

*UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL*  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA DE CINZAS  
VOLANTE E PESADA COM CAL DOLOMÍTICA  
HIDRATADA E AREIA, CURADAS PELOS PROCESSOS  
DE AUTOCLAVAGEM E CÂMARA À TEMPERATURA  
CONSTANTE.**

**José Eduardo Corrêa Mallmann**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil como parte dos requisitos para a obtenção do título *MESTRE EM ENGENHARIA*

Porto Alegre  
Julho de 1996

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - CPGEC.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Jorge Augusto Pereira Ceratti, D.Sc.(COPPE - UFRJ)

Banca Examinadora :

\_\_\_\_\_  
Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti , D.Sc.(COPPE - UFRJ) (Orientador)

\_\_\_\_\_  
Prof. Cláudio Renato Rodrigues Dias, D.Sc. (COPPE - UFRJ)

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Denise Dalmolin, D.Sc. (USP - SP)

\_\_\_\_\_  
Prof. Nilo Consoli, Ph.D.

\_\_\_\_\_  
Prof. Francisco José Casanova de O. Castro, D.Sc. (COPPE - UFRJ)

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Denise Dalmolin, D.Sc.  
Coordenadora do CPGEC

## **A SABEDORIA DA VIDA**

Feliz o homem que encontrou a sabedoria e alcançou o entendimento, porque a sabedoria vale mais do que a prata, e dá mais lucro que o ouro. Ela é mais valiosa do que as pérolas e não existe objeto precioso que se iguale a ela. Na mão direita ela tem vida longa, e na sua esquerda, riqueza e honra. Seus caminhos são deliciosos e suas trilhas conduzem ao bem-estar. Ela é árvore de vida para os que a adquirem e são felizes aqueles que a conservam.

Provérbios, 3, 13-18

## DEDICATÓRIA

À meus pais, José e Alba Mallmann, por tudo que me transmitiram e me possibilitaram realizar

À Irma Maristela que me transmitiu os primeiros conhecimentos

## AGRADECIMENTOS

A CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia pelo suporte financeiro e em particular ao Departamento de Recursos Minerais, nas pessoas da Eng<sup>a</sup> Neli e do Geólogo Luiz Zorzi, pelas facilidades proporcionadas.

Ao Corpo Docente de Pós-graduação de Engenharia da área de Mecânica de Solos da UFRS, pelos ensinamentos recebidos.

Ao professor Jorge Augusto Ceratti, pela amizade e preciosa orientação que deu sentido ao desenvolvimento da análise apresentada neste trabalho.

Ao companheiro Oleg Zwonok, pela amizade, pela sua sábia orientação e valiosas contribuições na discussão do tema aqui tratado.

Ao companheiro Fradique Chies, pela amizade e sua ajuda no projeto e ensaios laboratoriais.

A engenheira Bibiana Fogaça, pela amizade, incentivo e valiosa colaboração nas análises estatísticas dos resultados de ensaios.

Aos Estagiários Rosana Marília, Karina, Goldmann e Rodrigo pelas suas estimáveis colaborações em todo projeto.

Aos funcionários Nelson Morel, Assis Borin, Pedro Wilson, Paulo Amaral, Manoel Pires, Everson Silveira e Arlei Ferreira, pelas suas amizades e seus valiosos serviços nos ensaios laboratoriais.

Ao amigo Alexandre Fontenelle pelo constante apoio e sincera amizade.

## **ÍNDICE ANALÍTICO**

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE FOTOS</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1 OBJETIVO DA PESQUISA</b>	<b>21</b>
<b>1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA</b>	<b>21</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
<b>2.1 EFEITO DA CINZA SOBRE O MEIO AMBIENTE</b>	<b>23</b>
<b>2.2 UMA VISÃO DO EMPREGO DE RESÍDUOS DO CARVÃO NO MUNDO</b>	<b>25</b>
<b>2.3 EMPREGO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO NO BRASIL</b>	<b>27</b>
<b>2.4 MECANISMO DA REAÇÃO POZOLÂNICA</b>	<b>29</b>
2.4.1 COMPONENTES DO SISTEMA DA REAÇÃO POZOLÂNICA	29
2.4.2 NATUREZA DOS COMPONENTES CIMENTANTES DA REAÇÃO POZOLÂNICA	33
<b>2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE</b>	<b>36</b>
2.5.1 MATERIAIS	37
2.5.1.1 TIPOS DE CALES	37
2.5.1.2 TIPOS DE CINZA	38
2.5.3 CURA	43
2.5.3.1 EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO	43
<b>2.6 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM</b>	<b>45</b>
<b>3. PROGRAMA DE PESQUISA</b>	<b>49</b>
<b>3.1 MISTURAS UTILIZADAS NA PESQUISA</b>	<b>49</b>
<b>3.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS NO EXPERIMENTO</b>	<b>50</b>
3.2.1 PRIMEIRO ETAPA	51
3.2.2 SEGUNDA ETAPA	54
3.2.2.1 PRIMEIRA PARTE	54

