

LUCIANA NASCIMENTO LINS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA CASCA DE CAFÉ NA INDÚSTRIA DA
CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Tecnologia das construções.

Orientador: Prof. PROTASIO FERREIRA E CASTRO, PH.D

Niterói – RJ

2006

LUCIANA NASCIMENTO LINS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA CASCA DE CAFÉ NA INDÚSTRIA DA
CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Tecnologia das construções.

Aprovada em 25 de janeiro de 2006

BANCA EXAMINADORA

Prof. Protasio Ferreira e Castro, Ph.D. – Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof. Orlando Celso Longo, D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Josué Setta, D. Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Niterói – RJ
2006

Ao

Meu marido, minhas filhas, meus pais, à tia Carol e meus sogros

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram para a sua realização, em especial:

Ao Núcleo de Estudos e Projetos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pela liberação parcial do trabalho para a realização do curso.

A Universidade Federal Fluminense e ao Programa de Engenharia Civil, pelo curso oferecido.

Ao Prof. Protasio Ferreira Castro, pelo apoio, estímulo e orientação ao longo de todo o trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas observações e sugestões.

A todos os professores, alunos e funcionários do Programa de Engenharia Civil.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo ao longo de toda a minha vida de estudos.

À Tia Carol que viabilizou mais esta etapa alcançada já que foi a segunda mãe das minhas filhas durante toda a minha ausência.

Ao meu marido e minhas filhas, pelo apoio, incentivo e resignação durante todo o curso.

À toda Equipe do Laboratório da UERJ, instituição na qual foi realizada grande parte dos ensaios, onde tive o apoio necessário dos engenheiros Antônio Inácio, Gustaff e Rogério Feijó, chefes dos Laboratórios de Civil, Mecânica e Solos, respectivamente, e de todos os funcionários: Valmir, Paulo Almeida, Paulo Inácio, Joãozinho, Procópio, Gilbertinho, Rubens, Joacil, Roberto, Adelino, Ademar, Santos, Jorge, Wilson, enfim, todos aqueles que me ajudaram.

Aos engenheiros e amigos de trabalho Eduardo Kaiser, Ana Paula, Verônica e Liege.

Aos Professores Moacyr, Pimenta e Maurício Rey.

Aos funcionários do Grupo Holcim pelo tempo a mim disponibilizado em reuniões, bem como por alguns ensaios realizados, especialmente ao engenheiro Abílio e ao laboratorista Régis.

Aos engenheiros Fábio e Thiago da Construtora Pinto de Almeida que disponibilizaram seus profissionais de carpintaria para a realização dos serviços necessários.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO	6
LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
RESUMO	16
ABSTRACT	17
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Noções Gerais	18
1.2 Motivação para o trabalho.....	19
1.3 Objetivo do trabalho	21
1.4 Metodologia utilizada	22
1.5 Organização do trabalho.....	24
2 A CAFEICULTURA NO BRASIL E NO MUNDO	25
2.1 A produção de café no mundo	25
2.2 A produção de café no Brasil	26
3 CIMENTO PORTLAND	30
3.1 A história do cimento.....	30
3.2 Composição do Cimento Portland	32
3.2.1 Fabricação do clínquer Portland	32
3.2.2 Extração e preparo da mistura crua	33
3.2.3 Dosagem da mistura crua	34
3.2.4 Homogeneização	35
3.2.5 Clinquerização	35
3.2.6 Esfriamento	36
3.2.7 Adições	38
3.3 Composição Química do Cimento Portland	40
3.4 Composição Mineralógica do Clínquer Portland	42
3.5 Reações de hidratação dos compostos do clínquer	43
3.6 Cristalização	44
3.7 Classes de Resistência.....	45
3.8 Principais propriedades dos diversos tipos de cimento Portland	46

3.9	Principais tipos de Cimento Portland	48
3.9.1	Cimento Portland Comum , CP I.....	49
3.9.2	Cimento Portland Composto , CP II	50
3.9.3	Cimento Portland de Alto FORNO, CP III	51
3.9.4	Cimento Portland Pozolânico, CP IV.....	52
3.9.5	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V	52
3.9.6	Cimento Portland resistente aos sulfatos.....	53
3.9.7	Cimentos Portland de baixo calor de hidratação.....	53
3.9.8	Cimento Portland Branco, CP B.....	54
4	ARGAMASSAS	55
4.1	Componentes das argamassas	55
4.2	Tipos de argamassas.....	55
4.3	Ensaio das argamassas	56
5	TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	59
5.1	Histórico	59
5.2	Fabricação dos tijolos solo-cimento	60
5.3	Vantagens no emprego dos tijolos de solo-cimento.....	61
5.4	O tipo de solo.....	62
6	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	65
6.1	Introdução	65
6.2	Características dos materiais.....	67
6.2.1	Massa Específica.....	68
6.2.2	Massa Unitária	69
6.2.3	Granulometria	71
6.3	Utilização da casca do café <i>in natura</i> na indústria cimenteira como fonte geradora de energia	76
6.4	Verificação das características pozolânicas das cinzas nas argamassas...78	
6.4.1	Argamassa com relação água/aglomerante constante	81
6.4.2	Argamassa com relação água/aglomerante variável	84
6.5	Tijolos de solo/cimento/RESÍDUO	86
6.5.1	Produção dos tijolos.....	89
6.5.2	Determinação da resistência à compressão e da absorção de água dos tijolos de solo/cimento/RESÍDUO.....	91
6.5.2.1	Ensaio à compressão simples.....	91
6.5.2.2	Ensaio de absorção de água.....	95
6.6	Análises Estatísticas dos resultados	96
6.6.1	Argamassa com relação água/aglomerante constante	96
6.6.1.1	Análise da influência da temperatura de queima das cinzas da casca do café	100
6.6.1.2	Análise da influência da secagem dos corpos de prova na estufa	101
6.6.2	Argamassa com relação água/aglomerante variável	105
6.6.2.1	Análise da influência da secagem dos corpos de prova na estufa	106
6.6.2.2	Análise da utilização da cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland	108
6.6.2.3	Análise da influência da temperatura de queima das cinzas da casca do café	109
6.6.2.4	Análise da influência da relação água/aglomerante	110
6.6.2.5	Análise da influência da secagem na estufa para os diferentes traços	111
6.6.3	Determinação de atividade pozolânica	114

6.6.4	Determinação da água requerida.....	116
6.6.5	Tijolos de solo/cimento/resíduo.....	117
6.6.6	Análise dos efeitos da substituição da areia por cinza.....	121
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
7.1	Sugestões.....	129
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Peneira de malha quadrada
A	Absorção
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ág/aglom	Relação água/aglomerante
A _{req}	Água requerida
ARI	Alta Resistência Inicial
ARS	Alta resistência a sulfatos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCC	Cinza da casca do café
CEPLAC	Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CP “nº”	Corpo de prova “número”
CP B	Cimento Portland Branco
CP I	Cimento Portland Simples – Tipo I
CP II - E	Cimento Portland Composto – Tipo II com adição de Escória
CP II - F	Cimento Portland Composto – Tipo II com adição de Fíler
CP II - Z	Cimento Portland Composto – Tipo II com adição de Pozzolana
CP IV	Cimento Portland Pozzolânico
CP V - ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CREA	Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia
EB	Especificação Brasileira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
fc _A	Resistência média à compressão do cimento aos 28 dias de idade
fc _B	Resistência média à compressão do material pozolânico aos 28 dias de idade
FEBEC	Federação Brasileira dos Exportadores de Café
gl	Graus de liberdade
I _{ap}	Índice de atividade pozolânica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Lim Inf	Limite inferior
Lim Sup	Limite superior
M	Massa
MAF	Módulo de alumina-ferro
MC	Microcimento
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MH	Módulo hidráulico
MQ	Média Quadrática
MS	Módulo de sílica
M_s	Massa do material seco
M_{sat}	Massa do material saturado
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
OIC	Organização Internacional do Café
PH	Potencial hidrogeniônico
PI	Pega instantânea
Rc	Resistência à compressão
REIBRAC	Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto
RS	Resistente a sulfatos
SC	Solo-Cimento
SCR	Solo-Cimento-Resíduo
SQ	Soma Quadrática
Tipo G	Cimento para poços petrolíferos
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFF	Universidade Federal Fluminense
USDA	United States Department of Agriculture
V	Volume
δ_c	Massa específica do cimento
δ_p	Massa específica do material pozolânico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição percentual da produção mundial de café entre os anos de 1994 e 2001	21
Figura 1.2 - Alguns dos ensaios realizados	23
Figura 1.3 - Esquema demonstrando as três etapas do trabalho de acordo com a metodologia.	24
Figura 3.1 - Materiais constituintes do cimento	32
Figura 3.2:- Fluxo do processo para obtenção do cimento Portland	37
Figura 3.3: Finura, hidratação e crescimento das resistências dos cimentos.....	46
Figura 3.4 - Comportamento do cimento de acordo com a finura do clínquer.....	50
Figura 4.1: Cinza da casca do café após sair do forno	56
Figura 4.2: Argamassa moldada em fôrmas cilíndricas (50 x 100)mm	57
Figura 4.3: Ensaio de resistência à compressão de argamassa	58
Figura 4.4: Pesagem do corpo de prova seco em estufa.....	58
Figura 5.1: Mistura para moldar tijolos de solo/cimento.....	59
Figura 5.2: Prensa manual utilizada na moldagem dos tijolos	60
Figura 5.3: Tijolos após prensagem manual.....	60
Figura 5.4: Corpos de prova preparados para o ensaio de resistência à compressão	61
Figura 5.5: Ruptura do corpo de prova capeado.....	61
Figura 5.6: Homogeneização do solo com o cimento	63
Figura 5.7 - Teste da caixa para verificar a retração do solo.....	64
Figura 6.1 - Amostra A.....	66
Figura 6.2 - Amostra B, aspecto semelhante ao da amostra C	66
Figura 6.3 - Amostra D.....	67
Figura 6.4 - Massa Específica dos materiais em pó	68
Figura 6.5 - Massa unitária do solo	70
Figura 6.6 - Ensaio de granulometria	72
Figura 6.7 - Curvas Granulométricas das amostras B, C e D.....	73
Figura 6.8: Curva Granulométrica da areia	74
Figura 6.9: Composição granulométrica do solo.....	76
Figura 6.10 - Enchimento do molde	79
Figura 6.11 - Molde pronto para ser retirado.....	80
Figura 6.12 - Realização dos impactos	80
Figura 6.13 - Verificação da consistência	80
Figura 6.14 - Moldagem dos corpos de prova.....	82
Figura 6.15 - Corpo de prova após ser submetido ao ensaio de compressão axial	83
Figura 6.16 - Pesagem dos corpos de prova para o ensaio de absorção	83
Figura 6.17 - Homogeneização do solo	88
Figura 6.18 - Mistura mecânica na adição da cinza e do cimento.....	89

Figura 6.19 - Máquina de prensagem manual	90
Figura 6.20 - Corpos de prova após moldagem.....	90
Figura 6.21 - Comparação das resistências à compressão.....	102
Figura 6.22 - Curva da resistência a compressão média	107
Figura 6.23: Curva ajustada da resistência a compressão média.....	108
Figura 6.24 - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão	111
Figura 6.25 - Influência da relação água/aglomerante na absorção	111
Figura 6.26 - Regressão linear (resistência à compressão x % de cinza) nos tijolos solo/cimento/resíduo.....	118
Figura 6.27 - Ajustagem dos dados relativos à absorção dos tijolos solo/cimento/resíduo ...	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção de café no mundo	26
Tabela 2.2: Café Beneficiado - Safra 2004/2005 - Produção e Produtividade.....	28
Tabela 2.3: Café Beneficiado - Safra 2003/2004 - Produção e Produtividade.....	28
Tabela 2.4: Café Beneficiado - Safra 2002/2003 - Produção e Produtividade.....	29
Tabela 3.1 - Variedades Comerciais do Cimento Portland	31
Tabela 3.2: Classificação dos cimentos quanto a composição química	34
Tabela 3.3: Tratamento térmico na clínquerização	36
Tabela 3.4: Óxidos contidos no clínquer	40
Tabela 3.5: Principais compostos do clínquer e suas propriedades específicas	42
Tabela 3.6: Profundidade alcançada pela hidratação.....	45
Tabela 3.7: Valores Mínimos para resistência à compressão (MPa):.....	49
Tabela 3.8: Teores dos componentes do cimento Portland composto:.....	50
Tabela 3.9: Teores dos componentes do cimento Portland de alto-forno:	51
Tabela 3.10: Composição dos Cimentos Portland Comum, Composto, Alto Forno, Pozolânico e Alta Resistência Inicial.	53
Tabela 6.1 - Condições do ensaio da massa específica das amostras.....	69
Tabela 6.2 - Resultados obtidos no ensaio de massa específica.....	69
Tabela 6.3 -Massa Unitária das amostras B e C	70
Tabela 6.4 - Massa Unitária da amostra D	71
Tabela 6.5 - Massa Unitária da areia	71
Tabela 6.6 - Massa Unitária do solo	71
Tabela 6.7 - Granulometria das amostras B, C e D	72
Tabela 6.8 - Granulometria da areia	73
Tabela 6.9 - Determinação da umidade	74
Tabela 6.10 - Peneiramento grosso.....	75
Tabela 6.11 - Peneiramento em gramas.....	75
Tabela 6.12 - Peneiramento fino em gramas	75
Tabela 6.13 - Massa Unitária e Massa Específica das amostras	76
Tabela 6.14 - Análise da casca de café in natura calcinada a 1400°C	77
Tabela 6.15 - Poder calorífico dos principais combustíveis.....	78
Tabela 6.16 - Massa necessária para moldagem dos corpos de prova	78
Tabela 6.17 - Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova.....	81
Tabela 6.18 - Ensaio de resistência à compressão com relação água/aglomerante constante..	82
Tabela 6.19 - Ensaio de absorção de água por imersão com relação água/aglomerante constante	84
Tabela 6.20 - Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova.....	85
Tabela 6.21 - Ensaio de resistência à compressão com relação água/aglomerante variável....	85
Tabela 6.22 - Ensaio de absorção de água por imersão com relação água/aglomerante variável	

.....	85
Tabela 6.23 - Composição dos tijolos solo/cimento/cinza	86
Tabela 6.24 - Traços dos tijolos solo/cimento/cinza	87
Tabela 6.25 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço I.....	92
Tabela 6.26 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço II.....	93
Tabela 6.27 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço III	93
Tabela 6.28 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço IV	93
Tabela 6.29 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço VI.....	94
Tabela 6.30 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço VII.....	94
Tabela 6.31 - Valor médio da resistência à compressão.....	94
Tabela 6.32 - Resultados do ensaio de absorção de água.....	95
Tabela 6.33 - Absorção média dos traços.....	96
Tabela 6.34 - Resultados de resistência à compressão	96
Tabela 6.35 - Análise estatística dos ensaios de resistência à compressão	96
Tabela 6.36 - ANOVA aplicada aos ensaios de resistência à compressão.....	97
Tabela 6.37 - Resultados do teste de compressão dos corpos de prova secos em estufa (MPa)	97
Tabela 6.38 - ANOVA aplicada ao teste de compressão dos corpos de prova secos em estufa	98
Tabela 6.39 - Resultados do teste de compressão dos corpos de prova não submetidos a secagem em estufa (MPa).....	98
Tabela 6.40 - ANOVA aplicada ao teste de compressão dos corpos de prova não submetidos a secagem em estufa	99
Tabela 6.41 - Determinação da absorção de água por imersão	99
Tabela 6.42 - ANOVA aplicada à absorção de água por imersão.....	100
Tabela 6.43 - Resultados de resistência à compressão	100
Tabela 6.44 - ANOVA aplicada à temperatura de queima das cinzas	101
Tabela 6.45 - Resistência à compressão dos corpos de prova.....	101
Tabela 6.46 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 1	102
Tabela 6.47 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 2.....	103
Tabela 6.48 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 3.....	103
Tabela 6.49 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 4.....	104
Tabela 6.50 - Análise da resistência à compressão média dos 4 traços.....	104
Tabela 6.51 - Resistência à compressão das argamassas contendo cinza da casca do café ...	105
Tabela 6.52 - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas contendo cinza da casca do café	105
Tabela 6.53 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova secos em estufa	106
Tabela 6.54 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova que não foram secos em estufa.....	107
Tabela 6.55 - Análise da absorção das argamassas	108
Tabela 6.56 - Análise da influência da temperatura de queima na resistência à compressão	109
Tabela 6.57 - Influência da relação água/aglomerante sobre os resultados de resistência à compressão e absorção	110
Tabela 6.58 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 1.....	112
Tabela 6.59 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 2.....	112
Tabela 6.60 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 3.....	113
Tabela 6.61 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 4.....	113
Tabela 6.62 - Resistência à Compressão (MPa)	114

Tabela 6.63 - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento	115
Tabela 6.64 - Cálculo do desvio relativo máximo.....	115
Tabela 6.65 - Resistência a compressão média dos traços	115
Tabela 6.66 - Desvio relativo máximo	116
Tabela 6.67 - Índice de atividade pozolânica dos traços analisados	116
Tabela 6.68 - Quantidade de água requerida por cada traço	117
Tabela 6.69 - Traços dos tijolos solo/cimento/resíduo	117
Tabela 6.70 - Resistência à compressão dos tijolos solo/cimento/resíduo.....	118
Tabela 6.71 - Análise estatística da resistência à compressão dos tijolos SCR.....	119
Tabela 6.72 - Análise estatística dos dados relativos à absorção dos tijolos de SCR	119
Tabela 6.73 - Análise da resistência à compressão como função do percentual de cinzas e da absorção	121
Tabela 6.74 - Dados referentes à resistência à compressão.....	121
Tabela 6.75: Dados referentes à absorção	122
Tabela 6.76 - Análise estatística dos dados referentes à resistência à compressão.....	122
Tabela 6.77 - Análise estatística dos dados referentes à absorção	123

RESUMO

Neste trabalho foram avaliadas as possibilidades para a utilização da cinza da casca do café na indústria da construção civil. A casca do café é um resíduo que já vem sendo empregado como adição à rações animais e como combustível para torrar os grãos nas fazendas produtoras de café. Entretanto, parte desse resíduo ainda não é empregado. Inicialmente o programa experimental verificou se a cinza da casca do café apresentava atividade pozzolânica, como a cinza da casca de arroz e as cinzas das termoelétricas. Para isso, cinzas produzidas nas fazendas cafeeiras a partir da queima do café foram utilizadas para a fabricação de corpos de prova em argamassa e de tijolos de solo-cimento-resíduo. Foram avaliadas a resistência à compressão e a absorção dos corpos de prova e tijolos obtidos a partir de diferentes traços. Também foram testados traços com cinzas obtidas a partir de condições controladas de queima. No caso da utilização da casca do café como material combustível na indústria cimenteira, foi avaliada a sua potencialidade como fonte geradora de energia.

Palavras chave - casca do café, cinza da casca do café, cimento, pozzolânica, argamassa, tijolo de solo/cimento/resíduo, resíduo.

ABSTRACT

In this work were evaluated the possibilities for the use of the coffee husk ash in the civil construction industry. The coffee husk is a residue that is being employed, for example, in the addition to the animal rations and as fuel to toast the grains in the coffee producing farms. However, part of this residue is not yet used. In the begin, the experimental program verified if coffee husk ash presented pozzolanic characteristic, like the rice husk ash and the ashes of thermoelectric power stations. For this, ashes produced in the coffee farms from the burning coffee, were used for the manufacture of the test bodies and the ground-cement-residue bricks. The compressive strength and the absorption of test bodies and bricks were evaluated from different mixtures. Also were tested mixtures with ashes obtained from controlled burning conditions. In the case of the use of coffee husk as fuel material in the cement industry, its potentialities were evaluated as energy generating source.

Key-words - coffee husk, coffee husk ash, cement, pozzolanic, building cement, ground-cement-residue bricks, residue.

1 INTRODUÇÃO

1.1 NOÇÕES GERAIS

Até a algum tempo atrás o modelo de produção econômica existente era quase que em sua totalidade baseado no princípio da utilização de matérias-primas não renováveis de origem natural. Este modelo não apresentava problemas até recentemente, em razão da abundância de recursos naturais e da pequena quantidade de pessoas incorporadas à sociedade de consumo, fatos estes bastante diferentes da situação de hoje.

Atualmente a preocupação com o meio-ambiente tem sido colocada na pauta das discussões da sociedade civil com relação ao desenvolvimento sustentável. Entretanto, meio-ambiente e desenvolvimento sustentável não podem ser empecilhos para a garantia da qualidade de vida da população e a inserção do país no comércio internacional. Por essa razão, instituições de pesquisa e o poder executivo em todos os níveis vêm buscando soluções tecnológicas e políticas, objetivando o desenvolvimento aliado à preservação do meio ambiente. Dessa maneira, pode-se dizer que o desenvolvimento sustentável implica em utilizar os recursos naturais, de forma racional, sem comprometimento das gerações futuras.

Nos últimos anos foram intensificadas as pesquisas sobre a utilização de materiais alternativos na indústria da construção civil. O objetivo é diminuir o impacto ambiental proveniente da própria indústria da construção civil e de outras indústrias cujos resíduos possam vir, de alguma forma, a agredir o meio ambiente. A idéia geral é utilizar o resíduo de outras indústrias como matéria prima na construção civil. Essa prática conduz a um duplo benefício, pois tanto diminui a quantidade de resíduos como diminui a exploração dos recursos naturais não renováveis.

A Universidade Federal Fluminense (UFF) vem desenvolvendo pesquisas

sobre a utilização de resíduos desde 1988. Nesse sentido, os seguintes trabalhos foram realizados:

- avaliação do emprego de escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados, LOUZADA (1989);
- análise da influência da adição de cinzas volantes nas propriedades do concreto, PICCOLI (1989);
- estudo do composto de argamassa de cimento com raspa de pneu, TEIXEIRA (1991);
- análise do comportamento do concreto utilizando o resíduo do processo de jateamento de peças metálicas recém-forjadas, PIRES (2001);
- avaliação da possibilidade de aproveitamento do resíduo de cortes de rochas ornamentais como fíler mineral em compósitos de matriz polimérica e cimentícia, BIGNO (2002);
- estudo do potencial de aplicação de resíduos plásticos na construção civil, OLIVEIRA (2002);
- avaliação da potencialidade do uso do resíduo de carvão vegetal, RIBEIRO (2002);
- fibra de bucha no concreto, AKIL (1992);
- pó de entulho, forja e do corte de rochas ornamentais, CARVALHO (2005).

1.2 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é de grande importância na atualidade. As grandes cidades estão apresentando um ambiente cada vez mais agressivo à tais estruturas, seja pelo aumento da quantidade de gases emitidos pelos automóveis e pelas fábricas, o que gera as chuvas ácidas, seja pelos rios e mares que também estão apresentando águas cada vez mais agressivas. Nesses casos a utilização dos cimentos com adição de pozolana apresenta vantagens, uma vez que estes apresentam maior resistência aos ataques de sulfatos.

A produção de cimento Portland utiliza uma mistura de argila e calcário. A extração do calcário e da argila causa uma degradação na natureza que certamente é objeto de preocupação ambientalista. Existem atualmente no mercado nacional, cinco tipos de cimento com adições: comum, composto, alto forno, pozolânico e alta resistência inicial.

A utilização da cinza da casca de arroz como material pozolânico vem sendo intensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos EUA, mas só a partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia de concreto de alto desempenho, foi que a preocupação de obter um máximo de pozolanicidade do material se tornou premente. Segundo DAFICO (2006), a produção de cinza de casca de arroz com elevada pozolanicidade possibilita sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho.

Na região sudeste do Brasil não é usual produzir o cimento pozolânico, uma vez que nela não se encontra, até então, quantidade suficiente de matéria-prima com tais características. Em contrapartida, é na região sudeste que se encontram as maiores cidades do país e os maiores níveis de poluição do ar.

De acordo com o MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, no ano de 2003 foram produzidas no Brasil 1.970 mil toneladas de café. Considerando que esses dados são referentes à produção bruta e que, segundo a UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, a proporção entre palha e café beneficiado, em peso, corresponde a cerca de 55% de palha para 45% de café, espera-se que ao final do processo de beneficiamento restem 1.083 mil toneladas de resíduos sob a forma de casca. Nas fazendas produtoras de café, parte da quantidade de casca obtida é utilizada como fonte de energia através da queima e outra parte é adicionada ao solo como adubo orgânico. A casca do café também é utilizada na mistura da ração de alguns animais.

Também de acordo com o MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, nos últimos anos a região sudeste foi responsável por cerca de 70% da produção nacional de café.

A motivação desse trabalho se baseia na possibilidade de se estabelecer um projeto de desenvolvimento sustentável voltado para a indústria cimenteira. Além disso, soma-se o fato dessa ser a primeira pesquisa a utilizar o resíduo da agricultura cafeeira, seja em âmbito nacional bem como internacional, sendo que, o Brasil é o maior produtor de café no mundo.

