 .	25
Figura 3-3 - Esquema de fabricação de clínquer Portland.	38
Figura 4-1 - (A) Lã de vidro no aterro industrial, Vitória-ES. (B) Aspecto do resíduo de lã de vidro “natural”.	70
Figura 4-2 - (A) Moinho de bolas CODAMIN-CEFET-OP. (B) Aspecto do resíduo de lã de vidro moído.	71
Figura 4-3 - Microscópio eletrônico de varredura MEV-DEGEO-UFOP.	71
Figura 4-4 - Armazenamento dos agregados, ensaios CEFET-ES.	72
Figura 4-5 - Agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.	73
Figura 4-6 - Agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.	74
Figura 4-7 - Cimento Portland CPIII 40 RS.	74
Figura 4-8 – Betoneira, ensaios CEFET-ES.	77
Figura 4-9 - (A) Formas, ensaios CEFET-ES. (B) Moldagem dos corpos de prova, ensaios CEFET-ES.	79
Figura 4-10 - Capela para revestimento dos corpos de prova, ensaios CEFET-ES.	80
Figura 4-11 - Execução de Slump-test, ensaios CEFET-ES.	82
Figura 4-12 - Determinação das dimensões do corpo de prova, ensaios CEFET-ES.	82
Figura 4-13 - Prensa servo-hidráulica laboratório de construção civil, ensaios CEFET-ES.	83
Figura 4-14 - (A) Arranjo para o ensaio de tração na flexão, ensaios HOLCIM. (B) Corpo-de-prova rompido, ensaios HOLCIM.	85
Figura 5-1 - Aspecto do resíduo de lã de vidro pulverizado: (A) Aumento de 63X. (B) Aumento de 950X.	87
Figura 5-2 - MEV do resíduo de lã de vidro:	87
Figura 5-3 - Difratoograma de raios-X do resíduo da lã de vidro moída.	89
Figura 5-4 - Análise Granulométrica da Lã de Vidro.	90
Figura 5-5 - Curva granulométrica do agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.	91
Figura 5-6 - Curva granulométrica do agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.	92
Figura 5-7 - Curva granulométrica do agregado miúdo, ensaios CEFET-MG.	93
Figura 5-8 - Curva granulométrica do agregado graúdo, ensaios CEFET-MG.	94
Figura 5-9 - Gráfico médias das resistências à compressão X Idade para o traço de referência, ensaios CEFET-ES.	97
Figura 5-10 - Gráfico médias das resistências à compressão X Idade para o traço PS, ensaios CEFET-ES.	98
Figura 5-11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone NS-2, ensaios CEFET-ES.	99
Figura 5-12 - Gráfico resistências médias á compressão X Idade para o traço NS, ensaios CEFET-ES.	100
Figura 5-13 - Gráfico resistências médias à compressão X Idade para o traço PA, ensaios CEFET-ES.	101
Figura 5-14 - Comparativo das resistências médias dos traços submetidos aos ensaios de compressão X Idade, ensaios CEFET-ES.	101
Figura 5-15 - Comparativo das resistências médias à compressão X Idade, ensaios CEFET-ES.	102
Figura 5-16 - Evolução das resistências médias à compressão X Idade - Traços PS, NS e PA, ensaios CEFET-ES.	102

Figura 5-17 - Densidade do concreto para os traços estudados, ensaios CEFET-ES.	103
Figura 5-18 - Valores do Slump-test para os traços estudados, ensaios CEFET-ES.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Vantagens e desvantagens na utilização de aterros industriais.	27
Tabela 3-2 - Resistência térmica da lã de vidro – ISOVER.	34
Tabela 3-3 - Composição química da lã de vidro – ISOVER.	34
Tabela 3-4 - Propriedades físicas e químicas da lã de vidro – ISOVER.	35
Tabela 3-5 - Principais estatísticas do cimento no Brasil 2003-2005.	37
Tabela 3-6 - Composição do cimento Portland.	39
Tabela 3-7 - Produtos da hidratação do cimento Portland.	42
Tabela 3-8 - Principais estatísticas para a areia e pedra britada no Brasil 2003-2006.	43
Tabela 3-9 - Propriedades do Concreto X Características do Agregado.	44
Tabela 3-10 - Qualidade da água para a produção de concreto.	46
Tabela 3-11 - Vantagens e desvantagens da aplicação de aditivos em concretos.	47
Tabela 3-12 - Relação entre Trabalhabilidade e Abatimento do tronco de cone.	51
Tabela 3-13 - Relação entre Consistências do concreto e Tipos de obras.	52
Tabela 3-14 - Relação entre Materiais e Módulo de elasticidade.	55
Tabela 3-15 - Relação entre as Resistências à compressão, Tração na flexão e Tração direta (MPa).	60
Tabela 3-16 - Evolução dos estudos – Zona de transição fibra de vidro-matriz.	67
Tabela 4-1 - Composição em massa do traço de referência utilizado.	75
Tabela 4-2 - Composição em massa dos traços com substituição do resíduo pulverizado PS, ensaios CEFET-ES.	75
Tabela 4-3 - Composição em massa dos traços com substituição do resíduo natural NS, ensaios CEFET-ES.	76
Tabela 4-4 - Composição em massa dos traços com adição do resíduo pulverizado PA, ensaios CEFET-ES.	76
Tabela 4-5 - Quantitativo dos traços em massa, ensaios CEFET-ES.	77
Tabela 5-1 - Composição química do resíduo de lã de vidro – EDS/Microscopia Eletrônica de Varredura.	88
Tabela 5-2 - Composição química do resíduo de lã de vidro – Análise química por via úmida.	88
Tabela 5-3 - Caracterização física da lã de vidro.	89
Tabela 5-4 - Caracterização física do agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.	91
Tabela 5-5 - Caracterização física do agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.	92
Tabela 5-6 - Caracterização física do agregado miúdo, ensaios CEFET-MG.	93
Tabela 5-7 - Caracterização física do agregado graúdo, ensaios CEFET-MG.	94
Tabela 5-8 - Teores dos componentes do cimento Portland CPIII 40 RS.	95
Tabela 5-9 - Exigências químicas do cimento Portland CP III 40 RS.	95
Tabela 5-10 - Exigências físicas e mecânicas do cimento Portland CP III 40 RS.	95
Tabela 5-11 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço de referência, ensaios CEFET-ES.	96
Tabela 5-12 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço PS, ensaios CEFET-ES.	97
Tabela 5-13 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço NS, ensaios CEFET-ES.	99
Tabela 5-14 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço PA, ensaios CEFET-ES.	100
Tabela 5-15 - Resultados dos ensaios para determinação do Módulo de elasticidade, Densidade específica e Resistência de tração à flexão – Traço de referência, ensaios CEFET-MG.	104

Tabela 5-16 - Resultados dos ensaios para determinação do Módulo de elasticidade, Densidade específica e Resistência de tração à flexão – Traço PA-4 ensaios CEFET-MG.	105
Tabela 5-17 - Resultado solubilização para os traços de referência e PA-4, ensaio USP.	105

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland.
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades Produtoras de Agregados para a Construção.
AR	Resistente aos Álcalis.
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica.
CODAMIN	Coordenação de Mineração.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
DEGEO	Departamento de Geologia.
DEMIN	Departamento de Mineração.
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral.
OMS	Organização Mundial de Saúde.
RS	Resistente a Sulfatos.
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto.
USP	Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Ångström.
c	Concreto.
°C	Grau Celsius.
cal	Caloria.
cm	Centímetro.
cm ²	Centímetro quadrado.
d	Valor de cálculo.
<i>E</i>	Módulo de elasticidade.
<i>E_{ci}</i>	Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial.
<i>E_{cs}</i>	Módulo de deformação secante.
<i>f</i>	Resistência.
<i>f_c</i>	Resistência à compressão do concreto.
<i>f_{cd}</i>	Resistência de cálculo à compressão do concreto.
<i>f_{ck}</i>	Resistência característica à compressão do concreto.
<i>f_{cm}</i>	Resistência média à compressão do concreto.
<i>f_{ctM}</i>	Resistência à tração na flexão.
<i>f_{t,D}</i>	Resistência à tração por compressão diametral.
g	Gramas.
G	Giga.
HF	Ácido fluorídrico.
j	Idade (referente à cura do concreto).
k	Valor característico.
kg	Quilograma.
L	Litro.
MF	Módulo de finura.
µm	Micrométrico.
m	Metro.
m ²	Metro quadrado.
m ³	Metro cúbico.
mg	Milígrama.
mm	Milímetro.
N	Newton.
pH	Potencial Hidrogeniônico.
t	Tonelada.
W	Watt.
ε	Deformação.
σ	Tensão.
0	Ínicio.
	Instante de aplicação da carga.
28	Aos 28 dias.

ÍNDICE

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1 - INTRODUÇÃO	18
2 - OBJETIVOS	20
2.1 - Objetivo Principal	20
2.2 - Objetivos Específicos	20
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 - Resíduos industriais	21
3.1.1 - Classificação dos resíduos sólidos	21
3.1.2 - Gerenciamento de resíduos sólidos	24
3.1.3 - Disposição final dos resíduos sólidos	26
3.1.4 - Aproveitamento dos resíduos	28
3.2 - Lã de vidro	32
3.2.1 - Tipos de produtos em lã de vidro	35
3.3 - Concreto	36
3.3.1 - Componentes do concreto	36
3.3.1.1 - Cimento	37
3.3.1.2 - Agregados	43
3.3.1.3 - Água	45
3.3.1.4 - Aditivos	46
3.3.1.5 - Adições minerais	48
3.3.2 - Propriedades dos concretos	50
3.3.2.1 - Concreto fresco	50
3.3.2.2 - Concreto endurecido	53
3.3.2.3 - Deformações do Concreto	61
3.3.3 - Incorporações usuais nos concretos	62
3.3.3.1 - Sílica ativa	62
3.3.3.2 - Cinza volante	64
3.3.3.3 - Escória de alto-forno	64
3.3.3.4 - Fibras	65
3.3.3.5 - Vidro	68

3.3.3.6 - Cinza de Casca de Arroz – CCA	68
3.3.3.7 - Serragem cromada	68
3.3.3.8 - Lodo	68
4 - METODOLOGIA	70
4.1 - Aquisição e caracterização dos materiais	70
4.1.1 - Resíduo industrial de lã de vidro	70
4.1.2 - Agregados	72
4.1.2.1 - Agregado miúdo	73
4.1.2.2 - Agregado graúdo	73
4.1.3 - Aglomerante	74
4.2 - Determinação dos traços	75
4.3 - Preparação das misturas	76
4.4 - Confecção dos corpos de prova	78
4.4.1 - Moldagem e cura dos corpos de prova	78
4.4.2 - Capeamento dos corpos-de-prova	79
4.5 - Realização dos ensaios para determinação das propriedades mecânicas do concreto	80
4.5.1 - Ensaio de abatimento	80
4.5.2 - Ensaio de resistência à compressão	82
4.5.2.1 - Resultados	83
4.5.3 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade	84
4.5.4 - Ensaio de resistência de tração à flexão	84
4.6 - Realização de ensaios para classificação ambiental do concreto	85
4.6.1 - Ensaio de solubilização de resíduos	85
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1 - Caracterização do resíduo industrial de lã de vidro	86
5.1.1 - Microscopia eletrônica de varredura	86
5.1.2 - Análise química por via úmida	88
5.1.3 - Difração de raio-X	89
5.1.4 - Análise granulométrica	89
5.2 - Caracterização dos materiais componentes do concreto	90
5.2.1 - Agregado miúdo	90
5.2.2 - Agregado graúdo	91
5.2.3 - Agregado miúdo	92
5.2.4 - Agregado graúdo	93
5.2.5 - Aglomerante	94

5.3 - Estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto.	96
5.3.1 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto nos ensaios realizados no CEFET-ES.	96
5.3.1.1 - Concreto de Referência	96
5.3.1.2 - Concreto com lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa	97
5.3.1.3 - Concreto com de lã de vidro natural, substituindo o cimento em relação à sua massa	98
5.3.1.4 - Concreto com lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa	100
5.3.2 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto para resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência de tração na flexão.	104
5.3.2.1 - Concreto de Referência	104
5.3.2.2 - Concreto com lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa	104
5.4 - Estudo da influência da incorporação do resíduo na classificação ambiental do concreto	105
6 - CONCLUSÕES	106
7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	110
APÊNDICES	115

1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda a incorporação do resíduo industrial de lã de vidro em concreto, inicialmente com a finalidade de estudar o seu aproveitamento em incorporação ao concreto como uma alternativa à disposição em aterros, sem que o resíduo altere a classificação ambiental do concreto, ou seja, o concreto mesmo depois da incorporação deve permanecer inerte ambientalmente.

O aproveitamento do resíduo foi estudado em substituição ao cimento, ou simplesmente adicionado à matriz de concreto, observando o comportamento mecânico frente às incorporações, tais como resistência à compressão, consistência, trabalhabilidade, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, em atendimento às normas vigentes.

A lã de vidro, por suas características como leveza, facilidade de se moldar aos ambientes e, principalmente, pela alta capacidade de isolamento térmico, é largamente utilizada nas atividades diárias das indústrias, como por exemplo; nas indústrias minero-metalúrgicas. Porém, devido às condições de trabalho, o material perde as características de isolante térmico, transformando-se em um resíduo industrial.

Este material é então depositado em aterros terceirizados ou das próprias indústrias, gerando despesas com esta disposição. O aproveitamento de resíduos é prática e busca constante das indústrias, sendo desejável que:

"O manejo ambientalmente saudável de resíduos deve ir além da simples deposição ou aproveitamento por métodos seguros dos resíduos gerados e buscar desenvolver a causa fundamental do problema, procurando mudar os padrões não-sustentáveis de produção e consumo. Isto implica a utilização do conceito de manejo integrado do ciclo vital, o qual apresenta oportunidade única de conciliar o desenvolvimento com a proteção do meio ambiente" ¹.

O emprego dos resíduos pode resultar em vantagens do ponto de vista ambiental e econômico. O uso desses materiais torna-se uma alternativa de matéria-prima para todos os setores industriais, contribuindo para redução da extração/industrialização de novos recursos naturais. Consequentemente, os aterros são poupados em sua utilização com diminuição dos gastos com acondicionamento e transporte, além da redução dos riscos ambientais, proporcionados pela reciclagem desses materiais.

O aproveitamento de resíduos industriais na forma de adição e ou substituição em concreto, além de gerar ganho ambiental e econômico, pode proporcionar melhorias em suas

propriedades mecânicas. O desenvolvimento dessas incorporações no concreto, como pozolanas, escórias de alto-forno e cinzas volantes, contribui para aproveitar subprodutos poluidores, para melhorar as suas características, tais como a impermeabilidade, diminuição da porosidade capilar, maior resistência a sulfatos e redução do calor de hidratação.

Nenhum trabalho foi encontrado com relação ao emprego de lã de vidro com o seu aproveitamento na produção de concreto. Este estudo, portanto, contribui para o conhecimento nesta área no sentido de fornecer dados a aspectos pouco estudados, como a influência da incorporação nas propriedades mecânicas do concreto.

2 - OBJETIVOS

2.1 - Objetivo Principal

Esta dissertação tem como objetivo principal, o estudo da incorporação do resíduo industrial lã de vidro (gerado em atividades metalúrgicas), em substituição e adição, ao aglomerante em concretos sem fins estruturais.

2.2 - Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterização do resíduo;
- Caracterização dos agregados, miúdo e graúdo;
- Estudo da influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, enfatizando a trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência de tração na flexão e módulo de elasticidade;
- Classificação ambiental do concreto com incorporação do resíduo.
- Comparação dos valores experimentais obtidos.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Resíduos industriais

São considerados resíduos sólidos industriais para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação (2004) ²:

“resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades industriais, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isto, soluções economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível.”

A geração de resíduos em um processo industrial é muitas vezes inevitável. Não existindo uma tecnologia apropriada para o reaproveitamento ou técnicas de reciclagem, esses resíduos deverão ser depositados em aterros industriais, devendo ser monitorados para que não causem problemas para o meio-ambiente.

À medida que aumentam as preocupações com a manutenção, com a melhoria da qualidade do meio ambiente e com a proteção da saúde humana, as organizações de todos os tamanhos vêm crescentemente voltando suas atenções para os impactos ambientaisⁱ potenciais, de suas atividades, produtos ou serviços.

3.1.1 - Classificação dos resíduos sólidos

O escopo da NBR 10004 Resíduos sólidos – Classificação (2004) ², é classificar os resíduos sólidos quanto à sua periculosidade, considerando seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, portanto não tem como finalidade permitir ou não a utilização destes resíduos.

ⁱ Impacto ambiental: Qualquer alteração significativa no meio ambiente em um ou mais de seus componentes provocada por uma ação humana. Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais (Resolução CONAMA n°.001/1986).

A classificação dos resíduos sólidos envolve primeiramente a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e suas características; seguida da comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são reconhecidos, ou quanto à concentração de poluentes em suas matrizes.

A Figura 3-1 ilustra a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos – Classe I perigosos e Classe II não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em Classe II – A não inerte e Classe II – B inerte – NBR n°.10004/2004².

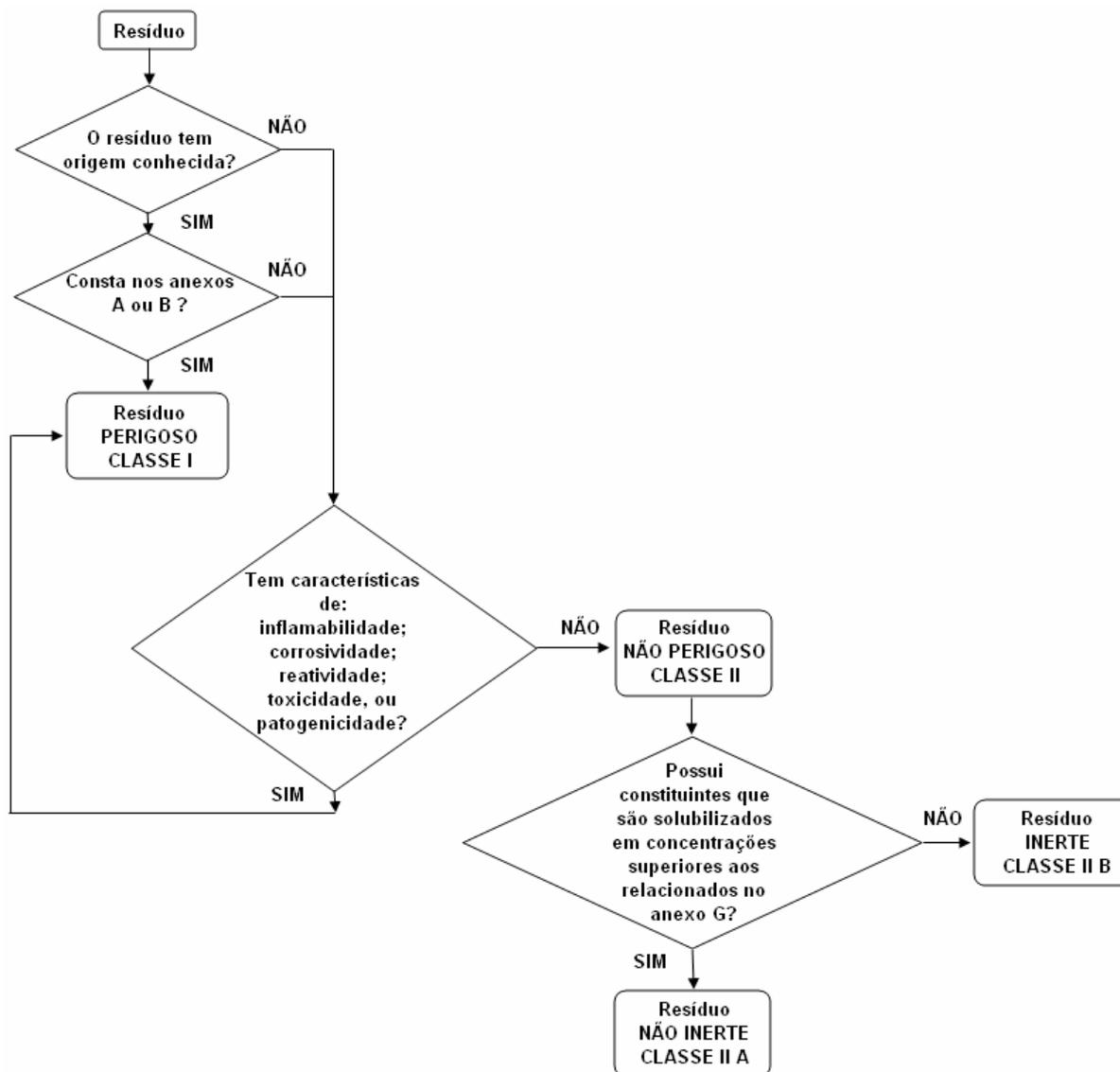


Figura 3-1 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos modificado de NBR 10004/2004 ².

Resíduos classe I – Perigosos: São classificados como resíduos classe I ou perigosos, os resíduos sólidos ou mistura de resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

Resíduos classe II A – Não inertes: São classificados como Classe II A, ou resíduos não inertes, os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadram na Classe I – perigosos ou na Classe II B – inertes. Estes resíduos podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Resíduos classe II B – Inertes: São classificados como Classe II B, ou resíduos inertes, os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos ao teste de solubilização preconizados pela ABNT NBR n°.10006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento (2004) ³, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos na Listagem 8 – “Padrões para o Teste de Solubilização”.

Como exemplos destes materiais, podem-se citar: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são facilmente decompostos.

3.1.2 - Gerenciamento de resíduos sólidos

A escolha de uma alternativa para a destinação de um resíduo sólido, seja pelo reaproveitamento ou pela disposição final, depende primeiramente da sua classificação, composição química, do teor de contaminantes, do estado físico, entre outros fatores.

A classificação de um resíduo sólido, exclusivamente, não deve impedir o estudo de alternativas para a sua utilização. No entanto, é essa classificação que orienta os cuidados especiais no seu gerenciamento, os quais podem inviabilizar a sua utilização quando não for possível garantir segurança ao trabalhador, ao consumidor final ou ao meio ambiente.

A Figura 3-2, apresenta o procedimento adotado no gerenciamento, com o objetivo de minimizar os resíduos na sua geração durante o processo, seguido das etapas de caracterização, classificação passando pelo pré-tratamento para aproveitamento ou destinação final dos resíduos industriais.

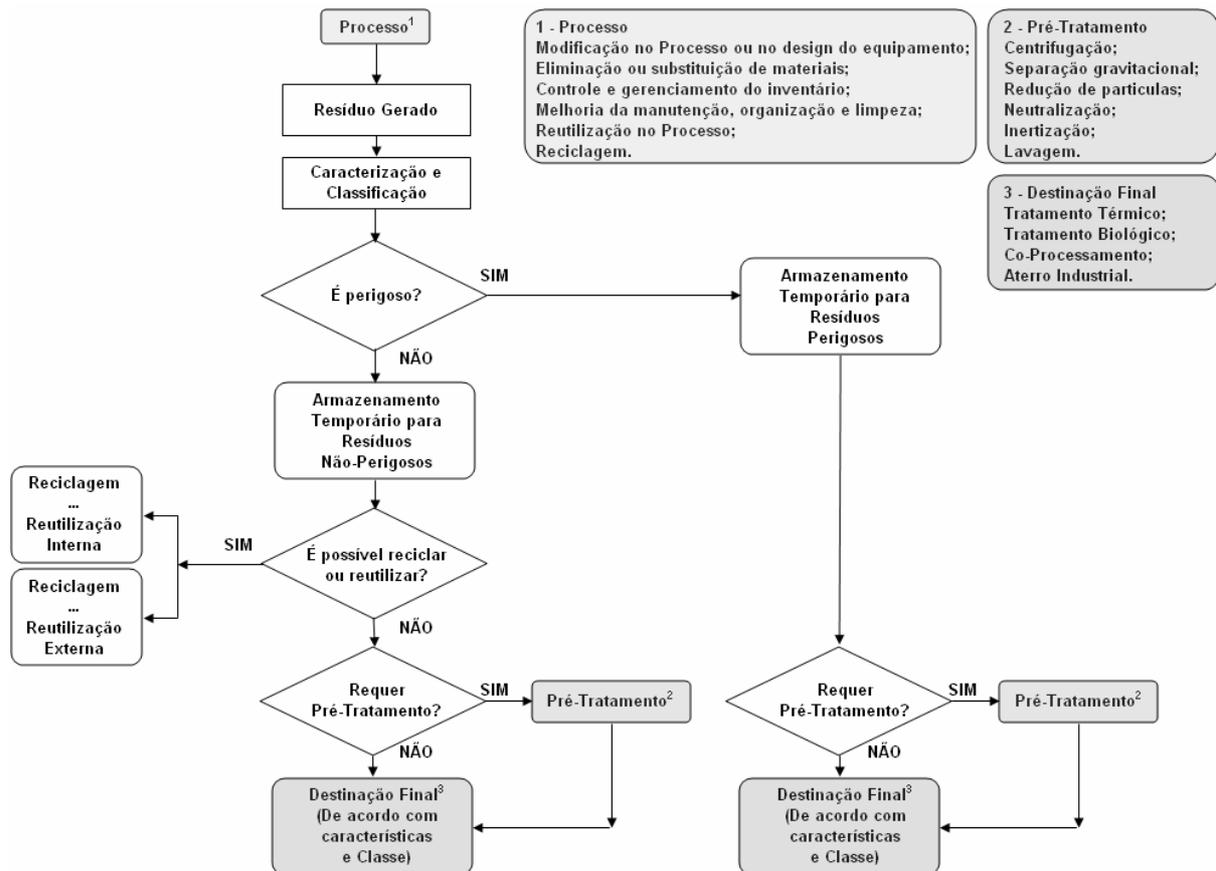


Figura 3-2 - Fluxograma de gerenciamento de resíduos sólidos modificado de Maroun 2006 ⁴.