3.2.2.2 SEGUNDA PARTE	55
<b>3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>58</b>
3.3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL I	58
3.3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL II	59
3.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	60
3.3.3.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	60
3.3.3.2 REGRESSÃO	60
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS</b>	<b>62</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>62</b>
<b>4.2 MATERIAIS EMPREGADOS NAS MISTURAS</b>	<b>62</b>
4.2.1 CAL DOLOMÍTICA MONOHIDRATADA	62
4.2.2. POZOLANAS	64
4.2.3. AGREGADO	68
<b>4.3 PROCESSO DE CURA, METODOLOGIA DE CONFECÇÃO E ENSAIOS EMPREGADOS NO EXPERIMENTO</b>	<b>72</b>
4.3.1 METODOLOGIA EMPREGADA NA CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	72
4.3.1.1. CONFECÇÃO PELO MÉTODO DE SOUZA PINTO	72
4.3.2 TIPOS DE CURA UTILIZADOS	75
4.3.2.1 PROCESSO DE CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)	75
4.3.2.2 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)	75
4.3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS EMPREGADOS	77
4.3.3.1 ANÁLISES QUÍMICAS	77
4.3.3.2 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	77
4.3.3.2.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	78
4.3.3.2.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO	79
4.3.3.2.3 ENSAIO DE PERDA DE MASSA	81
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS</b>	<b>82</b>
<b>5.1 PRIMEIRA ETAPA</b>	<b>82</b>
5.1.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	82
5.1.2.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO	82
5.2.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO	88
5.2.2 ABSORÇÃO	90
5.2.2.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO	90
5.2.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO	94
5.2.3. PERDA DE MASSA	95

5.2.3.1 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO	95
5.2.3.2- ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO	100
<b>5.3. SEGUNDA ETAPA</b>	<b>106</b>
5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (PRIMEIRA PARTE)	106
5.3.1.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO	106
5.3.1.1.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)	109
5.3.1.1.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)	114
5.3.1.1.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROCESSOS DE CURA ATC E CTC	119
5.3.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA	124
5.3.1.2.1. PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM	124
5.3.1.2.1.1 REGRESSÃO MÚLTIPLA	126
5.3.1.2.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)	130
5.3.1.2.2.1 REGRESSÃO SIMPLES	131
5.3.2. ABSORÇÃO	136
5.3.2.1 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS	136
5.3.2.1.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)	138
5.3.2.1.2 PROCESSO DE CURA PELA CTC	142
5.3.2.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO ATC E CTC DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO	147
5.3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO	150
5.3.2.2.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM	150
5.3.2.2.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)	152
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>154</b>
<b>6.1 CONCLUSÕES</b>	<b>154</b>
<b>6.2 SUGESTÕES</b>	<b>156</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>158</b>



## **LISTA DE FIGURAS**

### *Capítulo II*

Figura 2.1	Produção de energia no mundo ( $\times 10^3$ ton.) .....	23
Figura 2.2	Jazidas de carvão dos principais estados produtores .....	28
Figura 2.3	Efeito da temperatura sobre a solubilidade do Hidróxido de Cálcio. ....	30
Figura 2.4	Efeito do pH sobre a solubilidade do Hidróxido de Cálcio .....	30
Figura 2.5	Efeito da temperatura na solubilidade da Sílica .....	31
Figura 2.6	Solubilidade de sílica amorfa na água com a variação do pH.....	32
Figura 2.7	Efeito da variação da área superf. da Sílica na adsorção do hidróxido de cálcio .....	33
Figura 2.8	Fases de reação química da sílica amorfa e cristalina com a cal.....	34
Figura 2.9	Fatores que influenciam as prop. de materiais estabilizados pozolanicamente .....	36
Figura 2.10	Efeito da pressão de moldagem na resistência à compressão simples .....	40
Figura 2.11	Correlação entre a resistência e a M.E.A. Seca.....	41
Figura 2.12	Efeito do tempo de mistura na resistência .....	42
Figura 2.13	Efeito da temperatura e tempo de cura na RCS na cinza nº 1 .....	44
Figura 2.14	Efeito da temperatura e tempo de cura na RCS na cinza nº 2 .....	44
Figura 2.15	Efeito do tempo de permanência de CPs curados por autoclave .....	47
Figura 2.16	Resultados de ganhos de umidade durante a cura de autoclavagem.....	48