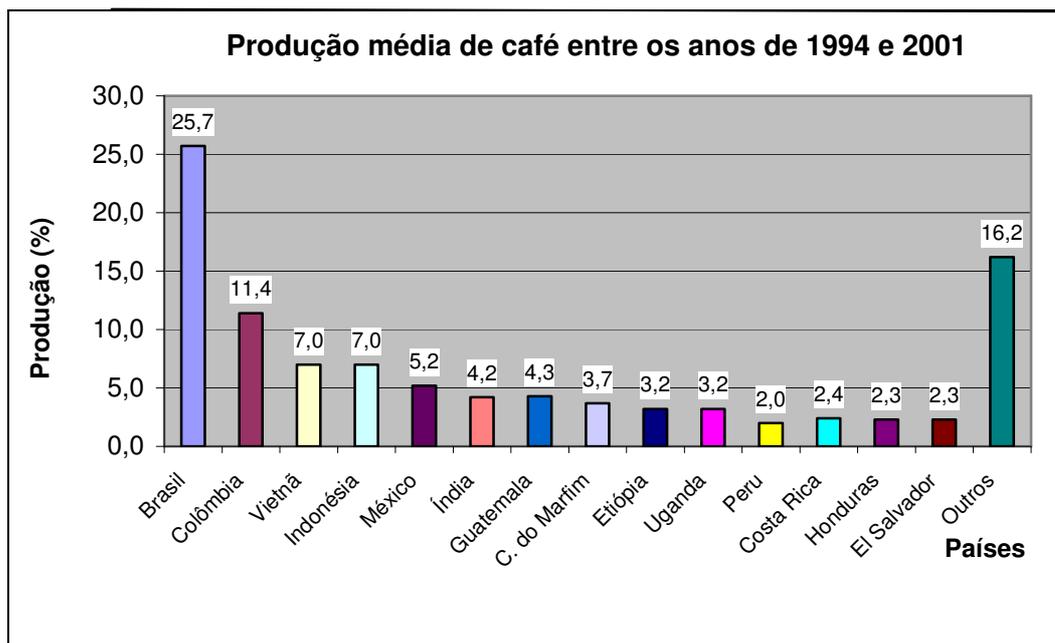


Figura 1.1 - Distribuição percentual da produção mundial de café entre os anos de 1994 e 2001

Outro fator motivador é que a indústria cimenteira, uma das contribuintes para este trabalho, é uma grande consumidora de energia. Parte dessa energia é gerada utilizando coque de petróleo e finos de carvão vegetal, contribuindo assim para a geração de gases que contribuem com o efeito estufa. Ao utilizar um resíduo do tipo rural, evita-se que este fique depositado no ambiente liberando gás metano.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

Verificar a potencialidade de aplicação da cinza de casca de café na indústria da construção.

Para consecução deste objetivo foram desenvolvidas as seguintes etapas do trabalho:

Inicialmente foi verificada a possibilidade de utilização da casca do café como fonte geradora de energia na indústria cimenteira. Neste caso, a cinza da casca do café foi misturada à composição final do clínquer Portland.

Numa segunda etapa foi avaliada a possibilidade da casca do café ser adicionada à mistura dos tijolos de solo-cimento, que neste caso, foram chamados tijolos de solo-cimento-resíduo (S-C-R). Nesta etapa, o resíduo entrou na mistura substituindo, ora uma parcela do cimento Portland utilizado, ora uma parcela da areia utilizada. O objetivo principal desta etapa foi verificar a possibilidade da

fabricação de um material de boa qualidade para que a população rural da própria região produtora de café pudesse fabricar seus tijolos e edificar suas residências.

A terceira etapa deste trabalho foi a verificação do comportamento das argamassas de cimento ao substituir parte deste aglomerante por cinza da casca do café (CCC), produto este obtido ao submeter a casca do café à temperaturas de 400°C e 600°C. Neste caso o objetivo foi verificar se a cinza da casca do café apresentava alguma característica pozolânica.

1.4 METODOLOGIA UTILIZADA

Para verificar a potencialidade de aplicação da cinza de casca de café na indústria da construção, este trabalho foi baseado num programa experimental, envolvendo:

- ensaios de caracterização dos materiais utilizados;
- preparação das misturas e moldagem de tijolos e corpos de prova cilíndricos de argamassas;
- ensaios de absorção e resistência à compressão dos tijolos e argamassas;
- análise dos resultados obtidos.

Para a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, contou-se com a colaboração de profissionais técnicos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e da Universidade Federal Fluminense (UFF).

Massa específica da areia



Granulometria



Massa específica das cinzas



Ensaio prático da caixa



Figura 1.2 - Alguns dos ensaios realizados

Por se tratar da primeira pesquisa realizada na área da engenharia civil utilizando o resíduo da agricultura cafeeira, o trabalho foi dividido em três etapas, resumidamente apresentadas:

- 1ª) utilização da casca do café como fonte geradora de energia na indústria cimenteira;
- 2ª) o comportamento das argamassas preparadas com cinza da casca do café (CCC) – (resíduo, 400 e 600 °C);
- 3ª) O COMPORTAMENTO DE TIJOLOS MACIÇOS DE SOLO/CIMENTO AO SUBSTITUIR, ORA PARTE DO CIMENTO, ORA PARTE DA AREIA, POR CASCA DE CAFÉ QUEIMADA NAS FAZENDAS (RESÍDUO DO PROCESSO DE SECAGEM DOS GRÃOS).

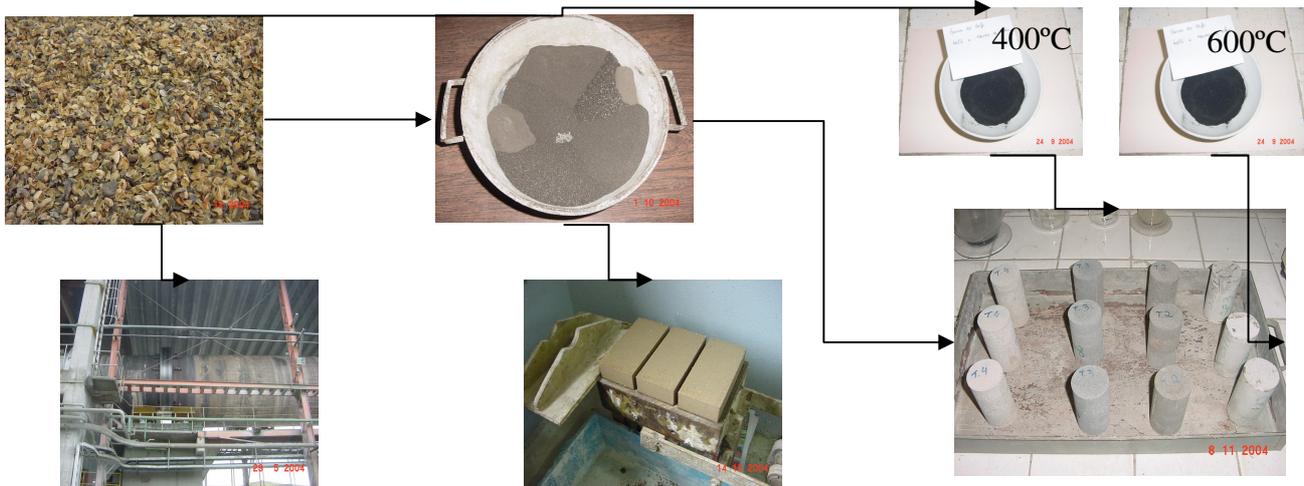


Figura 1.3 - Esquema demonstrando as três etapas do trabalho de acordo com a metodologia.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 do presente trabalho é apresentado um resumo sobre a situação da agricultura cafeeira no Brasil e no Mundo.

O Capítulo 3 apresenta as principais características do cimento Portland.

Os Capítulos 4 e 5 apresentam, respectivamente, alguns aspectos importantes sobre as argamassas e sobre os tijolos de solo-cimento.

No Capítulo 6 são apresentados os ensaios realizados e os resultados obtidos com argamassas e tijolos de solo-cimento em cuja fabricação foram utilizadas cinzas de casca de café obtidas em diferentes condições de queima.

As conclusões finais do trabalho são apresentadas no Capítulo 7, juntamente com sugestões para o prosseguimento das pesquisas aqui desenvolvidas.

2 A CAFEICULTURA NO BRASIL E NO MUNDO

Desde sua descoberta, o café desempenha importante papel na economia de países produtores e de países processadores, comerciantes e consumidores, como Alemanha, Estados Unidos, Holanda e Itália. O café representa mundialmente um mercado em valores monetários só superado pelo petróleo. Neste contexto, o Brasil é o maior produtor mundial há mais de 150 anos.

2.1 A PRODUÇÃO DE CAFÉ NO MUNDO

A distribuição da produção de café no mundo pode ser observada através da Tabela 2.1. Pode-se verificar que o Brasil é o maior produtor de café do mundo, seguido pela Colômbia. Pode-se também observar que a produção de café no Brasil entre os anos de 1994 e 2000 representou em média, 25,7% da produção mundial deste grão. Cabe ressaltar que a Colômbia foi responsável por 11,4% da produção mundial neste mesmo período.

Segundo MOREIRA (2003), a produção de café no mundo vem aumentando, em média, 1 milhão de sacas de 60 kg por ano nos últimos 30 anos. Em 1970, o volume total mundial era 65-70 milhões de sacas, na década de 80 subiu para 80-90 milhões e na década de 90 atingiu 90-100 milhões de sacas. Desde 1999 vem ultrapassando 100 milhões de sacas e de acordo com a OIC (Organização Internacional do Café – 2002) de outubro de 2001 a setembro de 2002 foram colhidas 113 milhões de sacas de café, havendo uma tendência em manter ou mesmo aumentar a produção.

Tabela 2.1 - Produção de café no mundo

PRINCIPAIS PAÍSES PRODUTORES DE CAFÉ EM MILHÕES DE SACAS 60 Kg										
PAÍSES	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	TOTAL	Média Anual	%
BRASIL	28,0	16,8	27,5	18,9	34,6	27,1	31,1	184,0	26,3	25,7
COLÔMBIA	13,0	12,9	10,9	12,2	11,1	9,3	11,5	81,4	11,6	11,4
VIETNÃ	3,5	3,9	5,8	7,0	7,0	11,3	11,4	49,9	7,1	7,0
INDONÉSIA	6,4	5,8	8,3	7,6	8,5	6,0	7,3	49,9	7,1	7,0
MÉXICO	4,0	5,5	5,3	5,0	5,0	6,4	6,3	37,5	5,4	5,2
ÍNDIA	3,1	3,7	3,5	4,7	4,4	5,4	4,9	29,7	4,2	4,2
GUATEMALA	3,5	4,0	4,5	4,2	4,9	5,2	4,5	30,8	4,4	4,3
COSTA DO MARFIM	3,7	2,5	4,5	3,7	2,0	5,5	4,2	26,1	3,7	3,7
ETIÓPIA	3,8	2,9	3,3	2,9	2,8	3,5	3,7	22,9	3,3	3,2
UGANDA	3,1	3,2	4,3	2,6	3,3	3,1	3,2	22,8	3,3	3,2
PERU	1,5	1,9	1,8	1,9	2,0	2,5	2,6	14,2	2,0	2,0
COSTA RICA	2,5	2,7	2,1	2,5	2,4	2,5	2,4	17,1	2,4	2,4
HONDURAS	2,3	1,9	2,0	2,6	2,2	3,0	2,3	16,6	2,4	2,3
EL SALVADOR	2,3	2,6	2,5	2,2	2,1	2,8	2,1	16,3	2,3	2,3
SUBTOTAL	80,7	70,3	86,3	78,0	92,3	93,6	98,0	599,2	85,6	83,8
DEMAIS PAÍSES	17,6	18,9	17,1	14,9	15,0	16,4	15,8	115,7	16,5	16,2
TOTAL	98,3	89,2	103,4	92,9	107,3	110,0	113,8	714,9	102,1	100,0

FONTE: USDA/EMBRAPA/FEBEC

2.2 A PRODUÇÃO DE CAFÉ NO BRASIL

A produção nacional de café tem importante significação mediante a produção mundial, apesar de ter sofrido uma decadência nos últimos 30 anos. Segundo o BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, a produção de café no Brasil correspondeu, nos últimos dez anos, a 27% de todo o café produzido no mundo. O parque cafeeiro está implantado no Brasil há quase 200 anos, e nesse período sofreu mudanças significativas de localização, tecnologias de produção e métodos diversos de colheita e pós-colheita.

Segundo o IBGE, a área colhida de café decresceu na última década a uma taxa de 2,7% a.a., atingindo o ponto mínimo em 1995, com 1,8 milhão de hectares. Em 1999 apresentou uma recuperação, passando para 2,2 milhões de hectares,

área 24% inferior à de 1990.

No Brasil, os maiores produtores de café são os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, Rondônia, Bahia, São Paulo e Paraná. Também nestas áreas está havendo uma drástica diminuição da área colhida, sendo no Paraná de 69% e em São Paulo 53%. Nesses estados, o interesse pela cafeicultura diminuiu consideravelmente em função dos prejuízos causados pelas geadas. Em função disso, nas áreas tradicionais de cultivo, o café foi substituído por soja, cana-de-açúcar e laranja.

Também houve redução da cultura do café na região centro-oeste, de 99 mil hectares para 28 mil (72%), em substituição, principalmente, pela soja.

Rondônia foi o único estado que registrou importante aumento relativo de área plantada, com acréscimo de 28 mil hectares, representando um aumento de 19%, cerca de 1,8% a.a.

Depois de períodos muito ruins para a cafeicultura brasileira, influenciada pelas condições climáticas ruins e queda de preços, a recuperação dos preços internacionais incentivou a implantação de novas áreas, aliada às mudanças tecnológicas utilizadas na recuperação dos cafezais afetados por condições climáticas, ao aumento da migração para áreas menos sujeitas às intempéries naturais e à difusão das tecnologias de adensamento.

Atualmente, Minas Gerais é o mais importante produtor nacional de café, responsável por uma produção que varia entre 45% e 50% da safra brasileira e aumentando ainda mais sua participação, com um crescimento de 3,4% a.a. Em seguida vem o Espírito Santo, que aumentou a produção a uma taxa de 3,8% a.a.

É importante ressaltar que apesar da área de plantio ser menor, pode-se registrar uma maior produtividade. Isso pode ser explicado pelo adensamento, pela migração para áreas menos sujeitas às intempéries e pelos maiores tratamentos, melhorando assim o desempenho das lavouras.

As Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 apresentam os dados da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ referente aos últimos 3 anos da produção de café no Brasil.

Tabela 2.2: Café Beneficiado - Safra 2004/2005 - Produção e Produtividade

UF/ Região	Produção (mil sacas de 60 Kg beneficiadas)			Produtividade (sacas/ha)
	Arábica	Robusta	Total	
Minas Gerais	18.630	30	18.660	18,57
Sul/Oeste	10.000	-	10.000	19,65
Triângulo/Alto Paranaíba	3.400	-	3.400	23,21
Z. da Mata/Jequitinhonha	5.230	30	5.260	15,05
Espírito Santo	1.950	4.450	6.400	12,60
São Paulo	5.071	-	5.071	24,77
Paraná	2.500	-	2.500	20,05
Bahia	1.870	390	2.260	22,65
Rondônia	-	1.996	1.996	11,09
Mato Grosso	60	315	375	10,19
Pará	-	320	320	17,30
Rio de Janeiro	220	12	232	21,11
Outros	160	290	450	20,00
BRASIL	30.461	7.803	38.264	17,31

Fonte: www.abic.com.br

Tabela 2.3: Café Beneficiado - Safra 2003/2004 - Produção e Produtividade

UF/ Região	Produção (mil sacas de 60 Kg beneficiadas)			Produtividade (sacas/ha)
	Arábica	Robusta	Total	
Minas Gerais	12.020	30	12.050	12,33
Sul/Oeste	5.360	-	5.360	11,24
Triângulo/Alto Paranaíba	2.810	-	2.810	18,25
Z. da Mata/Jequitinhonha	3.850	30	3.880	11,21
Espírito Santo	1.600	5.010	6.610	12,69
São Paulo	2.810	-	2.810	13,38
Paraná	1.970	-	1.970	15,99
Bahia	1.410	370	1.780	18,70
Rondônia	-	2.500	2.500	13,30
Mato Grosso	30	400	430	11,91
Pará	-	220	220	12,22
Rio de Janeiro	120	10	130	11,82
Outros	120	200	320	14,51
BRASIL	20.080	8.740	28.820	13,09

Fonte: www.abic.com.br

Tabela 2.4: Café Beneficiado - Safra 2002/2003 - Produção e Produtividade

UF/ Região	Produção (mil sacas de 60 Kg beneficiadas)			Produtividade (sacas/ha)
	Arábica	Robusta	Total	
Minas Gerais	25.100	40	25.140	23,50
Sul/Oeste	13.200	-	13.200	24,22
Triângulo/Alto Paranaíba	5.100	-	5.100	28,81
Z. da Mata/Jequitinhonha	6.800	40	6.840	19,66
Espírito Santo	2.500	6.825	9.325	17,63
São Paulo	5.800	-	5.800	25,78
Paraná	2.340	-	2.340	18,28
Bahia	1.750	550	2.300	22,33
Rondônia	-	2.100	2.100	12,73
Mato Grosso	60	430	490	13,28
Pará	-	310	310	15,90
Rio de Janeiro	240	15	255	20,43
Outros	160	260	420	19,19
BRASIL	37.950	10.530	48.480	20,98

Fonte: www.abic.com.br

3 CIMENTO PORTLAND

3.1 A HISTÓRIA DO CIMENTO

Buscando segurança e durabilidade para as edificações o homem iniciou a experimentação de diversos materiais aglomerantes, que eram chamados pelos romanos de “caementum”, termo que originou a palavra cimento.

O cimento já vem sendo utilizado pelos gregos e romanos desde épocas remotas, a partir da mistura triturada de cal e cinzas vulcânicas.

O engenheiro John Smeaton, por volta de 1756, procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções.

Coube ao pedreiro inglês Joseph Aspdin, em 1824, patentear a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à *Portlandstone*, que era um tipo de pedra arenosa muito utilizada em construções na região de Portland, na Inglaterra.

Poucos anos antes, na França, o engenheiro e pesquisador Louis Vicat publicou o resultado de suas experiências contendo a teoria básica para a produção e o emprego de um novo tipo de aglomerante: o cimento artificial.

O cimento Portland ocasionou uma revolução na construção, em função das suas propriedades de moldabilidade, hidráulidade, elevada resistência aos esforços e por ser obtido a partir de matérias-primas em abundância e disponíveis na natureza.

Obras simples ou aquelas cada vez mais arrojadas e indispensáveis, necessárias ou que propiciam conforto e bem-estar, associado ao contínuo

surgimento de novos produtos e aplicações, fazem do cimento um dos materiais mais consumidos da atualidade.

Segundo ANDRADE (2002), a produção mundial de cimento é da ordem de 1,6 bilhão de toneladas por ano, sendo destes, 36% fabricados pela China.

A fabricação do cimento Portland, no Brasil, dá-se de acordo com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), existindo, atualmente, no mercado brasileiro as seguintes variedades comerciais apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variedades Comerciais do Cimento Portland

CIMENTO PORTLAND	
VARIETADES COMERCIAIS	NORMAS DA ABNT
1- Comum (CP I e CP I-S) classes 25, 32 e 40	NBR 5732 (EB – 1 / 91)
2- Composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F) classes 25, 32 e 40	NBR 11578 (EB – 2138 / 91)
3- Alto Forno (CP III) classes 25, 32 e 40	NBR 5735 (EB – 208 / 91)
4- Pozolânico (CP IV)	NBR 5736 (EB – 758 / 91)
5- Alta Resistência Inicial (CP V)	NBR 5733 (EB – 2 / 91)
6- Resistência à sulfatos	NBR 5737 (EB – 903 / 91)
7- Especiais	
8- Branco, Tipo G	

Fonte: Boletim Técnico: Guia básico de utilização do cimento Portland

De acordo com a REVISTA PAINEL DA HOLCIM (2004) foram lançados no mercado brasileiro cinco novos tipos de cimento:

- os microcimentos MC 20 RS e MC 30 ARS. A principal característica destes materiais é a elevada finura. São destinados para injeção em solos, túneis, redes de saneamento, barragens e recuperação de estruturas em ambientes altamente agressivos;

- Duracem 200, Duracem 300 e Duracem PI 500. Especiais para concreto projetado, sendo o PI 500 de pega instantânea. Em função da alta aderência o desperdício é minimizado.

3.2 COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições (fíler, escória ou pozolana) podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

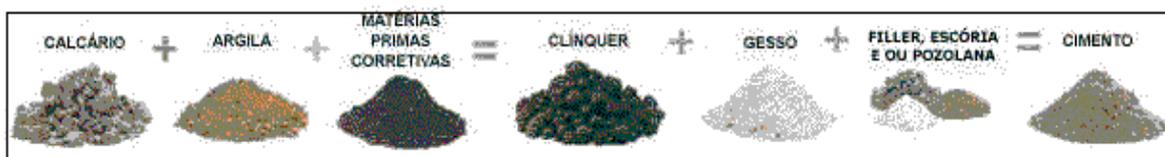


Figura 3.1 - Materiais constituintes do cimento

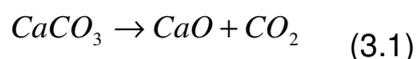
O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado e finamente moído, transformando-se em pó.

O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.

3.2.1 Fabricação do clínquer Portland

Como já foi dito, as matérias-primas principais para a produção do clínquer são a rocha calcária e a argila que apresentam as seguintes características:

a) **CALCÁRIO:** calcário é o carbonato de cálcio (CaCO_3) que se apresenta na natureza com impurezas como óxido de magnésio. O carbonato de cálcio puro ou calcita, sob ação do calor, decompõe-se de acordo com a Equação 3.1.



Pode-se dizer que cada tonelada de calcário origina 560 kg de cal, que é verdadeiramente a matéria-prima que entra na fabricação do cimento. Os outros 440 kg são perdidos sob a forma de gás (CO_2) saindo pela chaminé das fábricas.

b) ARGILA: a argila empregada na fabricação do cimento é essencialmente constituída de um silicato de alumínio hidratado, geralmente contendo ferro e outros minerais, em menores porcentagens. A argila fornece os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , necessários à fabricação do cimento.

Quando ocorre deficiência de SiO_2 na argila, é necessária a utilização da areia, como corretivo da farinha crua. O mesmo acontece com o Fe_2O_3 , ou seja, quando a argila for deficiente desta substância, torna-se necessária a adição de minério de ferro (hematita). Durante a extração, processamento e estocagem, os materiais são analisados física e quimicamente pela equipe do laboratório das cimenteiras.

A fabricação do clínquer Portland segue as seguintes etapas:

- extração e preparo da mistura crua;
- dosagem da mistura crua;
- homogeneização;
- clínquerização;
- esfriamento.

3.2.2 Extração e preparo da mistura crua

A matéria-prima é extraída das jazidas pelos processos usuais de exploração de depósitos minerais. O calcário pode apresentar-se com dureza elevada, exigindo o emprego de explosivos seguido de britagem, ou suficientemente mole, exigindo apenas o emprego de desintegradores, para ficar reduzido ao tamanho de partículas de diâmetro máximo da ordem de 1 cm.

As argilas contendo silicatos, alumina e óxido de ferro, normalmente, apresentam-se em condições de serem misturadas diretamente com o calcário.

Calcário e argila, em proporções predeterminadas, são enviadas ao moinho de cru (moinhos de bolas, de barras, de rolos) onde se processa o início da mistura íntima das matérias-primas e, ao mesmo tempo, a sua pulverização, de modo a

reduzir o diâmetro das partículas a 0,050mm, em média.

A moagem, conforme se trate de via úmida ou seca, é feita com ou sem presença de água.

3.2.3 Dosagem da mistura crua

A determinação da porcentagem de cada matéria-prima na mistura crua depende essencialmente da composição química das matérias-primas e da composição que se deseja obter para o cimento Portland quando terminado o processo de fabricação. Durante este processo a matéria-prima e a mistura crua são analisadas quimicamente, numerosas vezes, a intervalos de aproximadamente 1 hora. Em função dos resultados dos ensaios, o laboratório indica as porcentagens de cada matéria-prima que deve compor a mistura crua.

São numerosos os métodos de controle da composição química da mistura crua, sendo as fórmulas representadas pelas Equações 3.2 a 3.4 as mais empregadas:

$$\text{- Módulo Hidráulico (Michaelis)} \quad MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

$$\text{- Módulo de Sílica } \square\square\square\square\square\square\square \quad MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.3)$$

$$\text{- Módulo de Alumina-Ferro} \quad MAF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3.4)$$

Para os cimentos nacionais, como resultados de numerosos ensaios realizados em laboratório, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) adota os valores apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Classificação dos cimentos quanto a composição química

	Mínimo	Máximo
MH	1,8	2,2
MS	1,7	3,1
MAF	1,2	3,2

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

3.2.4 Homogeneização

A matéria prima devidamente dosada e reduzida a pó muito fino, após a moagem, deve ter a sua homogeneidade assegurada da melhor forma possível.

No processo de fabricação por via úmida, a matéria-prima é moída com água e sai dos moinhos sob a forma de uma pasta contendo geralmente de 30 a 40% de água, e é bombeada para grandes tanques cilíndricos, onde se processa durante várias horas a operação de homogeneização. Os tanques de homogeneização são providos de equipamento que gira em torno de um eixo central e é constituído de uma série de pás que giram, por sua vez, em torno de vários eixos ligados à arvore principal. A pasta, nesta fase de operação, é ensaiada várias vezes, a fim de se controlar a homogeneidade da mistura e a dosagem dos constituintes do cimento, o que permite a sua correção, se necessário.

No processo por via seca a matéria prima sai do moinho já misturada, pulverizada e seca. Normalmente os moinhos de cru do sistema por via seca trabalham com temperaturas elevadas (300 - 400°C) no seu interior, o que permite secá-la (menos de 1% de umidade). Para tal fim, são usados, em certos tipos de moinho, os gases de combustão do forno, antes de serem enviados ao filtro retentor de poeiras, e, em seguida, à chaminé. O cru é transportado mecânica ou pneumáticamente para o silo homogeneizador, onde se assegura a homogeneização necessária da mistura e se corrige, eventualmente, a sua composição.