Quanto à destinação final dos resíduos industriais gerados, o empreendedor gerador destes resíduos é diretamente responsável e será questionado quanto ao seu destino.

Cabe ao empreendedor:

- Comprovar a destinação dos resíduos sólidos gerados – Nota Fiscal da empresa responsável pelo recolhimento dos resíduos sólidos gerados, devendo verificar sempre se a empresa contratada para recolher os resíduos do processo gerador está devidamente autorizada a exercer a atividade.
- Possuir um sistema de controle de resíduos – Manifesto de Resíduos, mediante uso de formulário próprio, que permita conhecer e controlar a forma de destinação dada pelo gerador, transportador e receptor de resíduos.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da resolução 313 (2002) ⁵ dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, além de

distinguir os tipos e os destinos dados aos resíduos industriais, para a elaboração em nível nacional de um plano de gerenciamento de resíduos industriais perigosos.

3.1.3 - Disposição final dos resíduos sólidos

Nos aterros Industriais, os resíduos são confinados em grandes áreas especialmente projetadas para receber os tipos de resíduos que estão sendo dispostos. Existem aterros para resíduos da Classe I e da Classe II conforme classificação da norma ABNT NBR 10004 (2004) ², que diferem entre si no sistema de impermeabilização e controles necessários.

Um aterro industrial deve ter as seguintes características:

- Impermeabilização com camadas de argila e material polimérico de alta densidade;
- Sistema de drenagem e remoção de líquidos que percolam através dos resíduos;
- Sistema de tratamento do líquido percolado;
- Sistema de tratamento de gases que emanam dos resíduos;
- Monitoramento de águas subterrâneas.

Destaca-se também que, da mesma forma que para qualquer atividade industrial, as restrições a que estão sujeitas as unidades receptoras de armazenamento, utilização, tratamento ou disposição final de resíduos sólidos, são resultantes dos seus projetos, das condições de saúde ocupacional e outros fatores determinados pelos órgãos regulamentadores pertinentes, por exemplo: Órgãos Estaduais de Meio Ambiente, Ministério da Saúde, Ministério do Trabalho e Emprego, entre outros, dependendo da extensão e aplicação do resíduo.

As principais características da utilização de aterros industriais podem ser vistas na Tabela 3-1:

Tabela 3-1 - Vantagens e desvantagens na utilização de aterros industriais.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Baixo custo em relação a outras opções de tratamento e disposição final, como incineração.	Necessita de uma grande área física para construção e operação.
Pode ser utilizado para grande variedade de resíduos.	Gera um passivo que precisa ser continuamente monitorado.

Fonte: (RIBEIRO, 2007)

Os resíduos industriais geralmente são dispostos na forma de células, formando camadas de disposição:

- É o sistema mais seguro e eficaz, projetado com a aplicação de técnicas de engenharia de proteção ao meio ambiente, para evitar a contaminação do ar, do solo, das águas subterrâneas e superficiais, sem causar prejuízo ao meio ambiente e sem provocar doenças ou riscos para a saúde pública;
- Esse método utiliza princípios da engenharia para disposição dos resíduos no menor espaço possível, reduzindo o seu volume ao mínimo viável e cobrindo-os com a frequência diária ou a necessária;
- É o elemento central de qualquer Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos;
- É a forma mais acessível de tratamento e disposição final de resíduos sólidos;
- É a técnica de destinação final mais empregada em todo o mundo.

Segundo Monteiro et al. (2001) ⁶ um aterro industrial, com capacidade para receber 15 mil toneladas, demanda um investimento inicial de dois milhões de dólares, com um custo operacional entre 100,00 a 200,00 dólares por tonelada. O custo operacional varia com o grau de toxicidade do resíduo disposto.

Um cuidado especial que se deve tomar na operação de aterros industriais é o controle dos resíduos a serem dispostos, pois, em aterros industriais, só podem ser dispostos resíduos quimicamente compatíveis, ou seja, aqueles que não reagem entre si, nem com as águas de chuva infiltradas.

Os fenômenos mais comuns que podem ter origem na mistura de resíduos incompatíveis são: geração de calor, fogo ou explosão, produção de fumos e gases tóxicos e inflamáveis, solubilização de substâncias tóxicas e polimerização violenta.

Sistemas de manuseio, de estocagem, de transporte e de destinação final, adequados aos resíduos industriais, são práticas que não eram comuns na década passada.

A mudança para o novo formato é um resultado das pressões formais sofridas pelas organizações frente às legislações ambientais, como também por parte da sociedade e do mercado. O despertar para os aspectos ambientais produz uma competitividade entre empresas e entre setores, tanto em âmbito regional, nacional e internacional.

Atingir um desempenho ambiental adequado requer o comprometimento da organização com uma abordagem sistemática e com a melhoria contínua do seu sistema de gestão ambiental.

Reflexos desta política podem ser sentidos pelo mercado que cada vez mais exige empresas que cumpram a legislação ambiental. Assim como os órgãos de financiamento e de incentivos governamentais, como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que condicionam a aprovação dos projetos à apresentação das Licenças Ambientais.

De acordo com Roballo (2003)⁷

“[...] uma nova abordagem das relações entre o meio ambiente e o desenvolvimento se faz necessária, pois, isto implica considerar a dimensão da capacidade de suporte dos ecossistemas naturais em relação às atividades humanas e colocar em questão as escolhas e os estilos de desenvolvimento.”.

3.1.4 - Aproveitamento dos resíduos

Para a utilização de um resíduo ou de misturas de resíduos na fabricação de um novo produto ou para outras finalidades, deve-se estar em conformidade com os requisitos estabelecidos pelos órgãos responsáveis pela liberação do produto.

O aproveitamento dos resíduos gerados pode trazer benefício tanto do ponto de vista ambiental como também:

- Na redução da criação e utilização de aterros;

- Nos gastos com acondicionamento e transporte;
- Na redução da utilização dos recursos naturais, e;
- Na diminuição dos riscos ambientais proporcionados por esses resíduos.

A escolha dos métodos de tratamento deve considerar fatores técnicos, legais e financeiros que possibilitem:

- Redução da geração na fonte – Implantação de procedimentos que priorizam a não geração dos resíduos. Estas atuações podem variar de implantação de novas rotinas operacionais a processos produtivos com alterações tecnológicas;
- Reutilização de resíduos – Neste método o resíduo é reaproveitado sem que haja modificações na sua estrutura, e;
- Reciclagem de resíduos – No método da reciclagem o resíduo passa por um beneficiamento para que possa ser utilizado em outro processo, ou até mesmo retornar ao próprio processo.

A seguir estão descritos os principais métodos de tratamento (MAROUN, 2006) ⁴:

A). Processos químicos e biológicos:

- Inertização: através do uso de aditivos, a inertização modifica as características dos resíduos, transformando resíduos sólidos ou pastosos, com elevada concentração de contaminantes (como borras de petróleo e terra contaminada com óleo), em material seco, sem odor e com baixíssima concentração de contaminantes, permitindo assim a reutilização destes resíduos.

B). Processos térmicos:

Existe uma grande variedade de técnicas de tratamento baseadas na aplicação de calor aos resíduos, os chamados processos térmicos. Os produtos resultantes do emprego dessas técnicas dependem da quantidade de calor utilizada.

Os processos térmicos mais usuais incluem:

- **Dessorção Térmica:** é um processo que tem o objetivo de tratar solos contaminados com hidrocarbonetos não recicláveis tais como gasolina, óleo diesel, óleo combustível, querosene, entre outros, reduzindo ou eliminando sua concentração a níveis que permitam a disposição do solo em seu local de origem ou em uma nova utilização.
- **Incineração:** utiliza a combustão controlada para degradar termicamente materiais residuais. Os equipamentos envolvidos na incineração garantem fornecimento de oxigênio, turbulência, tempo de residência e temperatura adequados, precisam ainda contar com mecanismos de controle de poluição para remover os produtos da combustão incompleta e das emissões de particulados, de SO_x e NO_x . É necessária a correta disposição dos resíduos sólidos resultantes da incineração, as cinzas.
- **Co-Processamento:** consiste na técnica de destruição térmica a altas temperaturas em fornos de clínquer devidamente licenciados para este fim, com aproveitamento de conteúdo energético e/ou aproveitamento da fração mineral como matéria-prima, sem a geração de novos resíduos. Esses fornos também devem ter mecanismos de controle de poluição atmosférica para minimizar a emissão de particulados, SO_x e NO_x para a atmosfera. É um método de baixo custo e frequentemente utilizado para tratamento térmico de grande variedade de resíduos. É necessário o monitoramento das emissões atmosféricas, temperatura, tempo, e oxigenação.
- **Pirólise:** consiste na decomposição química do resíduo orgânico por calor na ausência de oxigênio. Os resíduos selecionados devem ser triturados e enviados a um reator pirolítico onde os compostos orgânicos são volatilizados e parcialmente decompostos. Apesar de ser um processo energeticamente auto-sustentável, visto que o seu balanço energético é positivo, produz mais energia do que consome, é necessário aquecer inicialmente os resíduos utilizando eletricidade, em virtude da falta de oxigênio. A vantagem deste processo é a limitação da produção de particulados.

- Plasma: é o gás ionizado por meio de temperaturas superiores a 3000°C, tornando-se uma forma especial de material gasoso que conduz eletricidade. A característica de alta energia e temperatura do plasma permite um tempo de reação curto em relação ao incinerador clássico, permitindo uma velocidade de destruição mais alta e a construção de reatores menores.

C). Processos físicos:

Os processos físicos são normalmente empregados como pré-tratamento para que os resíduos sejam posteriormente encaminhados para tratamento e/ou disposição final.

Os processos físicos de tratamento de resíduos englobam:

- Centrifugação: processo mecânico de separação de mistura de substâncias de densidades diferentes, pela ação da força centrífuga. Pela variação da velocidade de rotação do equipamento ou de suas dimensões, pode-se aumentar a força centrífuga e com isso diminuir o tempo necessário para a separação dos componentes da mistura.
- Separação Gravitacional: técnica de separação que explora as diferenças de densidade entre as fases. A dimensão do equipamento e a eficiência do processo dependem da velocidade de sedimentação dos sólidos, da viscosidade do fluido e da concentração de partículas. Também é empregada na remoção de óleo e para classificação onde partículas de tamanhos diferentes são separadas.
- Redução de Partículas: método constituído por processos mecânicos formados por sistemas seqüenciais de peneiras e moinhos, montados para reduzir a granulometria do resíduo final ou para manter as características dos produtos finais dentro de limites desejados.
- Encapsulamento: que consiste em revestir os resíduos com uma camada de resina sintética impermeável e de baixíssimo índice de lixiviação;
- Incorporação: onde os resíduos são agregados à massa de concreto ou de cerâmica em uma quantidade tal que não prejudique o meio ambiente, ou

ainda que possam ser acrescentados a materiais combustíveis sem gerar gases prejudiciais ao meio ambiente após a queima.

3.2 - Lã de vidro

A lã de vidro é um componente utilizado em alto forno, constituída de finas fibras de vidro, de diâmetro aproximado de 3µm a 6µm e de comprimento variado, aglomerada por resinas sintéticas, obtida por um forte sopro de ar sobre o vidro em fusão (sílica e sódio). Desenvolvida especificamente para melhorar o isolamento termo acústico de instalações, é comercializada em rolos e em painéis, havendo uma diversidade de densidades e espessuras, que adequam-se a cada necessidade.

Principais características das lãs de vidro:

- Leve, fácil de manusear e de cortar;
- Incombustíveis, evitando a propagação das chamas e o risco de incêndio;
- Isolantes térmicos, proporcionando a redução no consumo de energia dos sistemas utilizados;
- Não atacam as superfícies com as quais estão em contato;
- Não favorecem a proliferação de fungos ou bactérias;
- Não deterioram nem apodrecem;
- Não é atacada nem destruída pela ação de roedores;
- Não tem o desempenho comprometido quando exposto à maresia;
- Em condições normais, sua capacidade isolante não diminui com o passar do tempo.

A lã de vidro é um material incombustível, qualidade que deve ser considerada em todos os projetos industriais, de edificações comerciais ou residenciais. O comportamento ao fogo dos materiais isolantes, inclusive aqueles com revestimentos, deve ser o de não contribuir e não propagar o fogo durante uma situação de incêndio.

Por ser um material fibroso, a lã de vidro é um dos melhores materiais para o tratamento acústico, podendo ser usada na isolamento acústica, que é a construção de barreiras para evitar a transferência de uma onda sonora (ruído) de um ambiente para o outro, ou na absorção acústica, que é um tratamento aplicado para melhorar a qualidade acústica dos ambientes.

Quando uma onda sonora entra em contato com a lã de vidro, ela é facilmente absorvida, devido à porosidade da lã. Além disso, ocorre uma fricção entre a onda e a superfície das fibras. Essa fricção converte parte da energia sonora em calor, ou seja, a lã de vidro faz com que a energia sonora perca intensidade, o que resulta em um aumento de absorção ou da isolamento sonora. Tal fenômeno de absorção e fricção em conjunto não ocorre com outros materiais não-fibrosos Portal Metálica (2007) ⁸.

A lã de vidro, por suas propriedades físicas e químicas, é um dos mais tradicionais isolantes térmicos usados no mundo. É usada na indústria da Metalurgia e Siderurgia, para a redução de energia, através da diminuição da dissipação de calor.

Na construção civil, contribui para a obtenção do conforto térmico e acústico das edificações comerciais e residenciais, através do isolamento térmico, possibilitando o uso racional de energia nas edificações, principalmente nos sistemas de ar-condicionado, pois permite o uso de equipamentos de menor porte (menor investimento).

A condutividade térmica é influenciada, principalmente, pelos seguintes fatores:

- Composição química do material: materiais diferentes têm condutividades térmicas diferentes;
- Densidade: até um limite, os materiais com maior densidade têm condutividade térmica mais baixa em relação aos materiais de baixa densidade;
- Características físicas: materiais fibrosos (lã de vidro) ou porosos (espumas).

O desempenho de um isolante térmico é avaliado de acordo com a Resistência Térmica que ele propicia à passagem do calor. É um valor que pode ser medido em laboratório ou calculado, forma mais usual para a especificação dos isolantes em projetos.

Portanto, conhecendo-se a condutividade térmica e a espessura de um material, pode-se conhecer a resistência térmica que o mesmo propicia à passagem do calor. E quanto mais alta a resistência térmica, mais isolante é o material. A Tabela 3-2 mostra alguns valores de resistência térmica e da condutividade térmica em função da densidade da lã de vidro.

Tabela 3-2 - Resistência térmica da lã de vidro – ISOVER.

RESISTÊNCIA TÉRMICA DA LÃ DE VIDRO				
Material	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)	Condutividade térmica - K	Resistência térmica - R (m ² C/W)
			(W/m°C) Temperatura média = 24°C	
Lã de vidro	12	50	0,045	1,11
	20	50	0,038	1,32
	35	50	0,034	1,47
	12	75	0,045	1,67

Fonte: SAINT-GOBAIN CRISTALEIRA, S.A.

As escórias ricas em sílica podem ser refundidas com adição de calcário, dolomita ou cascalho e areia, e resfriadas rapidamente para obtenção de lã de vidro, utilizada como isolante térmico e acústico (MOURA, 2000) ⁹.

A lã de vidro é fabricada com areia, após a fusão, a sílica cristalina deixa de estar presente, uma vez que se torna um material amorfo. A Tabela 3-3, mostra a composição química da lã de vidro.

Tabela 3-3 - Composição química da lã de vidro – ISOVER.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	%
SiO ₂	62 a 68
Al ₂ O ₃	1 a 4
Na ₂ O + K ₂ O	15 a 18
CaO + MgO	9 a 12
B ₂ O ₃	3 a 6
Resina fenólica termostável	< 12
Óleo mineral	< 0,4

Fonte: SAINT-GOBAIN CRISTALEIRA, S.A.

A Tabela 3-4, mostra as principais propriedades físicas e químicas da lã de vidro.

Tabela 3-4 - Propriedades físicas e químicas da lã de vidro – ISOVER.

PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	
Aparência	Sólida
Forma	Lã mineral de textura homogênea, apresentada em forma de: painel, manta ou coquilha.
Tamanho das fibras	3µm < diâmetro < 6µm
Cor	Amarela, castanha ou cinzenta
pH	Ligeiramente básico
Ponto de fusão	>700 °C
Densidade	De 10 a 120 kg/m ³ (em função do produto).
Solubilidade em água	Nenhum
Estabilidade	Quimicamente estável
Reações perigosas	Não reativo. Só atacável pelo ácido fluorídrico - HF, que a decompõe.

Fonte: SAINT-GOBAIN CRISTALEIRA, S.A.

3.2.1 - Tipos de produtos em lã de vidro

Os produtos em lã de vidro são encontrados em muitos formatos para várias aplicações específicas; as principais são:

- Tubos Bipartidos. Elementos cilíndricos bipartidos de lã de vidro, de grande poder isolante, aglomerados com resinas sintéticas, para isolamento térmico em baixas e em altas temperaturas de tubulações em geral. São incombustíveis, não higroscópicos e inquebráveis. São de fácil e rápida aplicação;
- Painéis. São painéis leves, rígidos e/ ou semi-rígidos, incombustíveis, constituídos de lã de vidro, aglomerados com resinas sintéticas especiais. Podem também ser fornecidos revestidos com véu de vidro ou laminado. Ideais para isolamento térmico em altas e baixas temperaturas de equipamentos em geral com altos índices de absorção de ruídos; é recomendada sua utilização para tratamento acústico em instalações industriais e civis. Dimensões: 1200x600mm;
- Lã Branca. Lã de vidro branca isenta de resinas aglomerantes. Pode ser flocada manualmente, constituindo-se no isolante térmico ideal para locais de difícil acesso, enchimento de estufas e fornos, equipamentos industriais, etc.

3.3 - Concreto

O concreto é um material de larga aplicação na Construção Civil, e de consumo de grandes dimensões atingindo 5,5 bilhões de t/ano, obtido comumente da composição de cimento Portland, agregados e água, além de eventualmente contar com aditivos para a melhora de desempenho (RIBEIRO et al., 2000) ¹⁰.

O concreto de cimento Portland é o segundo produto mais consumido no mundo, segundo dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2005), e o seu consumo atinge 2.700 kg/habitante/ano, enquanto que a água atinge 11.000 kg/habitante/ano. Suas propriedades, como resistência à compressão e pouca permeabilidade, além da possibilidade de produção de peças de diferentes geometrias, são algumas das razões principais deste consumo (BUEST NETO, 2006) ¹¹.

3.3.1 - Componentes do concreto

O concreto é obtido pela mistura de aglomerante, agregados e água. A proporção de seus componentes deve ser tal, que atenda às condições pré-definidas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade.

O meio aglomerante do concreto é formado como resultado da reação de hidratação do cimento e água. A reação de hidratação e seus produtos são responsáveis pela evolução das características do material.

Os agregados a serem empregados na elaboração do concreto devem atender ao estabelecido na NBR 7211 Agregado para concreto – Especificação ¹², sendo que os mais utilizados na confecção do concreto são as areias e as rochas britadas, que devem possuir características de resistência e durabilidade maiores que aquelas exigidas do concreto.

Os aditivos mais comuns são os plastificantes, superplastificantes, retardador, acelerador, plastificante retardador e plastificante acelerador.

Por vezes o concreto recebe incorporações de materiais que tenham função de agregado ou ligante, como visto no capítulo anterior. Os resíduos são adicionados à massa de concreto aproveitando da qualidade de encapsulamento ou envelopamento destes materiais. (MAROUN, 2006) ⁴.

3.3.1.1 - Cimento

O aglomerante mais utilizado na construção civil é o cimento. Aglomerantes são materiais pulverulentos que hidratados formam uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados.

A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados declinou nas últimas décadas.

Em virtude da pouca expressão do comércio exterior, o consumo aparente apresenta comportamento análogo à produção. Segundo Brasil (2006) ¹³, os dados consistentes sobre o consumo setorial de cimento não estão disponíveis, entretanto, o consumo por região manteve em 2005 os mesmos níveis de 2004: Sudeste (48,7%), Sul (16,6%), Nordeste (16,5%), Centro Oeste (10,7%), e Norte (7,5%).

Os dados da produção nacional de cimento podem ser observados na Tabela 3-5:

Tabela 3-5 - Principais estatísticas do cimento no Brasil 2003-2005.

Discriminação		2003^(r)	2004^(r)	2005^(p)
Produção	(t)	34.010.115	34.413.288	36.673.470
Importação	(t)	612.762	441.117	323.494
	(10 ³ U\$-FOB)	22.698	24.187	20.665
Exportação	(t)	586.997	949.456	1.320.498
	(10 ³ U\$-FOB)	14.453	24.840	42.847
Consumo Aparente ⁽¹⁾	(t)	33.561.690	33.904.949	35.676.466
Preço médio	(US\$/t) ⁽²⁾	37,04/24,62	54,85/26,16	63,88/32,48

Fontes: DNPM-DIDEM, MDIC, SNIC, Mineral Commodity Summaries 2006.

Notas: ⁽¹⁾ Produção+Importação-Exportação; ⁽²⁾ Preço médio: comércio exterior base importação/exportação.

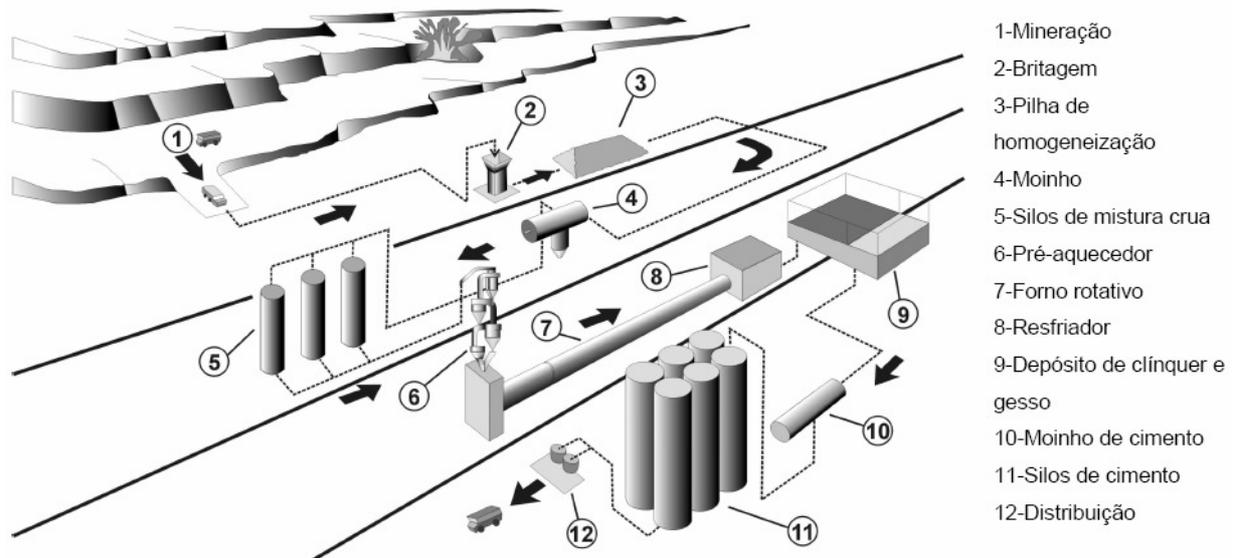
Notas: ^(r) Revisado; ^(p) Dados preliminares.