### *Capítulo IV*

Figura 4.1	Curvas granulométricas das cinzas e areia.....	71
Figura 4.2	Curvas granulométricas das misturas utilizadas no segunda etapa .....	71
Figura 4.3	Curvas de ensaio de compactação (2 <sup>o</sup> etapa) - Mistura 1 .....	73
Figura 4.4	Curvas de ensaio de compactação (2 <sup>o</sup> etapa) - Mistura 2.....	73
Figura 4.5	Curvas do ensaio de compactação (2 <sup>o</sup> etapa) - Mistura 3.....	74
Figura 4.6	Curvas do ensaio de compactação (2 <sup>o</sup> etapa) - Mistura 4.....	74

### *Capítulo V*

Figura 5.1	Efeito da temperatura na RCS (Energia Normal) .....	84
Figura 5.2	Efeito da temperatura na RCS (Energia Modificada).....	84
Figura 5.3	Efeito do tempo de cura na RCS (Energia Modificada).....	86
Figura 5.4	Efeito da energia de moldagem na RCS.....	87
Figura 5.5	Efeito da temperatura na absorção (Energia normal).....	92
Figura 5.6	Efeito da temperatura na absorção (Energia Modificada) .....	92

Figura 5.7 Efeito do tempo de cura na absorção (Energia Normal) .....	93
Figura 5.8 Efeito da energia de moldagem na absorção .....	93
Figura 5.9 Efeito da temperatura na perda de massa (energia normal).....	97
Figura 5.10 Efeito do tempo de cura na perda de massa (energia normal).....	98
Figura 5.11 Efeito da energia de moldagem na perda de massa .....	99
Figura 5.12 Resultados comparativos entre os valores máximos e mínimos das misturas e os limites máximos exigidos pela ABCP .....	100
Figura 5.13 Perda de massa da mistura 1 - C.M.M.....	104
Figura 5.14 Perda de massa da mistura 2 - C.M.M.....	104
Figura 5.15 Perda de massa da mistura 3 - C.M.M.....	105
Figura 5.16 Perda de massa da mistura 4 - C.M.M.....	105
Figura 5.17 Perda de massa da mistura 5 - C.M.M.....	105
Figura 5.18 Efeito da energia de moldagem na RCS.....	110
Figura 5.19 Efeito da temperatura de cura na RCS.....	112
Figura 5.20 Efeito do tempo de cura na RCS .....	113
Figura 5.21 Efeito do tempo de cura na RCS .....	114
Figura 5.21 Efeito da energia de moldagem na RCS.....	116
Figura 5.23 Efeito do tempo de cura, com variação da energia de moldagem, na RCS.....	117
Figura 5.24 Efeito do tempo de cura, com variação da energia de moldagem, na RCS.....	118
Figura 5.25 Comparação dos resultados de RCS dos processos de cura ATC e CTC .....	119
Figura 5.26 Comparação dos resultados de RCS do processos de cura ATC e CTC.....	120
Figura 5.27 Comparação dos resultados de RCS dos processos de cura ATC e CTC .....	121
Figura 5.28 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos.....	123
Figura 5.29 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos.....	123
Figura 5.30 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos.....	124
Figura 5.31 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 1 .....	127
Figura 5.32 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 3 .....	128
Figura 5.33 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 4 .....	129
Figura 5.34 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 1.....	132
Figura 5.35 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 2.....	133
Figura 5.36 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 3.....	134
Figura 5.37 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 4.....	135
Figura 5.38 Efeito da energia de moldagem na absorção .....	138
Figura 5.39 Efeito da temperatura de cura na absorção .....	140
Figura 5.40 Efeito do tempo de cura na absorção .....	141

<b>Figura 5.41</b>	<b>Efeito do tempo de cura na absorção .....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 5.42</b>	<b>Efeito da energia de moldagem na absorção .....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 5.43</b>	<b>Efeito do tempo de cura e energia de moldagem na absorção .....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 5.45</b>	<b>Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 5.46</b>	<b>Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 5.47</b>	<b>Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC.....</b>	<b>149</b>