3.2.5 Clinquerização

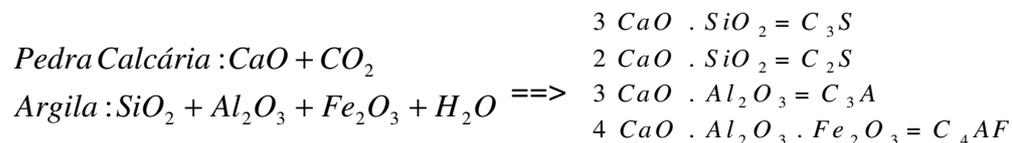
A matéria-prima após convenientemente dosada e pulverizada, sofre o tratamento térmico apresentado na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Tratamento térmico na clínquerização

Temperatura	Processo	Reação
Até 100°C	Evaporação da água livre	Endotérmica
500°C acima	Desidroxilação dos minerais argilosos	Exotérmica
900°C acima	Cristalização dos argilo-minerais decompostos	Exotérmica
900°C acima	Decomposição do carbonato	Endotérmica
900°C a 1200°C	Reação do CaO com os sílico-aluminatos	Exotérmica
1250°C a 1280°C	Início de formação da fase vítrea	Endotérmica
Acima de 1280°C	Formação de vidro e dos compostos do cimento (clínquerização)	Provavelmente Endotérmica

Fonte: Cimento Portland - Holdercim

As reações químicas que ocorrem no sistema de fornos de clínquerização podem, aproximadamente, ser representadas como:



No processo por via úmida, todo o processamento termo-químico necessário à produção do clínquer se dá no forno rotativo.

No processo por via seca, até temperatura da ordem de 900°C a 1000°C, o processamento da mistura crua se dá em trocadores de calor do tipo ciclone ou de contra-corrente. O processamento restante realiza-se no forno, de comprimento reduzido, que recebe a mistura já na referida temperatura.

3.2.6 Esfriamento

No forno, como resultado do tratamento sofrido, a matéria-prima transforma-se em clínquer. Na saída, o material apresenta-se na forma de bolas de diâmetro máximo variável entre 1cm a 3cm. As bolas que constituem o clínquer saem do forno a uma temperatura da ordem de 1200°C a 1300°C, pois há um início de

abaixamento de temperatura, na fase final, ainda no interior do forno.

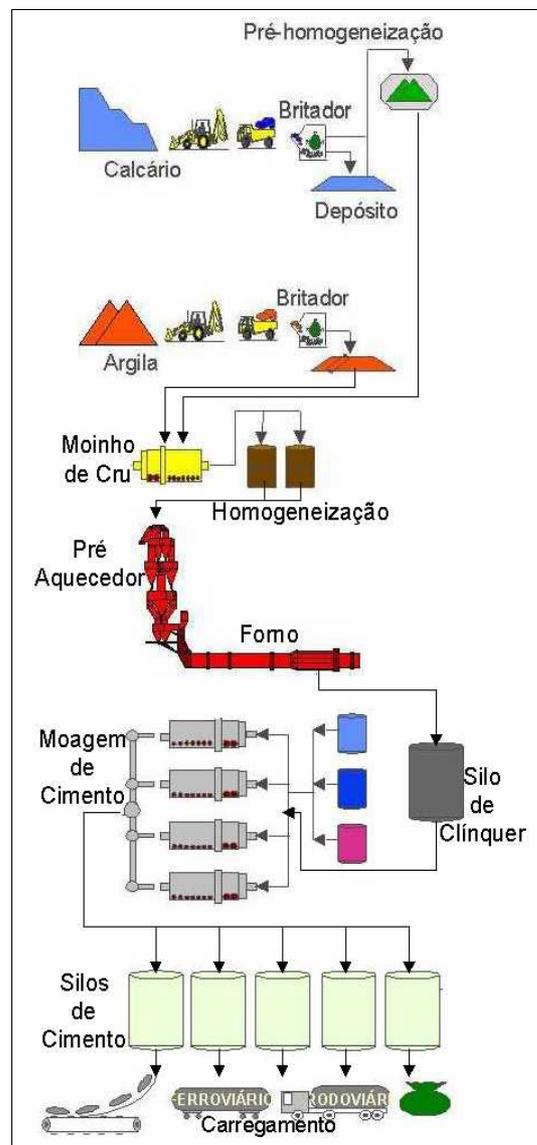


Figura 3.2:- Fluxo do processo para obtenção do cimento Portland

O clínquer sai do forno e passa ao equipamento resfriador, que pode ser de vários tipos. Sua finalidade é reduzir a temperatura, mais ou menos rapidamente, pela passagem de uma corrente de ar fria no clínquer. Dependendo da instalação, na saída do resfriador o clínquer apresenta-se entre 50°C e 70°C, em média. O clínquer, após o esfriamento, é transportado e estocado em depósitos.

3.2.7 Adições

As adições são outras matérias primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias primas são a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

A gipsita tem como função básica aumentar o tempo de endurecimento do clínquer moído. Caso não se adicionasse gipsita à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria a sua utilização nas obras. Por isso, a gipsita é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena, geralmente 3% de gipsita para 97% de clínquer, em massa.

As escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e têm forma de grãos de areia. Antigamente, as escórias de alto forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também têm a propriedade de ligante hidráulico bastante resistente, isto é, reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Esta descoberta tornou possível adicionar escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.

A composição química da escória granulada de alto forno é fixada pela NBR 5735 e está representada pela Equação 3.5.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (3.5)$$

Isto significa que as escórias destinadas à fabricação de cimento devem ser alcalinas e não ácidas. Somente as escórias alcalinas possuem por si só características de hidraulicidade e isto acontece pelo fato de terem uma composição química que permite a formação de componentes capazes de produzirem, por resfriamento brusco, um estado vítreo com propriedades hidráulicas latentes. A natureza do processo no alto forno e o estado físico da escória são fatores decisivos para o desenvolvimento das propriedades hidráulicas da escória granulada.

Com relação aos materiais pozolânicos, a NBR 12653 os define como: materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Ainda de acordo com a NBR 12653, os materiais pozolânicos são classificados em pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas artificiais são subdivididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais (escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, resíduo de carvão mineral). Assim sendo a cinza da casca do café em análise é classificada como uma pozolana artificial.

Da mesma forma que no caso da escória de alto-forno, pesquisas levaram a descoberta de que os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico. No entanto, a reação só vai acontecer se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença também de um outro material. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana, como ocorre com as escórias de alto forno.

Esse é o motivo pelo qual a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda oferece a vantagem de conferir, por exemplo, maior impermeabilidade aos concretos e às argamassas.

Também de acordo com a NBR 12653, as pozolanas podem ser classificadas em naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são os materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são os materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamentos térmicos com atividade pozolânica.

As pozolanas artificiais podem ser obtidas de argilas calcinadas, cinzas volantes ou outros materiais, como por exemplo, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais e resíduo de carvão mineral.

Atualmente está sendo intensamente pesquisado o uso de novos materiais pozolânicos, tais como as cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a

microsílica, um pó finíssimo que sai das chaminés das fundições de ferro-sílico.

Sobre os materiais carbonáticos, estes são minerais moídos, tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses minerais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um “lubrificante”. Quando presentes no cimento são conhecidos como filler calcário.

De todas as adições, o gesso não pode em hipótese alguma deixar de ser misturado ao cimento, e as demais matérias-primas adicionadas (escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) são compatíveis com o principal componente do cimento Portland – o clínquer – conferindo ao cimento pelo menos uma qualidade a mais.

3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND

De acordo com a composição da matéria-prima, o clínquer de cimento Portland contém aproximadamente os seguintes elementos expressos como óxidos, contidos na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Óxidos contidos no clínquer

	Fórmula	Abreviação	Composição (%)
Óxido de Cálcio	CaO	C	59 – 67
Sílica	SiO ₂	S	16 – 26
Alumínio	Al ₂ O ₃	A	4 – 8
Ferro	Fe ₂ O ₃	F	2 – 5
Magnésio	MgO	M	0,8 – 6,5
Sódio	Na ₂ O		0 – 1,5
Potássio	K ₂ O		0 – 1,5
Sulfato	SO ₃	S	0,5 – 1,2

Fonte: Cimento Portland – Holdercim

a) Cal (CaO): é o componente principal do cimento, originado, em sua quase totalidade, da composição do calcário (CaCO₃), que se encontra quimicamente combinado com a sílica, alumina e óxido de ferro. Apenas uma pequena parcela encontra-se em liberdade (cal livre), cuja presença em estado anidro, acima de certos limites, prejudica a estabilidade de volume das argamassas e dos concretos.

b) Sílica (SiO₂): provém basicamente das argilas. Da sua combinação com a cal

resultarão os compostos mais importantes do cimento: os silicatos bicálcico (C_2S) e tricálcico (C_3S).

c) Alumínio (Al_2O_3): também conhecido como alumina, origina-se da argila. O composto formado pela alumina e a cal, denominado aluminato tricálcico (C_3A) acelera o início de pega do cimento, reduz sua resistência ao ataque dos sulfatos, e por isso, quanto menor sua proporção, até certos limites, melhor. No entanto a alumina, por sua ação fundente facilita o desenvolvimento das reações que possibilitam a formação do clínquer.

d) Trióxido de Ferro (Fe_2O_3): também é gerado a partir da argila. O trióxido de ferro, desde que em porcentagem não muito elevada, é útil, também pelo seu papel de fundente, desenvolvendo neste sentido uma ação ainda mais enérgica do que a alumina. Com relação ao óxido de ferro (FeO), não ocorre normalmente.

e) Magnésio ou magnésia (MgO): provém do carbonato de magnésio presente no calcário ou em pequena quantidade na argila. Quando encontrado em quantidades superiores a certos limites, atua como agente expensor, prejudicando a estabilidade volumétrica das argamassas e dos concretos.

f) Potássio e Sódio: são álcalis, os quais desenvolvem papel de fundentes e aceleradores de pega. Atribui-se à presença dos álcalis as manchas que aparecem na massa depois de endurecida. Certos agregados podem reagir com os álcalis, provocando expansões anormais nas argamassas e nos concretos.

g) Sulfato (SO_3): advém principalmente do sulfato de cálcio, adicionado ao cimento como retardador de pega.

Na indústria cimenteira calcula-se o teor dos compostos do clínquer Portland a partir da análise dos óxidos, usando-se uma série de equações, HOLDERCIM BRASIL (1998), que foram originalmente desenvolvidas por R. H. Bogue, as quais estão representadas pelas Equações 3.6 a 3.9.

$$\text{Alita} \quad \% C_3S = 4,071 C - 7,600 S - 6,718 A - 1,430 F - 2,850 \bar{S} \quad (3.6)$$

$$\text{Belita} \quad \% C_2S = 2,867 S - 0,7544 C_3S \quad (3.7)$$

$$\text{Alumina } \% C_3A = 2,650 A - 1,692 F \quad (3.8)$$

$$\text{Ferrita } \% C_4AF = 3,043 F \quad (3.9)$$

3.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO CLÍNQUER PORTLAND

A composição mineralógica do clínquer é função das matérias primas disponíveis e também do processo de cozimento utilizado. Para cada tipo de clínquer obtido, cuja composição apresenta diferentes comportamentos de endurecimento, influenciam as propriedades do cimento nas suas aplicações.

A Tabela 3.5 apresenta os principais compostos do clínquer bem como suas propriedades específicas.

Tabela 3.5: Principais compostos do clínquer e suas propriedades específicas

Compostos	Fórmula Química Clássica	Abreviatura	% no clínquer	Propriedades Tecnológicas
Silicato Tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 – 65	- endurecimento rápido; - alto calor de hidratação; - alta resistência inicial.
Silicato Bicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 – 25	- endurecimento lento; - baixo calor de hidratação; - baixa resistência inicial.
Aluminato Tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 10	- pega muito rápida e deve ser controlado com adição de gesso; - suscetível ao ataque de meios sulfatados; - alto calor de hidratação; - alta retração; - baixa resistência final.
Ferro Aluminato Tetracálcico	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3 – 8	- endurecimento lento; - resistente a meios sulfatados; - não tem contribuição para resistência; - cor escura.
Cal Livre	CaO	C	0,5 – 1,5	- aceitável somente em pequenas quantidades, em maiores quantidades causam aumento de volume e fissuras.

Fonte: Holdercim Brasil (1998)

O silicato tricálcico é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo responsável pelo aumento da resistência a um ano ou mais.

O aluminato tricálcico também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia. O ferro aluminato tetracálcico não contribui para a resistência.

O aluminato tricálcico muito contribui para o calor de hidratação,

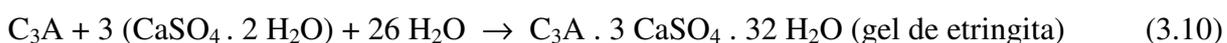
especialmente no início do período de cura. O silicato tricálcico é o segundo componente em importância no processo de liberação de calor. Já o silicato bicálcico e o ferro aluminato tetracálcico pouco contribuem para a liberação de calor.

O aluminato tricálcico é o responsável pela rapidez de pega. Com a adição de proporção conveniente de gesso, o tempo de hidratação é controlado. O silicato tricálcico é o segundo componente com responsabilidade pelo tempo de pega do cimento. Os outros constituintes se hidratam lentamente, não tendo efeito sobre o tempo de pega.

3.5 REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO DOS COMPOSTOS DO CLÍNQUER

As diferentes equações de hidratação dos compostos do clínquer estão representadas pelas Equações 3.10 a 3.14.

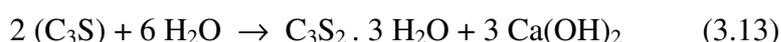
- Aluminato Tricálcico (C₃A):



- Ferro Aluminato Tetracálcico (C₄AF):



- Silicato Tricálcico (C₃S):



- Silicato Bicálcico (C₂S):



Observações:

- Os silicatos hidratados representam □ 50% da pasta endurecida.
- O hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ varia de 13 a 17%.
- O silicato de cálcio hidratado apresenta-se com semelhança ao mineral denominado tobermorita e como se parece com um gel, é denominado gel de tobermorita (C₃S₂.3H₂O).

3.6 CRISTALIZAÇÃO

Os compostos anidros do cimento Portland reagem com a água (hidrólise), dando origem a compostos hidratados de duas categorias:

- compostos cristalinos hidratados;
- gel.

Um grão de cimento que tenha cerca de 50µm de diâmetro médio, entrando em contato com a água, começa, no fim de algum tempo, a apresentar, em sua superfície, sinais de atividade química, pelo aparecimento de cristais que vão crescendo lentamente e pela formação de uma substância gelatinosa (gel) que o envolve. Inicialmente o gel que se forma possui uma porcentagem muito elevada de água e é designado por gel instável (semelhante a uma gelatina muito mole). Os compostos cristalinos, para se desenvolverem, necessitam de água, que em pouco tempo é inteiramente transformada em gel. O processo de desenvolvimento dos cristais se faz retirando a água do gel instável, que à medida que vai perdendo água, transforma-se em gel estável e torna-se responsável, em grande parte, pelas propriedades mecânicas de resistência das pastas hidratadas – endurecidas.

Constata-se que durante a reação com a água, os silicatos tricálcicos e bicálcicos liberam hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$.

Os cristais formados se entrelaçam à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. Os espaços vazios são preenchidos principalmente pelo gel, hidróxido de cálcio e água.

Primeiramente o aluminato entra em atividade e, logo a seguir, o C_3S ; esses dois elementos, para se hidratarem, retiram a água de que necessitam do gel instável e a formação de cristais hidratados se inicia.

Para se ter uma idéia da atividade dos vários compostos ao se hidratarem, é interessante observar a Tabela 3.6 a qual representa a profundidade alcançada pela hidratação em microns com o tempo.

Tabela 3.6: Profundidade alcançada pela hidratação

Tempo	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S
3 horas	4,35	1,68	-
1 dia	-	2,25	0,28
3 dias	5,68	-	-
7 dias	-	4,32	0,62
28 dias	5,68	4,44	0,83
5 meses	-	-	3,5

Fonte: Apostila de Materiais de Construção - Prof. Moacyr Carvalho Filho - UERJ

Observando a Tabela 3.6, podemos concluir que a resistência do cimento Portland é caracterizada pelos seguintes fatos:

- a) até os 3 dias → é assegurada pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos;
- b) até os 7 dias → praticamente pelo aumento da hidratação do C₃S;
- c) até os 28 dias → continua a hidratação do C₃S responsável pelo aumento de resistência, com pequena contribuição do C₂S; e,
- d) acima de 28 dias → o aumento de resistência passa a ser devido à hidratação do C₂S.

3.7 CLASSES DE RESISTÊNCIA

Quanto à granulometria o cimento pode ser diferenciado por classes: 25, 32 ou 40. A Figura 3.1 apresenta um gráfico comparativo entre as resistências dos diversos tipos de cimento.

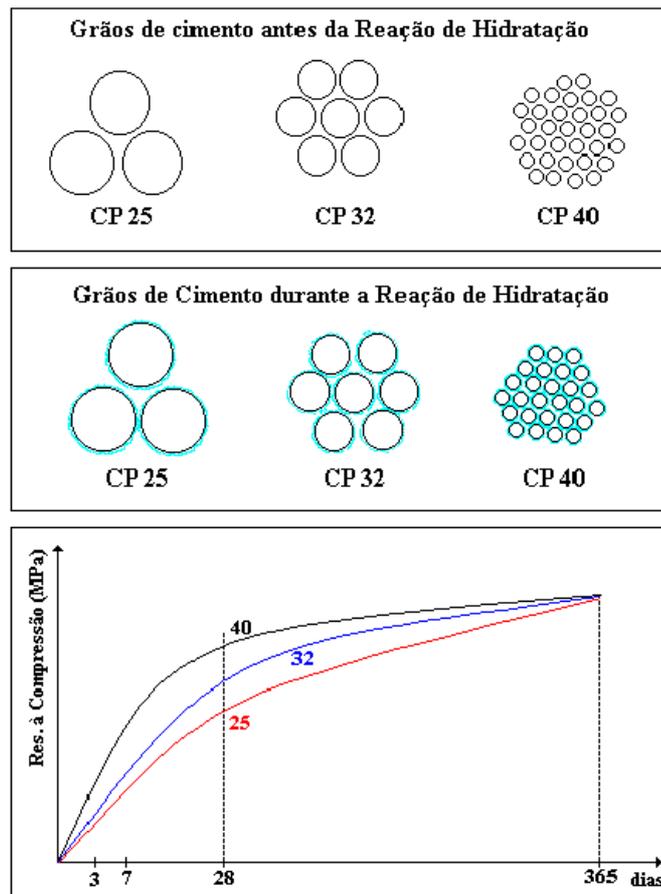


Figura 3.3: Finura, hidratação e crescimento das resistências dos cimentos

No gráfico da Figura 3.3 verifica-se que o cimento, quanto mais finamente moído, apresenta resistência à compressão superior a de um outro cimento com grãos maiores, se comparado na mesma idade de hidratação. Em outras palavras, analisando aos 28 dias, verifica-se que o cimento Portland de classe 40 (grãos menores, ou seja, mais finamente moído) possui uma resistência à compressão superior à do CP 32 e à do CP 25. O mesmo acontece com o CP 32 em relação ao CP 25. Este fato pode ser justificado pelo fato de que quanto mais fino o cimento, maior será a sua área específica, portanto maior será a quantidade de cimento em contato com a água, facilitando assim as reações de hidratação dos grãos.

3.8 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS DIVERSOS TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Em HOLDERCIM BRASIL (1998), as principais propriedades dos diversos tipos de cimento, estão assim apresentadas:

a) Finura: a finura do cimento pode ser determinada através de peneira de malha nº 200 (0,075 mm), permeabilímetro ao ar de Blaine e granulômetro a laser. Cimentos finos geralmente aceleram o desenvolvimento da resistência.

b) Expansibilidade: a expansibilidade pode ocorrer após o final de pega, ao longo do tempo, provocando fissuras, quando na queima do clínquer o teor de magnésio ou CaO livre é elevado.

c) Tempo de Pega: o tempo de pega do cimento é importante para permitir a aplicação adequada de pastas, argamassas ou concretos, isto é, sem perda de plasticidade e trabalhabilidade. Para controlar o tempo de pega, é adicionado o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na moagem do cimento, cujo controle é feito através do teor de SO_3 .

d) Falsa Pega: a falsa pega é um fenômeno que ocorre quando a mistura, em que está sendo empregado o cimento (pasta, argamassa ou concreto), perde a plasticidade com um tempo menor que o previsto, e com uma nova remistura na betoneira, sua plasticidade inicial é recuperada. Isto ocorre, quando na moagem do cimento, a temperatura desta ultrapassa a 128°C , provocando uma dissociação do sulfato de cálcio do gesso que perde $1 \frac{1}{2}$ moléculas de água, tornando-se o aglomerante gesso com pega rápida. A falsa pega, portanto, é causada pela pega dos grãos de gesso e não pela pega dos grãos de cimento.

e) Calor de Hidratação: no preparo do concreto, quando a água e o cimento reagem, ocorre o calor de hidratação. Esse efeito poderá acontecer durante meses, em função do volume concretado. A quantidade de calor gerado depende da composição química do cimento, quantidade e tipo de adições, finura, etc. Para se medir o calor de hidratação, utiliza-se a garrafa de Langavant.

f) Resistência à Compressão: a resistência à compressão do cimento é medida através de corpos de prova cilíndricos, de diâmetro 50mm e altura de 100mm, com um traço normalizado, com areia padrão do IPT. Diversos tipos de cimentos, com suas características de finura e composição têm curvas de resistências X idades distintas, que normalmente definem o seu uso ou não, em determinadas aplicações. É um ensaio importante para o controle de qualidade do cimento.

g) Perda ao Fogo: este ensaio é determinado com uma amostra do cimento, levado a uma temperatura em torno de 950°C em uma mufla, em função da diferença do peso inicial. Através deste ensaio, controla-se o teor de adições de material carbonático.

h) Resíduos Insolúveis: ensaio feito através de uma amostra de cimento em meio aquoso, onde determinamos a quantidade de partículas que se magnetizam e, posteriormente, quanto destas que não se dissolvem ao adicionarmos HCl. A porcentagem de resíduos insolúveis é obtida somando-se as quantidades encontradas, e dividindo tal valor pelo peso inicial de cimento.

i) Massa Específica: a massa específica não é uma indicação de qualidade do cimento. Ela é utilizada para cálculo de dosagens de concretos e argamassas, e no ensaio de Blaine (finura por superfície específica).

j) Tonalidade do Cimento: existe uma mentalidade generalizada fora do meio técnico que os cimentos com tonalidade escura são mais resistentes que os claros. Isto não corresponde a uma realidade. A cor do cimento é influenciada pela composição química das matérias primas, principalmente o teor de Fe_2O_3 , não existindo nenhuma relação entre cor do cimento e sua resistência.

3.9 PRINCIPAIS TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Os diferentes tipos de cimento Portland diferenciam-se entre si principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos são:

- Cimento Portland Comum;
- Cimento Portland Composto;
- Cimento Portland de Alto Forno;
- Cimento Portland Pozolânico;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI).

Também são oferecidos à construção civil outros tipos de cimento, os quais são consumidos em menor escala:

- Cimento Portland de alta resistência inicial resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland Branco;

- Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento Portland para poços petrolíferos;
- Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos com sílica ativa.

Todos os tipos de cimento mencionados são regidos por Normas da ABNT.

3.9.1 Cimento Portland Comum , CP I

De acordo com a NBR 5732, o cimento Portland comum é definido como: Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos dentro dos limites apresentados na Tabela 3.7, ABNT EB-1.

Tabela 3.7: Valores Mínimos para resistência à compressão (MPa):

Idade	Classe 25	Classe 32	Classe 40
3 dias	8,0	10,0	15,0
7 dias	15,0	20,0	25,0
28 dias	25,0	32,0	40,0

Fonte: ABNT EB-1

Os diferentes comportamentos para uma mesma composição são justificados através da finura do clínquer, como apresentado na Figura 3.4.

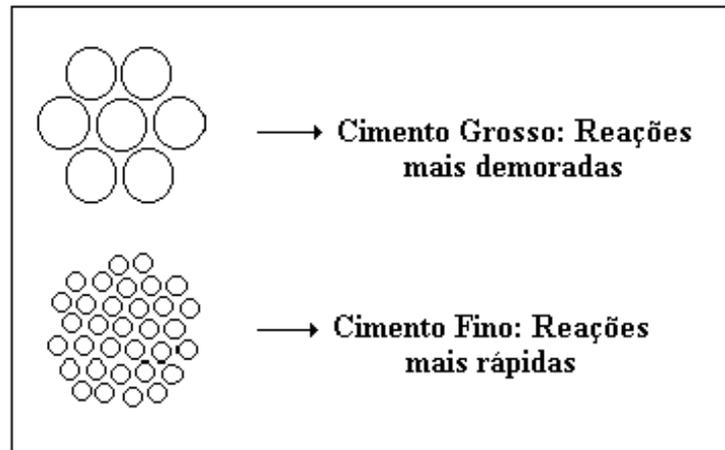


Figura 3.4 - Comportamento do cimento de acordo com a finura do clínquer

3.9.2 Cimento Portland Composto , CP II

A NBR 11578 define cimento Portland composto como: Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos dentro dos limites mostrados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Teores dos componentes do cimento Portland composto:

Sigla	Classe de Resistência	Componentes (% em massa)		
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material carbonático
CP II - E	25 32 40	94 - 56	6 - 34	0 - 10
CP II - Z	25 32 40	94 - 76	-	0 - 10
CP II - F	25 32 40	94 - 90	-	6 - 10

Fonte: ABNT EB-2138

3.9.3 Cimento Portland de Alto FORNO, CP III

De acordo com a NBR 5735 a definição para o cimento Portland de alto forno é: Aglomerante obtido pela moagem de clínquer Portland e escória granulada de alto forno.

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação do cimento motivou o setor, mundialmente, pela busca de medidas para diminuição do consumo energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto forno e pozolânicos, respectivamente. A Tabela 3.9, como vista em HOLDERCIM BRASIL (1998), apresenta a composição do cimento Portland de alto forno.