Dados da Produção e consumo do Cimento no Brasil (BRASIL, 2006)¹³.

No ano de 2006, o cimento teve preço médio de cento e setenta reais por tonelada, ante os duzentos e cinqüenta e três reais por tonelada de 2005, cerca de 32% inferior.

✓ Fabricação do cimento Portland

O Cimento Portland é obtido como resultado, principalmente, da calcinação da mistura homogênea de argila e calcário. O calcário é extraído das minas, britado e misturado nas proporções corretas com a argila, conforme a Figura 3-3.



Fonte: Esquema simplificado da fabricação de clínquer Portland (GOBBO, 2003) ¹⁴.

Figura 3-3 - Esquema de fabricação de clínquer Portland.

Os compostos químicos encontrados na farinha, como é chamada a mistura de rocha calcária e argila, são CaCO_3 (carbonato de cálcio) originados do calcário, SiO_2 (sílica), Al_2O_3 (alumina) e Fe_2O_3 (óxido de ferro) originados da argila.

A farinha é colocada em um moinho de matéria prima e posteriormente cozida em um forno rotativo a temperatura entre 1300°C e 1500°C .

Após o processo de queima, a massa cozida sofre uma série de reações químicas complexas, e, deixa o forno, com a denominação de clínquer.

Finalmente, o clínquer é reduzido a pó juntamente com gesso em um moinho. O gesso é acrescentado com a função de retardar o endurecimento do clínquer, pois este processo seria muito rápido se água fosse adicionada ao clínquer puro. Os compostos finais são mostrados na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 - Composição do cimento Portland.

		Fórmula	Sigla	Denominação	Porcentagem
Clínquer					
Silicatos	Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Alita	42-60
	Silicato Bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Belita	14-35
Aluminatos	Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Ferro-aluminatos cálcicos	6-13
	Ferro Aluminato	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Ferrita	5-10
Gesso					
		Fórmula	Sigla	Denominação	Porcentagem
Gesso	Sulfato de Cálcio	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	Gipsita	1-4

Nota: As abreviaturas são válidas somente para as fases puras, o que normalmente não ocorre em clínqueres industriais.

Fonte: Composição de um cimento Portland Modificado de (SILVOSO, 2003) ¹⁵.

Os silicatos, que são os compostos mais abundantes, são gerados nas últimas etapas do processo de clínquerização, não sofrem fusão durante sua formação e são normalmente cristais bem formados. O C_3S é o constituinte mais importante do cimento Portland, tanto por estar presente em maior porcentagem como por contribuir significativamente para a resistência mecânica do cimento hidratado. Tem endurecimento rápido, alto calor de hidratação e alta resistência inicial. O C_2S tem endurecimento lento, baixo calor de hidratação e baixa resistência inicial.

Os aluminatos são gerados na fase intermediária correspondente à temperatura de cristalização dos silicatos; representam a fase fundida na temperatura de clínquerização. O C_3A tem propriedades de pega muito rápida que é controlada com a adição de gesso, e é susceptível ao ataque de sulfatos, alto calor de hidratação e alta retração, além de baixa resistência final. O C_4AF apresenta endurecimento lento, é resistente a meios sulfatados, não contribui com a resistência e tem cor escura.

✓ Tipos de cimento Portland:

O cimento Portland comum (CP I) é referência, por suas características e propriedades, aos 11 tipos básicos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro. São eles:

- CP I - Cimento Portland Comum
 - CP I - S - Cimento Portland Comum com Adição
- Cimento Portland Composto (CP II)
 - CP II - E - Cimento Portland Composto com Escória
 - CP II - Z - Cimento Portland Composto com Pozolana
 - CP II - F - Cimento Portland Composto com Fíler
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
- Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI)
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- Cimento Portland Branco (CPB)

Esses tipos se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonáceo e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Diferem também em função de propriedades intrínsecas, como resistência inicial, e pela cor branca etc.

Para Metha e Monteiro (1994) ¹⁶ a economia dos custos foi fundamental para o desenvolvimento dos cimentos Portland compostos.

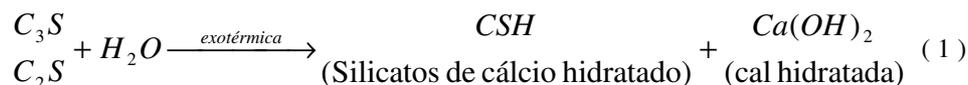
O CP I pode conter adição (CP I - S), de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou fillerⁱⁱ, calcário e o restante de clínquer.

O CP II pode conter adição de escória (CP II - E), de pozolanas (CP II - Z) ou adição de filler (CP II - F), em proporções um pouco maiores que no CP I - S.

O CP III tem adição de escória, de 35% a 70%, e o CP IV, conta com a adição de pozolanas de 15% a 50%.

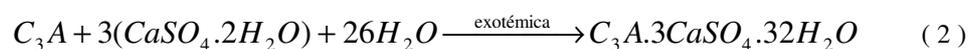
✓ Hidratação do cimento Portland.

Na reação de hidratação do cimento os grãos de cimento anidro iniciais vão sendo progressivamente dissolvidos dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Em contato com a água os silicatos se dissolvem, primeiramente os silicatos tricálcicos e em seguida os silicatos bicálcicos, precipitando os primeiros hidratos. Esquematizada sob a forma da Equação 1:



A hidratação dos silicatos, dentre as reações que ocorrem durante a hidratação do cimento, é a que exerce maior influência sobre as principais características do material. Os silicatos cálcicos hidratados recebem a denominação de CSH, e fazem referência a uma família de fases sólidas, de estrutura cristalina imprecisa e de composição química extremamente variada.

A reação de hidratação dos aluminatos, retardada pela adição de gesso é dada pela Equação 2.

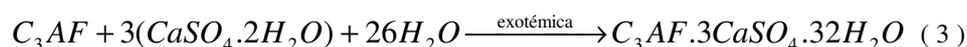


O produto obtido da hidratação é o trissulfato-aluminato que cristaliza sob a forma de agulhas, em forma de feixes ao redor dos grãos de cimento anidro. Caso haja um excesso de

ⁱⁱ Denomina-se Filler, a fração do material que apresenta dimensão nominal máxima inferior a 0,075mm. Como exemplo, tem-se o material carbonáceo constituído em grande parte por carbonato de cálcio.

C₃A em relação ao gesso, o trissulfato-aluminato de cálcio hidratado reage com o C₃A e forma o monossulfato-aluminato de cálcio hidratado, cristalizando sob a forma de plaquetas hexagonais, disseminadas nas fibras de CSH.

De maneira muito semelhante aos aluminatos a hidratação dos ferro-aluminatos pode ser esquematizada conforme a Equação 3:



Os principais produtos gerados na hidratação do cimento, suas características, quantidade e forma foram resumidas na Tabela 3-7, mostrada abaixo.

Tabela 3-7 - Produtos da hidratação do cimento Portland.

PRODUTO	QUANTIDADE	FORMAS	CARACTERÍSTICAS
Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H)	50% a 60% do volume de sólidos	Partículas de 1nm a 100nm	- arranjo irregular de lamelas entrelaçadas; - criam espaços de diferentes formas e tamanhos (5Å a 25 Å); - Água capilar, vazios até 50 Å; - Água livre, nenhum efeito na evaporação; - Água adsorvida, ligada por pontes de hidrogênio (15 Å); liberada em 30% U.R. responsável pela retração de secagem.
Portlandita Ca(OH) ₂ ou CH	20% a 25% de volume de sólidos	Cristais grandes prismas hexagonais 1µm	- Sua contribuição para a resistência se dá por força de Van der Walls.
Sulfo-aluminatos	15% a 20%		- desempenham papel menos importantes para a resistência mecânica, e - vulneráveis ao ataque de sulfatos.

Fonte: Principais características dos produtos de hidratação do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 1994)¹⁶.

O cimento CP III RS confere ao concreto características como maior impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, e resistência a sulfatos. Estas características imputam ao concreto uma aplicação geral em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada de concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro e outras. É particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, e obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

3.3.1.2 - Agregados

A NBR 7225 Materiais de pedra e agregados naturais (1993) ¹⁷ define agregado como sendo o material natural, de propriedades adequadas ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, duráveis e limpos e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possa afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto.

A forma e a textura dos agregados podem alterar significativamente a área específica dos agregados, influenciando diretamente na ligação pasta-agregado. Partículas que tendem à forma cúbica apresentam maior área específica do que as que se aproximam da forma arredondada. Quando a textura superficial é rugosa, a resistência mecânica do concreto aumenta consideravelmente, sobretudo nos esforços de tração na flexão. O mesmo efeito é obtido quando se reduz a dimensão máxima característica do agregado graúdo (ARAÚJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000) ¹⁸.

Brasil (2006) ¹³ disponibiliza a estatística para o setor, apresentando na Tabela 3-8 os principais dados de produção e consumo de agregados naturais para os anos de 2003 a 2005.

Tabela 3-8 - Principais estatísticas para a areia e pedra britada no Brasil 2003-2006.

Discriminação			2003	2004 [®]	2005 ^(p)
Areia	Produção	10 ⁶ t	190,6	187,0	196,0
	Consumo	t per capita	1,1	1,1	1,11
	Preço ⁽¹⁾	US\$/t	2,15	2,12	3,90
Pedra britada	Produção	10 ⁶ t	129,8	128,7	135,0
	Consumo	t per capita	0,7	0,7	0,8
	Preço ⁽²⁾	US\$/t	3,80	3,75	4,25

Fonte: Anepac/DNPM.

Notas: ⁽¹⁾ Preço médio líquido FOB-mina para o mercado da Região Metropolitana de São Paulo; ⁽²⁾ Preço médio líquido FOB-mina no mercado da Região Metropolitana de São Paulo; [®] revisado; ^(p) previsto.

Os agregados têm fundamental importância na composição de um concreto, em relação à ligação pasta-agregado, que depende basicamente da forma, da textura superficial e da natureza química e física dos agregados. Na Tabela 3-9, modificado por Buest Neto

(2006)¹¹ com base em Sbrighi Neto (2003), algumas características dos agregados estão relacionadas às principais propriedades do concreto.

Tabela 3-9 - Propriedades do Concreto X Características do Agregado.

Propriedades do Concreto	Características do Agregado									
	Resistência Mecânica	Textura Superficial	Limpeza	Forma de Grãos	Dimensão Máxima	Módulo de Elasticidade	Massa específica	Granulometria	Beneficiamento Requerido	Disponibilidade
Resistência Mecânica	x	x	x	x	x					
Retração		x	x	x	x	x				
Massa Unitária				x	x		x	x		
Economia				x	x			x	x	x

Fonte: Buest Neto (2006)¹¹.

✓ Agregado Miúdo

A NBR 7211 (2005)¹² define agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, podendo também ser uma mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira 4,75mm, e ficam retidos na peneira 0,075mm.

A forma e a textura superficial das partículas de areia têm grande influência na plasticidade do concreto. Quantidades excessivas de areia aumentam demasiadamente a coesão da mistura e dificultam o lançamento e adensamento do concreto, além de aumentarem o consumo de cimento.

Os principais locais de produção de areia são várzeas e leitos de rios, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos. No Brasil, 70% da areia são produzidas em leito de rios e 30% nas várzeas.

A qualidade do concreto está diretamente ligada à qualidade dos agregados, merecendo especial atenção os agregados miúdos, que sofrem com a escassez de reservas localizadas próximas dos grandes centros consumidores (BUEST NETO, 2006)¹¹.

Materiais substitutivos vêm sendo ofertados em algumas regiões com aplicações restritas. Em relação à areia natural, há um crescimento da oferta da areia de brita, produto gerado a partir do pó de pedra produzido nas instalações de britagem. Este produto pode ser obtido via úmida ou via seca e, em alguns casos, o próprio pó de pedra já possui a curva granulométrica da areia natural (BRASIL, 2006)¹³.

✓ Agregado Graúdo

Na definição da NBR 7211 (2005) ¹² Agregado para concreto – Especificação, o agregado graúdo é o pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, cujos grãos passam pela peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152mm e ficam retidos na peneira 4,75mm, que apresentam as características exigíveis para a recepção e produção de agregados graúdos de origem natural.

Quanto à forma dos agregados graúdos, aqueles grãos arredondados e de textura superficial lisa, como os seixos rolados, favorecem a plasticidade do concreto, exigindo menos água de amassamento, embora a ligação pasta-agregado no estado endurecido seja prejudicada. Já os agregados provenientes de britagem, que possuem forma cúbica e textura superficial rugosa, apresentam maior área específica e requerem maior quantidade de água de amassamento. As arestas vivas destes grãos provocam maior atrito entre eles, aumentando o consumo de água e cimento da mistura.

Agregados com maiores dimensões máximas características requerem menor teor de areia para determinada plasticidade, conseqüentemente com menor consumo de água.

Concretos contendo quantidades excessivas de agregados graúdos resultam em massas de concreto fresco com baixa coesão e mobilidade, exigindo grande esforço no seu lançamento e adensamento (ARAUJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000) ¹⁸.

3.3.1.3 - Água

A qualidade da água deve ser considerada, embora o cuidado maior deva ser em relação à quantidade de água empregada.

Impurezas presentes na água podem prejudicar a pega do cimento ou a resistência do concreto; os limites máximos são apresentados na Tabela 3-10. Em geral, a água potável é considerada adequada à produção do concreto, desde que isenta de açúcar e nitratos. A utilização de água agressiva no amassamento do concreto deve ser abolida, pois os efeitos na pega do cimento, na resistência do concreto e na corrosão das armaduras são prejudiciais.

Tabela 3-10 - Qualidade da água para a produção de concreto.

Requisitos	Especificação
pH	5,8 a 8,0
Matéria orgânica (expresso em oxigênio consumido)	3 mg/l
Resíduos sólidos	5000 mg/l
Sulfatos (p.p.m.)	≤ 2000
Cloretos (p.p.m.)	≤ 5000
Açúcar	5 mg/l

Fonte: Leonardo (2002)¹⁹.

Os limites máximos acima incluem as substâncias trazidas ao concreto pelos agregados.

No caso de não ser atendido qualquer dos limites, a água só poderá ser utilizada se obedecer a recomendações e limites decorrentes de estudos prévios em laboratório nacional idôneo.

3.3.1.4 - Aditivos

Aditivos para concretos são produtos químicos adicionados à matriz de concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento, na fase de preparo, imediatamente antes ou durante o amassamento, com objetivos definidos:

- Aumento da compacidade;
- Acréscimo de resistência aos esforços mecânicos;
- Melhoria da trabalhabilidade;
- Diminuição da higroscopicidade;
- Melhoria da impermeabilidade;
- Diminuição da retração;
- Aumento da durabilidade;
- Possibilidade de retirada dos cimbres e fôrmas em curto prazo;
- Diminuição do calor de hidratação;
- Retardamento ou aceleração da pega.

As vantagens e desvantagens na aplicação dos diversos tipos de aditivos na matriz de concreto e seus efeitos são relacionadas na Tabela 3-11.

Tabela 3-11 - Vantagens e desvantagens da aplicação de aditivos em concretos.

Efeitos	Usos/Vantagens	Desvantagens	Efeitos na Mistura
Plastificantes (P)			
- Aumenta o índice de consistência. - Possibilita redução de no mínimo 6% da água de amassamento.	- Maior trabalhabilidade para determinada resistência. - Maior resistência para determinada trabalhabilidade. - Menor consumo de cimento para determinada resistência e trabalhabilidade.	- Retardamento do início de pega para dosagens elevadas do aditivo. - Riscos de Segregação. - Enrijecimento prematuro em determinadas condições.	- Efeitos significativos da mistura nos três casos (usos) citados.
Retardadores (R)			
- Aumenta o tempo de início de pega.	- Mantém a trabalhabilidade em temperaturas elevadas - Retarda a elevação do calor de hidratação - Amplia os tempos de aplicação.	- Pode promover exsudação. - Pode aumentar a retração plástica do concreto.	- Retardamento do tempo de pega.
Aceleradores (A)			
- Pega mais rápida. - Resistência inicial mais elevada.	- Concreto projetado. - Ganho de resistência em baixas temperaturas. - Redução do tempo de desforma. - Reparos.	- Possível fissuração devido ao calor de hidratação. - Risco de corrosão de armaduras (cloretos).	- Acelera o tempo de pega e a resistência inicial.
Plastificantes e Retardadores (PR)			
- Efeito combinado de (P) e (R).	- Em climas quentes diminui a perda de consistência.		- Efeitos iniciais significativos. - Reduz a perda de consistência.
Plastificantes e Aceleradores (PA)			
- Efeito combinado de (P) e (A).	- Reduz a água e permite ganho mais rápido de resistência.	- Riscos de corrosão da armadura (cloretos).	- Efeitos iniciais significativos. - Reduz os tempos de início e fim de pega.

Efeitos	Usos/Vantagens	Desvantagens	Efeitos na Mistura
Super-plastificantes (SP)			
- Elevado aumento do índice de consistência. - Possibilita redução de no mínimo 12% da água de amassamento.	- Tanto como eficiente redutor de água como na execução de concretos fluidos (auto-adensáveis).	- Riscos de segregação da mistura. - Duração do efeito fluidificante. - Pode elevar a perda de consistência.	- Efeitos iniciais significativos.
Incorporadores de ar (IAR)			
- Incorpora pequenas bolhas de ar no concreto	- Aumenta a durabilidade ao congelamento do concreto sem elevar o consumo de cimento e o conseqüente aumento do calor de hidratação. - Reduz o teor de água e a permeabilidade do concreto. - Bom desempenho em concretos de baixo consumo de cimento.	- Necessita controle cuidadoso da porcentagem de ar incorporado e do tempo de mistura. - O aumento da trabalhabilidade pode ser inaceitável.	-Efeitos significativos.

Fonte: ABESC (2006)²⁰.

3.3.1.5 - Adições minerais

De acordo com Silveira citado por Silva (2004)²¹, adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas e/ou cimentíceas, acrescentadas ao concreto, antes ou durante a mistura, em quantidades que variam geralmente entre 5% e 100% do peso do cimento, em substituição de parte do cimento, visando à redução de custo, ou, como adição em percentuais variáveis em relação à massa do cimento.

Com aplicação das adições minerais de forma adequada, conseguem-se benefícios ao concreto fresco, que são repassados para o concreto endurecido, tais como:

- Aumento da coesão e à diminuição da segregação e da exsudação;
- Aumento de resistências à compressão, tração e abrasão;
- Redução da retração e da porosidade, com diminuição da permeabilidade e aumento da durabilidade;
- Aumento da resistência às reações álcali-agregado e contra o ataque por sulfatos.

Metha e Monteiro (1994) ¹⁶ constataram que quanto mais fino o aditivo mineral, menor é a quantidade de água necessária para aumentar a coesão e a trabalhabilidade de um concreto recém misturado.

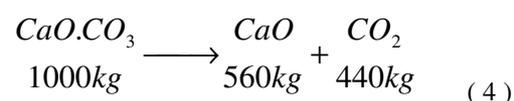
Dodson (1990) ²² relata que existem quatro tipos de aditivos e/ou adições, quando consideradas as suas ações dentro dos compósitos à base de cimento Portland:

- Aqueles que dispersam melhor as partículas de cimento;
- Os que modificam a cinética da hidratação;
- Os que reagem com um dos subprodutos das reações de hidratação, e
- Aqueles que possuem apenas uma ação física.

Os principais aditivos são as pozolanas, cinzas volantes, argilas calcinadas, diatomitos, rochas vulcânicas e a sílica ativa, que promovem a diluição do aluminato tricálcico (C₃A), componente do clínquer que é o principal responsável pelo calor de hidratação, e combinam com a cal gerada pela hidratação do cimento, diminuindo a permeabilidade do concreto e aumentando sua resistência aos ataques químicos.

A definição de pozolanas para a NBR 12653 Materiais pozolânicos (1992) ²³ considera o material que por si só possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

A produção do clínquer implica na calcinação de calcário, que libera grande quantidade de CO₂, responsável pelo efeito estufa, conforme a reação mostrada na Equação 4 abaixo de descarbonatação das matérias-primas calcáreas durante a produção do clínquer.



Portanto a substituição do cimento por qualquer outro material colabora para a diminuição da emissão de CO₂, contribuindo para a redução do aquecimento global.

A incorporação de resíduos como adição ou substituição em concretos não é nova. Muitos materiais são adicionados ao concreto, desde remotas eras, com o objetivo de

melhorar as características mecânicas, como é o caso já consagrado das misturas de diversos materiais. Mas, as incorporações também se aproveitam do concreto como agente receptor, devido a sua grande capacidade de incorporação, proporcionando uma destinação aos resíduos não inertes, medida de alto interesse ambiental conforme já visto no capítulo anterior.

3.3.2 - Propriedades dos concretos

O concreto é um compósito constituído de diversos materiais de diferentes morfologias, características mecânicas e físico-químicas variadas. Obviamente as partes, cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, água e aditivos diversos, representam papéis diferentes no comportamento do concreto fresco, durante a pega e na fase de endurecimento do material.

3.3.2.1 - Concreto fresco

As principais características de um concreto fresco são a trabalhabilidade e consistência. O concreto fresco é assim considerado até o momento em que tem início a pega do aglomerante. A qualidade final de uma estrutura de concreto depende tanto do controle de suas propriedades no estado fresco, como no seu estado endurecido.

Pega é a perda de fluidez da pasta. Com a hidratação, começa a formação dos compostos, que fazem com que a pasta perca sua fluidez, até que deixe de ser deformável para pequenas cargas e se torne rígida.

Início de pega de um aglomerante hidráulico é o período inicial de solidificação da pasta. É contado a partir do lançamento da água no aglomerante, até o início das reações químicas com os compostos do aglomerante. Esse fenômeno é caracterizado pelo aumento brusco da viscosidade e pela elevação da temperatura da pasta.

Fim de pega de um aglomerante hidráulico é quando a pasta se solidifica completamente, não significando, entretanto, que ela tenha adquirido toda sua resistência.

O controle tecnológico não deve se restringir aos ensaios de resistência à compressão simples (concreto endurecido), Aïtcin (2000) ²⁴ sugere que um concreto cujas características no estado fresco são bem controladas, provavelmente, se apresentará bem depois de endurecido.

✓ **Trabalhabilidade**

A Trabalhabilidade é uma propriedade do concreto recém misturado que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado.

A composição da pasta, argamassa e agregados devem ter uma proporção correta em função da trabalhabilidade desejada.

A obtenção de um concreto com trabalhabilidade adequada não depende unicamente da quantidade de água utilizada. A trabalhabilidade depende de uma adequada proporção dos materiais e/ou de adições minerais e aditivos químicos. O simples aumento de água pode levar à exsudação, à segregação, ou simplesmente, a um aumento do abatimento.

Dentre os diversos ensaios o que melhor determina a trabalhabilidade de um concreto é o abatimento do Tronco de Cone normalizado pela ABNT NBR NM 67 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (1998) ²⁵.

Neville (1997) ²⁶ relacionou os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone com a trabalhabilidade conforme a Tabela 3-12.

Tabela 3-12 - Relação entre Trabalhabilidade e Abatimento do tronco de cone.

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	3 a 10
Baixa	10 a 30
Média	30 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Fonte: (NEVILLE, 1997) ²⁶.

✓ **Consistência**

Consistência é o maior ou menor grau de fluidez da mistura fresca, relacionando-se com a mobilidade da massa. O principal fator que influi na consistência é o teor água/materiais secos.

Em função de sua consistência, o concreto é classificado em:

- Seco ou úmido - quando a relação água/materiais secos é baixa, entre 6 e 8%;
- Plástico - quando a relação água/materiais secos é maior que 8 e menor que 11%;
- Fluido - quando a relação água/materiais secos é alta, entre 11 e 14%.