## **LISTA DE QUADROS**

### ***CAPÍTULO II***

Quadro 2.1 Resultados quantitativos de metais pesados provenientes de cinza (ml/g).....	24
Quadro 2.2 Produção de cinza e previsão de consumo de carvão no mundo.....	25
Quadro 2.3 Produção e emprego de cinzas no mundo .....	26
Quadro 2.4 Análise quant. do consumo, produção e utilização da cinza no Estados Unidos. ....	26
Quadro 2.5 Produção e emprego da cinza nos Estados Unidos - 1974 .....	27
Quadro 2.6 Consumo de Carvão e prod. de cinzas das principais Termoelétricas Brasileiras ...	29
Quadro 2.7 Tipos de silicatos e aluminatos de cálcio que se formam após a reação química da cinza com a cal hidratada.....	35
Quadro 2.8 Fases do grupo tobermorita .....	35
Quadro 2.9 Comparações de resultados de RCS de dois tipos de cinza do Estados unidos.....	39

### ***CAPÍTULO III***

Quadro 3.1 Misturas utilizadas na segunda etapa do experimento .....	50
Quadro 3.2 Resultados dos parâmetros do ensaio de Proctor.....	54

### ***CAPÍTULO IV***

Quadro 4.1 Análise física da cal dolomítica monohidratada .....	63
Quadro 4.2 Análise química da cal dolomítica monohidratada .....	63
Quadro 4.3 Resultados da análise física das cinzas de Candiota .....	66
Quadro 4.4 Resultados da análise granulométrica das cinzas de Candiota .....	66
Quadro 4.5 Análise química das cinzas da Usina de Candiota.....	68
Quadro 4.6 Resultados comparativos das cinzas utilizadas no experimento com os quantitativos de análise química exigidos para o emprego no cimento .....	68
Quadro 4.7 Critérios de adequabilidade de areias para a fabricação de blocos sílico-calcários curados na autoclave .....	69
Quadro 4.8 Análise granulométrica da areia do Rio Quaíba .....	70
Quadro 4.9 Métodos empregados nas análises química dos materiais .....	77

## ***CAPÍTULO V***

Quadro 5.1 Misturas utilizadas na primeira etapa da pesquisa.....	82
Quadro 5.2 Média do resultados de ensaios de resistência à compressão simples dos CPs curados pelo processo de autoclave.....	83
Quadro 5.3 Resultados da Análise de Variância do ensaio de RCS.....	89
Quadro 5.4 Média dos resultados de ensaio de absorção em CPs curados pelo processo de autoclave.....	90
Quadro 5.5 Resultados de Análise de Variância do ensaio de absorção.....	94
Quadro 5.6 Média dos resultados da perda de massa de corpos-de-prova curados pelo processo de autoclavagem.....	96
Quadro 5.7 Resultados estatísticos do ensaio de perda de massa de CPs curados pelo processo ATC.....	100
Quadro 5.8 Resultados de Análise de Variância da perda de massa .....	101
Quadro 5.9 Misturas empregadas da segunda etapa .....	106
Quadro 5.10 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado .....	107
Quadro 5.11 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado.....	107
Quadro 5.12 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo de autoclave. ....	108
Quadro 5.13 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado.....	108
Quadro 5.14 Relação dos resultados de resistências à compressão simples dos dois processos de cura. ....	109
Quadro 5.15 Dados de resultados estatísticos da resistência à compressão .....	125
Quadro 5.16 Resultados de Análise de Variância (ANOVA) dos fatores principais .....	125
Quadro 5.17 Resultados do modelo matemático da mistura 1 .....	127
Quadro 5.18 Resultados do modelo matemático da mistura 3 .....	128
Quadro 5.19 Resultados do modelo estatístico da mistura 4 .....	129
Quadro 5.20 Resultados estatísticos da resistência à compressão simples .....	130
Quadro 5.21 Resultados de análise de variância da resistência à compressão simples .....	130
Quadro 5.22 Resultados do modelo matemático da mistura 1 .....	132
Quadro 5.23 Resultados do modelo matemático para a mistura 2.....	133
Quadro 5.24 Resultados do modelo matemático da mistura 3.....	134
Quadro 5.25 Resultados do modelo matemático da mistura 4 .....	135
Quadro 5.26 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.....	136
Quadro 5.27 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.....	137