Tabela 3.9: Teores dos componentes do cimento Portland de alto-forno:

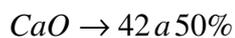
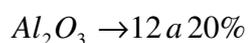
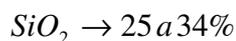
Sigla	Componentes (% em massa)		
	Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno	Material carbonático
CP III	65 - 25	35 - 70	0 - 5

Fonte: HOLDERCIM BRASIL (1998)

Características da Escória:

a) Granulometria por resfriamento brusco;

b) Composição Química:



c) Aspecto: Cor Clara

d) Hidratação da Escória: reação com a água formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, desde que em meio fortemente alcalino (PH > 12). Para a fabricação do CP III, o ideal é que o clínquer utilizado tenha alto teor de C₃S. Isto se deve ao fato do CP III ser rico em escória, a qual necessita de um meio fortemente alcalino para reagir. Esse meio alcalino é fornecido em maior quantidade pela

reação de hidratação do C_3S do que a do C_2S , conforme as Equações 3.13 e 3.14.

O cimento com escória tem baixo calor de hidratação, pois para que ela comece a reagir é necessário que o clínquer tenha reagido e liberado o hidróxido de cálcio, o qual fornece o meio alcalino. O clínquer e a escória reagem em tempos diferentes.

3.9.4 Cimento Portland Pozolânico, CP IV

De acordo com a NBR 5736, o cimento Portland pozolânico é assim definido: Aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado. Também de acordo com essa norma, os materiais silicosos ou silicoaluminosos são aqueles que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias.

As pozolanas podem ser classificadas em naturais ou artificiais. Sendo as naturais, por exemplo, as rochas vulcânicas e as artificiais, as argilas calcinadas e as cinzas volantes da combustão do carvão mineral.

A NBR 5752 fixa as condições de ensaio para verificação da atividade pozolânica dos materiais.

3.9.5 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V

Segundo a NBR 5733, o CP V pode ser definido como: Aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos, como pode ser verificado na Tabela 3.9.

O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

Em função da maior rapidez de desforma das concretagens, devido às altas resistências obtidas nas idades iniciais, este tipo de cimento é utilizado em concreto

protendido, fabricação de pré-moldados, construção de edifícios, pontes, viadutos, pisos industriais.

Tabela 3.10: Composição dos Cimentos Portland Comum, Composto, Alto Forno, Pozolânico e Alta Resistência Inicial.

Composição (% de massa)				
Sigla	Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material Pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)
CP V – ARI	100 - 95	-	-	0 - 5

Fonte: BT 106 Guia de Utilização do Cimento Portland – ABCP

3.9.6 Cimento Portland resistente aos sulfatos

Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados.

Em HOLDERCIM BRASIL (1998), alguns tipos básicos de cimento (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V) são considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedecem a pelo menos uma das seguintes condições:

- teor de C_3A do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico, que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico;
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

3.9.7 Cimentos Portland de baixo calor de hidratação

Utilizando os cimentos com baixo calor de hidratação pode-se evitar o aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto o que pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica.

De acordo com HOLDERCIM BRASIL (1998), são considerados cimentos com baixo calor de hidratação aqueles que desprendem até 260 J/g e até 300 J/g

aos 3 e 7 dias de hidratação, respectivamente, podendo ser qualquer um dos tipos básicos.

3.9.8 Cimento Portland Branco, CP B

Este cimento diferencia-se dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida utilizando-se matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação.

Pode ser classificado em dois subtipos: cimento Portland branco estrutural e cimento Portland branco não estrutural.

4 ARGAMASSAS

4.1 COMPONENTES DAS ARGAMASSAS

As argamassas são uma mistura de cimento, areia e água. As argamassas, assim como os concretos, também são moles nas primeiras horas e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade.

Quanto maior a plasticidade das argamassas na hora do uso, maior será a sua aderência, o que é uma grande vantagem em certas aplicações. Para aumentar essa plasticidade, é adicionado um quarto componente à mistura. Pode ser cal, saibro, barro, caulim ou outros, dependendo da região. Além desses componentes, as argamassas também podem conter aditivos.

4.2 TIPOS DE ARGAMASSAS

As argamassas são classificadas, segundo a sua finalidade, em: argamassas para assentamento e argamassas para revestimento.

Argamassas para assentamento são usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Servem também para a colocação de azulejos, tacos, ladrilhos e cerâmica.

As três primeiras fiadas de uma parede de blocos ou tijolos devem ser revestidas, inicialmente, com uma camada de argamassa de impermeabilização, que protege a parede contra a penetração de umidade e para isso, são utilizadas, por exemplo, as argamassas para revestimento. Todas as paredes e tetos devem receber uma camada de chapisco, qualquer que seja o acabamento. Sem o chapisco, que é a base do revestimento, as outras camadas podem descolar e até cair. Em alguns casos, como em muros, esse pode ser o único revestimento.

4.3 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS

As argamassas apresentam grande importância na construção civil, tanto no que diz respeito à qualidade quanto ao custo. Por isso é necessário que se façam os ensaios para verificar se os materiais atendem às exigências normativas.

Neste trabalho foram analisados a resistência à compressão e a absorção. Ambos os ensaios realizados tiveram seus resultados analisados e comparados com os resultados obtidos nas argamassas moldadas apenas com cimento Portland.

Para a confecção das argamassas, primeiramente foi necessário obter as cinzas. No recipiente mostrado na Figura 4.1, está apresentada a casca do café calcinada, ainda sem ser submetida à moagem.



Figura 4.1: Cinza da casca do café após sair do forno

Para realizar os ensaios de absorção e resistência à compressão foi necessário moldar corpos de prova cilíndricos (50 x 100)mm.



Figura 4.2: Argamassa moldada em fôrmas cilíndricas (50 x 100)mm

O ensaio de resistência à compressão consiste em submeter o corpo de prova à uma carga até que este seja rompido. Para este ensaio utiliza-se uma prensa de ruptura, a qual deve ter uma escala adequada em função da carga de ruptura dos corpos de prova. Antes de submeter o corpo de prova à ruptura, este deve ser curado e capeado. A cura tem por objetivo promover as reações de hidratação do cimento, isto é, tomam-se medidas para evitar que a água de amassamento evapore antes que as reações aconteçam, sendo estas as responsáveis pela resistência das argamassas. Já o capeamento dos corpos de prova tem a função de distribuir a carga uniformemente por toda a sua seção, a qual é transmitida pelos pratos da prensa. Nesse trabalho utilizou-se enxofre para o capeamento dos corpos de prova.



Figura 4.3: Ensaio de resistência à compressão de argamassa

De acordo com Bauer (1995), a absorção de água é devida aos poros existentes no material dos grãos. O ensaio consiste em medir a quantidade de água absorvida. O resultado do ensaio é calculado levando-se em consideração o estado saturado superfície seca (condição sss) e o estado seco. Portanto foi necessário que as amostras ficassem imersas em água até que estas se encontrassem completamente saturadas e depois foram submetidas à secagem em estufa.



Figura 4.4: Pesagem do corpo de prova seco em estufa

5 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

5.1 HISTÓRICO

Há pelo menos dez mil anos o homem utiliza o solo como material de construção. Como evidência destas técnicas, utilizadas intensivamente pelos gregos e difundidas pelos romanos, temos como vestígios edificações que estão de pé até hoje desafiando o tempo após milhares de anos. Um dos exemplos da aplicação do tijolo SC é a construção da Muralha da China, há mais de 4 milênios. De lá para cá, sua utilização sofreu modificações quanto ao uso e formatos, porém em pequena escala, comparado ao processo tradicional de construções (INVENTA BRASIL NET).

O solo-cimento é uma evolução de materiais de construção do passado, como o barro e a taipa. Só que as colas naturais, de características muito variáveis, foram substituídas por um produto industrializado e de qualidade controlada: o cimento.



Figura 5.1: Mistura para moldar tijolos de solo/cimento

O solo-cimento vem sendo empregado no Brasil desde 1948, encontrando-se hoje já bastante difundido. (CEPLAC)

5.2 FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Para a fabricação dos tijolos SC os materiais fornecidos pelo solo são misturados com água e cimento. Esta mistura é prensada em uma máquina para adquirir forma. Feita a modelagem, o tijolo sofre um processo de cura durante o qual deve permanecer em um ambiente úmido, sem vento e sem sol, durante sete dias. Após este tempo o tijolo adquire consistência e durabilidade suficiente para diversas aplicações no meio rural e urbano.



Figura 5.2: Prensa manual utilizada na moldagem dos tijolos



Figura 5.3: Tijolos após prensagem manual

Os tijolos SC também devem apresentar características que atendam as normas da ABNT. Nos tijolos preparados para esse trabalho, foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção.



Figura 5.4: Corpos de prova preparados para o ensaio de resistência à compressão



Figura 5.5: Ruptura do corpo de prova capeado

5.3 VANTAGENS NO EMPREGO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

O solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, obtido pela mistura de solo, cimento e um pouco de água, em proporções adequadas.

A economia de energia na produção do solo cimento é outro fator importante. Como exemplo, para a produção de mil tijolos de argila queimada (o tijolo

tradicional) é necessária a queima de 1 metro cúbico de madeira, o que equivale mais ou menos a seis árvores de porte médio.

O custo do frete também pode ser eliminado, pois o solo do próprio local da obra pode ser utilizado na confecção dos tijolos.

Uma outra vantagem é que ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram têm que ser descartados, os de solo-cimento podem ser moídos e reaproveitados.

O solo-cimento apresenta boas condições de conforto, comparáveis às construções de blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalação e proliferação de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade.

É um material de boa resistência e impermeabilidade, resistindo ao desgaste do tempo e à umidade, facilitando a sua conservação.

5.4 O TIPO DE SOLO

O uso do solo no local da obra é sempre a solução mais econômica. Entretanto, de acordo com a CEPLAC, se ele não servir, é necessário fazer a correção granulométrica (70% de areia grossa e 30 % de silte e argila) misturando-os uniformemente e peneirando-os, obtendo-se uma mistura adequada ou então procurar um solo adequado em outro local, denominado jazida, sendo importante observar que este local deve ficar o mais próximo possível da obra, por questões econômicas.



Figura 5.6: Homogeneização do solo com o cimento

Os solos adequados são os chamados solos arenosos, ou seja, aqueles que apresentam uma quantidade de areia na faixa de 60% a 80% da massa total da amostra considerada.

O proporcionamento dos constituintes é função do tipo de solo escolhido.

O Estudo Técnico Dosagem das Misturas de Solo-Cimento - Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio, da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), através de diferentes parâmetros relativos ao solo, tais como sua granulometria, índices físicos, etc., define os teores de cimento que devem ser aplicados aos diferentes tipos de solos. Os resultados finais são obtidos através de ensaios de resistências à compressão simples e de durabilidade por molhagem e secagem.

O resultado final do estudo de dosagem é apresentado na forma de teor de cimento (relação entre a quantidade de cimento e a de solo seco, em massa). Este teor, muitas vezes de pouca utilidade para fins de obra, pode ser transformado em traço volumétrico, por exemplo: 1 parte de cimento para 10 a 15 partes de solo, em volume.

Quando o volume de obra é pequeno, existem testes práticos para a avaliação das características granulométricas de um solo. Alguns deles são os testes da caixa e o da garrafa. Nesse trabalho foi utilizado o teste da caixa.



Figura 5.7 - Teste da caixa para verificar a retração do solo

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho procurou-se avaliar as potencialidades dos resíduos obtidos na agricultura cafeeira. Para facilitar a compreensão dos experimentos, os materiais empregados na análise serão designados da seguinte maneira:

- amostra A: casca do café *in natura*;
- amostra B: cinza obtida pela calcinação da casca do café à temperatura de 400°C, seguida de moagem no moinho de bolas;
- amostra C: cinza obtida através da calcinação da casca do café à temperatura de 600°C, seguida de moagem no moinho de bolas;
- amostra D: resíduo oriundo da queima da casca do café, sem controle de temperatura, quando utilizada na secagem dos grãos do café na própria fazenda. A amostra foi destorroada e peneirada na peneira ABNT 4,8mm (nº 4);
- amostra E: cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).



Figura 6.1 - Amostra A



Figura 6.2 - Amostra B, aspecto semelhante ao da amostra C



Figura 6.3 - Amostra D

Objetivando verificar o comportamento das amostras B, C e D, optou-se por avaliar suas possíveis potencialidades em diferentes aspectos. Para tanto, imaginou-se que os materiais poderiam ser utilizados em diferentes aplicações, sendo estas:

- a casca do café *in natura* poderia ser utilizada como fonte geradora de energia na indústria cimenteira;
- as amostras B, C e D poderiam ter características pozolânicas quando utilizadas em argamassas de cimento e areia;
- a amostra D poderia ser utilizada na fabricação de tijolos de solo/cimento/resíduo (SCR) nas próprias fazendas produtoras de café. A adição desse resíduo substituiria, num primeiro experimento, parte do cimento utilizado nos tijolos de solo/cimento (SC). Também foi realizada a substituição parcial da areia, utilizada para tornar o solo menos argiloso, por resíduo.

6.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Com o objetivo de definir as dosagens das misturas, foi realizada, primeiramente, a caracterização dos materiais. Os ensaios foram realizados nas instalações dos laboratórios de engenharia civil da Universidade Federal Fluminense (UFF) e da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Para a realização das experiências também foram utilizados outros materiais além dos oriundos da agricultura do café, como o cimento Portland (CP V - ARI), a

areia e o solo.

O solo utilizado na mistura para fabricar os tijolos foi peneirado na peneira de malha quadrada de abertura 4,76mm. Com o material passante nesta peneira é que foram realizados os ensaios.

Os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos, estão apresentados a seguir.

6.2.1 Massa Específica

Segundo a NBR NM 23 (2001), massa específica é a massa da unidade de volume do material.



Figura 6.4 - Massa Específica dos materiais em pó

a) Amostras B, C, D e E

Determinada de acordo com a NBR NM 23 (2001), a qual pode ser aplicada para cimento Portland e outros materiais em pó. As condições de ensaio estão apresentadas na Tabela 6.1 e os resultados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 - Condições do ensaio da massa específica das amostras

Amostra	Ensaio	Temperatura da água do banho (°C)	Temperatura do Laboratório (°C)	Umidade do Laboratório (%)
B	1	25,2	24,6	47
	2	26,5	24,8	52
C	1	25,0	23,7	48
	2	25,0	23,7	48
D	1	25,2	24,6	47
	2	26,5	24,8	52
E	1	23,5	22,6	51
	2	23,5	22,6	51

Obs: Não foi realizado o ensaio de massa específica para a amostra A.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos no ensaio de massa específica

Amostras	B		C		D		E	
	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º
Ensaio								
1ª Leitura V_1 (cm ³)	-0,1	0,1	0,4	0,4	0,0	0,4	0,5	0,6
Massa do material m (g)	29,3	29,90	27,58	27,65	45,85	46,03	64,00	64,00
2ª Leitura V_2 (cm ³)	21,4	21,9	18,6	18,5	22,2	22,7	21,2	21,1
$V = V_2 - V_1$ (cm ³)	21,5	21,8	18,2	18,1	22,2	22,3	20,7	20,6
massa específica	1,36	1,37	1,52	1,53	2,06	2,06	3,09	3,10

b) Areia e Solo

A massa específica da areia e do solo, utilizados nos tijolos SCR, foi realizada de acordo com a NBR 9776 (1986).

6.2.2 Massa Unitária

Segundo a NBR 7810 (1982), massa unitária é a massa da unidade de “volume aparente” do material, isto é, incluindo na medida deste volume os vazios entre os grãos. A importância de se conhecer a massa unitária vem da necessidade de se transformar um traço em massa para volume ou vice-versa.



Figura 6.5 - Massa unitária do solo

a) Amostras B e C

Para definição da massa unitária desses materiais utilizou-se o método de ensaio descrito na NBR 7251 (1982). No entanto para os materiais com quantidades insuficientes, ou seja, volume inferior ao do recipiente especificado pela norma, o ensaio seguiu os mesmos procedimentos descritos no método, porém com recipiente de dimensões diferentes.

Para as cinzas utilizou-se um recipiente de 400cm^3 . Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Massa Unitária das amostras B e C

Amostra	Ensaio	Massa da amostra	Massa Unitária (g/cm^3)
B	1	180,61	0,451
	2	178,05	0,445
	3	173,88	0,435
C	1	160,86	0,402
	2	160,20	0,400
	3	161,67	0,404

b) Amostra D

Para ensaiar a amostra D, utilizou-se um recipiente de 14510cm^3 e massa de 7150g. Os procedimentos foram os mesmos descritos na NBR 7251 (1982) e os resultados encontram-se na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Massa Unitária da amostra D

Amostra	Ensaio	Massa da amostra	Massa Unitária (g/cm ³)
D	1	12900	0,889
	2	12850	0,885
	3	12860	0,886

c) Cimento

A massa unitária do CP V utilizada para os cálculos foi a fornecida pelo fabricante do cimento, no valor de 1,20 g/cm³.

d) Areia e solo

A massa unitária da areia e do solo foi realizada de acordo com a NBR 7251 (1982). Os resultados obtidos encontram-se apresentados nas Tabelas 6.5 e 6.6.

Tabela 6.5 - Massa Unitária da areia

Areia		
Volume do recipiente: 14510 g/cm ³		
Massa do recipiente: 7150g		
Ensaio	Massa do recipiente + massa da amostra (g)	Massa Unitária (g/cm ³)
1	30850	2,126
2	31000	2,136
3	31250	2,154

Tabela 6.6 - Massa Unitária do solo

Solo		
Volume do recipiente: 14510 g/cm ³		
Massa do recipiente: 7117g		
Ensaio	Massa do recipiente + massa da amostra (g)	Massa Unitária (g/cm ³)
1	26100	1,799
2	25850	1,782
3	26050	1,795

6.2.3 Granulometria

A granulometria define a proporção relativa, expressa em porcentagem, dos diferentes tamanhos de grãos que se encontram constituindo um todo.



Figura 6.6 - Ensaio de granulometria

a) Amostras B, C e D

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.7 e na Figura 6.1.

Tabela 6.7 - Granulometria das amostras B, C e D

Material		Cinza 600°C			Cinza 400°C			Cinza queimada na fazenda		
Peso seco (g):		304,09			307,93			2040,60		
PENEIRAS		Peso retido da amostra seca (g)	% retida simples	% retida acumulada	Peso retido da amostra seca (g)	% retida simples	% retida acumulada	Peso retido da amostra seca (g)	% retida simples	% retida acumulada
Nº (ASTM)	mm (ABNT)									
6"	152									
3"	76									
2 1/2"	64									
2"	50									
1 1/2"	38									
1 1/4"	32									
1"	25									
3/4"	19									
1/2"	12,5									
3/8"	9,5									
1/4"	6,3									
Nº 4	4,8									
Nº 8	2,4								0	0,00
Nº 10	2							1	0,1	0,06
Nº 16	1,2							458	22,4	22,49
Nº 30	0,6							769	37,7	60,17
Nº 40	0,42	0	0	0,00		0	0,00	347	17,0	77,18
Nº 50	0,3	2	0,5	0,51	1	0,2	0,17	207	10,1	87,33
Nº 100	0,15	60	19,7	20,18	46	14,8	14,95	180	8,8	96,15
Nº 200	0,075	65	21,5	41,65	90	29,2	44,17	60	3,0	99,10
Fundo	0	171	56,2	97,89	172	55,7	99,86	12	0,6	99,69

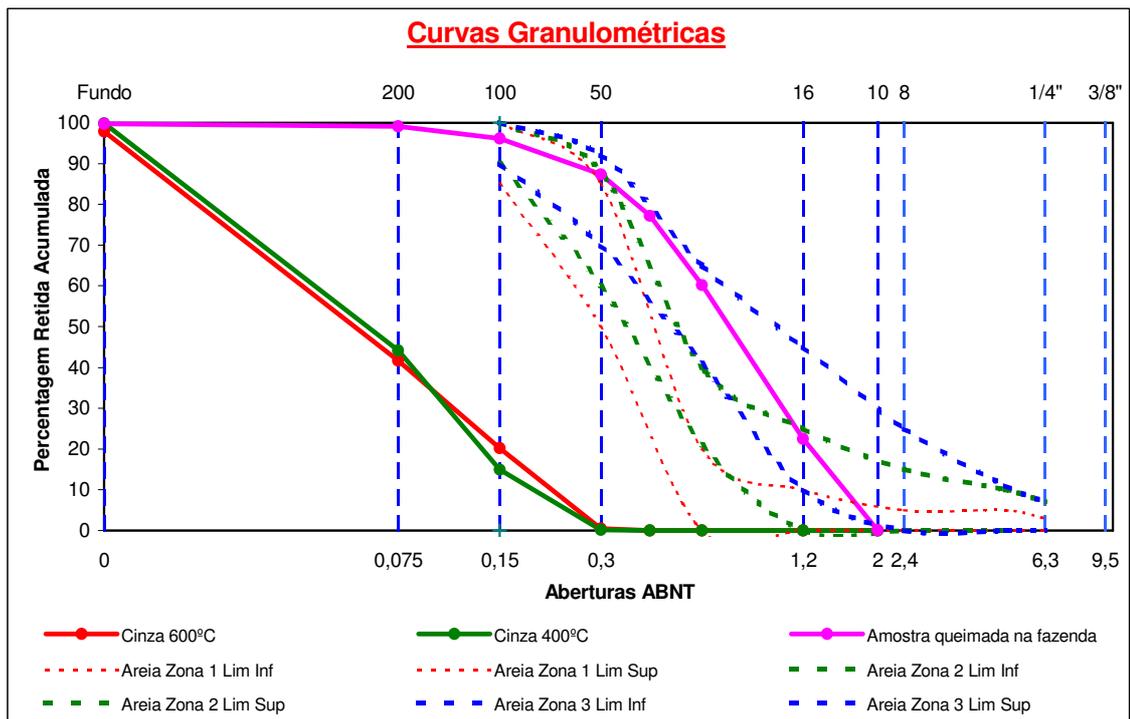


Figura 6.7 - Curvas Granulométricas das amostras B, C e D

b) Areia

A areia utilizada na mistura dos tijolos SCR apresentou a granulometria constante da Tabela 6.8 e representada graficamente na Figura 6.2.

Tabela 6.8 - Granulometria da areia

Peso seco:		Amostra A: 1000g			Amostra B: 1000g			% média retida acumulada
PENEIRAS		Peso seco retido (g)	% retida simples	% retida acumulada	Peso seco retido (g)	% retida simples	% retida acumulada	
Nº (ASTM)	mm (ABNT)							
1/2"	12,5	-	0	0	-	0	0	0
3/8"	9,5	-	0	0	-	0	0	0
1/4"	6,3	0	0	0	0,0	0	0	0
Nº 4	4,8	0	0	0	0,0	0	0	0
Nº 8	2,4	21	2	2	20,1	2	2	2
Nº 16	1,2	158	16	18	159,8	16	18	18
Nº 30	0,6	277	28	46	286,2	29	47	47
Nº 50	0,3	231	23	69	232,8	23	70	70
Nº 100	0,15	201	20	89	195,6	20	90	90
Fundo	0	1						

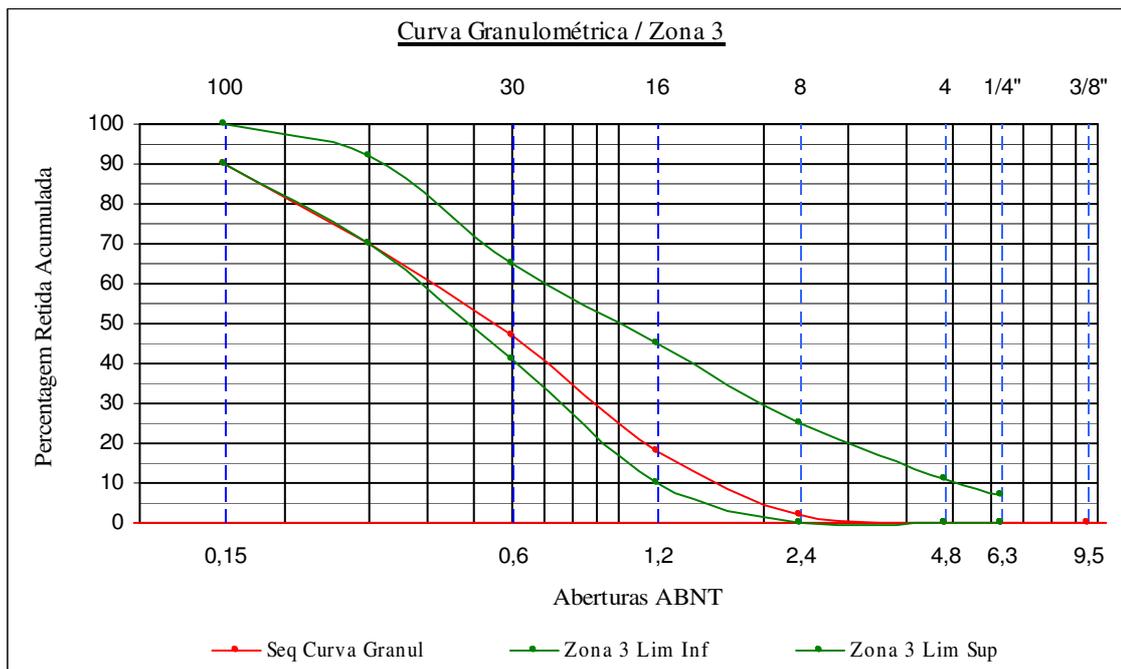


Figura 6.8: Curva Granulométrica da areia

Com base no ensaio de granulometria, o módulo de finura da areia é de 2,24 e a dimensão máxima 2,4 mm.

c) Solo

O solo utilizado, previamente peneirado na peneira 4,8mm, apresentou a composição granulométrica de acordo com as Tabelas 6.9 à 6.12 e representada graficamente pela Figura 6.3.