A consistência, assim como a trabalhabilidade, envolve considerações quanto à natureza da própria obra que está sendo executada. Os índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento foram resumidos e estão apresentados na Tabela 3-13.

Tabela 3-13 - Relação entre Consistências do concreto e Tipos de obras.

CONSISTÊNCIA	ABATIMENTO (mm)	TIPO DE OBRA
Extremamente seca	0	Pré-fabricação. Condições especiais de adensamento
Muito seca	0	Grandes massas: pavimentação Vibração muito enérgica
Seca	0 a 20	Estruturas de concreto armado ou protendido Vibração enérgica
Rija	20 a 50	Estruturas correntes. Vibração normal
Plástica (média)	50 a 120	Estruturas correntes Adensamento manual
Úmida	120 a 200	Estruturas correntes sem grandes responsabilidades Adensamento manual
Fluída	200 a 250	Concreto inadequado para qualquer uso

Fonte: Modificado de Materiais de Construções, Araújo, Rodrigues e Freitas (2000) ¹⁸.

Um concreto de consistência plástica pode oferecer, segundo o grau de sua mobilidade, maior ou menor facilidade para ser moldado e deslizar entre as armaduras, sem que ocorra separação de seus componentes.

3.3.2.2 - Concreto endurecido

As principais propriedades mecânicas do concreto endurecido são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios executados em condições específicas (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004)²⁷.

Pode-se considerar a resistência de um concreto como função da resistência da pasta de cimento endurecida, do agregado e da ligação pasta-agregado, dependendo fundamentalmente do fator água/cimento. Quanto menor for este fator, maior será a resistência do concreto, observando-se um mínimo que lhe garanta a trabalhabilidade necessária.

✓ Resistência à compressão

A resistência à compressão é a característica dos concretos mais significativa para a engenharia de estruturas, ainda que em muitos casos práticos, outras características como durabilidade e permeabilidade sejam de fato as mais importantes quando se quer prever a vida útil de uma estrutura inserida em determinado meio ambiente, assegura Neville citado por Levy (2001)²⁸.

Levy (2001)²⁸ acrescenta que a resistência à compressão, a qual indiretamente pode ser utilizada como parâmetro para avaliação da durabilidade de um concreto, é uma grandeza largamente conhecida pelo meio técnico, e universalmente aceita como parâmetro para avaliação da qualidade, sendo seu controle facilmente executável por um laboratório devidamente equipado para tal finalidade.

Os fatores principais que afetam a resistência à compressão do concreto são a resistência da pasta, e o fator água/cimento responsável por apresentar uma influência acentuada na porosidade da mistura.

Sua especificação é de primordial importância tanto para o dimensionamento da estrutura como para a dosagem do material.

A avaliação da resistência à compressão é feita por meio de ensaio de compressão uniaxial sobre corpos-de-prova cilíndrico com dimensões de 15cm de diâmetro por 30cm de altura ou 10cm de diâmetro por 20cm de altura, preparados segundo recomendação da ABNT

NBR-5738 Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova (2003) ²⁹, e rompidos adotando a metodologia da ABNT NBR-5739 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (1994) ³⁰.

A finalidade principal de um ensaio à compressão é o resultado da resistência alcançada na idade de 28 dias, imprescindível para se obter a resistência característica do concreto - f_{ck} . A informação sobre o progresso das resistências à compressão versus idades também são desejadas. De acordo com as necessidades, são também desenvolvidas expressões que correlacionam os resultados à compressão com outras propriedades do concreto, como módulo de elasticidade e a resistência à tração.

✓ Módulo de Elasticidade

Aspecto fundamental no projeto de estruturas de concreto o módulo de elasticidade consiste na relação entre o incremento de tensões e o incremento das deformações.

Por meio dos estudos de Resistência dos Materiais, a relação entre a tensão e a deformação para determinados intervalos se mantém praticamente linear. Essa relação estabelece a Lei de Hooke, conforme a Equação 5:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (5)$$

Sendo:

σ Tensão;

ε Deformação específica, e

E Módulo de Elasticidade Axial.

Quanto mais rígido for um material, maior o seu Módulo de Elasticidade. A Tabela 3-14 apresenta valores do módulo de Elasticidade de alguns materiais comumente utilizados.

Tabela 3-14 - Relação entre Materiais e Módulo de elasticidade.

MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)
Concreto	15 – 40
Aço	210
Alumínio	70
Fibras de carbono	200 – 450
Borracha	0,001 – 0,02

Fonte: Taylor G.D. (1991) ³¹

Para o concreto a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem.

O módulo de elasticidade de um concreto sofre variações, principalmente em função dos seguintes fatores (LEONARDO, 2002) ¹⁹:

- Tipo e consumo do aglomerante;
- Consistência do concreto fresco;
- Volume de pasta por metro cúbico de concreto;
- Idade do concreto;
- Tipo e quantidade do agregado;
- Porcentagem de ar incorporado;
- Dimensão e umidade dos corpos-de-prova no momento do ensaio;
- Resistência à compressão;
- Temperatura de ensaio;
- Relação água/cimento; e
- Velocidade de aplicação da carga ou deformação.

Em resumo, o módulo de elasticidade depende das características da pasta e dos agregados, características da zona da interface pasta-agregados, idade do concreto dentre outras.

O módulo de deformação longitudinal do concreto depende de diversos fatores, sendo a resistência à compressão apenas um deles. As propriedades elásticas dos agregados, por exemplo, têm uma grande influência sobre o módulo de deformação do concreto e são consideradas na formulação do CEB/90 (ARAÚJO, 2000) ³².

O módulo tangente pode ser obtido através da equação 6:

$$E_c = 21500 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}, MPa \quad (6)$$

Onde:

$f_{cm} = f_{ck} + 8MPa$, é a resistência média à compressão, estimada a partir da resistência característica.

O módulo de elasticidade secante é dado pela equação 7:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} \quad (7)$$

A ABNT através da NBR 8522 Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação (2003) ³³ prescreve o método para determinação dos módulos de deformação longitudinal, tangente e secante, e diagramas tensão-deformação do concreto, sob carregamento estático, à compressão axial simples, em corpos-de-prova moldados ou extraídos de forma cilíndrica, resumido segundo HELENE (1998) ³⁴:

O módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também é conhecido como módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial. No ensaio correspondente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0,5 MPa e $0,3 \cdot f_c$ indica-se o módulo de deformação por E_{ci} , expresso em GPa.

A Equação 8 mostra a fórmula utilizada no cálculo do módulo de elasticidade inicial.

$$E_{ci} = \frac{(\sigma_n - \sigma_{0,5})}{(\epsilon_n - \epsilon_{0,5})} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

σ_n tensão maior, em megapascals ($\sigma_n = 0.3.f_c$);

$\sigma_{0,5}$ tensão básica, em megapascals ($\sigma_{0,5} = 0,5MPa$);

ε_n deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão σ_n ,

$\varepsilon_{0,5}$ deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão $\sigma_{0,5}$;

Para o módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c , geralmente trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 e $0,4.f_c$, que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a $0,4.f_c$, pois esta é normalmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Indica-se o módulo de elasticidade secante por E_{cs} , expresso em GPa.

A ABNT por meio da NBR 6118 Projetos em estruturas de concreto (2003) ³⁵ destaca que o atendimento ao valor do módulo de elasticidade é fundamental para a garantia do respeito aos limites de deformação e fissuração previstos no cálculo. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados precisos sobre o concreto, pode-se estimar o valor. O item 8 “Propriedades dos Materiais” da norma citada acima determina que o módulo de elasticidade deva ser estimado pela Equação 9, sendo o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% de f_c ou outra tensão especificada do projeto:

$$E_{ci} = 5600 \times f_{ck}^{1/2} \quad (9)$$

Onde:

f_{ck} é a Resistência característica do concreto à compressão em megapascal.

Ainda segundo o item 8 da NBR 6118 (2003) ³⁵, o módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela equação 10:

$$E_{cs} = 0,85.E_{ci} \quad (10)$$

A grandeza módulo de elasticidade foi ignorada pelos engenheiros de obras por muito tempo. Pensava-se que bastava a resistência à compressão atingir um determinado valor para promover a desforma da peça. O módulo de elasticidade não cresce como a resistência à

compressão, desenvolve-se mais lentamente. Se o escoramento de peças, que trabalham na flexão como uma laje ou uma viga, dependendo do vão, que é a distância entre os apoios, for retirado antes do módulo de elasticidade ter atingido o valor de cálculo, a flecha apresentada pode ser maior que a esperada. Buest Neto (2006) ¹¹ citando Beer e Johnston (1995) ressalta a importância para a análise das deformações ocorridas em estruturas de concreto, sendo que os elementos estruturais devem ser projetados de modo a sofrer apenas pequenas deformações.

✓ Resistência à tração na flexão

A resistência à tração é uma propriedade associada com a capacidade que o concreto tem em resistir a esforços mecânicos de tração, provocando um alongamento na direção da força aplicada.

Há três ensaios normalizados: resistência à tração direta, resistência à compressão diametral e resistência à tração na flexão.

- Ensaio de resistência à tração direta

Ensaio considerado como de referência. A resistência à tração direta, f_{ct} , é determinada aplicando-se tração axial, em corpos de prova de concreto simples, com seção central retangular, medindo 9cm por 15cm, e extremidades quadradas, com 15cm de lado, até a ruptura.

- Ensaio de tração na compressão diametral “splitting test”.

O ensaio de tração na compressão diametral conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943. Para a realização do ensaio, um corpo-de-prova cilíndrico de 15cm de diâmetro por 30cm de altura é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa, sendo aplicada uma força até a sua ruptura, por fendilhamento, em tração indireta. O ensaio segue a NBR 7222 (1993) Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos ³⁶, a resistência à tração por compressão diametral é calculada pela equação 11:

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{b.d.L} \quad (11)$$

Onde:

$f_{t,D}$ resistência à tração por compressão diametral em megapascals.

F carga máxima obtida no ensaio (kN)

b dimensão do apoio $(0,15 \pm 0,01) \cdot d$ (mm)

d diâmetro do corpo-de-prova (mm)

L altura do corpo-de-prova (mm)

O valor da resistência à tração por compressão diametral, $f_{t,D}$, encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta.

- Ensaio de tração na flexão

A realização deste ensaio requer um corpo-de-prova de seção prismática 15cm de base por 15cm de altura por 50cm de comprimento, submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até a ruptura. O ensaio é também conhecido por “carregamento nos terços”, pois as seções carregadas se encontrarem nos terços do vão.

A NBR 12142 (1991) Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos prescreve o método para determinar a resistência à tração na flexão.

A promoção da aplicação de carga controlada sobre o corpo-de-prova deve ser feita com um dispositivo de flexão que assegure a aplicação de carga ao corpo-de-prova perpendicularmente às suas faces, superior e inferior, sem excentricidade. Caso a ruptura ocorra no terço médio da distância ente os elementos de apoio, a resistência à tração na flexão é calculada pela equação 12:

$$f_{ctM} = \frac{p.l}{b.d^2} \quad (12)$$

Onde:

f_{ctM} resistência à tração na flexão, em megapascals

p carga máxima aplicada, em Newtons

l distância entre cutelos de suporte, em milímetros

b largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em milímetros

d altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em milímetros

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a distância deste não superior a 5% da distância entre os cutelos do suporte, a resistência à tração na flexão deve ser calculada pela equação (13):

$$f_{ctM} = \frac{3 \cdot p \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (13)$$

Onde a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, obtida com aproximação de 1mm, mediante a tomada de, pelo menos, três medidas ($a \geq 0,283 \cdot l$).

Caso a ruptura ocorra além dos 5% citados, o ensaio não tem validade.

A Tabela 3-15 mostra os valores de referência para resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à tração direta.

Tabela 3-15 - Relação entre as Resistências à compressão, Tração na flexão e Tração direta (MPa).

Resistência à Compressão	Resistência de Tração na Flexão	Resistência de Tração Direta
11	1,6	0,8
14	2,6	1,4
21	3,3	1,9
28	4,0	2,3
34	4,7	2,8
41	5,3	3,2
48	5,9	3,6
55	6,4	4,0
62	7,0	4,3

Fonte: Durante (2000) ³⁷

3.3.2.3 - Deformações do Concreto

- Segregação

Segregação é a separação dos grãos do agregado da pasta de cimento. Pode ocorrer durante o transporte, durante o lançamento, durante o adensamento, ou pela ação da gravidade, quando os grãos graúdos, mais pesados que os demais tendam a alojar no fundo das formas.

Segregação é a perda de uniformidade da distribuição dos componentes do concreto fresco. As diferenças nas massas específicas e nos tamanhos das partículas dos materiais constituintes do concreto são as causas primárias da segregação.

Para uma trabalhabilidade e consistência adequadas, o concreto na desforma não deve conter vazios ou preenchimento com material segregado.

- Exsudação

Exsudação é o fenômeno que ocorre em certos concretos quando a água se separa da massa e sobe à superfície da peça concretada. Ocorre quando a parte superior do concreto se torna excessivamente úmida; sua consequência é um concreto poroso e menos resistente (ARAUJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000) ¹⁸.

Para minorar a exsudação é necessário alterar a dosagem do concreto, aumentando-se a proporção de finos e o teor do cimento. A exsudação pode ser controlada pela adequada confecção de um concreto trabalhável, evitando-se o emprego de água além do limite necessário.

Segundo Neville (1997) ²⁶, a exsudação é uma forma de segregação, caracterizada pela separação da água do concreto, em que parte da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém aplicado. O seu resultado é proveniente da incapacidade dos constituintes sólidos da mistura reter a água presente, sendo ela o componente de menor massa específica.

3.3.3 - Incorporações usuais nos concretos

Além dos aditivos químicos, que são produtos introduzidos no concreto em busca de efeitos vantajosos, como visto no item 3.3.1.4 - , e as adições minerais responsáveis por acentuar certas propriedades, item 3.3.1.5 - ou mesmo diminuir o custo dos concretos, as incorporações são admitidas com objetivo preliminar de encapsular, envelopar ou, como o próprio nome sugere, incorporar um novo material, geralmente com a finalidade de proporcionar o aproveitamento de resíduos industriais.

3.3.3.1 - Sílica ativa

A sílica ativa, que é um subproduto da fabricação do silício metálico, é usada em adição com o objetivo de melhorar as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido, especialmente em concretos com baixa relação água/aglomerante (AİTCIN, 2000) ²⁴.

Almeida (1996) ⁴¹ define a sílica ativa como um subproduto da indústria do ferrossilício, material altamente poluente, com características de elevada finura e grande leveza.

As partículas são obtidas a partir da condensação do gás residual da redução da sílica, de forma esférica e dimensões microscópicas, o diâmetro médio das partículas primárias é de 0,10µm a 0,15µm, equivalente às partículas sólidas da fumaça de um cigarro. A sílica ativa possui uma área específica extremamente elevada, da ordem de 20.000 m²/kg, aproximadamente, cem vezes maior que a do cimento com composição entre 85% a 98% de dióxido de silício (SiO₂) amorfo (AİTCIN, 2000) ²⁴.

A adição de sílica ativa é normalizada segundo a ABNT NBR 13956 Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação (1997) ⁴².

Grande (2003) ⁴³ destaca que a sílica ativa possui duas formas de atuação na matriz de cimento:

- “Física, como filler (ou de preenchimento de vazios); essa ação ocorre por conta da elevada área específica, ocupando espaços disponíveis entre grãos de cimento. Esse efeito colabora para aumentar a coesão e a compacidade da pasta e diminuir a zona de interface agregado-pasta.”; e
- “Química, promovendo a clássica reação pozolânica que se dá pela transformação do frágil hidróxido de cálcio CH em silicato de cálcio hidratado C-S-H, produto muito resistente e responsável pela aderência. Um importante detalhe é que o C-S-H produzido pelo efeito pozolânico é de melhor qualidade que aquele produzido pela simples hidratação do cimento Portland”.

Grande (2003) ⁴³, citando Goldman & Bentur apud Liborio, acredita que o efeito microfiller de qualquer pó muito fino resulta em benefícios ao concreto, por conta do preenchimento de vazios e do melhor empacotamento entre as partículas, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como pontos de nucleação de produtos da hidratação do cimento.

O efeito microfiller também é o responsável pelo aumento da fluidez em concretos com baixa relação água/aglomerante baixa (AİTCIN, 2000) ²⁴.

A pasta de cimento com sílica ativa torna o concreto menos susceptível às reações álcali-agregado, pois reage antes com os álcalis presentes na pasta de cimento (K_2O e Na_2O) do que os constituintes silicosos reativos dos agregados (MEHTA e MONTEIRO, 1994) ¹⁶.

Com a substituição simples de uma parte do cimento de um concreto por uma fração de sílica ativa, mantendo-se a relação água/aglomerante, obtém-se um ganho acentuado na resistência à compressão.

A adição de sílica ativa melhora outras características do concreto, como a menor porosidade e a elevada aderência da pasta de cimento e o aumento do módulo de elasticidade do concreto, segundo Shrp (1996) citado por Freitas Júnior (2005) ⁴⁴.

3.3.3.2 - Cinza volante

Cinza volante ou cinza gerada através da precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão durante a combustão do carvão pulverizado. Segundo Aïtcin (2000) ²⁴, existem diversos tipos de cinzas volantes, no entanto a ASTM as classifica em duas categorias relacionadas à composição química, cinza de baixo teor de cálcio - Classe F e cinza com alto teor de cálcio - Classe C.

Assim como a sílica ativa, a utilização da cinza volante na produção do concreto é justificada pela ação pozolânica, porém, com efeitos menores. O efeito pozolânico gera aumento da resistência do concreto em idades mais avançadas.

3.3.3.3 - Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é um subproduto da fabricação de ferro-gusa em equipamentos chamados alto-fornos.

Para Raeder Filho (2005) ⁴⁵ destacando os estudos de Mehta e Monteiro (1994), a escória de alto-forno possui um caráter mineralógico e reatividade semelhante à cinza volante com alto teor de cálcio. Quando comparada à cinza volante de baixo teor de cálcio, que normalmente não apresenta contribuição para a resistência até cerca de quatro semanas de hidratação, a contribuição da escória de alto-forno e da cinza volante de alto teor de cálcio é notada já aos 7 dias de hidratação.

Bourguignon (2004) ⁴⁶, citando Battagin e Esper (1998), relata que além da boa resistência a sulfatos e cloretos, as misturas com escória de alto forno minimizam a reação álcali-sílica.

De acordo com John (1995) ⁴⁷ citando Brodersen apud Smolczyk (1980), outro aspecto importante que dá relevância à adição de escória de alto-forno no cimento é o ambiental. A adição de 65% de escória reduz a energia gasta na produção do cimento de 3,53G J/t para 1,67G J/t, incluindo a energia para secagem e moagem da escória.

Quando as pozolanas são utilizadas em substituição ao cimento Portland, contribuem para a diminuição da emissão de CO₂, reduzindo o aquecimento global. Nita (2006) ⁴⁸, citando Gartner (2004), demonstra que para a produção de 1,7x10⁹t de cimento no

ano de 1994, a quantidade de CO₂ liberada foi de aproximadamente 1,126Gt, sendo 0,587Gt originado da calcinação das matérias primas e 0,539Gt da queima de combustíveis fósseis.

Além do ganho de resistência e do ganho ambiental pode haver também o ganho econômico. Por exemplo, no caso da introdução de escória, Bourguignon (2004)⁴⁶, citando Aldasoro (1985) e John (1995), afirma que o processamento da tonelada de escória consome menos de 20% de energia do que o processamento de uma tonelada de cimento Portland.

3.3.3.4 - Fibras

As fibras são materiais muito empregados para o reforço de concreto. Existe uma grande variedade de fibras para utilização em matrizes de concreto: fibras de metal, como as de aço-carbono e aço inox; fibras de silicatos cristalinos, como o amianto; fibras de vidro; fibras de carbono; fibras de polímero, como o polipropileno; e o polietileno e fibras de vegetal natural, como sisal, cânhamo, juta, coco, bambu, banana e madeira; além da resina poliéster reforçada com fibra de vidro, dentre outras.

Os resíduos chamados de fibras de borracha podem atuar como obstáculos no desenvolvimento de fissuras, quando interceptam as microfissuras que surgem durante o endurecimento do concreto, impedindo sua progressão. O concreto reforçado com resíduos é definido como sendo uma substância composta contendo fibras distribuídas aleatoriamente, ou de forma orientada e alinhada (PINHEIRO e ACCETTI, 2000)⁴⁹.

Nos compósitos de fibra/cimento, a fibra é misturada junto à matriz, diminuindo o custo de trabalho. Para Zattera, Carvalho e Freire (2000)⁵⁰, o problema consiste na descontinuidade da fibra na matriz, gerando variação na resistência do material e também baixa eficiência mecânica, quando comparada com os compósitos ferro/cimento.

O emprego dos resíduos de laminados de fibra de vidro, como reforço das pastas de cimento na indústria da construção civil, se deu segundo Majumdar e Ryder (1986)⁵¹, pelo favorecimento ao conjunto de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e ao fogo e leveza. Entretanto, foi observado que devido ao ataque químico pelos álcalis do cimento, as fibras de vidro sofrem uma degradação das suas propriedades.

Segundo Majumdar e Nurse (1974)⁵², a matriz de concreto reforçada com fibra tem sua resistência reduzida com o envelhecimento, devido às reações corrosivas entre a

superfície e a matriz. Este fato foi determinante para o desenvolvimento de fibras de vidro resistente aos álcalis – AR.

Mesmo com a maior resistência dessas fibras ao ataque alcalino, comparadas com as fibras não tratadas, com o envelhecimento, os compósitos contendo fibras reduziram sua tenacidade e resistência ao impacto a condições preocupantes. Laguna, Palomares e Amaráz (1978) ⁵³ destacam, citando Paradela, que o uso de aditivos conseguiu minimizar o ataque químico do cimento nas fibras.

Laguna, Palomares e Almaraz (1978) ⁵³ relatam que a adição de fibra em compósitos de cimento produz uma melhora no desempenho das argamassas e concretos, conferindo ganhos nas resistências mecânicas, diminuição de custos e também utilização de materiais disponíveis no mercado.

De acordo com a ABNT NBR 5735 – Cimento Portland de alto-forno ⁵⁴, o cimento CPIII tem entre 35 a 70% de escória granulada de alto forno em substituição ao clínquer. Para Peruzzi (2002) ⁵⁵, esta grande quantidade de escória adicionada faz com que a Portlandita produzida seja menor, tornando o cimento CPIII o mais favorável a ser utilizado quando incorporada à fibra de vidro, sob o ponto de vista do ataque alcalino à mesma, pois a escória finamente moída minimiza a quantidade de Ca(OH)_2 presente na matriz.

Para Peruzzi (2002) ⁵⁵, citando Purnell et al. (2000), é possível contornar a degradação das fibras de vidro através da melhora da resistência das fibras, por meio de fibras de vidro AR ou do preparo de sua superfície para resistir ao ataque. Pode-se também realizar modificação das matrizes de cimento com a utilização de cimentos de baixa alcalinidade, como o cimento de alto-forno (CPIII), ou através da adição de sílica ativa, cinza volante, metacaulinita e outros materiais, que têm por objetivo reduzir o pH da solução dos poros e/ou diminuir ou eliminar a formação de hidróxido de cálcio.

Para Peruzzi (2002) ⁵⁵ a adição de qualquer tipo de fibra à argamassa ou ao concreto convencional reduz a sua trabalhabilidade e essa perda é proporcional à concentração volumétrica de fibras. Essa limitação da trabalhabilidade pode ser contornada por meio de uma correta seqüência de preparo da argamassa ou do concreto com adição de aditivos incorporadores de ar, plastificantes e um maior teor de pasta.

Muitos estudos foram realizados para a adição de fibra de vidro em matriz de concreto, um resumo das principais publicações é relacionado na Tabela 3-16.

Tabela 3-16 - Evolução dos estudos – Zona de transição fibra de vidro-matriz.