Tabela 6.9 - Determinação da umidade

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE		
Cápsula N°	573	579
Solo um.+tara(g)	98,31	86,47
Solo seco+tara(g)	93,72	79,82
Tara (g)	14,6	11,84
Água (g)	4,59	6,65
Solo seco (g)	79,12	67,98
Teor de umid. %	5,80	9,78
Média %	7,79	

Tabela 6.10 - Peneiramento grosso

PENEIRAMENTO GROSSO				
PENEIRAS		Peso da amostra seca (g)		% pas. am.
Nº	mm	Retido	Passando	total
2"	50			
1 1/2"	38			
1"	25			
3/4"	19			
3/8"	9,5			
4	4,8	0,00		
10	2	44,00	2390,72	98

Tabela 6.11 - Peneiramento em gramas

PENEIRAMENTO GROSSO (g)	
A) Amostra total úmida	2621,0
B) Solo seco retido #10	44,0
C) Solo úmido pas. #10=(A-B)	2577,0
D) Solo seco pas.#10=C/(100+h)	2390,7
E) Amostra total seca = B+D	2434,7
PENEIRAMENTO FINO (g)	
Peso da amostra úmida: PU	130,76
Peso am.seca: PS=PU/(100+h)	121,31

Tabela 6.12 - Peneiramento fino em gramas

PENEIRAMENTO FINO (g)					
PENEIRAS		Peso da amostra seca (g)		% pas. am.	% pas. am.
Nº	mm	Retido	Passando	parcial	total
16	1,20	4,89	116,42	96,0	94
30	0,60	17,49	98,93	81,6	80
40	0,42	12,00	86,93	71,66	70
50	0,30	9,00	77,93	64,24	63
100	0,15	21,08	56,85	46,86	46
200	0,075	8,98	47,87	39,46	39

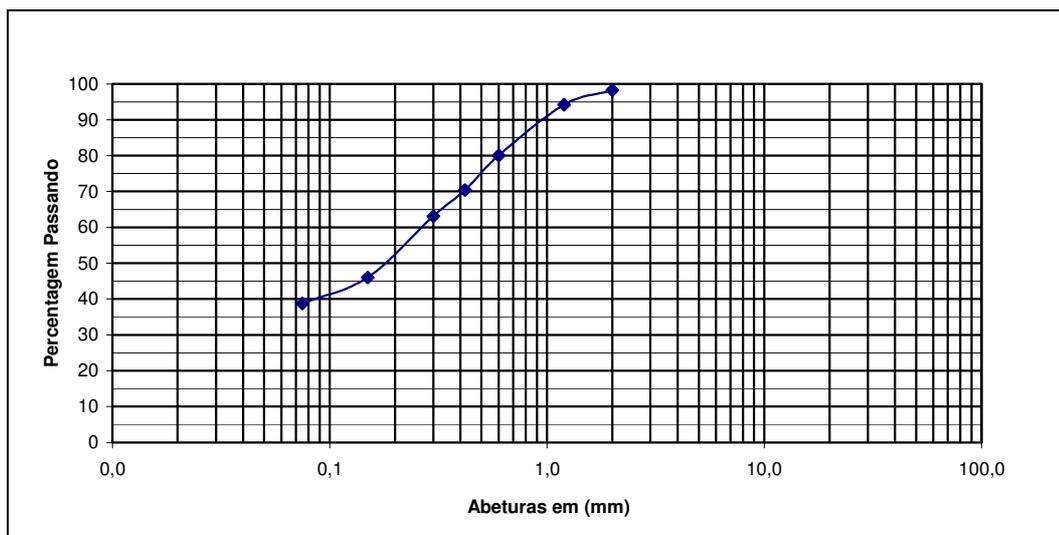


Figura 6.9: Composição granulométrica do solo

A Tabela 6.13 consolida os resultados apresentados com relação à massa unitária e a massa específica dos materiais utilizados nas argamassas e nos tijolos.

Tabela 6.13 - Massa Unitária e Massa Específica das amostras

Materiais	Características	
	Massa Unitária (g/cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)
CP V - ARI	1,20	3,10
Casca do café queimada a 400°C (Amostra B)	0,44	1,37
Casca do café queimada a 600°C (Amostra C)	0,40	1,52
Casca do café queimada na fazenda e peneirada na # 4,8mm (Amostra D)	0,82	2,06
Areia	1,65	2,60
Solo	1,30	2,55

6.3 UTILIZAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ *IN NATURA* NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA COMO FONTE GERADORA DE ENERGIA

Com relação aos estudos sobre a possibilidade da casca do café *in natura* ser utilizada como fonte geradora de energia na indústria cimenteira, foi realizada uma visita à uma fábrica desta natureza, no estado do Rio de Janeiro, a qual apoiou a idéia e realizou alguns ensaios para que fosse avaliada tal possibilidade. Nesta visita foi entregue ao pesquisador da fábrica cerca de 10kg de casca de café para que fosse ensaiada.

Primeiramente a amostra foi calcinada a uma temperatura semelhante à de

clinkerização, isto é, 1400°C . Os resultados obtidos nos ensaios realizados são apresentados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Análise da casca de café in natura calcinada a 1400°C

Umidade total	12,36 %
Poder calorífico	5052 kcal/kg
Enxofre	0,32 %
Cinzas	3,82 %
Matérias voláteis	80,40 %
Carbono fixo	15,78 %
Cloretos	0,06 %

Todos os ensaios acima mencionados são de grande importância para a cimenteira, seja do ponto de vista comercial ou qualitativo, uma vez que o calor gerado pela casca do café deve ser tal que viabilize sua utilização, quando da substituição de outros combustíveis já utilizados (coque de petróleo, finos de carvão vegetal), e também os resíduos gerados pela queima desse combustível não devem alterar negativamente a qualidade do clínquer produzido.

Quanto às características físicas e químicas do clínquer produzido, estima-se que os resultados sejam positivos ao utilizar-se a casca do café como fonte geradora de energia durante o processo de sua fabricação. Esta estimativa é baseada na experiência dos profissionais da fábrica, apesar de não ter sido realizada uma queima em escala industrial, analisando-se as características da cinza obtida quando da queima da casca do café em laboratório.

Uma vez sabendo-se que os resultados do clínquer fabricado são satisfatórios, deve-se analisar se é viável para a fábrica, a utilização da casca do café como fonte geradora de energia. Para tanto, deve-se realizar uma avaliação sob o ponto de vista econômico, legal e ambiental.

Segundo Lebre (2003), do Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas - CENTRO CLIMA, em seu projeto “A utilização da casca de arroz na cogeração de energia e a decorrente mitigação de gases que contribuem para o efeito estufa como mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)”, ao utilizar um resíduo agrícola, evita-se a emissão de gás metano para o ambiente, além de reduzir a emissão de CO₂ ao substituir parte de um combustível fóssil por um combustível renovável. Ainda de acordo com o projeto, o poder calorífico da casca de arroz é de 3.200 kcal/kg. Cabe lembrar que o poder calorífico da casca do café, determinado no ensaio realizado pela cimenteira, foi de 5.052 kcal/kg.

Com relação à viabilidade econômica, é interessante analisar o poder calorífico de alguns materiais apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Poder calorífico dos principais combustíveis

Energético	Poder calorífico (kcal/kg)
Petróleo	10.180
Gás Natural	8.600
Óleo combustível	9.590
Óleo diesel	10.100
Coque de petróleo	8.390
Carvão energético	6.120
Coque de carvão mineral	6.900
Lenha	3.100
Carvão vegetal granulado	6.460
Finos de carvão vegetal	5.110
Bagaço de cana (com 50% de umidade)	2.130

Fonte: 18º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais - 2003

6.4 VERIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS POZOLÂNICAS DAS CINZAS NAS ARGAMASSAS

Para a avaliação da característica de pozolanicidade das cinzas, utilizou-se a NBR 5752 (1992).

De acordo com a norma, devem ser preparados corpos de prova com dois tipos de argamassa, identificadas por argamassas A e B.

- a) argamassa A: deve conter apenas cimento Portland;
- b) argamassa B: deve ter 35% do seu volume absoluto de cimento substituído pelo material pozolânico em estudo.

A norma também recomenda que para cada tipo de argamassa devem ser moldados pelo menos 3 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. A Tabela 6.16 estabelece as quantidades em massa necessárias para a moldagem desses três corpos de prova cilíndricos.

Tabela 6.16 - Massa necessária para moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	312,0	202,8
Material pozolânico	-	$109,2 \times \frac{\delta p^{(A)}}{\delta c^{(A)}}$
Areia normal	936,0	936,0
Água	$x^{(B)}$	$y^{(B)}$

- (A) Representam as massas específicas do material pozolânico e do cimento, determinadas de acordo com a NBR 6474 (1984);
- (B) Representam as quantidades de água necessárias para produzir argamassas com índices de consistência de 225 ± 5 mm, determinados de acordo com a NBR 7215 (1996).

Neste trabalho foram moldados seis corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão e três para o ensaio de absorção, para cada tipo de argamassa.

No dia seguinte em que foram moldados os corpos de prova iniciaram a cura, imersos em água, durante 27 dias, em temperatura ambiente. Após o período de cura os corpos de prova foram capeados com enxofre e rompidos de acordo com as recomendações da NBR 7215 (1996).

Com relação a avaliação da pozolanicidade das cinzas na argamassa, foram preparados dois tipos de mistura. Na primeira, fugindo ao que a norma estabelece, fixou-se a relação água/aglomerante, onde são utilizados como aglomerante o cimento e as cinzas. Este procedimento teve por objetivo analisar apenas a influência das cinzas. Na segunda situação, adicionou-se tanta água quanto fosse necessária para atingir o índice de consistência de 225 ± 5 mm, de acordo com a NBR 7215 (1996), também utilizando como aglomerante o cimento e as cinzas.



Figura 6.10 - Enchimento do molde



Figura 6.11 - Molde pronto para ser retirado



Figura 6.12 - Realização dos impactos



Figura 6.13 - Verificação da consistência

Para a preparação das argamassas foi utilizada areia padrão do rio Tietê e cimento CP V - ARI.

6.4.1 Argamassa com relação água/aglomerante constante

Para a moldagem dos corpos de prova foram preparados quatro tipos de argamassa, identificadas por argamassas 1, 2, 3 e 4. Os traços dessas argamassas diferem entre si em função do material que se deseja avaliar, isto é, ora utilizou-se o cimento como aglomerante ora as cinzas em análise. Todas as argamassas utilizavam areia como agregado. Com relação ao aglomerante, os traços foram definidos da seguinte forma:

- Traço 1: apenas com cimento Portland;
- Traço 2: com cimento Portland e amostra B;
- Traço 3: com cimento Portland e amostra C;
- Traço 4: com cimento Portland e amostra D.

As quantidades de materiais necessárias para moldar seis corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm) constam da Tabela 6.17. Estes quantitativos estão de acordo com a NBR 5752 (1992), exceto a quantidade de água, que neste primeiro caso, foge ao que a norma estabelece. A quantidade de material pozolânico foi calculada de acordo com a Equação 6.1,

$$109,2 \times \frac{\delta p^{(A)}}{\delta c^{(A)}} \quad (6.1)$$

onde δp e δc representam, respectivamente, as massas específicas do cimento e do material pozolânico, garantindo assim que as argamassas 2, 3 e 4 tenham 35% do seu volume absoluto de cimento substituído por material pozolânico.

Tabela 6.17 - Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária para a moldagem de 6 cp's cilíndricos (g)			
	Argamassa 1	Argamassa 2	Argamassa 3	Argamassa 4
Cimento Portland (g)	624,0	405,6	405,6	405,6
Material pozolânico (g)	0,0	96,5	107,4	145,4
Cim. Port. + Mat. poz. (g)	624,0	502,1	513,0	551,0
Areia normal (g)	1872,0	1872,0	1872,0	1872,0
Água (ml)	300,0	241,0	246,3	264,5
Relação água/aglomerante (em massa)	0,48	0,48	0,48	0,48



Figura 6.14 - Moldagem dos corpos de prova

Após decorridos os 28 dias de cura das argamassas, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção, de acordo com a NBR 7215 (1996) obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 6.18 e 6.19.

Tabela 6.18 - Ensaio de resistência à compressão com relação água/aglomerante constante

Amostras	Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	F (kgf)	9400	3900	4400	2700
	R _c (MPa)	46,96	19,49	21,98	13,49
CP 2	F (kgf)	Falsa Ruptura	4700	5800	2600
	R _c (MPa)	-	23,48	28,98	12,99
CP 3	F (kgf)	9800	4600	5000	2900
	R _c (MPa)	48,96	22,98	24,98	14,49
CP 4	F (kgf)	9800	4300	4500	4200
	R _c (MPa)	48,96	21,48	22,48	20,98
CP 5	F (kgf)	10900	4200	4800	4100
	R _c (MPa)	54,46	20,98	23,98	20,48
CP 6	F (kgf)	10500	5000	4600	4400
	R _c (MPa)	52,46	24,98	22,98	21,98

A resistência à compressão individual é calculada dividindo-se a força registrada na prensa quando da ruptura do corpo de prova pela área do mesmo, que é de 19,63cm².



Figura 6.15 - Corpo de prova após ser submetido ao ensaio de compressão axial



Figura 6.16 - Pesagem dos corpos de prova para o ensaio de absorção

Seguindo a NBR 9778 (1987), para verificar a absorção das diversas argamassas em análise, os corpos de prova foram pesados após terem sido retirados da imersão, tendo-se assim suas massas saturadas. Logo após, foram submetidos à secagem em estufa até que houvesse constância de massa.

Tabela 6.19 - Ensaio de absorção de água por imersão com relação água/aglomerante constante

Amostras	Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	M _{sat} (g)	446,87	424,60	423,53	440,46
	M _s (g)	413,04	387,22	382,52	398,74
	A (%)	8,19	9,65	10,72	10,46
CP 2	M _{sat} (g)	445,90	426,28	430,80	437,10
	M _s (g)	412,31	390,54	394,72	395,05
	A (%)	8,15	9,15	9,14	10,64
CP 3	M _{sat} (g)	446,05	431,59	431,41	438,41
	M _s (g)	412,15	394,10	394,95	396,41
	A (%)	8,23	9,51	9,23	10,60

Para calcular a absorção de cada corpo de prova utilizou-se a Equação 6.2.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (6.2)$$

Onde: A = Absorção

M_{sat} = Massa do corpo de prova cilíndrico (5x10)cm saturado

M_s = Massa do corpo de prova cilíndrico (5x10)cm seco

6.4.2 Argamassa com relação água/aglomerante variável

Os resultados obtidos nos ensaios das argamassas com relação água/aglomerante variável estão apresentados nas Tabelas 6.20 a 6.22. Cabe ressaltar que os procedimentos para calcular a resistência à compressão e a absorção dos corpos de prova são os mesmos apresentados no caso das argamassas com água/aglomerante constante.

Tabela 6.20 - Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária para a moldagem de 6 cp's cilíndricos (g)			
	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Cimento Portland (g)	624,0	405,6	405,6	405,6
Material pozolânico (g)	0,0	96,5	107,4	145,4
Cim. Port. + Mat. poz. (g)	624,0	502,1	513,0	551,0
Areia normal (g)	1872,0	1872,0	1872,0	1872,0
Água (ml)	420,0	380,0	407,5	485,0
Relação água/aglomerante (em massa)	0,67	0,76	0,79	0,88

Tabela 6.21 - Ensaio de resistência à compressão com relação água/aglomerante variável

Amostras	Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	F (kgf)	7900	3100	3100	700
	R _c (MPa)	39,47	15,49	15,49	3,50
CP 2	F (kgf)	9500	2800	3000	700
	R _c (MPa)	47,46	13,99	14,99	3,50
CP 3	F (kgf)	9800	2800	3000	700
	R _c (MPa)	48,96	13,99	14,99	3,50
CP 4	F (kgf)	9800	3200	3100	2100
	R _c (MPa)	48,96	15,99	15,49	10,49
CP 5	F (kgf)	9400	3200	3200	2150
	R _c (MPa)	46,96	15,99	15,99	10,74
CP 6	F (kgf)	9800	3100	4300	2140
	R _c (MPa)	48,96	15,49	21,48	10,69

Tabela 6.22 - Ensaio de absorção de água por imersão com relação água/aglomerante variável

Amostras	Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	M _{sat} (g)	439,84	394,41	415,65	401,98
	M _s (g)	398,95	349,30	365,85	338,73
	A (%)	10,25	12,91	13,61	18,67
CP 2	M _{sat} (g)	439,17	392,94	415,64	397,80
	M _s (g)	398,86	348,02	366,06	335,25
	A (%)	10,11	12,91	13,54	18,66
CP 3	M _{sat} (g)	439,33	393,56	415,80	399,81
	M _s (g)	398,76	348,87	365,66	337,56
	A (%)	10,17	12,81	13,71	18,44

6.5 TIJOLOS DE SOLO/CIMENTO/RESÍDUO

Conforme apresentado na Tabela 6.23 pode-se observar que a cinza (amostra D) foi substituída ora como material inerte, ora como aglomerante. É importante destacar que o Traço V não apresentou características que viabilizassem a moldagem dos tijolos, uma vez que a mistura apresentou-se bastante arenosa.

Tabela 6.23 - Composição dos tijolos solo/cimento/cinza

Traço	Material inerte (%)			Material aglomerante (%)		Nº de tijolos moldados
	Solo	Areia	Cinza	Cimento	Cinza	
I	70	30	-	100	0	11
II	70	30	-	75	25	8
III	70	30	-	50	50	9
IV	70	30	-	25	75	9
V	70	30	20	100	0	-
VI	70	13,8	16,2	100	0	11
VII	70	11,2	18,8	100	0	13

Para definir o traço unitário em massa, foi utilizada a massa unitária dos materiais apresentadas nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Para o traço dos tijolos optou-se pela proporção de 1:10 em volume (1 parte de cimento para 10 partes de solo), de acordo com TEIXEIRA FILHO (1996). Os traços definidos para os tijolos constam da Tabela 6.24.

Apesar de bibliografias mostrarem o traço dos tijolos SC em volume, optou-se neste trabalho por apresentá-los em volume e em massa, uma vez que as misturas em massa apresentam maior precisão.

Percebe-se pela Tabela 6.24 que o traço I serve como referência para os demais, dado que é composto apenas por cimento, areia e solo.

Nos traços I, II, III e IV, a cinza foi utilizada a fim de que se verificasse a sua potencialidade como material aglomerante.

Nos demais traços, a cinza foi utilizada na substituição parcial da areia, isto é, do material inerte, dado que ela apresenta característica granulométrica semelhante à areia.

Com relação ao traço V, este não apresentou coesão o suficiente para que os tijolos fossem prensados e desmoldados com sucesso.

Segundo TEIXEIRA FILHO (1996), é possível adicionar areia a um solo

quando este não apresentar quantidade suficiente deste material, podendo esta adição variar de 5 a 30%.

Tabela 6.24 - Traços dos tijolos solo/cimento/cinza

TRAÇO	Materiais	Traço em volume	Traço em massa	Traço unitário em massa
I	cimento	1	1,20	1,00
	areia	3	4,94	4,12
	solo	7	9,10	7,58
II	cinza	0,25	0,206	0,23
	cimento	0,75	0,90	1,00
	areia	3	4,94	5,49
III	solo	7	9,10	10,11
	cinza	0,5	0,412	2,06
	cimento	0,5	0,60	1,00
	areia	3	4,94	8,23
IV	solo	7	9,10	15,17
	cinza	0,75	0,62	2,06
	cimento	0,25	0,30	1,00
	areia	3	4,94	16,46
V	solo	7	9,10	30,33
	cinza	0	0	0,00
	cimento	1	1,20	1,00
	areia	3	4,94	4,12
	solo	7	9,10	7,58
VI	cinza	2	1,65	1,37
	cinza	0	0	0,00
	cimento	1	1,20	1,00
	areia	1,379	2,27	1,89
	solo	7	9,10	7,58
VII	cinza	1,621	1,34	1,11
	cinza	0	0	0,00
	cimento	1	1,20	1,00
	areia	1,12	1,84	1,54
	solo	7	9,10	7,58
	cinza	1,88	1,55	1,29

Para verificar as características do solo utilizado foram realizados ensaios de granulometria, e também, o ensaio da caixa, que objetiva avaliar se o solo, ao ser misturado com certa quantidade de água, irá apresentar fissuras ou retrações. O ensaio da caixa pode ser descrito da seguinte forma:

- a) prepara-se uma caixa de madeira, com dimensões de (60 x 8,5 x 3,5)cm, estanque e lubrifica-a com óleo;
- b) toma-se uma porção da mistura a ser analisada, mistura-a com água, até que tal mistura adira à superfície metálica de uma colher de pedreiro;

- c) coloca-se a mistura na caixa de madeira relacionada no item 1;
- d) mantém-se a caixa à sombra e sete dias após mede-se a retração no sentido do comprimento da caixa (60 cm).

Para que a amostra seja considerada adequada, a retração medida não deve ser superior a 2,0 cm. Também não devem aparecer trincas na mesma.

A retração medida após 7 dias foi de 1,8 cm.

Após os ensaios de caracterização do solo e utilizando-se também os resultados obtidos do ensaio prático da caixa, a proporção de solo misturado à areia foi fixada em 30%, em função das características especificadas para o solo a ser utilizado nesses tipos de tijolos.

Para a mistura do solo e da areia fez-se a homogeneização dos materiais manualmente.



Figura 6.17 - Homogeneização do solo

Após obter esta mistura, adicionou-se nesta as quantidades de cinza e cimento estabelecidas para os traços e com o auxílio de um misturador mecânico procedeu-se a homogeneização dos materiais secos.



Figura 6.18 - Mistura mecânica na adição da cinza e do cimento

Após estarem preparados todos os traços secos, pôde-se dar início à adição de água, a qual não é calculada. Esta quantidade de água adicionada às misturas é estabelecida experimentalmente. Segundo TEIXEIRA FILHO (1996), adiciona-se à mistura determinada quantidade de água com o objetivo de atingir a umidade ótima, na qual se consegue maior compacidade do solo, isto é, maior peso específico seco. Para a determinação desta umidade ótima, característica de cada tipo de solo, utilizou-se o ensaio prático conhecido como “ensaio do bolo”, o qual pode ser descrito da seguinte forma:

- a) coloca-se um punhado de solo na mão e comprime-o entre os dedos. O solo deve ficar com a marca dos dedos ao abrir a mão. Caso isto não ocorra é possível que a mistura esteja muito seca;
- b) deixa-se o bolo cair no chão de uma altura de aproximadamente 1,0m, devendo este esfarelar-se. Se isto não ocorrer o bolo pode estar com excesso de água.

6.5.1 Produção dos tijolos

Os tijolos foram prensados utilizando-se a mistura de solo/cimento e solo/cimento/resíduo na umidade ótima. As dimensões dos tijolos são (9 x 11 x 23)cm.

Para a execução dos tijolos foi utilizada uma máquina de prensagem manual. De acordo com o CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO - THABA

(1999), o princípio básico de tais máquinas consiste em submeter uma mistura de solo/cimento à pressões muito elevadas dentro de uma forma metálica. Nas prensas manuais a pressão varia de 20 a 40 kgf/cm².

Na compactação dos tijolos tomou-se o cuidado de se utilizar a mesma quantidade de material para cada tijolo.



Figura 6.19 - Máquina de prensagem manual

Após a prensagem dos tijolos, estes são retirados do equipamento, colocados sobre uma bancada e curados. Os tijolos de solo/cimento/cinza não necessitam de queima em fornos.



Figura 6.20 - Corpos de prova após moldagem

Para que a cura dos tijolos fosse adequada, estes foram colocados em câmara úmida e sobre eles fez-se a aspersão de água até que completassem 28 dias. Depois de curados os tijolos foram preparados para os ensaios de absorção e

resistência à compressão.

6.5.2 Determinação da resistência à compressão e da absorção de água dos tijolos de solo/cimento/RESÍDUO

A NBR 8492 (1984) define como determinar a resistência à compressão e a absorção de água de tijolos maciços de solo-cimento para alvenaria.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água de tijolos maciços de solo-cimento foram escolhidas 13 unidades, aleatoriamente, representativas do lote constituído de 10000 a 25000 tijolos. As amostras foram medidas com precisão de 1mm, e essas leituras foram efetuadas em 3 pontos distintos.

Dos treze corpos-de-prova selecionados aleatoriamente, dez foram separados para o ensaio de resistência à compressão, e os outros três foram destinados ao ensaio de absorção de água.

6.5.2.1 Ensaio à compressão simples

A prensa utilizada para este ensaio deveria atender às seguintes condições:

- distribuir uniformemente a carga e aplicar os esforços à peça ensaiada, progressivamente e sem choque;
- possuir dispositivo para o controle da velocidade de aplicação da carga;
- permitir a leitura das cargas aplicadas com uma sensibilidade de 100N (10kgf).

Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão:

- cada tijolo foi cortado ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão;
- as faces cortadas de maior área foram superpostas, tomando o cuidado de colocá-las com as reentrâncias do tijolo em posições contrárias, de acordo com a NBR 8492 (1984). As faces foram unidas com uma camada fina (2 a 3mm de espessura) de pasta de cimento Portland pré contraída (repouso de 30 minutos) e aguardou-se o seu endurecimento;
- as reentrâncias dos tijolos foram preenchidas com pasta de cimento Portland e aguardou-se por aproximadamente 24 horas;
- executou-se o capeamento das faces que entrariam em contato com o prato da prensa, tornando-as niveladas, com intervalo de 24 horas de um lado para

o outro;

- identificou-se os corpos de prova e após 24 horas os mesmos foram imersos em água por mais 24 horas;

- os corpos de prova foram retirados e enxutos superficialmente e determinou-se as dimensões das faces com precisão de 1mm;

- colocou-se cada corpo de prova centrado sobre o prato inferior da prensa;

- aplicou-se uma carga uniforme, à razão de 500N/s até ocorrer a ruptura do corpo de prova.

Determina-se a resistência à compressão de cada corpo de prova, dividindo-se a carga máxima observada no ensaio de resistência à compressão pela área média das duas faces de trabalho. Determina-se a resistência à compressão como sendo a média dos dez valores individuais obtidos.

Os resultados de resistência à compressão dos tijolos ensaiados estão apresentados nas Tabelas 6.25 a 6.30.