Década de 60	
KRENCHER (1964) apud AGOPYAN (1991)	Estudo considerado como o início da pesquisa sobre matrizes frágeis reforçadas com fibras, inclusive com resultados experimentais, no emprego de fibras de vidro comum.
Década de 70	
AVESTON et al. (1971) e AVESTON; KELLY (1973)	Apresentaram teoria de funcionamento dos compósitos fibrosos com matrizes frágeis (conhecida como teoria ACK: Aveston, Cooper e Kelly), na qual o fundamento é a transferência de tensões entre matriz e fibras, por meio da interface.
MAJUMDAR; RYDER (1970) e MAJUMDAR (1974).	Apresentaram importantes pesquisas sobre pastas de cimento reforçadas com fibras de vidro com dióxido de zircônio (Cem-FIL), mais resistentes aos álcalis do cimento que as fibras do tipo E. Foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), registrando a evolução dos produtos hidratados ao longo do tempo e o acúmulo de portlandita na superfície das fibras.
MAJUMDAR (final dos anos 70)	As fibras de vidro tiveram novo aprimoramento, além do uso de zircônio, por meio de recobrimento à base de inibidores químicos da família dos fenóis.
COHEN; DIAMOND (1975)	Notaram a presença de filme duplo, constituído de portlandita, seguido de C-S-H, em compósitos de pasta de cimento reforçada com fibras de vidro comum e de vidro resistente a álcalis.
JARAS; LITHERLAND (1975)	Também sobre pasta de cimento reforçada com fibras de vidro comum e de vidro resistente a álcalis, com a constatação de que o acúmulo de portlandita ocorre logo no início da hidratação e que os cristais formados são tanto maiores quanto o espaço disponível para seu crescimento.
HANNANT (1978)	Autor do primeiro livro publicado sobre compósitos fibrosos. Apresentou abordagem sobre a morfologia da interface entre matriz de cimento e fibras de vidro, aço e polipropileno e observou a sua importância sobre o comportamento da aderência.
Década de 80	
LAWS (1982) e LAWS et al. (1986)	Contribuíram para o avanço do modelo ACK, ao apresentarem teorias sobre a evolução da aderência fibra-matriz durante a solitação mecânica. Afirmaram ser de grande importância a modificação da zona de transição para a melhoria do compósito.
BENTUR; DIAMOND (1984)	Apresentaram estudo sobre fibras de vidro resistente a álcalis em feixes de filamentos e constataram o acúmulo de vazios ou de portlandita, com prejuízo para a aderência.
Década de 90.	
MAJUMDAR; LAWS (1991)	Reportam que o recobrimento se dissolve lentamente, em contato com meio alcalino, e isso faz reduzir a interação vidro-matriz. Como resultado, obtém-se sensível aumento da durabilidade dessas fibras, comercialmente denominadas Cem-FIL 2.

Fonte: Evolução dos estudos sobre a zona de transição fibra-matriz. (Modificado de SALVASTANO JÚNIOR, 1992)⁵⁶.

3.3.3.5 - Vidro

López e Azevedo (2003)⁵⁷, citando Shao et al.(2000), relatam a utilização do uso do vidro moído ou sílica fumê e cinzas volantes em substituição ao cimento. Verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro finamente moído, abaixo de 75mm, tinha suas propriedades mecânicas melhoradas, mas apresentava problema gerado pela reação álcali-sílica em consequência da adição do vidro finamente moído. Segundo estes pesquisadores, a reação álcali-sílica acontece, entre outros motivos, quando o vidro com granulometria superior a 300mm é adicionado ao concreto.

Ainda Shao et al. (2000) e Babu & Prakash (1995), citados por López e Azevedo (2003)⁵⁷, reforçam que os efeitos benéficos da adição do vidro em substituição ao cimento foram devido a mecanismos de preenchimento dos vazios entre os grãos do agregado miúdo e ao efeito pozolânico.

3.3.3.6 - Cinza de Casca de Arroz – CCA

Segundo Santos (1997) citado por Silva (2004)²¹, as cinzas, em especial a cinza de casca de arroz, por sua composição, constituição e proporção, quando adicionados em cimentos para argamassa e concreto, podem influenciar no desenvolvimento da resistência, na exigência e retenção de água, na retração, na fissuração e fluência do concreto. Também influem na durabilidade de concretos e argamassas frente ao ataque de agentes químicos, particularmente sobre o aspecto de corrosão das armaduras. No estudo da reatividade do material devem-se considerar os fatores ligados à composição química, física e mineralógica.

3.3.3.7 - Serragem cromada

A serragem cromada é um resíduo gerado na máquina de rebaixar, operação esta utilizada para uniformizar a espessura do couro curtido. Em estudos de Fujikawa (2002)⁵⁸, a utilização do resíduo em tijolos de argila queimados ao forno se mostrou com bons resultados para a resistência à compressão, absorção de água e teve classificação nos estudos de solubilização e lixiviação do cromo total, como não inerte.

3.3.3.8 - Lodo

O uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado, em matriz de concreto de cimento portland, foi estudado por Hoppen et. al. (2006)⁵⁹, sendo que dentre as aplicações

viáveis, é possível citar contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas em concreto, placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, pedestais para apoio de equipamentos, calçadas e pavimentos residenciais, concreto compactado com rolo, dentre outras.

4 - METODOLOGIA

Para a determinação do comportamento mecânico do concreto, foram realizadas duas etapas de ensaios. Na primeira etapa foram observados trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto frente à incorporação do resíduo. Em seguida foram executados os ensaios de resistência à compressão, resistência de tração na flexão e determinação do módulo de elasticidade do concreto.

Para o desenvolvimento das etapas deste trabalho, foi adotada a metodologia descrita a seguir.

4.1 - Aquisição e caracterização dos materiais

Os materiais utilizados no presente trabalho foram o resíduo industrial de lã de vidro moído e natural, agregado miúdo e agregado graúdo, além do aglomerante cimento Portland CP III – 40 RS. A seguir têm-se a descrição desses materiais.

4.1.1 - Resíduo industrial de lã de vidro

O resíduo de lã de vidro usado foi coletado no aterro industrial da empresa geradora na região da Grande Vitória. As imagens do resíduo no aterro industrial, e em sua forma “natural”, podem ser vistas na Figura 4-1 (A) e (B).



(A)



(B)

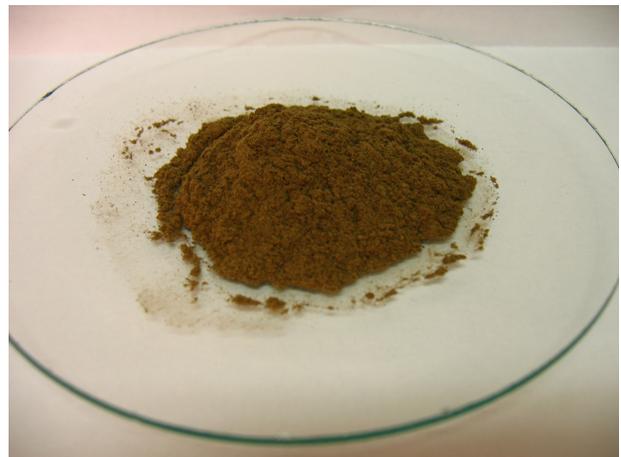
Figura 4-1 - (A) Lã de vidro no aterro industrial, Vitória-ES. (B) Aspecto do resíduo de lã de vidro “natural”.

O material foi submetido a uma moagem em moinho de bolas nas dependências do laboratório de beneficiamento mineral do Departamento de Mineração do Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto M.G. - CEFET-OP. Na Figura 4-2 (A), pode ser

observado o equipamento utilizado para moagem do resíduo, e na Figura 4-2 (B), a aparência do resíduo moído ou pulverizado.



(A)



(B)

Figura 4-2 - (A) Moinho de bolas CODAMIN-CEFET-OP. (B) Aspecto do resíduo de lã de vidro moído.

Na caracterização da microestrutura do resíduo de lã de vidro moída utilizaram-se as técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura - MEV. As imagens fornecidas pelo MEV, equipamento utilizado mostrado na Figura 4-3, foram de uma amostra única de lã de vidro moída, depositada sobre uma fita adesiva e metalizada com uma fina camada de ouro.



Figura 4-3 - Microscópio eletrônico de varredura MEV-DEGEO-UFOP.

As imagens do MEV foram obtidas através de um aparelho de emissão de elétrons secundários e a análise química elementar por meio de um microanalisador EDS.

Foram realizadas determinações quantitativas para o resíduo pela técnica de análise química via úmida, através do ataque por ácido clorídrico, e do uso combinado de ácido

clorídrico e ácido nítrico, agindo como solvente para determinação dos teores dos componentes do resíduo.

4.1.2 - Agregados

Os agregados para o estudo da trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto frente à incorporação do resíduo em matriz de concreto, em diferentes percentagens de incorporação, foram adquiridos na região da Grande Vitória, ES.

Os ensaios para a caracterização dos agregados foram realizados no laboratório de construção civil do Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo (CEFET-ES).

Os agregados foram armazenados em tambores, conforme a imagem da Figura 4-4



Figura 4-4 - Armazenamento dos agregados, ensaios CEFET-ES.

Para o estudo do comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à tração na flexão, em decorrência da incorporação do resíduo na matriz de concreto, foram adquiridos agregados na região da Grande Belo Horizonte, MG.

Os agregados foram caracterizados no laboratório de Engenharia Civil do CEFET-MG. Os corpos de prova foram moldados no CEFET-MG e rompidos nas dependências da indústria HOLCIM em Pedro Leopoldo – MG.

4.1.2.1 - Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para o trabalho experimental foi uma areia classificada como zona ótima, de natureza quartzosa, de depósitos naturais, Figura 4-5.



Figura 4-5 - Agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.

Procedeu-se aos ensaios das areias conforme as normas:

- Classificação granulométrica - ABNT NBR 7211/2005 Agregado para concreto¹²;
- Massa específica - ABNT NBR 9776/2003 Determinação da massa específica de agregados miúdo por meio do frasco de Chapman⁶⁰;
- Teor de materiais pulverulentos - ABNT NBR 7219/2003 Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos⁶¹.

4.1.2.2 - Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no trabalho experimental foi uma rocha britada, de natureza granulítica, Figura 4-6.



Figura 4-6 - Agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.

A caracterização do agregado graúdo foi executada conforme a ABNT NBR NM 248 Agregados – Determinação da composição granulométrica (2003) ⁶². Os limites granulométricos da brita e as dimensões máximas dos agregados foram determinadas pela NBR 7211 Agregado para concreto – Especificação (2005) ¹².

4.1.3 - Aglomerante

O cimento Portland CP III – 40 RS, NBR 5735 Cimento Portland de Alto Forno (1991) ⁵⁴, mostrado na imagem da Figura 4-7, foi o aglomerante escolhido por apresentar vantagens em relação aos outros compostos, conforme visto no item 3.3.1.1 - .



Figura 4-7 - Cimento Portland CPIII 40 RS.

O Cimento Portland Nassau CPIII 40 RS, amplamente consumido na região metropolitana de Vitória, foi adquirido em casa comercial.

4.2 - Determinação dos traços

A escolha da dosagem do concreto foi feita com base em um traço comumente utilizado na região da grande Vitória, e sistematizado por meio de uma planilha desenvolvida durante este trabalho.

O concreto do traço de referência, dosado para atender ao valor de resistência à compressão aos 28 dias da ordem de 16MPa, tem valor suficiente para aplicação em estruturas de concreto não armado, com objetivo específico de incorporar o resíduo industrial.

O traço de referência utilizado, em massa, possui a composição apresentada na Tabela 4-1:

Tabela 4-1 - Composição em massa do traço de referência utilizado.

Traço	Composição			
	cimento	areia	brita	água
Referência				
Ref.	1	2,83	3,7	0,71

Para o traço escolhido o consumo de cimento foi de 286 kg/m³.

O objetivo desta etapa foi quantificar os demais traços. Para isto, fixaram-se os parâmetros agregado miúdo e graúdo em todas as dosagens. Os traços foram identificados pelas letras A – adição, S – substituição, P – lã de vidro pulverizada ou moída, N – lã de vidro natural sem modificação na sua forma física, e pelos números 1 – 2,5% de resíduo, 2 – 5% de resíduo, 3 – 7,5% de resíduo, e 4 – 10% de resíduo.

No traço com resíduo moído pulverizado em substituição ao cimento – PS, a substituição de parte do cimento foi calculada em relação à massa do aglomerante utilizado no traço de referência, conforme a Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Composição em massa dos traços com substituição do resíduo pulverizado PS, ensaios CEFET-ES.

Traço	Composição				
	cimento	resíduo	areia	brita	água
1	0,975	0,025	2,83	3,7	0,71
PS 2	0,950	0,050	2,83	3,7	0,71
3	0,925	0,075	2,83	3,7	0,71
4	0,900	0,100	2,83	3,7	0,71

No traço com resíduo natural, sem modificação em sua forma física em substituição ao cimento – NS, a substituição de parte do cimento foi calculada em relação à massa do aglomerante utilizado no traço de referência, conforme a Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Composição em massa dos traços com substituição do resíduo natural NS, ensaios CEFET-ES.

Traço	Composição					
	cimento	resíduo	areia	brita	água	
NS	1	0,975	0,025	2,83	3,7	0,71
	2	0,950	0,050	2,83	3,7	0,71
	3	0,925	0,075	2,83	3,7	0,71
	4	0,900	0,100	2,83	3,7	0,71

O resíduo moído, ou pulverizado, foi simplesmente adicionado ao traço de referência – PA. A adição ao traço foi calculada também em relação à massa do aglomerante utilizada no traço de referência; além disso, foi mantida a relação água/cimento para análise da influência da incorporação, conforme a Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Composição em massa dos traços com adição do resíduo pulverizado PA, ensaios CEFET-ES.

Traço	Composição					
	cimento	resíduo	areia	brita	água	
PA	1	1	0,025	2,83	3,7	0,71
	2	1	0,050	2,83	3,7	0,71
	3	1	0,075	2,83	3,7	0,71
	4	1	0,100	2,83	3,7	0,71

4.3 - Preparação das misturas

O procedimento para realização dos ensaios mecânicos baseou-se nas recomendações da ABNT NBR 12821 Preparação de concreto em laboratório (1993)⁶³. As massas das misturas dos 4 grupos (Ref., PS, NS e PA), envolvendo 13 traços elaborados para confeccionar 195 corpos-de-prova para o estudo da trabalhabilidade e da resistência à compressão, são apresentadas na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Quantitativo dos traços em massa, ensaios CEFET-ES.

Traços	Incorporação %	Composição					Total
		Lã de vidro	Cimento	Areia	Brita	Água	
		kg	kg	kg	kg	l	
Ref.	0,0	-	9,587	27,171	35,452	7,312	80
P S	2,5	0,240	9,347	27,171	35,452	7,312	80
P S	5,0	0,479	9,107	27,171	35,452	7,312	80
P S	7,5	0,719	8,868	27,171	35,452	7,312	80
P S	10,0	0,959	8,628	27,171	35,452	7,312	80
N S	2,5	0,240	9,347	27,171	35,452	7,312	80
N S	5,0	0,479	9,107	27,171	35,452	7,312	80
N S	7,5	0,719	8,868	27,171	35,452	7,312	80
N S	10,0	0,959	8,628	27,171	35,452	7,312	80
P A	2,5	0,240	9,587	27,171	35,452	7,312	80
P A	5,0	0,479	9,587	27,171	35,452	7,312	80
P A	7,5	0,719	9,587	27,171	35,452	7,312	80
P A	10,0	0,959	9,587	27,171	35,452	7,312	80
Total		7,190	119,834	353,227	460,870	95,056	1116

Nota: Ref. – Referência, P – Pulverizado, N – Natural, S – Substituição, A – Adição.

Para a execução dos traços foi empregada betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros, vista na Figura 4-8.



Figura 4-8 – Betoneira, ensaios CEFET-ES.

A realização da seqüência de adição dos materiais na betoneira seguiu as recomendações da NBR 12821 (1993) ⁶³:

Com a betoneira desligada foi feita a introdução de:

- Agregado graúdo;

- Uma parte da água;

A betoneira foi acionada e procedeu-se a introdução de:

- Agregado miúdo;
- Cimento, e
- Restante da água.

Para os traços com adição ou substituição de lã de vidro, a sua introdução ocorreu combinada ao cimento.

Depois que todos os materiais foram introduzidos na betoneira o concreto foi misturado por três minutos, seguido de três minutos de descanso e, logo após, mais dois minutos de mistura final.

A seguir, para cada mistura, realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, item 4.5.1 - , conforme a NBR NM 67 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (1998) ²⁵.

4.4 - Confeção dos corpos de prova

4.4.1 - Moldagem e cura dos corpos de prova

Para a moldagem foram utilizados moldes de corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura Figura 4-9 (A), seguindo os passos descritos na NBR 5738 Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova (2003) ²⁹.

O concreto foi introduzido no molde em duas camadas de volume aproximadamente iguais e adensado em cada camada utilizando uma haste. O concreto foi golpeado com seu extremo em forma de semi-esfera o número de doze vezes. A primeira camada foi atravessada em toda a sua espessura, com o cuidado de não se golpear a base do molde. Os golpes foram distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde, Figura 4-9 (B).



(A)



(B)

Figura 4-9 - (A) Formas, ensaios CEFET-ES. (B) Moldagem dos corpos de prova, ensaios CEFET-ES.

A camada seguinte foi moldada com quantidade em excesso de concreto e, também, adensada em toda sua espessura, com a haste penetrando aproximadamente 20mm da camada anterior. O rasamento, eliminação do material em excesso do topo dos corpos-de-prova, foi realizado empregando-se uma régua metálica, que foi deslizada sobre as bordas da forma em direção normal à régua, tendo sido realizado também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

Os corpos-de-prova foram protegidos e submetidos a um período de cura inicial ao ar livre. Passadas 24 horas realizou-se a desforma e em seqüência a colocação dos corpos-de-prova na câmara úmida, onde permaneceram agrupados em séries distintas de quinze corpos-de-prova relativas aos diferentes amassamentos até o momento do ensaio de resistência à compressão.

4.4.2 - Capeamento dos corpos-de-prova

Nesta etapa que precede o rompimento, os topos dos corpos-de-prova foram revestidos com uma fina camada de mistura de enxofre a quente, Figura 4-10, através de um capeador, conferindo um acabamento liso e plano após endurecimento.



Figura 4-10 - Capela para revestimento dos corpos de prova, ensaios CEFET-ES.

O cuidado com o revestimento dos topos dos corpos-de-prova tem o objetivo de garantir perpendicularidade da superfície obtida com a sua geratriz, obtendo uma espessura da camada de capeamento não excedendo 3mm em cada topo. O enxofre foi utilizado por ser um material apropriado, permitindo aderência, compatibilidade química com o concreto, fluidez, no momento de sua aplicação e resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

4.5 - Realização dos ensaios para determinação das propriedades mecânicas do concreto

4.5.1 - Ensaio de abatimento

Com o objetivo de comparar a trabalhabilidade de cada traço com o valor encontrado no traço de referência, realizou-se o ensaio de abatimento NBR NM 67 (1998) ²⁵.

O molde, em forma de um tronco de cone oco, apresentou as seguintes dimensões internas:

- Diâmetro da base inferior: 20cm \pm 0,2cm;
- Diâmetro da base superior: 10cm \pm 0,2cm, e
- Altura: 30cm \pm 0,2cm.

Foi usada uma haste de compactação, de seção circular, reta, feita de aço, com diâmetro de 1,6cm, comprimento de 60cm e extremidades arredondadas.

Para apoio do molde foi usada uma placa de base metálica plana. Quadrada, com lados de dimensões igual a 50cm e espessura igual a 0,3cm.

O procedimento da determinação foi iniciado com o umedecimento do molde e da placa de base e a colocação do molde sobre a placa de base. Durante o preenchimento do molde com o concreto do ensaio, o operador posicionava os pés sobre suas alças, de forma a mantê-la estável. Em seguida, enchia rapidamente o molde com o concreto coletado, em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado.

A cada camada procedia-se a compactação com 25 golpes da haste de socamento, distribuindo uniformemente os golpes sobre a seção de cada camada. Na camada superior, procedia-se o rasamento da superfície do concreto com uma régua metálica e com movimentos rolantes da haste de compactação. Em seguida, era realizada a limpeza da placa de base e retirado o molde do concreto levantando-o cuidadosamente na direção vertical, com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral.

Imediatamente após a retirada do molde, procedia-se a medida do abatimento do concreto, Figura 4-11, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado, aproximando aos 0,5cm mais próximos.



Figura 4-11 - Execução de Slump-test, ensaios CEFET-ES.

4.5.2 - Ensaio de resistência à compressão

Antes dos ensaios de resistência à compressão, as medidas do diâmetro e altura dos corpos-de-prova foram tomadas com paquímetro, Figura 4-12, sendo que para o diâmetro avaliou-se a meia altura e com um giro de 90°, em seguida determinou-se a média para os dois valores.



Figura 4-12 - Determinação das dimensões do corpo de prova, ensaios CEFET-ES.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo a NBR 5739 (1980) ³⁰, com o objetivo de comparar as médias da resistência à compressão axial para as

respectivas idades (5 corpos de prova para cada idade de 3, 7 e 28 dias), acompanhando assim a sua evolução.

Para os ensaios de resistência à compressão, foi utilizada uma prensa Servo-Hidráulica EMIC, Figura 4-13, acoplada a um microcomputador que permitiu a realização dos ensaios com taxa de incremento linear de carga 0,25MPa/s, com manutenção de carga constante, com alto grau de automação.



Figura 4-13 - Prensa servo-hidráulica laboratório de construção civil, ensaios CEFET-ES.

4.5.2.1 - Resultados

✓ Resistência individual

Procedeu-se ao cálculo da resistência à compressão, em megapascals, de cada corpo-de-prova, dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo-de-prova.

✓ Resistência média

Foi calculada a média das resistências individuais, em megapascals, dos cinco corpos-de-prova ensaiados na mesma idade. O resultado foi arredondado ao décimo mais próximo.

✓ Desvio relativo máximo

Em seguida determinou-se o desvio relativo máximo da série de cinco resultados indicados para a resistência média, dividindo o valor absoluto da diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média, para mais ou para menos, pela resistência média e multiplicando este quociente por 100. A porcentagem obtida foi arredondada ao décimo mais próximo.

✓ Expressão dos resultados

Os resultados do ensaio foram tabelados com as cinco resistências individuais, a resistência média e o desvio relativo máximo, em cada idade, os valores estão listados em apêndices.

Quando o desvio relativo máximo foi superior a 6%, calculou-se uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, identificando-o com um asterisco.

4.5.3 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Os corpos-de-prova de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, confeccionados para os ensaios da obtenção do módulo de elasticidade foram moldados no CEFET-MG seguindo os mesmos procedimentos descritos no item 4.3 - . Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade foram realizados na HOLCIM em Pedro Leopoldo MG.

Os ensaios para determinação dos módulos de elasticidade secante foram realizados em corpos-de-prova 10cm x 20cm, com idade de 28 dias, efetuando-se ciclos de carga até 70% do limite de resistência a compressão do concreto. As deformações foram obtidas através de dois extensômetros elétricos posicionados nas laterais opostas de cada corpo-de-prova. O módulo de elasticidade secante foi calculado para as deformações medidas para a média dos 3 corpos-de-prova, para a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última.

4.5.4 - Ensaio de resistência de tração à flexão

Foram moldados corpos de prova prismáticos nas dimensões 15cmx15cmx50cm para os ensaios de resistência de tração à Flexão no CEFET-MG.

No ensaio realizado na HOLCIM em Pedro Leopoldo MG, submeteu-se o prisma de concreto à flexão e determinou-se a tensão teórica máxima de tração atingida nas fibras inferiores, Figura 4-14.



Figura 4-14 - (A) Arranjo para o ensaio de tração na flexão, ensaios HOLCIM. (B) Corpo-de-prova rompido, ensaios HOLCIM.

O valor da resistência à tração foi determinado. Empregando-se duas forças, simétricas, separadas de um terço do vão. A tensão máxima ocorreu nas seções do terço central.

4.6 - Realização de ensaios para classificação ambiental do concreto

A classificação ambiental do concreto com resíduo industrial foi feita através do ensaio de solubilização, seguindo a metodologia da norma complementar ABNT NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (2004)³, que atribui parâmetros para que se possam diferenciar os resíduos da classe II A e classe II B.

4.6.1 - Ensaio de solubilização de resíduos

Foram preparadas amostras do concreto de referência e do concreto com adição de 10% de resíduo pulverizado para submetê-los ao ensaio de solubilização. A amostra submetida à análise foi coletada conforme as condições citadas na ABNT NBR 10007 Amostragem de resíduos sólidos⁶⁴.

Na realização do ensaio, colocou-se uma amostra representativa de 250g de massa seca do resíduo em um frasco de 1500mL. A partir desse ponto foram adicionados 1000mL de água deionizada e deixado em agitação com baixa velocidade por um período de cinco minutos. Com o frasco tampado, a mistura foi mantida em repouso por sete dias. Após este período, filtrou-se a solução, a qual foi submetida às análises químicas por espectrofotometria (ABNT, 2004c)⁶⁴.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados concernentes às etapas do trabalho, a saber:

- Caracterização do resíduo de lã de vidro;
- Caracterização dos materiais componentes do concreto;
- Estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto, enfatizando trabalhabilidade e resistência à compressão;
- Estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto, enfatizando resistência à compressão; resistência à tração na flexão; módulo de elasticidade;
- Estudo da influência da incorporação do resíduo na classificação ambiental do concreto.

5.1 - Caracterização do resíduo industrial de lã de vidro

5.1.1 - Microscopia eletrônica de varredura

A amostra foi submetida à microscopia eletrônica de varredura, o ensaio foi realizado no laboratório do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Na Figura 5-1 (A) observa-se o aspecto geral da lã de vidro moída com um aumento de 63X, na Figura 5-1 (B) apresenta detalhe do resíduo pulverizado com um aumento de 950X.

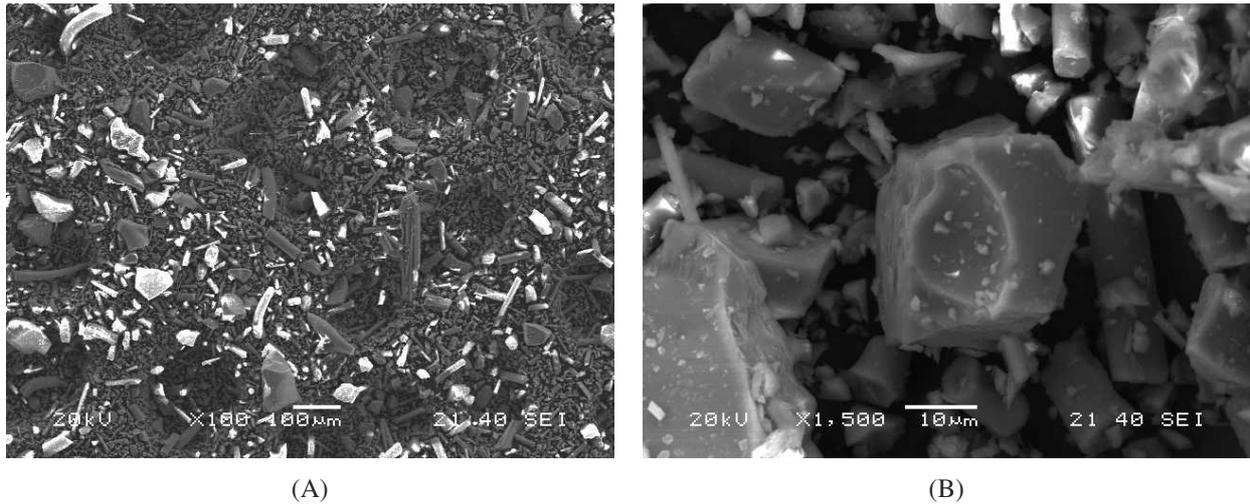


Figura 5-1 - Aspecto do resíduo de lã de vidro pulverizado: (A) Aumento de 63X. (B) Aumento de 950X.

Na Figura 5-2 (A) podem ser vistos os pontos para os locais selecionados, onde o microanalisador EDS (espectrometria a energia dispersiva) foi usado. Na Figura 5-2 (B) o espectro fornecido pelo microanalisador para um dos pontos selecionados, permitindo a observação da predominância dos elementos silício e cálcio nas partículas.

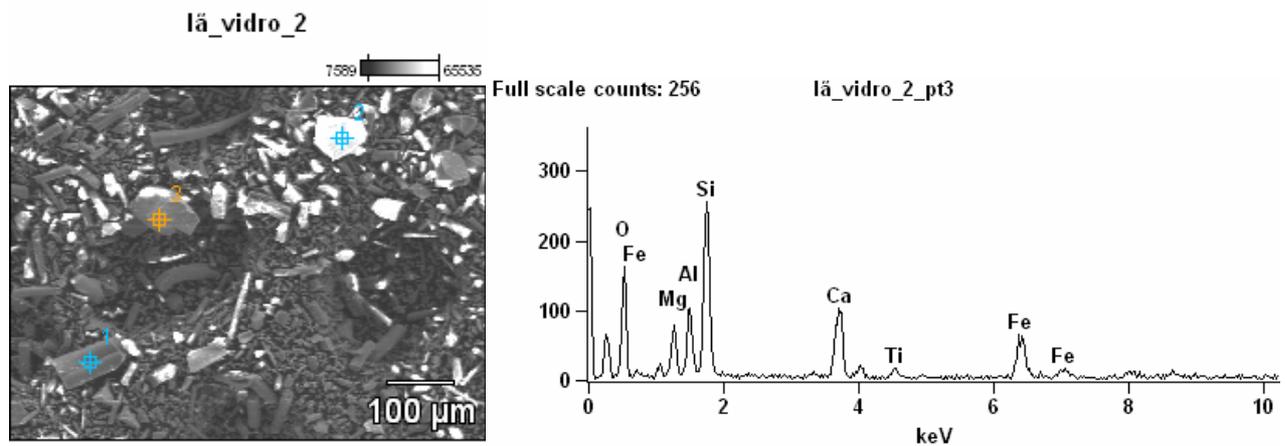


Figura 5-2 - MEV do resíduo de lã de vidro: (A) Pontos selecionados para análise da composição pelo EDS. (B) Espectro para o ponto selecionado.

A sonda EDS determinou a composição química de vários pontos da amostra, o resultado da média dos valores está representado na Tabela 5-1:

Tabela 5-1 - Composição química do resíduo de lã de vidro – EDS/Microscopia Eletrônica de Varredura.

Elementos	%
SiO ₂	45,48
CaO	16,66
Al ₂ O ₃	13,73
Fe ₂ O ₃	10,41
MgO	8,81
TiO ₂	2,98
K ₂ O	0,98
Cu ₂ O	0,71
SO ₃	0,24

Fonte: Laboratório DEGEO-UFOP.

5.1.2 - Análise química por via úmida

A composição química do resíduo de lã de vidro foi determinada por via úmida no laboratório de análise química do DEGEO-UFOP, a amostra pulverizada foi atacada pelo ácido clorídrico e pela mistura de ácido clorídrico mais ácido nítrico os resultados podem ser vistos na Tabela 5-2, o resíduo insolúvel, aproxima-se do teor de SiO₂ encontrado no EDS/MEV, 51,14% para o ataque com HNO₃ e 44,87% para o HCl .

Tabela 5-2 - Composição química do resíduo de lã de vidro – Análise química por via úmida.

Elementos	HNO₃ + HCl %	HCl %
CaO	14,24	16,21
Al ₂ O ₃	11,39	12,76
Fe ₂ O ₃	11,11	12,37
MgO	6,21	7,01
TiO ₂	2,32	2,82
Na ₂ O	1,89	2,09
K ₂ O	0,79	0,88
P ₂ O ₅	0,22	0,25
MnO	0,17	0,19
ZrO ₂	0,03	0,03

Os valores encontrados para a análise química por via úmida, por ataque de ácido clorídrico, ficaram próximos e confirmaram os valores encontrados para a média dos pontos selecionados pela sonda EDS do Microscópio Eletrônico de Varredura.

A predominância dos óxidos de silício, cálcio, alumínio e ferro é um fator favorável, tendo em vista que, esses mesmos elementos são os principais componentes do cimento e, portanto, fundamentais nas reações de hidratação do cimento.

5.1.3 - Difração de raio-X

Na caracterização da microestrutura do resíduo de lã de vidro moída utilizou-se a técnica de difração de raios X. O difratograma da Figura 5-3 confirma o caráter amorfo da amostra.

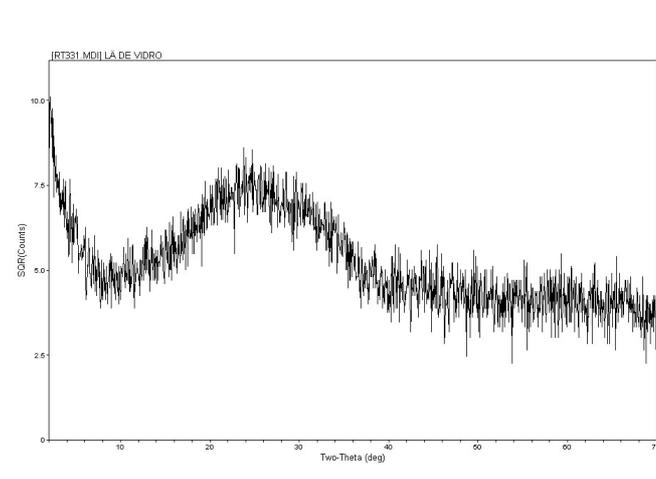


Figura 5-3 - Difratograma de raios-X do resíduo da lã de vidro moída.

5.1.4 - Análise granulométrica

A análise granulométrica do resíduo de lã de vidro moído foi realizada no laboratório de Beneficiamento Mineral da CODAMIN do CEFET-OP. Os resultados do ensaio e a curva granulométrica encontram-se na Tabela 5-3 e na e Figura 5-4, respectivamente.

Tabela 5-3 - Caracterização física da lã de vidro.

Peneiras Abertura da Malha mm	Massa g	%		
		Retida		Passante
		Simples	Acumulada	Acumulada
0,21	0,00	0,00	0,00	100,00
0,15	8,94	4,47	4,47	95,53
0,1	16,71	8,35	12,82	87,18
0,07	33,05	16,53	29,35	70,65
0,05	140,09	70,04	99,39	0,61
0,04	0,94	0,47	99,86	0,14
Fundo	0,27	0,14	100,00	0,00
Soma	200,00	100,00		
Peso inicial	200,90			
Perda	0,45%			

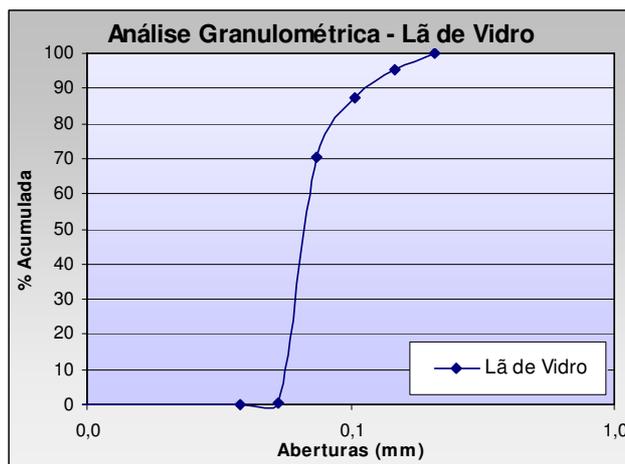


Figura 5-4 - Análise Granulométrica da Lã de Vidro.

5.2 - Caracterização dos materiais componentes do concreto

- ✓ Estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto fresco e endurecido – trabalhabilidade e resistência à compressão.

5.2.1 - Agregado miúdo

Os agregados utilizados nos estudos referentes ao comportamento da resistência à compressão e trabalhabilidade foram adquiridos na região da grande Vitória – ES.

Foi utilizada uma areia de origem natural quartzosa. Os ensaios apontaram para uma granulometria na faixa entre os limites da Zona ótima inferior e Zona ótima superior. O módulo de finura obtido foi 2,63 e, por estar entre 2,20 e 2,90, foi classificada como zona ótima. A massa específica determinada foi de 2,618 kg/dm³, e o teor de materiais pulverulentos igual a 0,5%. Os resultados de caracterização do agregado miúdo encontram-se na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 - Caracterização física do agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.

Peneiras Abertura mm	Massa g	%		
		Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
6,30	0,00	0,00	0,00	100,00
4,80	0,68	0,14	0,14	99,96
2,40	12,33	2,47	2,60	97,40
1,20	88,82	17,77	20,37	79,63
0,60	151,70	30,34	50,71	49,29
0,30	193,65	38,74	89,45	10,55
0,15	49,00	9,80	99,25	0,75
Fundo	3,74	0,75	100,00	0,00
Soma	499,92	100,00		
Peso inicial	500,03			
Perda	0,11	0,02		
Teor de materiais pulverulentos	0,5%			
Massa específica	2,618 kg/dm ³			
Módulo de Finura	2,63			

Na Figura 5-5, observa-se a Curva Granulométrica da areia utilizada nos ensaios realizados no CEFET-ES.

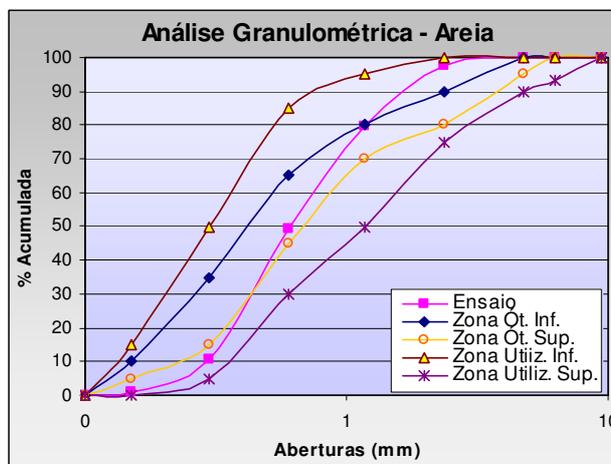


Figura 5-5 - Curva granulométrica do agregado miúdo, ensaios CEFET-ES.

5.2.2 - Agregado graúdo

O agregado graúdo natural empregado foi uma brita de granito. A caracterização do agregado seguiu a ABNT NBR NM 248/2003 Agregados – Determinação da composição granulométrica. Foram observados os limites granulométricos da brita e das dimensões máximas dos agregados estabelecidos pela NBR 7211/2005 Agregado para concreto – Especificação ¹².

Os resultados da caracterização do agregado graúdo encontram-se na Tabela 5-5:

Tabela 5-5 - Caracterização física do agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.

Peneiras Abertura da Malha mm	Massa g	%		
		Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
19,10	115,11	2,30	2,30	97,70
12,70	2727,15	54,56	56,86	43,14
9,50	1603,57	32,08	88,94	11,06
6,30	479,19	9,59	98,52	1,48
Fundo	73,85	1,48	100,00	0,00
Soma	4998,87	100,00		
Peso inicial	5000,01			
Perda	1,14	0,02		
Massa específica	2,469 kg/dm ³			
Dimensão Máxima Característica	19,10 mm			

A curva granulométrica da brita é apresentada na Figura 5-6:

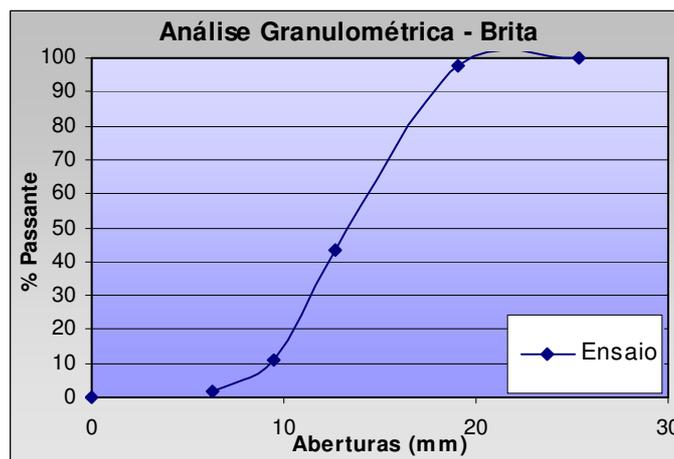


Figura 5-6 - Curva granulométrica do agregado graúdo, ensaios CEFET-ES.

- ✓ A seguir os agregados utilizados no estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto endurecido - resistência à compressão, resistência de tração na flexão e módulo de elasticidade

5.2.3 - Agregado miúdo

Os agregados utilizados nos estudos desta etapa foram adquiridos na região da grande Belo Horizonte – MG.

O agregado miúdo utilizado nos estudos referentes ao comportamento da resistência à compressão, resistência à tração na flexão e do módulo de elasticidade, também de origem

quartzosa, foi uma areia que se encontrava na faixa entre os limites da Zona ótima inferior e Zona ótima superior. O módulo de finura determinado foi 2,28 e, também classificado como zona ótima por obter um MF entre 2,20 a 2,90. Os resultados de caracterização do agregado miúdo da encontram-se na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 - Caracterização física do agregado miúdo, ensaios CEFET-MG.

Peneiras Abertura mm	Massa g	%		
		Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
9,50	0	0,00	0,00	100,00
6,30	0	0,00	0,00	100,00
4,80	1	0,20	0,20	99,80
2,40	9	1,80	2,00	98,00
1,20	34	6,80	8,80	91,20
0,60	161	32,20	41,00	59,20
0,30	191	38,20	79,20	20,80
0,15	86	17,20	96,40	3,60
Fundo	18	3,60	100,00	0,00
Soma	500	100,00		
Peso inicial	500,03			
Perda	0,03	0,01		
Módulo de Finura	2,28			

Na Figura 5-7, observa-se a Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios realizados no CEFET-MG.

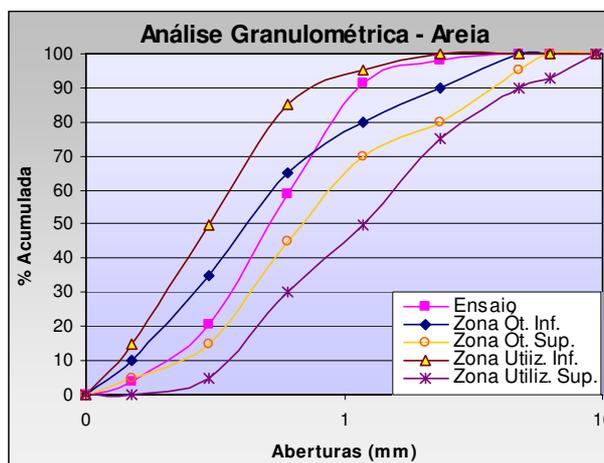


Figura 5-7 - Curva granulométrica do agregado miúdo, ensaios CEFET-MG.

5.2.4 - Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, e do módulo de elasticidade, foi caracterizado e os resultados encontram-se na Tabela 5-7:

Tabela 5-7 - Caracterização física do agregado graúdo, ensaios CEFET-MG.

Peneiras Abertura da Malha mm	Massa g	%		
		Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
19,10	1313	26,3	26,3	73,7
12,70	2741	54,8	81,1	18,9
9,50	734	14,7	95,8	4,24
6,30	194	3,9	99,6	0,4
4,8	9	0,2	99,8	0,2
Fundo	9	0,2	100,0	0,0
Soma	5000	100,0		
Peso inicial	5000			
Perda	0	0		
Dimensão Máxima Característica	19,10 mm			

A curva granulométrica do agregado graúdo é apresentada na Figura 5-8:

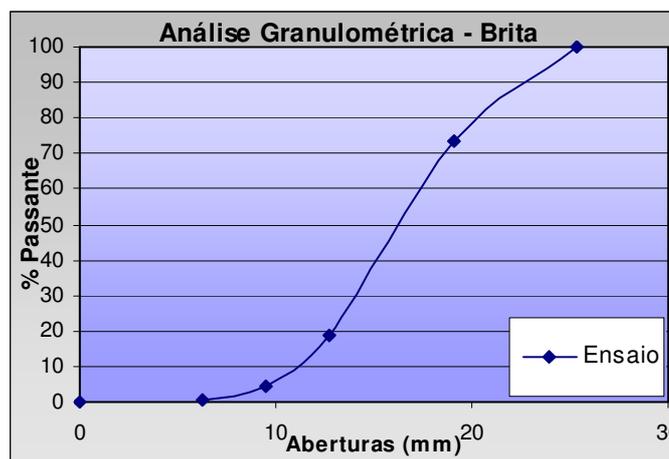


Figura 5-8 - Curva granulométrica do agregado graúdo, ensaios CEFET-MG.

5.2.5 - Aglomerante

As especificações dos teores dos componentes, exigências químicas, exigências físicas e mecânicas para o CPIII Classe 40 foram fornecidas pelo fabricante (RIBEIRO, 2007)⁶⁵ e encontram-se relacionadas nas Tabela 5-8, Tabela 5-9, e Tabela 5-10 respectivamente.

Tabela 5-8 - Teores dos componentes do cimento Portland CPIII 40 RS.

Determinações		Unidade	NASSAU (2007)
Composição potencial do clínquer	C ₃ S	%	55,00 a 65,00
	C ₂ S	%	8,00 a 15,00
	C ₃ A	%	4,00 a 6,00
	C ₄ AF	%	10,00 a 15,00

Fonte: (RIBEIRO, 2007) ⁶⁵

Tabela 5-9 - Exigências químicas do cimento Portland CP III 40 RS.

Determinações	Unidade	NASSAU (2007)
Resíduo insolúvel	%	0,5 a 1,0
Perda ao fogo	%	2,5 a 3,5
Óxido de magnésio (MgO)	%	6,0 a 7,0
Trióxido de enxofre (SO ₃)	%	1,7 a 2,2

Fonte: (RIBEIRO, 2007) ⁶⁵

Tabela 5-10 - Exigências físicas e mecânicas do cimento Portland CP III 40 RS.

Determinações		Unidade	NASSAU (2007)
Finura	Resíduo na peneira 75 μ m	%	0,0 a 0,3
	Área específica	m ² /kg	400 a 430
	Massa específica	kg/dm ³	2,97 a 3,00
	Início de pega	min	190 a 230
	Fim de pega	min	230 a 270
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	16 a 20
	7 dias de idade	MPa	26 a 30
	28 dias de idade	MPa	44 a 49

Fonte: (RIBEIRO, 2007) ⁶⁵

Estes dados estão de acordo com os limites estabelecidos pelas Especificações da ABNT NBR 5735 (1991) ⁵⁴.

5.3 - Estudo da influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do concreto.

A análise dos resultados foi auxiliada com confecção de gráficos em conjunto com as técnicas de estatística descritiva (cálculo de média, desvio padrão e gráficos de média) na caracterização da variável resistência à compressão em relação à idade do corpo de prova.

5.3.1 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto nos ensaios realizados no CEFET-ES.

Neste item serão apresentados os resultados obtidos para os traços de concreto de referência, com substituição e adição. Em apêndices encontram-se as relações completas de todos os resultados encontrados para as etapas deste trabalho.

Para o concreto no estado endurecido foram utilizados cinco corpos-de-prova nas dimensões 10cm de diâmetro por 20cm de altura, para as idades de 3, 7 e 28 dias. A seguir é indicada a média dos resultados da resistência à compressão para cada idade para o traço de referência, e para os grupos de traços PS, NS e PA.

5.3.1.1 - Concreto de Referência

A Tabela 5-11 mostra os resultados do “slump test” e da média da resistência à compressão para cada idade do Traço de Referência, assim como o respectivo desvio padrão para os dados avaliados. Foi adicionada a coluna Evolução que será um índice para comparações com os demais traços.

Tabela 5-11 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço de referência, ensaios CEFET-ES.

%	Slump	Idade do ensaio (dias)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Evolução (%)	Densidade Específica (kg/dm ³)
0	35	3	7,94	0,20	100	2,354
		7	11,33	0,42	100	
		28	16,68	0,72	100	

O gráfico relativo á Resistência à Compressão X Idade para o Traço de Referência é apresentado na Figura 5-9, ele servirá para comparação com os grupos de traços PS, NS e PA.

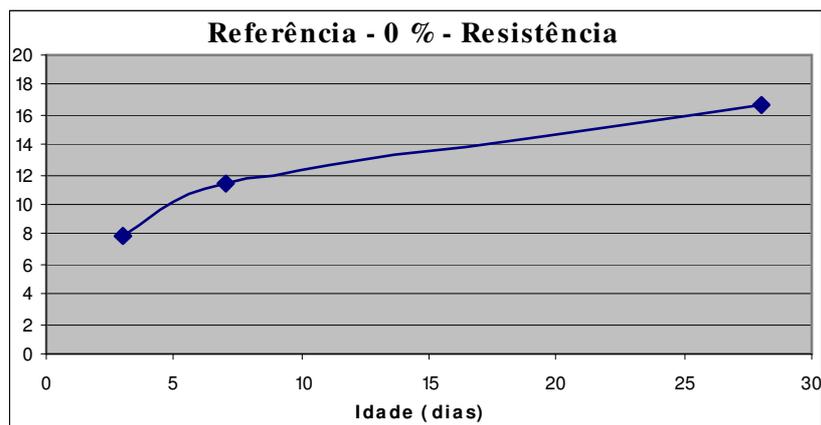


Figura 5-9 - Gráfico médias das resistências à compressão X Idade para o traço de referência, ensaios CEFET-ES.