Tabela 6.25 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço I

Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 1	111,8	110,3	113,6	111,0	12331,54	12609,60	12470,57	3100	2,44
CP 2	111,0	111,0	110,6	113,5	12321,00	12553,10	12437,05	2800	2,21
CP 3	112,3	112,7	112,0	113,9	12656,21	12756,80	12706,51	2900	2,24
CP 4	110,7	112,2	111,0	111,3	12420,54	12354,30	12387,42	2900	2,30
CP 5	111,7	111,0	111,3	114,6	12398,70	12754,98	12576,84	3000	2,34
CP 6	111,0	114,9	112,3	110,5	12753,90	12409,15	12581,53	2900	2,26
CP 7	110,8	115,0	112,2	112,4	12742,00	12611,28	12676,64	2800	2,17
CP 8	111,0	113,3	111,3	111,0	12576,30	12354,30	12465,30	2700	2,12

Tabela 6.26 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço II

Traço II									
Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 3	112,0	110,5	115,5	111,0	12376,00	12820,50	12598,25	2220	1,73
CP 4	110,7	116,0	111,0	112,6	12841,20	12498,60	12669,90	1810	1,40
CP 5	111,0	114,0	110,5	110,5	12654,00	12210,25	12432,13	2940	2,32
CP 6	111,0	116,0	111,3	109,0	12876,00	12131,70	12503,85	2000	1,57
CP 7	111,1	112,0	111,3	113,5	12443,20	12632,55	12537,88	1660	1,30

Tabela 6.27 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço III

Traço III									
Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 4	112,8	114,5	112,0	112,3	12915,60	12577,60	12746,60	1250	0,96
CP 5	111,3	111,2	111,1	113,8	12376,56	12643,18	12509,87	1430	1,12
CP 6	111,1	112,2	111,4	113,3	12465,42	12621,62	12543,52	1870	1,46
CP 7	110,8	112,1	110,3	114,2	12420,68	12596,26	12508,47	1460	1,15
CP 8	111,4	109,0	111,4	115,0	12142,60	12811,00	12476,80	1540	1,21
CP 9	111,3	114,8	110,2	110,4	12777,24	12166,08	12471,66	1410	1,11

Tabela 6.28 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço IV

Traço IV									
Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 3	111,0	114,9	111,6	108,8	12753,90	12142,08	12447,99	430	0,34
CP 4	111,0	109,7	111,0	111,0	12176,70	12321,00	12248,85	530	0,42
CP 5	110,4	110,0	111,8	110,0	12144,00	12298,00	12221,00	420	0,34
CP 6	111,2	111,0	110,2	108,6	12343,20	11967,72	12155,46	600	0,48
CP 7	111,0	116,0	111,6	109,6	12876,00	12231,36	12553,68	460	0,36
CP 8	109,0	112,0	110,7	112,9	12208,00	12498,03	12353,02	520	0,41
CP 11	111,0	110,0	109,8	110,2	12210,00	12099,96	12154,98	550	0,44

Tabela 6.29 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço VI

Traço VI									
Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 1	110,5	114,5	112,6	110,5	12652,25	12442,30	12547,28	6000	4,69
CP 2	112,3	114,1	112,2	111,5	12813,43	12510,30	12661,87	5000	3,87
CP 3	112,5	113,9	111,2	114,3	12813,75	12710,16	12761,96	6020	4,63
CP 4	114,0	110,9	111,0	114,0	12642,60	12654,00	12648,30	6200	4,81
CP 5	110,8	115,8	110,0	112,2	12830,64	12342,00	12586,32	5800	4,52
CP 6	112,2	112,2	110,0	116,0	12588,84	12760,00	12674,42	5740	4,44
CP 7	112,0	117,0	110,5	111,5	13104,00	12320,75	12712,38	6040	4,66
CP 8	111,0	112,0	110,0	115,0	12432,00	12650,00	12541,00	5840	4,57

Tabela 6.30 - Resistência à compressão dos tijolos do Traço VII

Traço VII									
Amostra	Medidas (mm)				Áreas (mm ²)		Área Média (mm ²)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
	Face Superior		Face Inferior		Superior	Inferior			
	x	y	x	y					
CP 1	110,0	110,0	115,0	110,0	12100,00	12650,00	12375,00	2440	1,93
CP 2	110,0	113,0	113,0	112,0	12430,00	12656,00	12543,00	3000	2,35
CP 3	111,6	113,3	111,0	112,8	12644,28	12520,80	12582,54	2460	1,92
CP 4	112,5	111,0	117,0	110,5	12487,50	12928,50	12708,00	3020	2,33
CP 5	110,0	112,0	110,0	113,0	12320,00	12430,00	12375,00	2920	2,31
CP 6	109,0	113,0	112,0	110,0	12317,00	12320,00	12318,50	3020	2,41
CP 7	111,0	112,0	111,0	115,0	12432,00	12765,00	12598,50	2600	2,02
CP 8	111,0	112,0	111,0	115,0	12432,00	12765,00	12598,50	3100	2,41
CP 9	110,0	112,0	111,0	115,0	12320,00	12765,00	12542,50	3680	2,88
CP 10	110,0	112,0	110,0	115,0	12320,00	12650,00	12485,00	2400	1,89
CP 11	110,0	111,0	111,0	117,0	12210,00	12987,00	12598,50	3320	2,59

A Tabela 6.31 representa o valor médio da resistência à compressão e o desvio padrão obtidos nos ensaios de cada um dos traços.

Tabela 6.31 - Valor médio da resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)
I	2,26	0,100
II	1,66	0,402
III	1,17	0,166
IV	0,40	0,056
VI	4,52	0,285
VII	2,28	0,297

6.5.2.2 Ensaio de absorção de água

Os equipamentos necessários para este ensaio foram:

- balança com capacidade de 10kg e sensibilidade de 1g;
- estufa capaz de manter a temperatura entre 105 e 110°C;
- tanque de imersão para submergir os corpos de prova em água na temperatura ambiente.

Para o ensaio de absorção de água, os corpos de prova foram secos em estufa (105 a 110°C) até que sua massa fosse constante quando pesados a temperatura ambiente. Quando não houve mais variação de massa, determinou-se a massa M_1 do tijolo seco, em gramas. Depois de determinada a massa M_1 os corpos de prova foram imersos em um tanque com água durante 24h. Retirados da imersão foram enxutos superficialmente com um pano úmido e pesados, determinando assim a massa M_2 de cada tijolo, também em gramas.

Calculou-se a absorção, individualmente para cada corpo de prova, pela Equação 6.3.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (6.3)$$

Tomou-se como absorção da amostra, a média entre os três valores individuais.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados estão representados pela Tabela 6.32.

Tabela 6.32 - Resultados do ensaio de absorção de água

Traço	Amostra	M1 (g)	M2 (g)	A (%)
I	CP 9	2110,4	2467,6	16,9
	CP 10	2046,5	2415,3	18,0
	CP 11	2063,2	2459,5	19,2
II	CP 1	2040,1	2375,1	16,4
	CP 2	2119,8	2466,3	16,3
	CP 3	2096,8	2436,2	16,2
III	CP 1	2047,8	2391,3	16,8
	CP 2	2110,6	2458,6	16,5
	CP 3	2118,2	2467,6	16,5
IV	CP 1	2010,6	2362,7	17,5
	CP 4	2048,8	2378,6	16,1
	CP 9	2022,6	Desagregou	-
VI	CP 9	2097,6	2480,5	18,3
	CP 10	2022,5	2380,6	17,7
	CP 11	2135,2	2505,1	17,3
VII	CP 12	2026,9	2413,2	19,1
	CP 13	2002,4	2390,1	19,4

	CP 14	1970,0	2361,7	19,9
--	-------	--------	--------	------

A Tabela 6.33 apresenta os resultados da absorção média de cada um dos traços.

Tabela 6.33 - Absorção média dos traços

Traço	Absorção média (%)	Desvio padrão (%)
I	18,05	1,141
II	16,32	0,120
III	16,59	0,163
IV	16,80	1,001
VI	17,76	0,468
VII	19,43	0,417

6.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

Para avaliar os resultados obtidos nos ensaios foi utilizada a ferramenta estatística ANOVA do programa Excel 2000.

6.6.1 Argamassa com relação água/aglomerante constante

A ferramenta ANOVA foi utilizada para verificar a existência de influências na utilização da cinza da casca do café sobre a resistência à compressão das argamassas quando se substitui parte de cimento por esta cinza. A Tabela 6.34 contém os dados da resistência à compressão dos ensaios realizados. As Tabelas 6.35 e 6.36 apresentam a análise estatística dos resultados.

Tabela 6.34 - Resultados de resistência à compressão

Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
-	19,49	21,98	12,99
46,96	20,98	22,48	13,49
48,96	21,48	22,98	14,49
48,96	22,98	23,98	20,48
52,46	23,48	24,98	20,98
54,46	24,98	28,98	21,98

Tabela 6.35 - Análise estatística dos ensaios de resistência à compressão

Traços	1	2	3	4
Média (MPa)	50,36	22,23	24,23	17,40
Desvio Padrão (MPa)	3,027	1,967	2,562	4,161

Tabela 6.36 - ANOVA aplicada aos ensaios de resistência à compressão

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	5	251,8080755	50,36161509	9,161029865
Traço 2	6	133,3983257	22,23305428	3,869099807
Traço 3	6	145,3891864	24,23153107	6,564988704
Traço 4	6	104,4204122	17,40340204	17,31526172

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	3455,1814	3	1151,727125	124,7659887	1,11296E-12	3,1273544
Dentro dos grupos	175,39087	19	9,231098452			
Total	3630,5722	22				

Uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$ existe influência significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, quando se utiliza a cinza da casca do café na fabricação das argamassas de cimento Portland, substituindo-o parcialmente.

Neste trabalho os três corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção também foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, logo analisou-se separadamente cada um dos casos.

As Tabelas 6.37 e 6.38 apresentam os resultados referentes aos corpos de prova secos em estufa.

Tabela 6.37 - Resultados do teste de compressão dos corpos de prova secos em estufa (MPa)

Amostra	Traço 1	Traço 2 (400º)	Traço 3 (600º)	Traço 4
CP1	46,96	19,49	21,98	13,49
CP2	-	23,48	28,98	12,99
CP3	48,96	22,98	24,98	14,49

Tabela 6.38 - ANOVA aplicada ao teste de compressão dos corpos de prova secos em estufa

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	2	95,92688589	47,96344295	1,996954739
Traço 2 (400º)	3	65,94973405	21,98324468	4,742767505
Traço 3 (600º)	3	75,942118	25,31403933	12,31455422
Traço 4	3	40,96877418	13,65625806	0,582445132

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	1466,9751	3	488,9916847	91,82575758	5,52326E-06	4,3468305
Dentro dos grupos	37,276488	7	5,325212637			
Total	1504,2515	10				

Pode-se dizer que existe influência significativa, ao risco de 5%, nos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à secagem na estufa, quando se utiliza cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland destas argamassas.

As Tabelas 6.39 e 6.40 apresentam os resultados referentes aos corpos de prova que não foram submetidos à secagem em estufa.

Tabela 6.39 - Resultados do teste de compressão dos corpos de prova não submetidos a secagem em estufa (MPa)

Amostra	Traço 1	Traço 2 (400º)	Traço 3 (600º)	Traço 4
CP4	48,96	21,48	22,48	20,98
CP5	54,46	20,98	23,98	20,48
CP6	52,46	24,98	22,98	21,98

Tabela 6.40 - ANOVA aplicada ao teste de compressão dos corpos de prova não submetidos a secagem em estufa

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	3	155,8811896	51,96039652	7,738199613
Traço 2 (400º)	3	67,44859164	22,48286388	4,742767505
Traço 3 (600º)	3	69,44706843	23,14902281	0,582445132
Traço D	3	63,45163806	21,15054602	0,582445132

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	1990,8599	3	663,6199555	194,5264228	8,18552E-08	4,0661803
Dentro dos grupos	27,291715	8	3,411464346			
Total	2018,1516	11				

Pode-se também dizer que existe influência significativa, ao risco de 5%, nos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova não submetidos à secagem na estufa, quando se utiliza cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland destas argamassas.

Buscando-se verificar o comportamento das argamassas ensaiadas com relação à absorção realizou-se a análise cujos resultados são apresentados nas Tabelas 6.41 e 6.42.

Tabela 6.41 - Determinação da absorção de água por imersão

Determinação da absorção de água por imersão (NBR 9778)					
Amostras	Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	M _{sat} (g)	446,87	424,60	423,53	440,46
	M _s (g)	413,04	387,22	382,52	398,74
	A (%)	8,19	9,65	10,72	10,46
CP 2	M _{sat} (g)	445,90	426,28	430,80	437,10
	M _s (g)	412,31	390,54	394,72	395,05
	A (%)	8,15	9,15	9,14	10,64
CP 3	M _{sat} (g)	446,05	431,59	431,41	438,41
	M _s (g)	412,15	394,10	394,95	396,41
	A (%)	8,23	9,51	9,23	10,60

Tabela 6.42 - ANOVA aplicada à absorção de água por imersão

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	3	24,56243353	8,187477843	0,001542582
Traço 2	3	28,31767235	9,439224117	0,06706151
Traço 3	3	29,09321302	9,697737672	0,787377024
Traço 4	3	31,70227151	10,56742384	0,008788255

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	8,7059357	3	2,901978578	13,42313304	0,001729153	4,0661803
Dentro dos grupos	1,7295387	8	0,216192343			
Total	10,435474	11				

Pôde-se observar que a utilização da cinza da casca do café tem influência significativa na absorção das argamassas, ao risco de 5%, quando o cimento Portland é substituído parcialmente, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

6.6.1.1 Análise da influência da temperatura de queima das cinzas da casca do café

Outro estudo realizado sobre os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção das argamassas foi verificar se a temperatura de queima das cinzas da casca do café interferiu significativamente nos resultados dos ensaios. Para tal, foi realizada uma análise dos traços 2, 3 e 4, cujos resultados constam das Tabelas 6.43 e 6.44

Tabela 6.43 - Resultados de resistência à compressão

Resultados de Resistência à Compressão (MPa)			
Amostra	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	19,49	21,98	13,49
CP 2	23,48	28,98	12,99
CP 3	22,98	24,98	14,49
CP 4	21,48	22,48	20,98
CP 5	20,98	23,98	20,48
CP 6	24,98	22,98	21,98

Tabela 6.44 - ANOVA aplicada à temperatura de queima das cinzas

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 2	6	133,3983257	22,23305428	3,869099807
Traço 3	6	145,3891864	24,23153107	6,564988704
Traço 4	6	104,4204122	17,40340204	17,31526172

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	147,88559	2	73,9427963	7,994002999	0,004332437	3,6823167
Dentro dos grupos	138,74675	15	9,249783409			
Total	286,63234	17				

Observa-se que a temperatura de queima das cinzas têm influência significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

6.6.1.2 Análise da influência da secagem dos corpos de prova na estufa

Com o objetivo de realizar o ensaio de absorção, foi verificado se a secagem dos corpos de prova na estufa alterou significativamente os resultados de resistência à compressão destes mesmos corpos de prova. Para tanto, realizou-se uma análise dos resultados, como apresentado nas Tabelas 6.45 a 6.50.

Tabela 6.45 - Resistência à compressão dos corpos de prova

Resistência à Compressão das argamassas com fator a/aglom constante (MPa)					
Condição	Amostra	Traço 1	Traço 2 (400º)	Traço 3 (600º)	Traço 4
Estufa 72h	CP1	46,96	19,49	21,98	13,49
	CP2	-	23,48	28,98	12,99
	CP3	48,96	22,98	24,98	14,49
	Média	47,96	21,98	25,31	13,66
Normal	CP4	48,96	21,48	22,48	20,98
	CP5	54,46	20,98	23,98	20,48
	CP6	52,46	24,98	22,98	21,98
	Média	51,96	22,48	23,15	21,15

A Figura 6.4 apresenta uma comparação das resistências à compressão dos corpos de prova que sofreram e que não sofreram o processo de secagem em estufa.

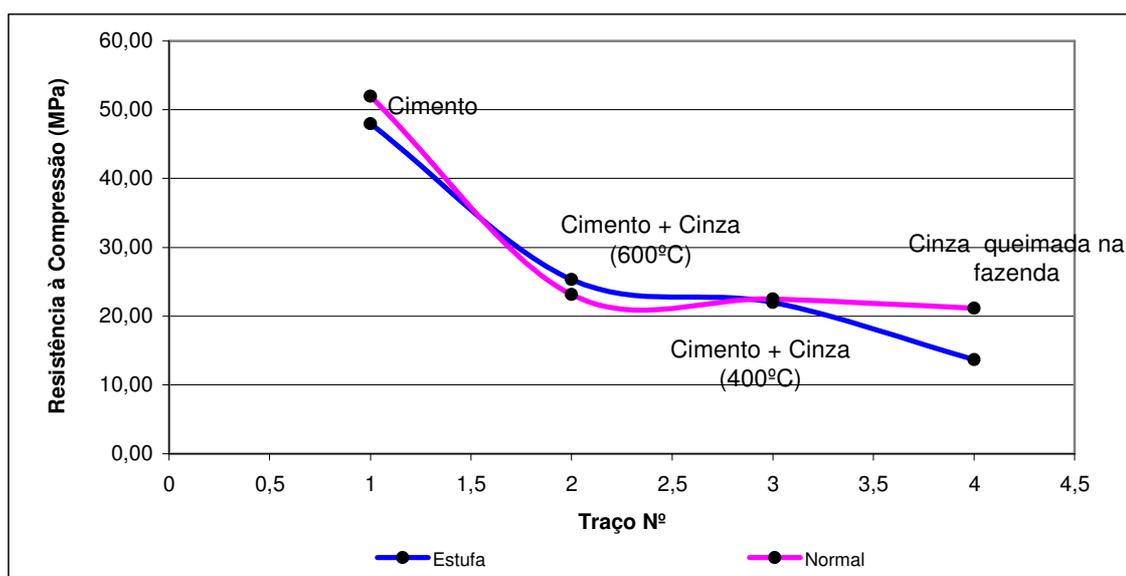


Figura 6.21 - Comparação das resistências à compressão

Tabela 6.46 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 1

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	2	95,9268858 9	47,9634429 5	1,99695473 9
Normal	3	155,881189 6	51,9603965 2	7,73819961 3

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	19,17076549	1	19,1707654 9	3,29142857 1	0,16728191 6	10,1279624 7
Dentro dos grupos	17,47335397	3	5,82445132 2			
Total	36,64411946	4				

Pode-se verificar que não existe diferença significativa para o Traço 1, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.47 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 2

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	65,94973405	21,98324468	4,742767505
Normal	3	67,44859164	22,48286388	4,742767505

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,374429014	1	0,374429014	0,078947368	0,792663836	7,708649719
Dentro dos grupos	18,97107002	4	4,742767505			
Total	19,34549903	5				

Pode-se verificar que não existe diferença significativa para o Traço 2, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.48 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 3

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	75,942118	25,31403933	12,31455422
Normal	3	69,44706843	23,14902281	0,582445132

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	7,03094481	1	7,03094481	1,090322581	0,355347695	7,708649719
Dentro dos grupos	25,79399871	4	6,448499678			
Total	32,82494352	5				

Não existe diferença significativa para o Traço 3, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.49 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova do Traço 4

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	40,96877418	13,65625806	0,582445132
Normal	3	63,45163806	21,15054602	0,582445132

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	84,24652805	1	84,24652805	144,6428571	0,000274032	7,708649719
Dentro dos grupos	2,329780529	4	0,582445132			
Total	86,57630858	5				

Existe diferença significativa para o Traço 4, para um risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.50 - Análise da resistência à compressão média dos 4 traços

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Normal	51,96	22,48	23,15	21,15
Estufa	47,96	21,98	25,31	13,66

ANOVA: fator duplo sem repetição

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ESTUFA	4	108,916985	27,22924626	215,107157
NORMAL	4	118,7428292	29,68570731	221,2066518
Traço A	2	99,92383947	49,96191974	7,987818956
Traço C (600 ^º)	2	48,46306214	24,23153107	2,34364827
Traço B (400 ^º)	2	44,46610856	22,23305428	0,124809671
Traço D (sem controle)	2	34,80680408	17,40340204	28,08217602

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Linhas	12,06840182	1	12,06840182	1,367779961	0,326661	10,12796
Colunas	1282,471375	3	427,4904585	48,44990177	0,004852	9,276619
Erro	26,4700511	3	8,823350366			
Total	1321,009828	7				

Os corpos de prova submetidos à secagem na estufa (linhas) não influenciaram significativamente os resultados de resistência à compressão, ao risco de 5% , quando comparados àqueles que foram rompidos normalmente, isto é, sem secagem na estufa. Já o traço (colunas), quantitativamente iguais em volume absoluto, de acordo com a NBR 5752 (1992), variando apenas pelo tipo de cinza utilizada, tiveram influência significativa nos resultados de resistência à compressão, também ao risco de 5%.

6.6.2 Argamassa com relação água/aglomerante variável

Com o objetivo de verificar se existe influência da utilização da cinza da casca do café sobre a resistência à compressão quando utilizada nas argamassas de cimento Portland, substituindo-o parcialmente, utilizou-se a ferramenta estatística ANOVA do programa Excel 2000 nos dados colhidos nos ensaios. Os resultados estão representados nas Tabelas 6.51 e 6.52.

Tabela 6.51 - Resistência à compressão das argamassas contendo cinza da casca do café

Resultados de Resistência à Compressão (MPa)				
Corpo de prova	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	39,47	13,99	14,99	3,50
CP 2	46,96	13,99	14,99	3,50
CP 3	47,46	15,49	15,49	3,50
CP 4	48,96	15,49	15,49	10,49
CP 5	48,96	15,99	15,99	10,69
CP 6	48,96	15,99	15,49	10,74
Média (MPa)	46,80	15,16	15,41	7,07
Desvio Padrão (MPa)	3,694	0,930	0,376	3,914

Tabela 6.52 - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas contendo cinza da casca do café

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	6	280,7859889	46,79766482	13,64585738
Traço 2	6	90,93069392	15,15511565	0,865347054
Traço 3	6	92,43135639	15,40522607	0,141511621
Traço 4	6	42,41766986	7,069611643	15,32038714

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	5549,962104	3	1849,987368	246,8863308	5,7725E-16	3,098392654
Dentro dos grupos	149,865516	20	7,493275799			
Total	5699,82762	23				

Sendo $F > F_{\text{crítico}}$, existe influência significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, quando se utiliza a cinza da casca do café na fabricação das argamassas de cimento Portland, substituindo-o parcialmente.

6.6.2.1 Análise da influência da secagem dos corpos de prova na estufa

Para verificar se a secagem na estufa interferiu nos resultados de resistência à compressão significativamente, analisou-se separadamente os corpos de prova secos na estufa. Na Tabela 6.53 são apresentados os resultados dessa análise.

Tabela 6.53 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova secos em estufa

Amostra	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP1	39,47	15,49	15,49	3,50
CP2	47,46	13,99	14,99	3,50
CP3	48,96	13,99	14,99	3,50

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	3	135,8964217	45,29880723	26,04361805
Traço 2 (400 ^o)	3	43,46687017	14,48895672	0,748858027
Traço 3 (600 ^o)	3	45,46534696	15,15511565	0,083206447
Traço 4	3	10,49200314	3,497334381	3,55271E-15

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	2896,811667	3	965,6038888	143,7141383	2,69061E-07	4,066180281
Dentro dos grupos	53,75136506	8	6,718920632			
Total	2950,563032	11				

Existe influência significativa, ao risco de 5%, nos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à secagem na estufa, quando se utiliza cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland destas argamassas.

Na Tabela 6.54 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova que não foram secos em estufa.

Tabela 6.54 - Análise da resistência à compressão dos corpos de prova que não foram secos em estufa

Amostra	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP4	48,96	15,99	15,49	10,49
CP5	46,96	15,99	15,99	10,74
CP6	48,96	15,49	15,49	10,69

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	3	144,8895672	48,29652241	1,331303159
Traço 2 (400º)	3	47,46382375	15,82127458	0,083206447
Traço 3 (600º)	3	46,96420455	15,65473485	0,083206447
Traço 4	3	31,92566671	10,6418889	0,017473354

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	2692,486378	3	897,4954593	2369,328757	3,92939E-12	4,066180281
Dentro dos grupos	3,030378816	8	0,378797352			
Total	2695,516757	11				

Existe influência significativa, ao risco de 5%, nos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova não submetidos à secagem na estufa, quando se utiliza cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland destas argamassas. As Figuras 6.22 e 6.23 representam a resistência à compressão média dos diferentes traços.