5.3.1.2 - Concreto com lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa

O resumo dos resultados para o traço com substituição de lã de vidro pulverizada, PS para as diferentes idades e porcentagens são apresentados na Tabela 5-12.

Tabela 5-12 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço PS, ensaios CEFET-ES.

	%	Slump (mm)	Idade do ensaio (dias)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Evolução (%)	Densidade Específica (kg/dm ³)
1	2,5	155	3	7,14	0,27	90	2,331
			7	11,23	0,46	99	
			28	16,16	0,38	97	
2	5,0	165	3	6,49	0,28	82	2,338
			7	8,87	0,37	78	
			28	13,70	0,24	82	
3	7,5	175	3	5,26	0,17	66	2,329
			7	9,22	0,25	81	
			28	13,27	0,55	80	
4	10,0	135	3	4,61	0,14	58	2,346
			7	8,09	0,25	71	
			28	12,47	0,43	75	

As curvas referentes à resistência à compressão X Idade, para os diferentes traços com substituição de lã de vidro pulverizada para as diferentes idades, são apresentados na Figura 5-10:



Figura 5-10 - Gráfico médias das resistências à compressão X Idade para o traço PS, ensaios CEFET-ES.

Analisando a Figura 5-10, é possível observar que a substituição de cimento por lã de vidro em 2,5% se mostrou bastante vantajosa uma vez que a resistência alcançada por este traço chegou a 97% do valor de referência, além de apresentar uma trabalhabilidade muito superior.

Embora os demais traços com substituição de cimento por resíduo pulverizado tenham apresentado o mesmo efeito na trabalhabilidade, as substituições em percentagens maiores alcançaram resistências bem inferiores, seguramente pela diminuição da quantidade do aglomerante.

5.3.1.3 - Concreto com de lã de vidro natural, substituindo o cimento em relação à sua massa

A Figura 5-11, mostra o ensaio de abatimento do tronco de cone para a dosagem com o traço com NS-2:



Figura 5-11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone NS-2, ensaios CEFET-ES.

Observando a imagem da Figura 5-11, pode-se afirmar que ao contrário da substituição do cimento pelo resíduo moído – PS, a substituição por lã de vidro “natural” – NS, para valores acima de 2,5%, ocasionou uma perda na trabalhabilidade da mistura. Nos traços referentes à substituição de 7,5% e 10% de lã de vidro natural, não puderam ser executados, uma vez que não existia trabalhabilidade suficiente para moldar os corpos-de-prova.

A perda de trabalhabilidade com adição de lã de vidro natural já era esperada, nos trabalhos de Peruzzi (2002) ⁵⁵, demonstrou-se haver perda de trabalhabilidade quando se adiciona qualquer tipo de fibra à argamassa ou ao concreto convencional, concluindo ainda que, essa perda é proporcional à concentração volumétrica de fibras.

As médias dos resultados para a adição com lã de vidro natural, são apresentadas na Tabela 5-13:

Tabela 5-13 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço NS, ensaios CEFET-ES.

		Slump	Idade do	Média	Desvio	Evolução	Densidade
	%	(mm)	ensaio	(MPa)	Padrão	(%)	Específica
			(dias)		(MPa)		(kg/dm³)
1	2,5	85	3	6,19	0,18	78	2,363
			7	9,21	0,37	81	
			28	14,72	0,40	88	
2	5,0	0	3	5,79	0,22	73	2,307
			7	8,72	0,31	77	
			28	11,93	0,60	72	

O gráfico Resistência X Idade para substituição com lã de vidro natural, NS, é apresentado na Figura 5-12:

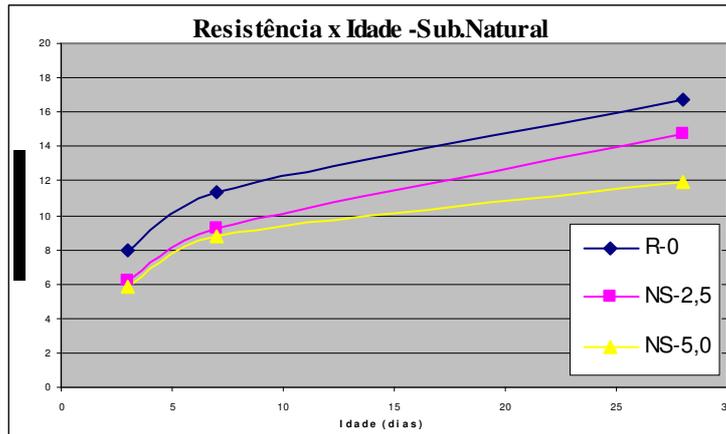


Figura 5-12 - Gráfico resistências médias à compressão X Idade para o traço NS, ensaios CEFET-ES.

A Figura 5-12 demonstra que a evolução da resistência à compressão foi inferior para o traço NS se comparado aos mesmos valores de substituição do traço de referência.

5.3.1.4 - Concreto com lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa

Os resultados com as médias das resistências à compressão para adição com lã de vidro pulverizada PA, para as idades de 3, 7 e 28 dias, são apresentados na Tabela 5-14:

Tabela 5-14 - Resultados das Resistências médias à compressão X Idade para o traço PA, ensaios CEFET-ES.

	%	Slump (mm)	Idade do ensaio (dias)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Evolução (%)	Densidade Específica (kg/dm ³)
1	2,5	210	3	6,09	0,13	77	2,365
			7	9,75	0,52	86	
			28	13,46	0,82	81	
2	5,0	185	3	5,39	0,16	68	2,355
			7	9,24	0,09	82	
			28	13,36	0,39	80	
3	7,5	165	3	6,10	0,16	77	2,363
			7	9,98	0,24	88	
			28	15,14	0,44	91	
4	10,0	195	3	6,15	0,19	77	2,365
			7	10,18	0,22	90	
			28	15,50	0,64	93	

Assim como nos traços PS, o efeito da incorporação do resíduo sobre a trabalhabilidade da mistura foi sentido nos traços PA. A Tabela 5-14 evidencia que a evolução na resistência à compressão foi maior, para traços com adições maiores. Observa-se também, através da coluna evolução, de maneira bem clara, que esses valores têm um ganho nas idades

mais avançadas, podendo inferir que o resíduo incorporado retarda a velocidade de hidratação da pasta, mas para idades avançadas há uma recuperação significativa.

O gráfico com a representação das médias das Resistências X Idade para adição com lã de vidro pulverizada em diferentes adições, é apresentado na Figura 5-13:

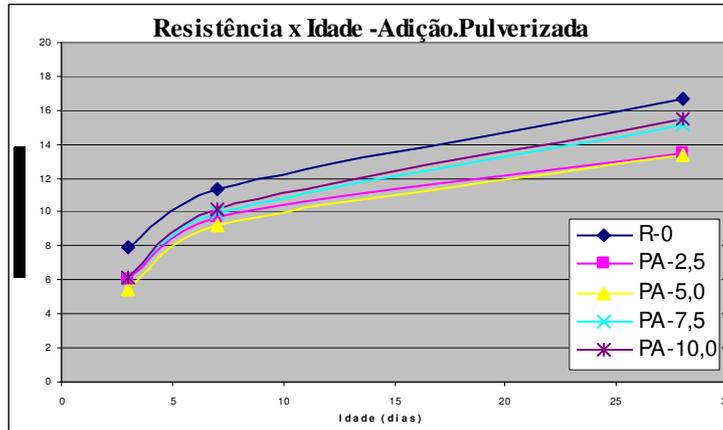


Figura 5-13 - Gráfico resistências médias à compressão X Idade para o traço PA, ensaios CEFET-ES.

O efeito mencionado de melhora em idades avançadas, 28 dias, é melhor observado nos dados para os valores de Resistência à compressão agrupados em função da Idade, conforme Figura 5-14.

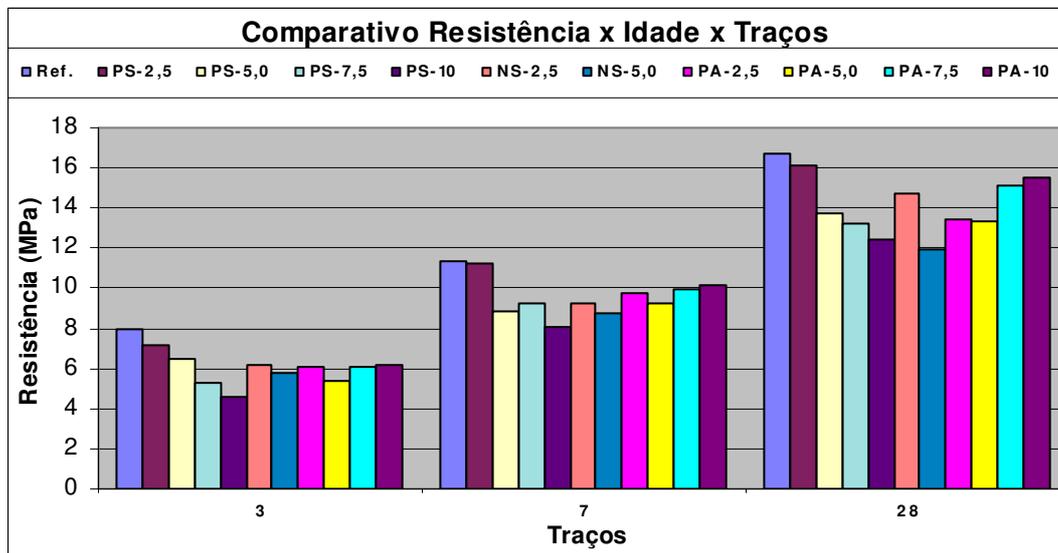


Figura 5-14 - Comparativo das resistências médias dos traços submetidos aos ensaios de compressão X Idade, ensaios CEFET-ES.

A Figura 5-15 mostra o comparativo das Resistências à compressão dos traços estudados em função da Idade.

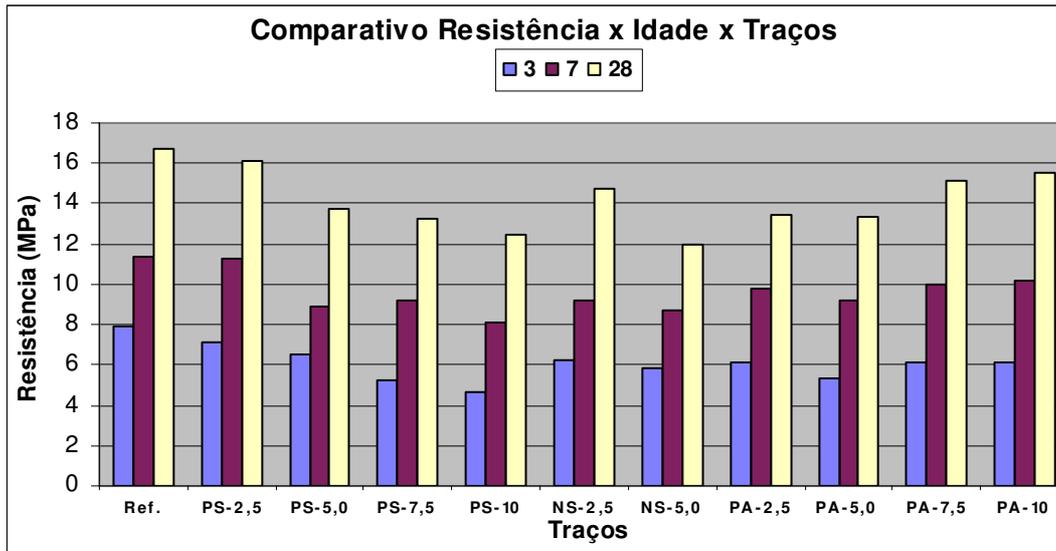


Figura 5-15 - Comparativo das resistências médias à compressão X Idade, ensaios CEFET-ES.

Os dados agrupados da maneira acima destacam o efeito inverso provocado pela incorporação da lã de vidro moída, em PS há uma perda contínua de resistência à compressão e em PA observa-se o contrário.

A Figura 5-16 mostra um comparativo do parâmetro Evolução da Resistência à compressão X Idade aos 3, 7 e 28 dias, para os traços PS, NS e PA.

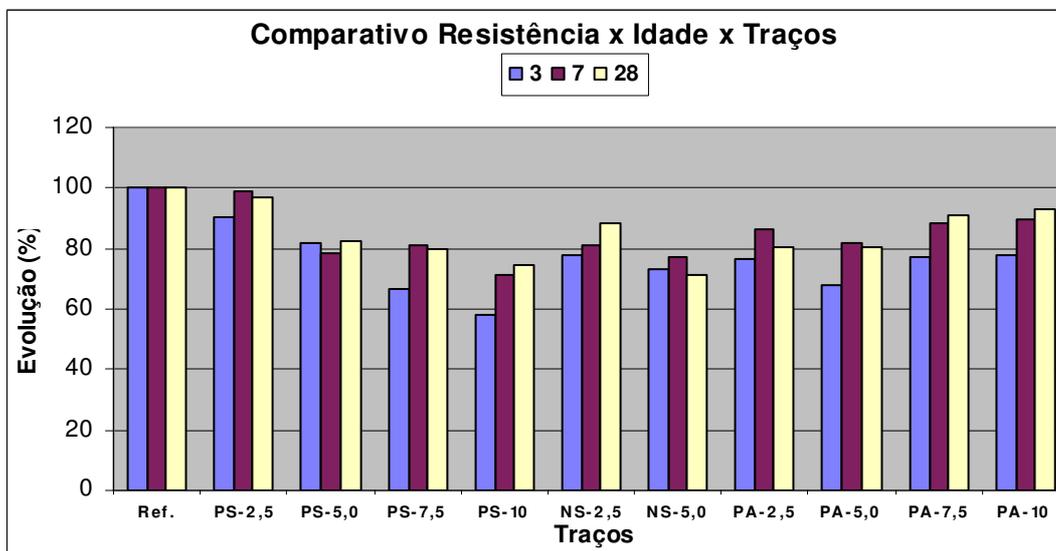


Figura 5-16 - Evolução das resistências médias à compressão X Idade - Traços PS, NS e PA, ensaios CEFET-ES.

A adição de resíduo de lã de vidro retarda as reações de hidratação do concreto, sugerindo ocorrer ação pozolânica, tendo em vista que o efeito pozolânico gera aumento da resistência do concreto em idades mais avançadas, observado em Aïtcin (2000) ²⁴.

A Figura 5-17 mostra as densidades dos concretos para todos os traços estudados.

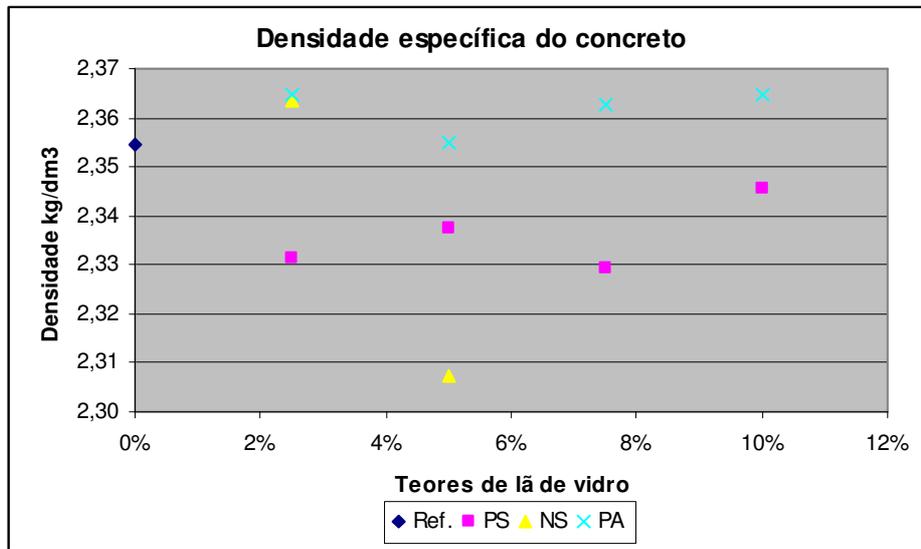


Figura 5-17 - Densidade do concreto para os traços estudados, ensaios CEFET-ES.

A Figura 5-18, mostra os resultados obtidos para a trabalhabilidade através do ensaio de Slump-test para os traços estudados.

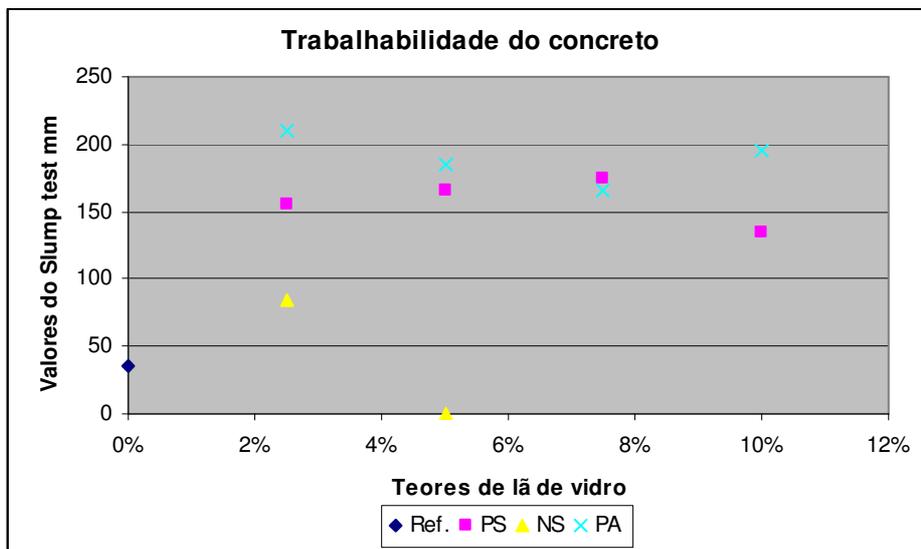


Figura 5-18 - Valores do Slump-test para os traços estudados, ensaios CEFET-ES.

Embora os valores da densidade específica do concreto estejam próximos é possível inferir que, o aumento da trabalhabilidade está relacionado com o aumento na densidade específica, com diminuição dos poros intersticiais, resultados observados também por Aïtcin (2000)²⁴ e Grande (2003)⁴³.

5.3.2 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto para resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência de tração na flexão.

Elegeram-se o traço PA-4 para o estudo do comportamento mecânico do módulo de elasticidade e da resistência de tração na flexão.

Neste item serão apresentados os resultados médios obtidos para o traço de concreto de referência e para o traço com adição de 10% de resíduo de lã de vidro, submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

5.3.2.1 - Concreto de Referência

O Traço de referência empregado nos ensaios de resistência à compressão, densidade específica, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade forneceu os resultados que são apresentados na Tabela 5-15.

Tabela 5-15 - Resultados dos ensaios para determinação do Módulo de elasticidade, Densidade específica e Resistência de tração à flexão – Traço de referência, ensaios CEFET-MG.

Idade do Ensaio	Resistência à Compressão (MPa)	Densidade Específica (kg/dm ³)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
28	16,6	2,281	3,4	22,7

Os resultados da resistência à compressão aos 28 dias, para a o traço de referência, para as duas etapas de testes foram coincidentes, embora os agregados utilizados fossem diferentes.

5.3.2.2 - Concreto com lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa

Para os ensaios com o traço com adição de 10% de resíduo pulverizado em adição à matriz de concreto, os ensaios de resistência à compressão, densidade específica, resistência de tração na flexão e módulo de elasticidade forneceram os seguintes resultados, Tabela 5-16:

Tabela 5-16 - Resultados dos ensaios para determinação do Módulo de elasticidade, Densidade específica e Resistência de tração à flexão – Traço PA-4 ensaios CEFET-MG.

Idade do Ensaio	Resistência à Compressão (MPa)	Densidade Específica (kg/dm³)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
28	16,8	2,304	3,6	27,5

5.4 - Estudo da influência da incorporação do resíduo na classificação ambiental do concreto

Os parâmetros analisados para os extratos solubilizados dos corpos-de-prova ficaram dentro dos limites especificados pelas ABNT NBR 10004 (2004)² e NBR 10004 (1987), mostrando que o PA-4 não é um resíduo perigoso. Os resultados físicos apresentados na Tabela 5-17 foram favoráveis, portanto o uso do resíduo não gera riscos ambientais.

Tabela 5-17 - Resultado solubilização para os traços de referência e PA-4, ensaio USP.

Identificação da Amostra	Mn	Fe	Al	Limite detecção
Lã de vidro	<0,01	<0,01	<0,01	mg/L <0,01
Referência	<0,01	<0,01	<0,01	mg/L <0,01

6 - CONCLUSÕES

De acordo com os dados apresentados no Capítulo anterior, podem-se tirar algumas conclusões sobre a incorporação da lã de vidro na fabricação de concreto:

Para os ensaios utilizando resíduo de lã de vidro pulverizada em substituição ao aglomerante, traços PS:

- Observou-se um aumento da trabalhabilidade com a adição do resíduo pulverizado, alcançando o máximo de 400% em PS-3, sendo o menor valor 286% em PS-4.
- A propriedade resistência à compressão aos 28 dias de idade teve redução constante nos diversos traços, o parâmetro Evolução registrou 97% para PS-1 alcançando o menor valor em PS-4 com 75% do traço de referência. Quanto maior o teor de substituição menor a resistência à compressão aos 28 dias de idade;
- O decréscimo constante na resistência à compressão, observado para os valores com substituição superiores a 2,5%, determinam este como o limite para a substituição do aglomerante por resíduo pulverizado.

Para os ensaios utilizando substituição do aglomerante por lã de vidro natural, traços NS:

- A Substituição de lã de vidro natural no traço NS-1 apresentou um acréscimo na trabalhabilidade atingindo 143% do traço de referência, no entanto, para teores superiores a 2,5%, a substituição do aglomerante por lã de vidro natural não ofereceu trabalhabilidade satisfatória para as misturas;
- A redução na resistência à compressão aos 28 dias de idade para os traços NS foi superior aos resultados apresentados nas misturas com resíduo pulverizado PS; em NS-2 houve uma redução da resistência à compressão de 28%;

Para os ensaios utilizando a adição de lã de vidro pulverizada, traços PA:

- O resíduo pulverizado em adição ao aglomerante apresentou um aumento na trabalhabilidade das misturas. O traço PA-1 apresentou o maior valor atingindo o corresponde a 500% acima do traço de referência. Os demais traços também obtiveram valores elevados para a trabalhabilidade ente 370% e 450%;
- A adição de resíduo reduz a resistência à compressão aos 28 dias, em PA-1 e PA-2 os valores para o parâmetro Evolução apontam para aproximadamente 80% da resistência do traço de referência, enquanto que em PA-3 e PA-4 ocorreu uma recuperação atingindo 90% do traço de referência;
- A lã de vidro em adição á matriz de concreto, PA-4, apresentou um ganho de 22% no resultado do módulo de elasticidade;
- A lã de vidro em adição á matriz de concreto, PA-4, não interferiu de maneira considerável nos resultados da resistência de tração na flexão do concreto;

Em função dos dados, pode-se afirmar que o resíduo moído ou pulverizado em adição ou em substituição atua como superplastificante.

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A disposição de um resíduo em um aterro industrial cria um passivo ambiental para as indústrias a longo prazo, pois são responsáveis pelo monitoramento e pelos cuidados com o aterro por longos anos. Os trabalhos de disposição dos resíduos geram gastos financeiros com a remoção, transporte e acondicionamento dos mesmos.

A incorporação de resíduos industriais no concreto é amplamente utilizada e traz benefícios do ponto de vista ambiental, proporcionando redução na utilização de novos recursos naturais, ocasionando aumento da vida útil dos aterros industriais, além de eliminar os riscos ambientais causados pela manipulação desses resíduos.