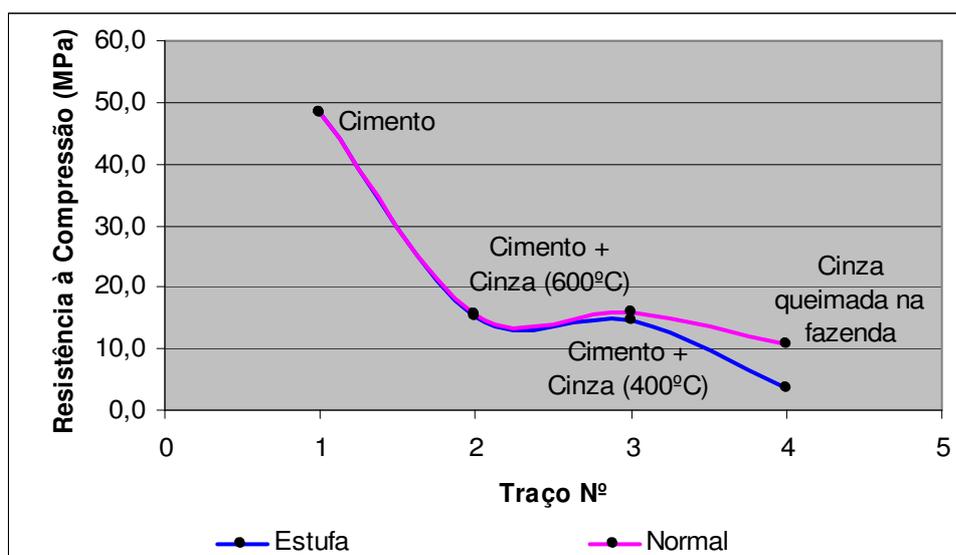


Figura 6.22 - Curva da resistência a compressão média

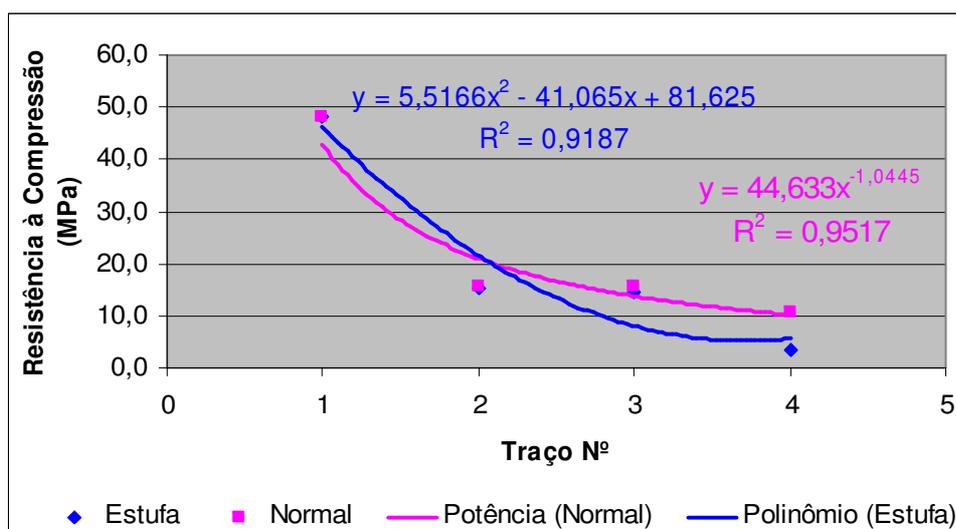


Figura 6.23: Curva ajustada da resistência a compressão média

6.6.2.2 Análise da utilização da cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland

Para verificar se existe influência sobre a absorção das argamassas quando se utiliza cinza da casca do café na substituição parcial do cimento Portland, utilizou-se a ferramenta estatística ANOVA. Na Tabela 6.55 estão apresentados os resultados relativos a absorção.

Tabela 6.55 - Análise da absorção das argamassas

Amostras	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP1	10,25	12,91	13,61	18,67
CP2	10,11	12,91	13,54	18,66
CP3	10,17	12,81	13,71	18,44

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 1	3	30,52974717	10,17658239	0,005124375
Traço 2	3	38,63163361	12,8772112	0,003407739
Traço 3	3	40,8685555	13,62285183	0,00713909
Traço 4	3	55,7715733	18,59052443	0,016786986

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	110,8802166	3	36,9600722	4554,791389	2,88392E-13	4,066180281
Dentro dos grupos	0,064916382	8	0,008114548			
Total	110,945133	11				

A utilização da cinza da casca do café tem influência significativa na absorção das argamassas, quando o cimento Portland é substituído parcialmente, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

6.6.2.3 Análise da influência da temperatura de queima das cinzas da casca do café

Outra análise ainda pode ser realizada sobre os resultados. Ela diz respeito a se a temperatura de queima das cinzas da casca do café interfere significativamente nos resultados de resistência à compressão. Para tal, serão analisados os Traços 2, 3 e 4. Os resultados relativos a essa análise são apresentados na Tabela 6.56.

Tabela 6.56 - Análise da influência da temperatura de queima na resistência à compressão

Resultados de Resistência à Compressão (MPa)			
Amostra	Traço 2	Traço 3	Traço 4
CP 1	13,99	14,99	3,50
CP 2	13,99	14,99	3,50
CP 3	15,49	15,49	3,50
CP 4	15,49	15,49	10,49
CP 5	15,99	15,99	10,69
CP 6	15,99	15,49	10,74

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço 2	6	90,93069392	15,15511565	0,865347054
Traço 3	6	92,43135639	15,40522607	0,141511621
Traço 4	6	42,41766986	7,069611643	15,32038714

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	269,8407963	2	134,9203981	24,79053718	1,7575E-05	3,682316674
Dentro dos grupos	81,63622906	15	5,442415271			
Total	351,4770253	17				

A temperatura de queima das cinzas tem influência significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

6.6.2.4 Análise da influência da relação água/aglomerante

Foi verificada a influência da relação água/aglomerante sobre os resultados de resistência à compressão e absorção. Os resultados encontram-se na Tabela 6.57.

Tabela 6.57 - Influência da relação água/aglomerante sobre os resultados de resistência à compressão e absorção

Traço	Relação água/aglom.	Ab (%)	Rc (MPa)
1	0,67	10,18	46,80
2	0,76	12,88	15,16
3	0,79	13,62	15,41
4	0,88	18,59	7,07

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,022348119	0,01117406	73,57135487	0,082159892
Resíduo	1	0,000151881	0,000151881		
Total	3	0,0225			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	0,563163967	0,064186875	8,773818119	0,07224727	-0,252404114	1,378732048
Ab (%)	0,017714439	0,003654049	4,847892833	0,129502498	-0,028714459	0,064143337
Rc (MPa)	-0,001559624	0,000730439	-2,135185752	0,278841431	-0,010840696	0,007721449

Pode-se dizer que a relação água/aglomerante pode ser dada através da Equação 6.4.

$$\text{Rel. ag/aglom.} = 0,563 + 0,0177 \cdot \text{Ab} - 0,00156 \cdot \text{Rc} \quad (6.4)$$

As Figuras 6.24 e 6.25 representam, respectivamente, a influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão e na absorção dos corpos de prova.

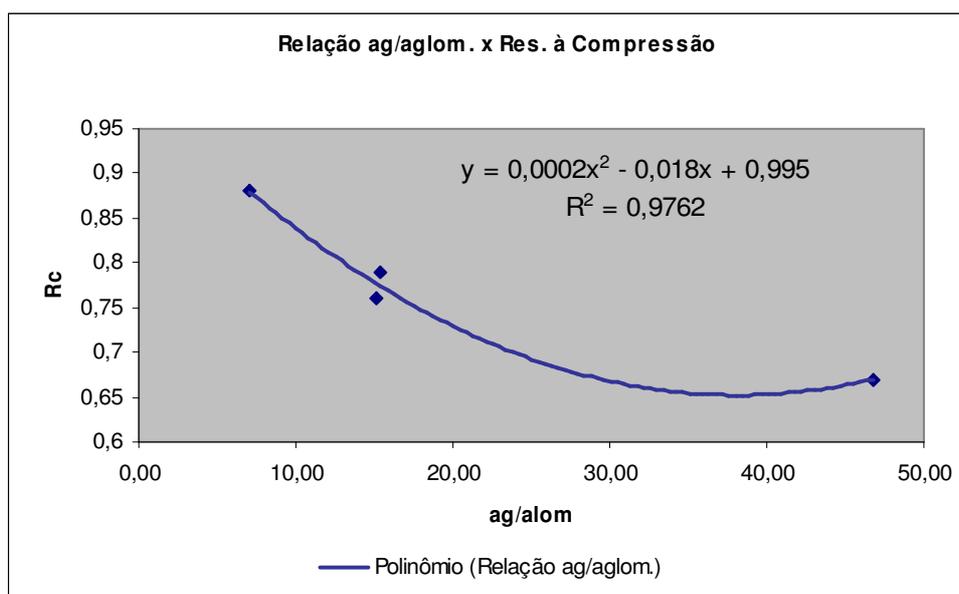


Figura 6.24 - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão

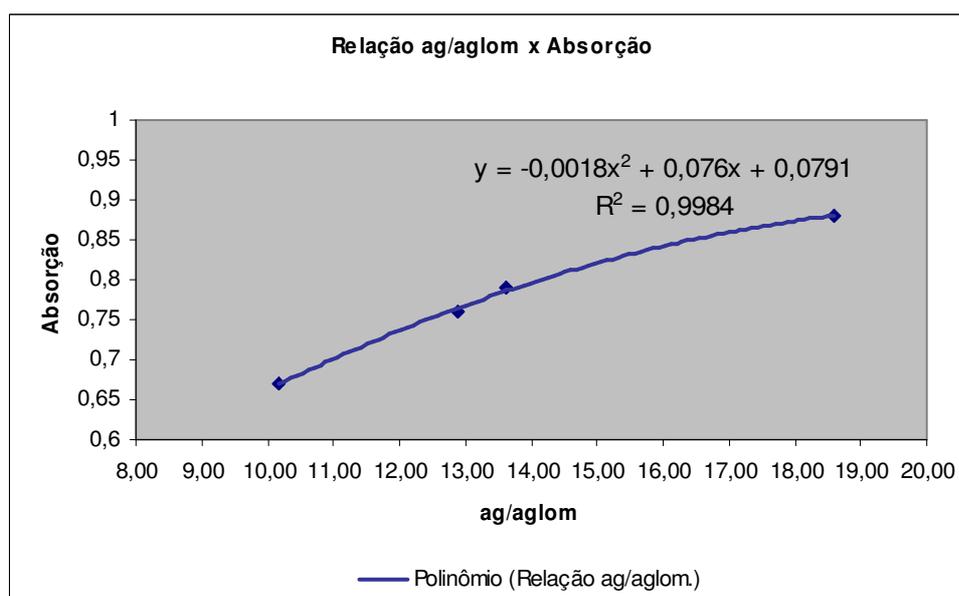


Figura 6.25 - Influência da relação água/aglomerante na absorção

6.6.2.5 Análise da influência da secagem na estufa para os diferentes traços

Também foi avaliada a influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão de cada um dos diferentes traços. Os resultados obtidos constam das Tabelas 6.58 a 6.61.

Tabela 6.58 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 1

Resistência à Compressão (MPa)			
Estufa	39,47	47,46	48,96
Normal	48,96	46,96	48,96

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	135,8964217	45,29880723	26,04361805
Normal	3	144,8895672	48,29652241	1,331303159

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	13,47944449	1	13,47944449	0,984802432	0,377188307	7,708649719
Dentro dos grupos	54,74984243	4	13,68746061			
Total	68,22928691	5				

Observasse que não existe diferença significativa para o Traço 1, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.59 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 2

Resistência à Compressão (MPa)			
Estufa	15,49	13,99	13,99
Normal	15,99	15,99	15,49

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	43,46687017	14,48895672	0,748858027
Normal	3	47,46382375	15,82127458	0,083206447

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	2,662606319	1	2,662606319	6,4	0,064676894	7,708649719
Dentro dos grupos	1,664128949	4	0,416032237			
Total	4,326735268	5				

Observa-se que não existe diferença significativa para o Traço 2, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.60 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 3

Resistência à Compressão (MPa)			
Estufa	15,49	14,99	14,99
Normal	15,49	15,99	15,49

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	45,46534696	15,15511565	0,083206447
Normal	3	46,96600943	15,65533648	0,082906949

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,37533131	1	0,37533131	4,518977021	0,100683829	7,708649719
Dentro dos grupos	0,332226792	4	0,083056698			
Total	0,707558103	5				

Observasse que não existe diferença significativa para o Traço 3, para um risco de 5%, uma vez que $F < F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.61 - Influência da secagem na estufa nos resultados de resistência à compressão do Traço 4

Resistência à Compressão (MPa)			
Estufa	3,50	3,50	3,50
Normal	10,49	10,74	10,69

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Estufa	3	10,49200314	3,497334381	3,55271E-15
Normal	3	31,92566671	10,6418889	0,017473354

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	76,56698898	1	76,56698898	8763,857143	7,80603E-08	7,708649719
Dentro dos grupos	0,034946708	4	0,008736677			
Total	76,60193569	5				

Neste caso observou-se que existe diferença significativa para o Traço 4, para um risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

Ao analisar a Tabela 6.62 temos como conclusão que os corpos de prova submetidos à secagem na estufa (linhas) não influenciaram significativamente os resultados de resistência à compressão, ao risco de 5% , quando comparados

àqueles que foram rompidos normalmente, isto é, sem secagem na estufa. Já o traço (colunas), variando apenas pelo tipo de cinza utilizada, apresentou influência significativa nos resultados de resistência à compressão, também ao risco de 5%.

Tabela 6.62 - Resistência à Compressão (MPa)

	Traço 1	Traço 2 (400 ^º)	Traço 3 (600 ^º)	Traço 4 (sem controle)
ESTUFA	48,2	14,5	15,2	3,5
NORMAL	48,3	15,8	15,7	10,6

ANOVA: fator duplo sem repetição

RESUMO

	Contagem	Soma	Média	Variância
ESTUFA	4	81,3546593	20,33866483	373,9037728
NORMAL	4	90,41442075	22,60360519	299,1651531
Traço 1	2	96,50977496	48,25488748	0,003466935
Traço 2 (400 ^º)	2	30,31023131	15,15511565	0,88753544
Traço 3 (600 ^º)	2	30,8098505	15,40492525	0,124809671
Traço 4 (sem controle)	2	14,13922329	7,069611643	25,52232966

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Linhas	10,25991	1	10,25990968	1,89085209	0,262803	10,12796
Colunas	2002,929	3	667,6428486	123,0433712	0,001226	9,276619
Erro	16,27823	3	5,426077342			
Total	2029,467	7				

6.6.3 Determinação de atividade pozolânica

Na Tabela 6.63 são apresentados os resultados dos testes para determinação de atividade pozolânica de acordo com a NBR 5752 (1992).

Tabela 6.63 - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento

Resistência à Compressão (MPa)					
	Amostra	Traço 1	Traço 2 (400º)	Traço 3 (600º)	Traço 4
Estufa 72h	CP1	39,5	15,5	15,5	3,5
	CP2	47,5	14,0	15,0	3,5
	CP3	49,0	14,0	15,0	3,5
	Média	48,2	14,5	15,2	3,5
Normal	CP4	49,0	16,0	15,5	10,5
	CP5	47,0	16,0	16,0	10,7
	CP6	49,0	15,5	15,5	10,7
	Média	48,3	15,8	15,7	10,6

De acordo com a NBR 7215 (1996), para calcularmos o desvio relativo máximo necessitamos de apenas 4 resultados, para tanto serão eliminados 2 resultados de cada traço, obtendo assim os dados da Tabela 6.64.

Tabela 6.64 - Cálculo do desvio relativo máximo

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	
	47,5	14,0	15,5	(*) resultados mais afastados da média.
	49,0	14,0 (*)	15,0	
	47,0	16,0	15,5	
	49,0 (*)	15,5	16,0 (*)	
Médias:	48,1	14,9	15,5	

Partindo do princípio que para o Traço 4 a influência da secagem na estufa foi significativa, não seria coerente selecionar 2 resultados tipo "estufa" e 2 resultados tipo "normal" para realizar a análise. Para tanto, o Traço 4 será avaliado separadamente.

Tabela 6.65 - Resistência a compressão média dos traços

RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa):				
Traço A	Traço B	Traço C	Traço D (estufa)	Traço D (normal)
48,1	15,5	14,9	3,5	10,6

Tabela 6.66 - Desvio relativo máximo

DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%) - (Drm)				
(Máximo de 6% como estabelecido na NBR 7215)				
1,8	3,2	5,9	0,0	1,4

De acordo com a NBR 5752 (1992) o índice de atividade pozolânica é calculado de aplicando-se a Equação 6.5.

$$I_{ap} = (f_{cB} / f_{cA}) \cdot 100 \quad (\%) \quad (6.5)$$

Onde:

f_{cB} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B)

f_{cA} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados só com cimento (argamassa A)

A Tabela 6.67 apresenta os índices de atividade pozolânica dos diferentes traços analisados neste trabalho.

Tabela 6.67 - Índice de atividade pozolânica dos traços analisados

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4 (estufa)	Traço 4 (normal)
$I_{ap} (\%) =$	100	30,91	32,21	7,27	22,13

De acordo com a NBR 12653 (1992) as cinzas da casca do café calcinadas a 400 e a 600°C e também aquelas queimadas na fazenda sem controle de temperatura não apresentaram resultados satisfatórios quanto ao Índice de Atividade Pozolânica, uma vez que esta Norma estabelece que o I_{ap} deve ser no mínimo 75%.

6.6.4 Determinação da água requerida

A NBR 5752 (1992) estabelece que a quantidade de água requerida é dada pela Equação 6.6;

$$A_{req.} = (B/A) \cdot 100 \quad (\%) \quad (6.6)$$

onde B e A são as quantidades de água necessárias para a obtenção de índices de consistência normais de (225 ± 5) mm para as argamassas B e A.

A Tabela 6.68 apresenta as quantidades de água para os diferentes traços analisados neste trabalho.

Tabela 6.68 - Quantidade de água requerida por cada traço

Traço	1	2	3	4 (estufa e normal)
$A_{req.} (%) =$	100	90,48	97,02	115,48

Com relação à água requerida o material atende esta exigência, enquadrando-se como material pozolânico, uma vez que a NBR 12653 (1992) fixa o valor máximo de 110% para a água requerida, exceto o material utilizado no Traço D (cinza queimada na fazenda sem controle de temperatura).

6.6.5 Tijolos de solo/cimento/resíduo

Com o objetivo de avaliar a influência do teor de cinza nos traços I, II, III e IV, utilizou-se a ferramenta de análise ANOVA Fator Único. Cabe lembrar que a diferença entre esses traços está no percentual de cinza que substitui parcialmente o cimento utilizado como aglomerante, como apresentado na Tabela 6.69.

Tabela 6.69 - Traços dos tijolos solo/cimento/resíduo

Traço	Material inerte (%)			Material aglomerante (%)	
	Solo	Areia	Cinza	Cimento	Cinza
I	70	30	-	100	0
II	70	30	-	75	25
III	70	30	-	50	50
IV	70	30	-	25	75

Na Tabela 6.70 estão consolidadas as resistências à compressão obtidas nos quatro traços em análise.

Tabela 6.70 - Resistência à compressão dos tijolos solo/cimento/resíduo

	Resistência à Compressão (MPa)			
	Traço I (0% de cinza)	Traço II (25% de cinza)	Traço III (50% de cinza)	Traço IV (75% de cinza)
	2,12	1,30	0,96	0,34
	2,17	1,40	1,11	0,34
	2,21	1,57	1,12	0,36
	2,24	1,73	1,15	0,41
	2,26	2,32	1,21	0,42
	2,30		1,46	0,44
	2,34			0,48
	2,44			
Médias	2,26	1,66	1,17	0,40

No gráfico apresentado na Figura 6.26, que relaciona a resistência à compressão com o percentual de cinza, após a regressão linear dos dados obteve-se uma correlação com R^2 igual a 0,9922, o que representa uma boa ajustagem dos dados ao modelo linear.

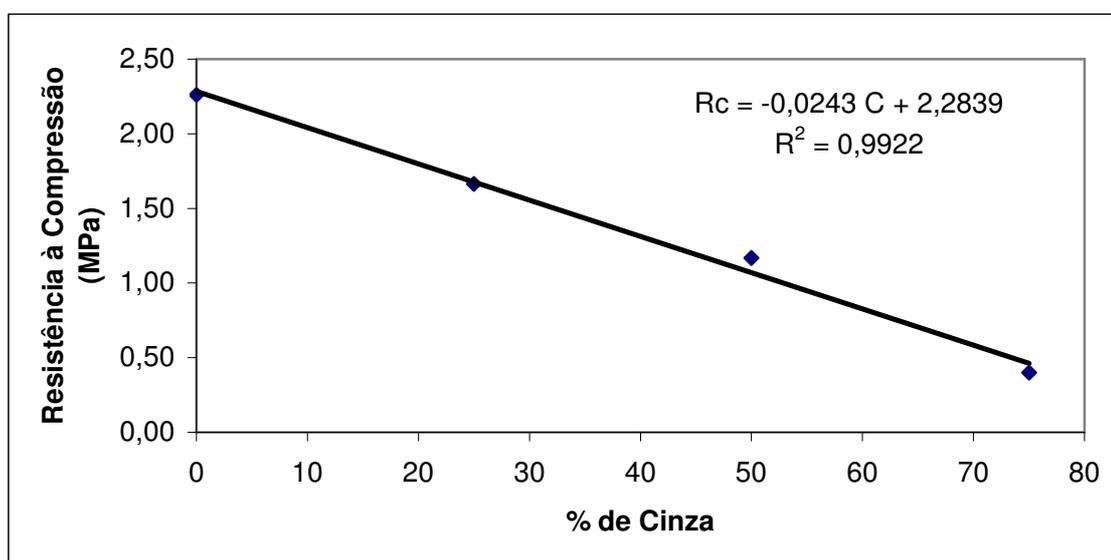


Figura 6.26 - Regressão linear (resistência à compressão x % de cinza) nos tijolos solo/cimento/resíduo

A análise estatística dos dados da resistência à compressão dos tijolos SCR é apresentada na Tabela 6.71. Foi empregada a ferramenta ANOVA ao risco de 5%.

Tabela 6.71 - Análise estatística da resistência à compressão dos tijolos SCR

ANOVA: fator
único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço I	8	18,07558682	2,259448353	0,00995461
Traço II	5	8,317966653	1,663593331	0,16142151
Traço III	6	7,010837975	1,168472996	0,02743088
Traço IV	7	2,801022584	0,400146083	0,00318633

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	13,57474619	3	4,524915398	114,207769	1,45053E-13	3,04912362
Dentro dos grupos	0,87164069	22	0,039620031			
Total	14,44638688	25				

De acordo com os resultados da análise estatística pode-se dizer que existe influência do teor de cinza no resultado, ao risco de 5%, uma vez $F > F_{\text{crítico}}$.

No tocante aos dados relativos à absorção dos tijolos ensaiados, foi também realizada uma análise estatística cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.72.

Tabela 6.72 - Análise estatística dos dados relativos à absorção dos tijolos de SCR

Traços	%Cinza (C)	C ²	Ab (%)
I	0	0	18,1
II	25	625	16,3
III	50	2500	16,6
IV	75	5625	16,8

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F _{significação}
Regressão	2	1,556221803	0,778110901	3,69912715	0,345068638
Resíduo	1	0,210349866	0,210349866		
Total	3	1,766571669			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	17,94902488	0,447026144	40,15206971	0,01585194	12,26904351	23,62900625
%Cinza (C)	-0,072472226	0,028715353	-2,523814577	0,24016377	-0,437333812	0,292389361
C2	0,000781094	0,000366911	2,128835772	0,27957041	-0,003880936	0,005443124

Através da ANOVA pode-se verificar que houve influência do teor de cinza na absorção, uma vez que $F > F_{\text{significação}}$. No entanto, seria conveniente que um número maior de amostras fossem ensaiadas.

De acordo com o gráfico contido na Figura 6.27, percebe-se que a linha de tendência que melhor se ajusta aos resultados é a do tipo polinomial.

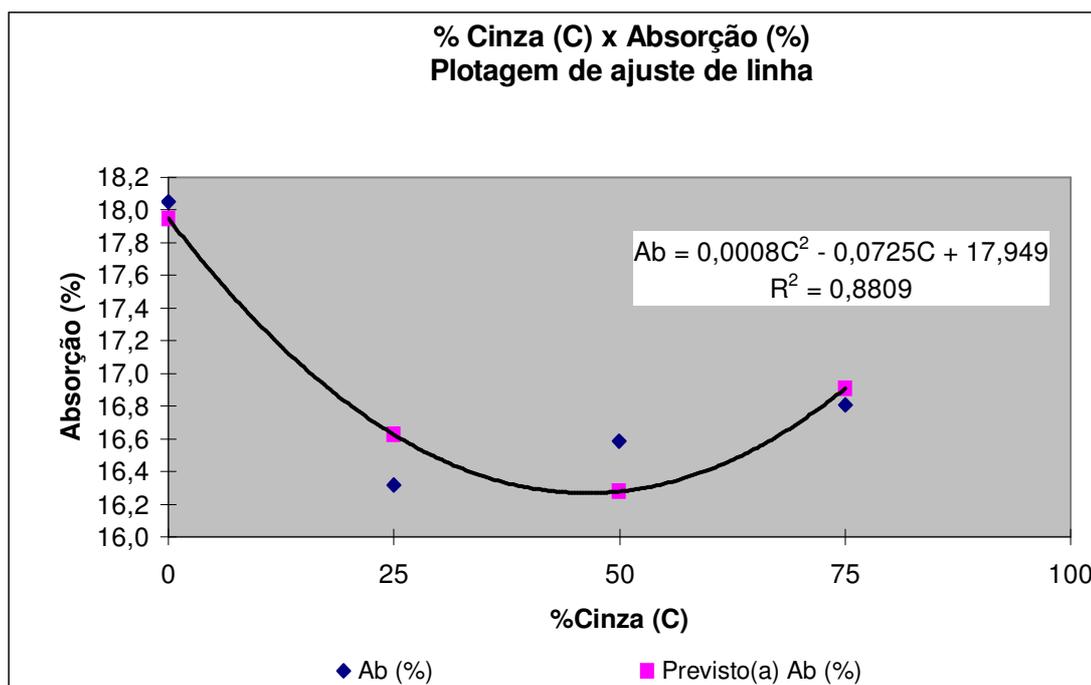


Figura 6.27 - Ajustagem dos dados relativos à absorção dos tijolos solo/cimento/resíduo

Na Tabela 6.73 é realizada uma análise estatística tomando-se a resistência à compressão como uma função do percentual de cinzas e da absorção.

Pode-se observar que a absorção e o percentual de cinzas interferem significativamente na resistência à compressão dos tijolos, ao risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{significação}}$.

De acordo com os resultados gerados pela ANOVA, pode-se dizer que a resistência à compressão pode ser obtida pela Equação 6.7;

$$R_c = 2,971 - 0,024C - 0,039Ab \quad (6.7)$$

onde $C = \% \text{ Cinzas}$ e $Ab = \text{Absorção}$

Tabela 6.73 - Análise da resistência à compressão como função do percentual de cinzas e da absorção

%Cinza	Ab (%)	Rc (MPa)
0	18,1	2,26
25	16,3	1,66
50	16,6	1,17
75	16,8	0,40

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F _{significação}
Regressão	2	1,845889401	0,9229447	73,1232135	0,082409564
Resíduo	1	0,012621774	0,012621774		
Total	3	1,858511175			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	2,971840537	1,820936607	1,632039537	0,34996735	-20,16525368	26,10893476
%Cinza	-0,024839393	0,00247623	-10,0311349	0,06325539	-0,056302738	0,006623952
Ab (%)	-0,039400809	0,104147845	-0,378316129	0,76975068	-1,362718977	1,283917358

6.6.6 Análise dos efeitos da substituição da areia por cinza

O objetivo desta análise é verificar se existe influência do teor de cinza sobre a resistência à compressão dos tijolos quando esta substitui parte da areia e também a sua influência sobre a absorção. Para isso foram analisados os três traços cujo os dados de composição, resistência à compressão e absorção constam das Tabelas 6.74 e 6.75. A análise estatística dos dados consta das Tabelas 6.76 e 6.77.

Tabela 6.74 - Dados referentes à resistência à compressão

Resistência à Compressão (MPa)		
Traço I (70% solo + 30% areia)	Traço VI (70% solo + 13,8% areia + 16,2% cinza)	Traço VII (70% solo + 11,2% areia + 18,8% cinza)
2,12	3,87	1,92
2,17	4,44	1,93
2,21	4,52	2,02
2,24	4,57	2,31
2,26	4,63	2,33
2,30	4,66	2,35
2,34	4,69	2,41
2,44	4,81	2,41
-	-	2,59
-	-	2,88

Tabela 6.75: Dados referentes à absorção

Absorção (%)		
Traço I (70% solo + 30% areia)	Traço VI (70% solo + 13,8% areia + 16,2% cinza)	Traço VII (70% solo + 11,2% areia + 18,8% cinza)
16,9	18,3	19,1
18,0	17,7	19,4
19,2	17,3	19,9

Tabela 6.76 - Análise estatística dos dados referentes à resistência à compressão

ANOVA: fator
único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço I	8	18,07558682	2,259448353	0,00995461
Traço VI	8	36,19375627	4,524219534	0,08139068
Traço VII	10	23,15143849	2,315143849	0,08848777

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	27,65067131	2	13,82533565	221,466197	9,42229E-16	3,422130135
Dentro dos grupos	1,435807016	23	0,062426392			
Total	29,08647833	25				

Observa-se que o teor de resíduo adicionado interferiu significativamente nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, uma vez que $F > F_{\text{crítico}}$.

Tabela 6.77 - Análise estatística dos dados referentes à absorção

ANOVA: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Traço I (70% solo + 30% areia)	3	54,15473914	18,05157971	1,30295275
Traço VI (70% solo + 13,8% areia + 16,2% cinza)	3	53,283909	17,761303	0,21867006
Traço VII (70% solo + 11,2% areia + 18,8% cinza)	3	58,30367562	19,43455854	0,17396031

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	4,796675116	2	2,398337558	4,24338542	0,071045894	5,143249382
Dentro dos grupos	3,391166233	6	0,565194372			
Total	8,187841349	8				

Neste caso $F < F_{\text{crítico}}$, logo pode-se dizer que a substituição parcial de areia pela amostra D não interfere significativamente nos resultados de absorção das amostras, ao risco de 5%

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões do presente trabalho estão baseadas no objetivo da pesquisa e nos resultados obtidos no programa experimental.

Com relação à utilização da casca do café como fonte geradora de energia pode-se dizer que esta possibilidade é viável, uma vez que não altera negativamente as características do clínquer produzido, de acordo com as características apresentadas nos ensaios químicos realizados na cinza da casca do café calcinada na fábrica de cimento. Além disso, a casca do café apresenta um poder calorífico de 5052 kcal/kg que, de acordo com a Tabela 6.14, é maior que o poder calorífico da lenha, dos finos de carvão vegetal e do bagaço de cana. Pode-se também verificar que o poder calorífico da casca do café é maior que o da casca do arroz, lembrando que este último é de 3.200 kcal/kg.

Fazendo uma breve análise da safra cafeeira do ano de 2004/2005, com uma produção de 38.264.000 sacas de 60kg de café beneficiado, correspondendo a uma igual quantidade de casca gerada, conclui-se que poderia se produzir cerca de $1,1599 \times 10^{13}$ kcal de energia neste ano, caso se utilizasse a casca de café gerada pelo café beneficiado, ou seja, as 2.295.840 toneladas de resíduo. Vale lembrar que tal fonte de energia é renovável.

De acordo com o SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, no ano de 2002, a produção nacional de cimento pode ser distribuída da seguinte forma:

- Região Norte: 1.188.000 toneladas
- Região Nordeste: 7.346.000 toneladas
- Região Centro-Oeste: 4.069.000 toneladas
- Região Sudeste: 19.109.000 toneladas
- Região Sul: 6.315.000 toneladas

Das 38.027.000 toneladas de cimento produzidas no Brasil no ano de 2002, cerca de 50% foram produzidas na região Sudeste, onde se encontra também a maior produção de café do Brasil, cerca de 79,4%, em 2004, o que corresponde à aproximadamente 1.813.713,6 toneladas.

De acordo com SANTI (2003), com relação aos resíduos utilizados nas indústrias cimenteiras, pode-se concluir que são utilizados aqueles com poder calorífico que varia de 2.800 a 12.000 kcal/kg.

Ainda de acordo com SANTI (2003) é comum a alimentação simultânea de resíduos diferentes no forno rotativo, de acordo com os planos de queima, que levam em conta a compatibilidade química dos materiais e a taxa de alimentação dos resíduos que comporão a mistura. O consumo específico de energia térmica na indústria cimenteira é cerca de 3260 a 3770 kJ/kg de clínquer (780 a 900 kcal/kg).

Pode-se observar que $1,1599 \times 10^{13}$ kcal de energia, gerados com a queima da casca do café, poderia produzir cerca de 12.887.315,2 toneladas de clínquer. Comparando com as 19.109.000 toneladas de clínquer produzidas na região sudeste, em 2002, pode-se dizer que 67% desta quantidade poderia ser fabricada utilizando energia térmica derivada dos resíduos da indústria cafeeira.

Com relação à utilização das cinzas da casca do café, calcinadas à temperaturas de 400, 600°C e no caso da amostra D, esta última sem controle da temperatura de queima, pode-se concluir, no caso de argamassas com relação água/aglomerante constante, que as cinzas não substituem satisfatoriamente o cimento Portland. No entanto, verifica-se que para a maior temperatura de queima da casca do café (600°C), obteve-se um maior resultado médio de resistência à compressão (24,23 MPa), contra 22,23 MPa para as argamassas preparadas com a cinza calcinada a 400°C, como mostra a Tabela 6.35. Pôde-se concluir então, que ao substituir 35% do volume absoluto de cimento Portland por cinzas houve uma influência significativa sobre os resultados de resistência à compressão.

Ao observar as Tabelas 6.37 e 6.39, percebe-se que os traços 1, 2 e 4, apresentam resultados médios de resistência à compressão inferiores quando comparados aqueles que não foram secos em estufa, diferentemente do que ocorre com o traço 3. Mais detalhadamente pode-se dizer que os traços 1, 2, 3 e 4 apresentaram resultados médios diferenciados em 8,34%, 2,27%, 9,3% e 54,95%, respectivamente. Observa-se que no caso do traço 4 houve uma diferença percentual bem superior aos demais traços, o que pode ser explicado pela formação de vazios quando os corpos de prova foram submetidos à secagem na estufa. Essa

diminuição da resistência à compressão pode ter ocorrido devido a uma possível porosidade em consequência da queima de materiais incombustos presentes na amostra D.

Com relação à absorção, as misturas 1, 2, 3 e 4 apresentaram diferenças significativas nos resultados, 8,19%, 9,44%, 9,70 e 10,57%, respectivamente apresentados. Verifica-se que no caso do traço 1, cuja argamassa possui apenas cimento como aglomerante, a absorção foi a menor dentre todas as outras.

Ainda com relação às argamassas com fator água/aglomerante constante, no que diz respeito à absorção de água por imersão, verifica-se que ao substituir parte do cimento por cinza também houve uma diferença desfavorável quanto à esta característica, isto é, aumentou a absorção das argamassas.

No caso das argamassas com relação água/aglomerante variável, objetivando que as argamassas tivessem a mesma consistência, verificou-se que para as argamassas constituídas de cimento e cinza, essas relações água/aglomerante aumentaram, como pode ser observado na Tabela 6.20. Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova moldados com argamassa e cinza também apresentaram resultados inferiores aqueles moldados com argamassa cujo aglomerante utilizado foi apenas o cimento (Tabela 6.21). No que diz respeito à absorção, pode-se observar, de acordo com a Tabela 6.22, que a mesma também aumentou quando foram adicionadas cinzas às misturas.

Com relação aos resultados de resistência à compressão, como mostrados na Tabela 6.51, observa-se que a perda de resistência foi bastante significativa quando se substituiu parte do cimento pelas cinzas calcinadas à 400 e 600°C. No entanto, verifica-se ainda que quando substituiu-se parte do cimento pela amostra D (resíduo oriundo da queima da casca do café nas fazendas), houve uma perda maior ainda de resistência à compressão, o que leva a concluir que as amostras B e C apresentam maior característica de pozolana que a amostra D.

Observando os resultados de resistência à compressão do traço 4, na Tabela 6.53, verifica-se que as amostras representadas pelos corpos de prova CP1, CP2 e CP3, secos em estufa, apresentaram resultados significativamente inferiores que os apresentados na Tabela 6.54, também do traço 4, onde os corpos de prova CP4, CP5 e CP6 não foram submetidos à secagem em estufa. Observa-se ainda que o mesmo ocorreu no caso das argamassas com relação água/aglomerante constante, como mostrado nas Tabelas 6.37 e 6.39.

É válido analisar os resultados médios de resistência à compressão dos

diferentes traços quando secos ou não em estufa, sendo estes apresentados respectivamente em MPa: traço 1: 45,299 e 48,296; traço 2: 14,489 e 15,821; traço 3: 15,155 e 15,655 e, por último o traço 4: 3,497 e 10,642.

Verifica-se que para os traços 1, 2, 3 e 4, houve um aumento de resistência à compressão de 6,6%, 9,2%, 3,3% e 204%, respectivamente. Observa-se que todos os quatro traços apresentaram perda de resistência quando secos em estufa, sendo que a diferença no traço 4 foi a mais significativa, o que pode ser explicado pelo fato de ter o traço 4 maior quantidade de materiais incombustos ou ainda por ter a amostra D menores propriedades pozolânicas. De acordo com as Tabelas 6.58, 6.59, 6.60 e 6.61, pode-se concluir que para os traços 1, 2 e 3 não existe diferença significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%, quando os corpos de prova são secos ou não em estufa. Já para o traço 4, essa diferença é significativa ao risco de 5%.

Ao avaliar conjuntamente a condição de secagem e a composição dos traços, apresentada nas Tabelas 6.62 e 6.63, conclui-se que a composição dos traços têm influência significativa nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%. Já o tipo de secagem não apresenta influência significativa, ao risco de 5%, sobre os resultados de resistência à compressão.

Com relação à absorção dos corpos de prova moldados com argamassa de relação água/aglomerante variável, observa-se que as cinzas quando adicionadas às argamassas não melhoraram sua qualidade no que diz respeito à essa característica. Verifica-se ainda que o traço 4 foi o que apresentou resultados de absorção mais elevados, como mostrado na Tabela 6.57.

Pode-se dizer então que a substituição do cimento Portland pelas cinzas tem influência significativa tanto nos resultados de resistência à compressão quanto na absorção das argamassas. Verifica-se ainda, de acordo com a Tabela 6.56, que a temperatura de queima interfere significativamente nos resultados de resistência à compressão, ao risco de 5%.

De acordo com a NBR 12653, pode-se concluir que as cinzas utilizadas nessa pesquisa, não apresentam resultados satisfatórios de índice de atividade pozolânica, uma vez que tal norma estabelece um mínimo de 75% para este índice, e os resultados obtidos foram de 32,21%, 30,91%, 7,27% e 22,13% para as amostras calcinadas às temperaturas de 600°C, 400°C, resíduos da fazenda com corpos de prova secos em estufa e daqueles que não foram secos em estufa, respectivamente. No entanto, é válido observar que para a maior temperatura de queima obteve-se

maior I_{ap} .

A NBR 12653 também faz a exigência de que para enquadrar-se como material pozolânico, este deve atender à exigência da água requerida, estabelecida na norma em 110%. Pode-se concluir que as amostras B e C atendem tal exigência. Apenas a amostra D não atende à exigência da água requerida para classificar-se como material pozolânico.

Com relação à utilização da amostra D na substituição parcial do cimento Portland nos traços dos tijolos SCR, pode-se concluir que existe influência significativa, ao risco de 5% nos resultados de resistência à compressão. Observa-se, de acordo com a Tabela 6.70, que nos traços I, II, III e IV, quanto maior o percentual da amostra D inserida no traço, menor é a resistência à compressão dos tijolos, como pode ser visto na Figura 6.9. Pode-se verificar também, de acordo com a Tabela 6.72, que a absorção aumenta à medida que o percentual da amostra D aumenta na composição dos traços II, III e IV. Conclui-se que a quantidade da amostra D inserida no traço tem influência significativa, ao risco de 5%, nos resultados de absorção. Cabe ressaltar que os tijolos do traço I, compostos apenas de cimento Portland, obtiveram absorção média maior que os tijolos cuja mistura possuía algum percentual da amostra D.

Segundo a Tabela 6.74, verifica-se que o traço VI, no qual houve substituição de 16,2% de areia pela amostra D, constata-se um aumento da resistência à compressão dos tijolos. Verifica-se também, comparando o traço VII com o traço I, que onde houve um percentual da amostra D substituindo a areia, obteve-se pequeno crescimento na resistência à compressão média. No entanto verifica-se que a menor variância ocorreu para o traço I, onde os resultados apresentaram-se mais homogêneos.

Com relação à absorção média, analisando os traços I, VI e VII, de acordo com as Tabelas 6.75 e 6.76, percebe-se que o traço VI foi o que apresentou o menor resultado. Diferentemente do que ocorreu com relação aos resultados de resistência à compressão, o traço I foi o que apresentou a maior variância para os resultados de absorção. Pode-se concluir, que ao risco de 5%, a substituição de areia pela amostra D não interfere significativamente nos resultados de absorção das amostras.

Resumidamente pode-se dizer que:

- à princípio é possível a utilização da casca do café como fonte

geradora de energia nas cimenteiras;

- com relação ao I_{ap} as cinzas não podem ser classificadas como material pozolânico. No entanto, verificou-se que este índice aumentou à medida que a temperatura de queima também aumentou.
- quanto a A_{req} , as cinzas calcinadas a 400 e 600°C atenderam à NBR 12653. Já o resíduo obtido nas fazendas cafeeiras, amostra D, não atendeu a esta norma;
- o resíduo gerado quando da secagem dos grãos do café nas fazendas, utilizado na fabricação dos tijolos de SCR, substituindo parte do cimento, não apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à resistência à compressão e a absorção.
- ao substituir parte da areia por resíduo os resultados foram satisfatórios.

7.1 SUGESTÕES

Em função dos resultados obtidos no programa experimental, sugere-se que novos trabalhos sejam desenvolvidos. As recomendações para novas pesquisas são:

- realização de ensaios com cinzas da casca do café calcinadas a temperaturas superiores a 600°C, de modo a comprovar se a característica de pozolanicidade das cinzas aumenta à medida que aumenta a temperatura de queima;
- avaliação do real desempenho, em escala industrial, da casca do café como fonte de energia para a indústria cimenteira, bem como analisar as características do clínquer produzido;
- tendo em vista a melhoria de desempenho observado nos tijolos de SCR ao substituir parte da areia por resíduo (amostra D), sugere-se que novas composições de misturas sejam estudadas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKIL, Pedro Paulo Voto. *A potencialidade dos compósitos de cimento Portland reforçados com fibras vegetais*. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1992.

ANAIS IBRACON - 34^a REIBRAC - CURITIBA. Curitiba: Concrebras, 1992, n. 1, p. 1-261, jun. 1992.

ANAIS IBRACON - 35^a REIBRAC - BRASÍLIA. São Paulo: Novalunar, 1993, n. 2, p. 397-774, jun. 1993.

ANDRADE, Maria Lúcia Amarante de; CUNHA, Luiz Maurício da Silva; SILVA, Marcela do Carmo. *Desenvolvimento e perspectivas da indústria de cimento*. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, n. 15, p. 35-62, mar. 2002.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Edurado; JOHN, Vanderley Moacyr. *Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo_IV_CT206_2001.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. *Estatísticas – Produção Agrícola*. Disponível em: <http://www.abic.com.br/estat_pagricola.html>. Acesso em: 07 jan. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado*. 3 ed. São Paulo: ABCP, 1998. 16 p. (BT-110).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. 3 ed. São Paulo: ABCP, 2000. 16 p. (BT-111).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia básico de utilização do cimento portland*. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1994. 28 p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Manual de ensaios de agregados, concreto fresco, concreto endurecido*. São Paulo: ABCP, 2000. 118 p. (MT-6).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Solo-cimento na habitação popular*. 4 ed. São Paulo: ABCP, 1998. 16 p. (BT-129).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado em estado compactado e seco: determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3 p. (NBR-7810).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 5 p. (NBR-9778).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. (NBR-7215).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland composto*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p. (EB-2138).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p. (EB-1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p. (EB-2).

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. (NBR-5733).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 5 p. (NBR-NM-23).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. (NBR-6474).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p. (EB-758).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland Pozolânico*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. (NBR-5736).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 3 p. (NBR-9776).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual*. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 3 p. (NBR-10832).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Massa unitária em estado solto do agregado miúdo*. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. (NBR-7251).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 3 p. (NBR-5752).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 3 p. (NBR 12653).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento - Determinação da absorção d'água*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 1 p. (NBR-13555).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 2 p. (MB-3361).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 3 p. (NBR-13554).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 5 p. (NBR-12024).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 5 p. (NBR-8492).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Tijolo maciço de solo-cimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 4 p. (NBR-8491).

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Disponível em: <www.bndes.gov.br>. Acesso em 07 jan. 2006.

BARCELOS, Adauto; PÉREZ, Juan Ramón O. *Composição da casca e polpa desidratada de café*. Disponível em: <<http://cafebr.com.br/ocafezal.asp?SE=8&ID=267>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

BIGNO, I. C. *Aproveitamento do resíduo de cortes de rochas ornamentais como fíler mineral em compósitos de matriz polimérica e cimentícia*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999. Aplica-se ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. *Diário Oficial da União*, 20 mar. 2000.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. *Diário Oficial da União*, n. 136, Seção 1, 17 jul. 2002.

CARVALHO, Eduardo Fagundes. *A potencialidade do uso de resíduos industriais urbanos na confecção de tachas refletivas viárias*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2005.

CENTRO CLIMA. Projeto: *A Utilização da Casca de Arroz na Cogeração de Energia e a Decorrente Mitigação de Gases que Contribuem para o Efeito Estufa como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo*. Disponível em: <http://www.centroclima.org.br/FNMA_arroz.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2006.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO - THABA, CAMAÇARI. *Manual de construção com solo-cimento: Convênio CEPED / BNH / URBIS / CONDER / PMC / OEA / CEBRACE*. 4 ed. São Paulo: ABCP, 1999. 114 p. (MT-5).

CEPLAC. *Construção com solo-cimento*. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/semfaz/solocimento.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

CIÊNCIA QUÍMICA. *Fabricação de cimento*. Disponível em: <<http://www.cienciaquimica.hpg.ig.com.br/interessante/cimento/cimento.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

COFFEE BREAK. *A cafeicultura no Brasil: diversidade é principal característica*. Disponível em: <<http://www.coffeebreak.com.br/ocafezal.asp?SE=6&ID=34>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

COFFEE BREAK. *A destruição de café no Brasil*. Disponível em: <<http://www.coffeebreak.com.br/saborcafe.asp?SE=2&ID=23>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

COFFEE BREAK. *O café como combustível*. Disponível em: <<http://www.coffeebreak.com.br/saborcafe.asp?SE=2&ID=12>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

CREA-RJ. Energia - Fontes alternativas. *Revista CREA RJ*, Rio de Janeiro: CREA-RJ, n. 44, p. 18-19, ago. 2004.

CREA-RJ. Energia por um fio. *Revista CREA RJ*, Rio de Janeiro: CREA-RJ, n. 26, p. 13-16, set/out. 1999.

CREA-RJ. Meio Ambiente - Cidades em colapso. *Revista CREA RJ*, Rio de Janeiro: CREA-RJ, n. 15, p. 5, abr. 1998.

CREA-RJ. Petróleo - Soberania em risco. *Revista CREA RJ*, Rio de Janeiro: CREA-RJ, p. 7-9, jul. 2004.

DAFICO, Dario de Araújo. Método de Produção de Cinza de Casca de Arroz para Utilização em Concretos de Alto Desempenho. Goiânia: Universidade Católica de Goiás. Disponível em: <http://www.ucg.br/nupenge/pdf/Dario_Resumo.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2006.

FALCÃO BAUER, L. A. *Materiais de Construção Civil*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. v. 1. 435 p.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Diagnóstico da cafeicultura do estado do Rio de Janeiro: Relatório de Pesquisa*. Rio de Janeiro: FAERJ/SEBRAE-RJ, 1999. 165 p.

HOFFMANN, R.; JAHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARTORI, T. C. *Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://www.ufsm.br/cenergia/arte_final.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2006.

HOLDERCIM BRASIL S.A. *Cimento Portland*. 2 ed. Santo André: Holdercim Brasil, 1998. 43 p.

INVENTA BRASIL NET. *Técnica do solo-cimento*. Disponível em: <<http://www.inventabrasilnet.t5.com.br/solocim.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2006.

LEITE, Mônica Batista; MOLIN, Denise Dal. *Avaliação da Atividade Pozolânica do Material Cerâmico Presente no Agregado Reciclado de Resíduo de C&D*. Feira de Santana: Sitientibus, n. 26, p. 111-130, jan./jun. 2002

LOUZADA, D. M. *Emprego de escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados: Estudo de caso*. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1989.

MEHTA, Provindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Anuário 2003. Disponível em <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 07 jan. 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanço Energético Nacional 1999*. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round2/Pdocs/Papresent/ben_p99.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2006.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 463 p.

MOREIRA, Cássio Franco. *Caracterização de Sistemas de Café Orgânico Sombreado e a Pleno Sol no Sul de Minas Gerais*. Piracicaba. 2003. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, Piracicaba. 2003.

NEVILLE, Adam Matthew. *Propriedades do Concreto*. 3 ed. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.

OLIVEIRA, T. M. *resíduos em plásticos: Um estudo do potencial de aplicação na construção civil*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2002.

PAULON, Vladimir Antonio. *Execução de concretos duráveis*. 3 ed. São Paulo: ABCP, 1999. 48 p. (ET-84).

PETRUCCI, Eládio G.R. *Concreto de Cimento Portland*. 2 ed. Porto Alegre: Globo, 1975. 277 p. (Enciclopédia Técnica Universal Globo).

PETRUCCI, Eládio G.R. *Materiais de Construção*. 3 ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 435 p.

PICCOLI, G. M. *Influência da adição de cinzas volantes nas principais propriedades do concreto*. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1989.

PIRES, E. F. C. *Comportamento do concreto utilizando o resíduo do processo de jateamento de peças metálicas recém-forjadas*. Niterói. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2001.

PITTA, Márcio Rocha. *Controle e fiscalização de obras de solo-cimento*. 4 ed. São Paulo: ABCP, 2000. 62 p. (ET-36).

PITTA, Márcio Rocha. *Retração de solo-cimento*. 3 ed. São Paulo: ABCP, 1998. 66 p. (ET-74).

REVISTA PAINEL DA HOLCIM. Pedro Leopoldo: Holcim, n. 49, ano VI, mar. 2004. 15 p.

RIBEIRO, C. S. C. *A potencialidade do uso do resíduo de carvão vegetal*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2002.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. *Parâmetros de dosagem do concreto*. 3 ed. São Paulo: ABCP, 1998. 32 p. (ET-67).

SAES, Maria Sylvia Macchione; FARINA, Elizabeth M. M. Q. *O Agribusiness do Café no Brasil*. São Paulo: Milkbizz, 1999. 218 p.

SANTI, Auxiliadora Maria Moura; SEVÁ FILHO, Arsênio Oswaldo. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: Casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE – ANPPAS, 2., 2004, Campinas. Disponível em:

http://www.anppas.org.br/encontro/segundo/Papers/GT/GT06/santi_seva.pdf

Acesso em: 07 jan. 2006.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Cimento Portland: Ciclo de eventos técnicos*. Rio de Janeiro: SINDUSCON RIO, 1998. 3 v.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *50 anos: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento*. Rio de Janeiro: SNIC, 2003. 66 p.

SOBRAL, Hernani Sávio. *Propriedades do concreto fresco*. 6 ed. São Paulo: ABCP, 2000. 32 p. (ET-15).

SUBSECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO MÍNERO-METALÚRGICO E POLÍTICA ENERGÉTICA. *18º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais*. Disponível em: <http://www.sede.mg.gov.br/subsecret_sdmmpe.htm>. Acesso em: 07 jan. 2006.

TEIXEIRA FILHO, Fernando José. *O solo-cimento e suas aplicações rurais*. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1996. 28 p. (BT-117).

TEIXEIRA, E. T. C. *Um estudo do composto de argamassa de cimento com raspa de pneu*. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1991.

TERZIAN, Paulo Roberto. *Exigências básicas na produção e aplicação do concreto em estruturas*. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1999. 88 p. (BT-121).

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA. Disponível em: <http://www.uel.br/cca/agro/graduacao/disciplinas/disciplinas_data/Colheita,%20preparo,%20beneficiament o%20e%20armazenamento.doc>. Acesso em: 07 jan. 2006.