Os conhecimentos obtidos através do desenvolvimento desta dissertação podem ser consideravelmente ampliados. A seguir são apresentadas algumas sugestões de estudos que são fundamentais para a consolidação desta nova linha de pesquisa:

- Estudar argamassas modificadas com lã de vidro;
- Estudar a mistura de lã de vidro natural para a produção de concreto poroso.
- Influência da adição de lã de vidro nas propriedades mecânicas, para uso em concretos de alto desempenho;
- Estudar a porosidade de concretos modificados pela adição ou substituição do resíduo;
- Análises microestruturais do concreto para elucidação do acréscimo do módulo de elasticidade;
- Ensaio de penetração de íons de cloreto, de carbonatação, de porosimetria por intrusão de mercúrio para esclarecimento do comportamento desta incorporação;
- Estudos de novos cimentos com acréscimo de resíduo moído;
- Alteração no fator água/cimento das misturas pesquisadas;
- Avaliação da influência da granulometria, forma e textura dos agregados miúdos e graúdos nas propriedades dos concretos modificados com lã de vidro;

- Avaliação do desempenho do concreto com adição de lã de vidro utilizando como agregado miúdo a areia britada de rocha;
- Com relação ao resíduo é necessário estudar outros processos para a sua pulverização;
- Maiores proporções de adições do resíduo pulverizado, acima de 10% da massa do cimento, incluindo estudos com redução no fator água/cimento.

8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ¹ AMBIENTE, Ministério do Meio. **Agenda 21**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 02 jul. 2006.
- ² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ⁴ MAROUN, Christianne Arraes. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos: Guia de Procedimento passo a passo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Gma, 2006.
- ⁵ AMBIENTE, Ministério do Meio. **Resolução N°313**: Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 01 jul. 2006.
- ⁶ MONTEIRO, José Henrique Penido et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: Sedu, 2001. 204 p.
- ⁷ ROBALLO, Rosilma Mirtes dos Santos. **Panorama da gestão ambiental e desenvolvimento sustentável**. Cadernos Faceca, Campinas, p.99-103, 2003. Semestral.
- ⁸ PORTAL METÁLICA (Brasil). **Isolamento térmico e acústico: Lã de vidro**. Disponível em <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=544>. Acesso em: 10 de jul. de 2006.
- ⁹ MOURA, Washington Almeida. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- ¹⁰ RIBEIRO, Carmen Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**. Belo Horizonte: 2000. 96 p.
- ¹¹ BUEST NETO, Guilherme Teodoro. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- ¹² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211: **Agregado para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.
- ¹³ BRASIL, Antônio Fernando da Silva Rodrigues. Departamento Nacional de Produção Mineral (Org.). **Sumário Mineral**. Brasília, 2006. 200 p.
- ¹⁴ GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos do clínquer Portland**. 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Minerais e Hidrogeologia, Departamento de Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

- ¹⁵ SILVOSO, Marcos Martinez. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéricos**. 2003. 169 f. Tese (Doutor) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Coope, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Cap. 7.
- ¹⁶ MENTHA, P K; MONTEIRO, P J M. **Concreto - Estruturas, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994, 573p.
- ¹⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7225: **Materiais de pedra e agregados naturais**. Rio de Janeiro, 1993.
- ¹⁸ ARAUJO, R. C. L. ; RODRIGUES, E. H. V. ; FREITAS, E. G. A. **Materiais de Construção** - Coleção Construções Rurais 1. 1ª. ed. Seropédica-RJ: Editora Universidade Rural, 2000. v. 1. 203 p.
- ¹⁹ LEONARDO, C. R. T., **Estudo de Concreto de Alto Desempenho visando Aplicação em Reparos Estruturais**. 2002. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação Em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná.
- ²⁰ CONCRETAGEM, Associação Brasileira Das Empresas de Serviços de. **Manual do Concreto Dosado em Central**. Disponível em: <<http://www.abesc.org.br/>>. Acesso em: 03 jul. 2006.
- ²¹ SILVA, Carlos Adriano Rufino da. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Estado de São Paulo, Ilha Solteira, 2004.
- ²² DODSON, V.H., **Concrete admixtures**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- ²³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653: **Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.
- ²⁴ AÏTCIN, P.-C. **Concreto de Alto Desempenho**. Editora Pini. São Paulo, 2000.
- ²⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- ²⁶ NEVILLE, Adam Matthews. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador E. Giamusso. Editora PINI. São Paulo, 1997.
- ²⁷ PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **Estrutura de Concreto**. São Paulo: USP – EESC – Dep. Eng. de Estruturas, 2004.
- ²⁸ LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Cap. 6.
- ²⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

- ³⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739: **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- ³¹ TAYLOR, G.D. **Construction Materials**. Longman Scientific & Technical, 1991.
- ³² ARAÚJO, J. M. . **O módulo de deformação longitudinal do concreto**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande, n. 1, p. 9-16, 2000.
- ³³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522: **Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama - Tensão-deformação**. Rio de Janeiro, 2003.
- ³⁴ HELENE, Paulo R.L. **Estudo da Variação do Módulo de Elasticidade do Concreto com a Composição e características do Concreto Fresco e Endurecido**. Relatório Técnico do Convênio EPUSP-CPqDCC/ABCP, n.10.122, 1998.
- ³⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: **Projetos em estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2003.
- ³⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222: **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1993.
- ³⁷ DURANTE, Rogério. **Concreto - Qualidade, Classificação e Propriedades: Notas de Aula - Materiais de Construção 2**. Limeira: Ceset /Unicamp, 2000. 67 p. Disponível em: <<http://www.ceset.unicamp.br>>. Acesso em: 02 jul. 2006.
- ⁴¹ ALMEIDA, I R. **Superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos**. *Téchne*, São Paulo, v. 1, n. 24, p.30-33, set-out 1996. Bimestral.
- ⁴² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13956: **Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ⁴³ GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Departamento de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ⁴⁴ FREITAS JUNIOR, José de Almendra. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- ⁴⁵ RAEDER FILHO, Marcos. **Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR)**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- ⁴⁶ BOURGUIGNON, Kátia Maria Brunoro Grilo. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 153 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

⁴⁷ JOHN, Vanderley M. **Cimentos com escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

⁴⁸ NITA, Clovis. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

⁴⁹ PINHEIRO, L. M. ; ACCETTI, Kristiane Mattar . **Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42, 2000, Fortaleza, 2000.

⁵⁰ ZATERRA, Ademir J; CARVALHO, Glaucio de Almeida; FREIRE, Estevão. **Reuso de resíduos de laminados de fibra de vidro na construção civil**. Caxias do Sul: Ucs, 2000. 15p.

⁵¹ MAJUMDAR, A. J.; RYDER, J. F. **Glassfibre Reinforcement for Cement Products**, Glass Technology, 9, p.78-84, 1986.

⁵² MAJUMDAR, A.J.; NURSE, R.W. **Glass Fibre Reinforced Cement**, Materials Science and Engineering, Vol. 15, p. 107-127, 1974.

⁵³ LAGUNA, O; A PALOMARES; ALMARAZ, J S. **Reciclado de resíduos sólidos urbanos**. Revista de Plásticos Modernos, Madrid, v. 1, n. 36, p.491-498, 1978. Anual.

⁵⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

⁵⁵ PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Departamento de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

⁵⁶ SALVASTANO JÚNIOR, Holmer. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland**. 1992. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Departamento de Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

⁵⁷ LÓPEZ, Diosnel Antonio Rodriguez; AZEVEDO, C.A.P.. **Avaliação da utilização de vidro cominuído como material agregado ao concreto**. in: 22º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: Abes, 2003. v. 1. p. 1-8.

⁵⁸ FUJIKAWA, E. S. **Incorporação do resíduo “serragem cromada” em materiais de construção civil**. Bauru, 2002. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

- ⁵⁹ HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; JOUKOSKI, A. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental.** Química Nova, v. 29, p. 79-84, 2006.
- ⁶⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776: **Determinação da massa específica de agregados miúdo por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 2004.
- ⁶¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7219: **Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ⁶² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ⁶³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12821: **Preparação de concreto em laboratório.** Rio de Janeiro, 1993.
- ⁶⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007: **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ⁶⁵ RIBEIRO, Cléa M. da Cunha. Dados CPIII 40 RS. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <paulo.roberto.borges@gmail.com> em: 14 mar. 2007.

APÊNDICES

1 - Resultados dos ensaios mecânicos.

1.1 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto para os ensaios realizados no CEFET-ES.

Para o concreto no estado endurecido foram utilizados cinco corpos-de-prova nas dimensões 100x200mm, para cada idade (3, 7 e 28 dias). A seguir são fornecidos os resultados da resistência á compressão para cada idade.

✓ Concreto de Referência.

Para a dosagem com o traço de referência o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice A:

Apêndice A - Resultado do ensaio de tronco de cone para o concreto de referência.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	35

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice B.

Apêndice B - Resistência à compressão – Concreto de referência.

Nº Cp	Idade do ensaio	f _{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	3	7,0*	7,94	0,20
2	3	7,7		
3	3	8,1		
4	3	8,1		
5	3	8,0		
6	7	11,0	11,33	0,42
7	7	10,3*		
8	7	11,8		
9	7	11,6		
10	7	11,0		
11	28	13,9*	16,68	0,72
12	28	16,1		
13	28	18,4*		
14	28	16,5		
15	28	17,5		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 2,5% de lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa, PS-2,5.

Para a dosagem com o traço com substituição de 2,5% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice C.

Apêndice C - Ensaio de tronco de cone para o concreto PS-2,5.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	155

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice D.

Apêndice D - Resistência à compressão – Concreto PS-2,5.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
16	3	7,2	7,14	0,27
17	3	7,0		
18	3	7,3		
19	3	6,8		
20	3	7,5		
21	7	11,7	11,23	0,46
22	7	9,9*		
23	7	10,6		
24	7	11,3		
25	7	11,3		
26	28	17,5*	16,16	0,38
27	28	15,8		
28	28	16,2		
29	28	16,5		
30	28	18,3*		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 5,0% de lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa, PS-5,0.

Para a dosagem com o traço com substituição de 5,0% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice E.

Apêndice E - Ensaio de tronco de cone para o concreto PS-5,0.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	165

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice F.

Apêndice F - Resistência à compressão – Concreto PS-5,0.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
31	3	6,8		
32	3	5,8*		
33	3	6,1	6,49	0,28
34	3	6,6		
35	3	6,5		
36	7	9,2		
37	7	8,7		
38	7	8,4	8,87	0,37
39	7	9,2		
40	7	9,9*		
41	28	12,5*		
42	28	15,2*		
43	28	13,5	13,7	0,24
44	28	13,6		
45	28	14,0		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 7,5% de lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa, PS-7,5.

Para a dosagem com o traço com substituição de 7,5% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice G.

Apêndice G - Ensaio de tronco de cone para o concreto PS-7,5.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	175

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice H.

Apêndice H - Resistência à compressão – Concreto PS-7,5.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
46	3	5,3		
47	3	5,4		
48	3	5,1	5,26	0,17
49	3	5,8*		
50	3	6,0*		
51	7	9,0		
52	7	9,2		
53	7	9,0	9,22	0,25
54	7	9,6		
55	7	9,3		
56	28	13,1		
57	28	13,2		
58	28	12,6	13,27	0,55
59	28	14,1		
60	28	13,4		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 10,0% de lã de vidro pulverizada, substituindo o cimento em relação à sua massa, PS-10,0.

Para a dosagem com o traço com substituição de 10,0 % de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice I.

Apêndice I - Ensaio de tronco de cone para o concreto PS-10,0.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	135

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice J.

Apêndice J - Resistência à compressão – Concreto PS-10,0.

N° Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
61	3	4,4		
62	3	4,7		
63	3	4,6	4,61	0,14
64	3	4,5		
65	3	4,7		
66	7	9,1*		
67	7	8,2		
68	7	8,4	8,09	0,25
69	7	8,0		
70	7	7,8		
71	28	12,7		
72	28	12,4		
73	28	12,8	12,47	0,43
74	28	11,8		
75	28	12,8		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 2,5% de lã de vidro natural, substituindo o cimento em relação à sua massa, NS-2,5.

Para a dosagem com o traço com substituição de 2,5% de lã de vidro natural, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice K

Apêndice K - Ensaio de tronco de cone para o concreto NS-2,5.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	85

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice L.

Apêndice L - Resistência à compressão – Concreto NS-2,5.

N° Cp	Idade do ensaio	f _{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
76	3	6,0		
77	3	6,4		
78	3	6,1	6,19	0,18
79	3	6,3		
80	3	6,2		
81	7	9,3		
82	7	9,4		
83	7	9,5	9,21	0,37
84	7	10,3*		
85	7	8,7		
86	28	14,2		
87	28	15,0		
88	28	14,4	14,72	0,40
89	28	14,9		
90	28	15,1		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 5,0% de lã de vidro natural, substituindo o cimento em relação à sua massa, NS-5,0.

Para a dosagem com o traço com substituição de 5,0% de lã de vidro natural, o ensaio de abatimento do tronco de cone, forneceu o seguinte resultado, Apêndice M.

Apêndice M - Ensaio de tronco de cone para o concreto NS-5,0.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	0,0

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para a adição de 5% com lã de vidro natural, são apresentados no Apêndice N

Apêndice N - Resistência à compressão – Concreto NS-5,0.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
91	3	4,7*		
92	3	5,6		
93	3	5,8	5,79	0,22
94	3	4,5*		
95	3	6,0		
96	7	8,5		
97	7	7,9*		
98	7	9,1	8,72	0,31
99	7	8,6		
100	7	7,3*		
101	28	11,4		
102	28	12,4		
103	28	12,6	11,93	0,60
104	28	11,9		
105	28	11,3		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 2,5% de lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa, PA-2,5.

Para a dosagem com o traço com adição de 2,5% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice O.

Apêndice O - Ensaio de tronco de cone para o concreto PA-2,5.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	210

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice P.

Apêndice P - Resistência à compressão – Concreto PA-2,5.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
136	3	6,0		
137	3	6,7*		
138	3	6,0	6,09	0,13
139	3	6,1		
140	3	6,3		
141	7	10,1		
142	7	9,4		
143	7	11,4*	9,75	0,52
144	7	9,2		
145	7	10,3		
146	28	13,0		
147	28	17,3*		
148	28	14,4	13,46	0,82
149	28	14,7*		
150	28	13,0		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 5,0% de lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa, PA-5,0.

Para a dosagem com o traço com adição de 5,0% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice Q.

Apêndice Q - Ensaio de tronco de cone para o concreto PA-5,0.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	185

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice R.

Apêndice R - Resistência à compressão – Concreto PA-5,0.

N° Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
151	3	5,6		
152	3	5,2		
153	3	5,3	5,39	0,16
154	3	5,3		
155	3	5,6		
156	7	9,3		
157	7	8,4*		
158	7	9,3	9,24	0,09
159	7	9,2		
160	7	9,1		
161	28	13,1		
162	28	13,6		
163	28	13,9	13,36	0,39
164	28	13,1		
165	28	13,1		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 7,5% de lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa.

Para a dosagem com o traço com adição de 7,5% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice S.

Apêndice S - Ensaio de tronco de cone para o concreto PA-7,5.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	165

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice T.

Apêndice T - Resistência à compressão – Concreto PA-7,5.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
166	3	6,2		
167	3	6,0		
168	3	6,3	6,10	0,16
169	3	6,0		
170	3	6,6*		
171	7	9,9		
172	7	11,0*		
173	7	9,7	9,98	0,24
174	7	10,3		
175	7	10,1		
176	28	15,5		
177	28	15,3		
178	28	13,2*	15,14	0,44
179	28	13,8*		
180	28	14,6		

* Controle estatístico.

- ✓ Concreto com 10,0% de lã de vidro pulverizada, adicionada ao cimento em relação à sua massa, PA-10,0.

Para a dosagem com o traço com adição de 10,0% de lã de vidro pulverizada, o ensaio de abatimento do tronco de cone forneceu o seguinte resultado, Apêndice U.

Apêndice U - Ensaio de tronco de cone para o concreto PA-10,0.

Propriedade	mm
Abatimento do tronco de cone	195

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Apêndice V.

Apêndice V - Resistência à compressão – Concreto de PA-10,0.

Nº Cp	Idade do ensaio	fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
181	3	6,0	6,15	0,19
182	3	6,0		
183	3	6,3		
184	3	6,4		
185	3	6,7*		
186	7	10,2	10,18	0,22
187	7	10,5		
188	7	9,9		
189	7	10,3		
190	7	10,1		
191	28	15,2	15,5	0,64
192	28	13,5		
193	28	15,8		
194	28	16,2		
195	28	14,8		

* Controle estatístico.

1.2 - Influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto para os ensaios realizados no CEFET-MG.

O Apêndice W e o Apêndice X, apresentam os dados para o ensaio de módulo de elasticidade realizados no traço de referência e no traço PA-10,0.



LABORATÓRIO DE CONCRETO - HOLCIM PL

ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Data do ensaio:	5/6/2007	Idade	Tensão média (MPa)
Identificação:	PROF. PAULO CEFET_MG	28	16,4

1ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		1	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada σ_n (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica ϵ_n (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,6	1290	1200	1,5	0,005000	0,000050	20,37
	20	3,3	2580	2600	3,3	0,013000	0,000130	21,55
	30	4,9	3870	3800	4,8	0,019000	0,000190	22,79
	40	6,6	5160	5200	6,6	0,028000	0,000280	21,83
	50	8,2	6450	6400	8,1	0,037000	0,000370	20,65
	60	9,9	7740	7800	9,9	0,046000	0,000460	20,49
	70	11,5	9030	9000	11,5	0,057000	0,000570	19,21
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	15400			
				Tensão de ruptura (MPa)	19,6			

2ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		2	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada σ_n (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,6	1290	1200	1,5	0,003000	0,000030	33,96
	20	3,3	2580	2600	3,3	0,008000	0,000080	35,02
	30	4,9	3870	3800	4,8	0,015000	0,000150	28,86
	40	6,6	5160	5200	6,6	0,026000	0,000260	23,51
	50	8,2	6450	6400	8,1	0,035000	0,000350	21,83
	60	9,9	7740	7800	9,9	0,047000	0,000470	20,05
	70	11,5	9030	9000	11,5	0,059000	0,000590	18,56
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	15000			
				Tensão de ruptura (MPa)	19,1			

2ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		3	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,6	1290	1200	1,5	0,004000	0,000040	25,47
	20	3,3	2580	2600	3,3	0,010000	0,000100	28,01
	30	4,9	3870	3800	4,8	0,016000	0,000160	27,06
	40	6,6	5160	5200	6,6	0,027000	0,000270	22,64
	50	8,2	6450	6400	8,1	0,035000	0,000350	21,83
	60	9,9	7740	7800	9,9	0,046000	0,000460	20,49
	70	11,5	9030	9000	11,5	0,056000	0,000560	19,56
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	15600			
				Tensão de ruptura (MPa)	19,9			

RESULTADOS

Cálculo de Módulo (E)		Módulo de elasticidade médio (GPa)			
$E_{sec,n} = \frac{\sigma_n - 0,5}{\epsilon_n - \epsilon_{0,5}}$	$E_{sec,1}$	26,60	$E_{sec,5}$	21,44	
	$E_{sec,2}$	28,19	$E_{sec,6}$	20,34	
	$E_{sec,3}$	26,24	$E_{sec,7}$	19,11	
	$E_{sec,4}$	22,66			

Observações:

Operador:	Geraldo Gonçalves	Supervisor:	Flávio Capuruço	Engº Responsável	Marcelo Singulani
-----------	-------------------	-------------	-----------------	------------------	-------------------

Apêndice W - Resultado do ensaio do módulo de elasticidade traço de Referência, ensaios realizados no CEFET-MG.



LABORATÓRIO DE CONCRETO - HOLCIM PL

ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Data do ensaio:	5/6/2007	Idade	Tensão média (MPa)
Identificação:	PROF. PAULO CEFET_MG	28	16,8

1ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		1	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada σ_n (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica ϵ_n (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,7	1320	1400	1,8	0,003000	0,000030	42,45
	20	3,4	2640	2600	3,3	0,007000	0,000070	40,02
	30	5,0	3960	4000	5,1	0,012000	0,000120	38,20
	40	6,7	5280	5200	6,6	0,020000	0,000200	30,56
	50	8,4	6600	6600	8,4	0,034000	0,000340	23,22
	60	10,1	7920	8000	10,2	0,056000	0,000560	17,28
	70	11,8	9240	9200	11,7	0,077000	0,000770	14,55
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	12400			
				Tensão de ruptura (MPa)	15,8			

2ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		2	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada σ_n (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica ϵ_n (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,7	1320	1400	1,8	0,005000	0,000050	25,47
	20	3,4	2640	2600	3,3	0,010000	0,000100	28,01
	30	5,0	3960	4000	5,1	0,016000	0,000160	28,65
	40	6,7	5280	5200	6,6	0,023000	0,000230	26,58
	50	8,4	6600	6600	8,4	0,032000	0,000320	24,67
	60	10,1	7920	8000	10,2	0,044000	0,000440	22,00
	70	11,8	9240	9200	11,7	0,061000	0,000610	18,37
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	14200			
				Tensão de ruptura (MPa)	18,1			

2ª Determinação	Ciclo de carregamento				Corpo de prova nº:		3	
	Carga (% Carga de ruptura)	Tensão (MPa)	Carga (kgf)	Carga utilizada (kgf)	Tensão utilizada (MPa)	Deformação (mm)	Deformação específica (mm/mm)	Módulo de elasticidade $E_{sec,n}$ (Gpa)
	n x 10	0,5	400	400	0,5	0,000000	0,000000	
	10	1,7	1320	1400	1,8	0,006000	0,000060	21,22
	20	3,4	2640	2600	3,3	0,012000	0,000120	23,35
	30	5,0	3960	4000	5,1	0,017000	0,000170	26,97
	40	6,7	5280	5200	6,6	0,024000	0,000240	25,47
	50	8,4	6600	6600	8,4	0,032000	0,000320	24,67
	60	10,1	7920	8000	10,2	0,042000	0,000420	23,04
	70	11,8	9240	9200	11,7	0,051000	0,000510	21,97
Após o ensaio de módulo				Carga de ruptura (N)	16400			
				Tensão de ruptura (MPa)	20,9			

RESULTADOS

Cálculo de Módulo (E)		Módulo de elasticidade médio (GPa)			
$E_{sec,n} = \frac{\sigma_n - 0,5}{\epsilon_n - \epsilon_{0,5}}$	$E_{sec,1}$	29,71	$E_{sec,5}$	23,33	
	$E_{sec,2}$	30,46	$E_{sec,6}$	22,48	
	$E_{sec,3}$	31,27	$E_{sec,7}$	22,18	
	$E_{sec,4}$	27,53			

Observações:			
Operador:	Geraldo Gonçalves	Supervisor:	Flávio Capuruço
Engº Responsável	Marcelo Singulani		

Apêndice X - Resultado do ensaio do módulo de elasticidade traço PA-10,0, ensaios realizados no CEFET-MG.

- ✓ Resultados para o ensaio de solubilização de resíduos.

O Apêndice Y apresenta o relatório da espectrofotometria AA para o traço de referência e para o traço PA-10,0, realizados para o ensaio de solubilização.

CELQA - Análises Técnicas Ltda.

Laboratório de Química Analítica - Registro no C.R.Q. No 14.594-F - Quarta Região

RELATÓRIO DE ANALISE QUÍMICA

SOLICITAÇÃO	D-06865 - 01	ENTRADA = 18/05/07	SAÍDA = 28/05/07
SOLICITANTE	ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO		
ENDEREÇO	AV. PROF. MELO MORAES, 2.463 – CIDADE UNIVERSITÁRIA SÃO PAULO – 05508-900 – FONE 11-3818-5240 - FAX: 11-3818-5421		
INTERESSADO	PROF JORGE TENÓRIO. DOMINIQUE A.C. LUIZ H.D.C.		

Nº CELQA	IDENTIFICAÇÃO AMOSTRA	Mn	Fe	Al		LIMITE DETECÇÃO
26.032	LÃ	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mg/L	0,01 mg/L
26.033	REFERENCIA	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mg/L	0,01 mg/L

Estes resultados têm significação restrita e refere-se a amostra recebida.

DETERMINADO POR ESPECTROFOTOMETRIA AA.

José Carlos Machado de Almeida.

CRQ Nº 04.404.512-4ª Região

Apêndice Y - Resultado solubilização para os traços de referência e PA-10,0, ensaios realizados na USP.