<b>Quadro 5.28 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.....</b>	<b>137</b>
<b>Quadro 5.29 Resultados de ensaios de absorção, processo de cura CTC.....</b>	<b>142</b>
<b>Quadro 5.30 Resultados estatísticos.....</b>	<b>151</b>
<b>Quadro 5.31 Resultados de análise de variância do ensaio de absorção. ....</b>	<b>151</b>
<b>Quadro 5.32 Dados estatísticos de ensaio de absorção.....</b>	<b>152</b>
<b>Quadro 5.33 Resultados de análise de variância do ensaio de absorção .....</b>	<b>153</b>

## **LISTA DE FOTOS**

<b>Foto 4.1- Equipamento para confecção de corpos-de-prova .....</b>	<b>56</b>
<b>Foto 4.2- Processo de cura de temperatura ambiente (câmara a temperatura constante) .....</b>	<b>59</b>
<b>Foto 4.3 Processo de cura de temperaturas acima da ambiente (autoclave) .....</b>	<b>60</b>
<b>Foto 4.4 -Ensaio de resistência à compressão simples .....</b>	<b>63</b>
<b>Foto 4.5- Ensaio de Absorção .....</b>	<b>64</b>
<b>Foto 4.6 Ensaio de Perda de Massa .....</b>	<b>65</b>

## **LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS**

ABCP	:Associação Brasileira de Cimento Portland
CICASOL	:Cinza, Cal e Solo
CIENTEC	:Fundação de Ciência e Tecnologia
CONAMA	:Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	:Companhia Petroquímica do Sul
COPPE	: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
CP	: Cinza Pesada
CPRM	:Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais
CPs	:Corpos-de-prova
CV	: Cinza Volante
DNER	:Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ELETROSUL	:Centrais Elétrica do Sul do Brasil S/A
HRB	:Highway Research Board
METROPLAN	:Fundação de Planejamento Metropolitano Regional
PETROFLEX	:Petroflex Industria e Comercio S/A
RCS	:Resistência à Compressão Simples
$\gamma_s$ (máxima)	:Massa Específica Aparente Seca Máxima do ensaio de Proctor
$h_{ót}$	:Umidade Ótima do ensaio de Proctor



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento mecânico e físico de pozolanas artificiais estabilizadas química e granulometricamente, curadas por dois processos de cura denominados de : autoclave(ATC), que utiliza temperaturas na faixa de 149 a 188°C e câmara à temperatura constante(CTC) que utiliza uma temperatura de  $\pm 21^\circ\text{C}$ . Também fez-se análises estatísticas com a finalidade de se determinar o efeito da energia de moldagem, temperatura e tempo de cura sobre os resultados dos ensaios, para cada processo de cura, além de se determinar modelos matemáticos para previsão de resultados de resistência através de regressões múltiplas e simples.

As pozolanas artificiais empregadas foram as cinzas volante e pesada da Usina de Candiota, as quais foram estabilizadas com cal dolomítica hidratada e areia do Rio Guaíba. Os ensaios de resistência à compressão simples , absorção e perda de massa basearam-se nas normas da ABNT e DNER e para os estudos de análise estatística, fez-se anteriormente aos ensaios, dois planejamentos experimentais denominados de Split-Splot e Quadrado Latino, que foram utilizados nos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante, representativamente.

Os Corpos-de-Prova curados na câmara à temperatura constante, até os 28 dias de cura, apresentaram resultados de resistências inferiores aqueles curados pelo processo de autoclave. Aos 60 dias de cura suas resistências ficaram na faixa dos valores de Corpos-de-Provas curados pela autoclave nas temperaturas de 149 a 188°C, excessão feita na mistura utilizando areia, onde em todos os períodos de cura estudados,os valores de resistência dos Corpos-de-Prova curados pelo câmara à temperatura constante foram inferiores.

A proporção da quantidade de cal e cinza na mistura, bem como o valor da superfície específica da cinza influenciam nos resultados de ensaios, independentemente da variação dos fatores principais. Em termos de análise estatística verificou-se que a energia de moldagem e o tempo de cura são os fatores que apresentam os maiores efeitos sobre os resultados da resistência, para os processos de cura ATC e CTC, respectivamente.

## ABSTRACT

The aim of the research is to evaluate the mechanics and physical behaviour of artificial pozolanics stabilizes chemistry and granulometric.

Two processes have been used to cure the artificial pozolanics: Autoclave (ATC) with a temperatures of 149<sup>0</sup>C, 165<sup>0</sup>C, 175<sup>0</sup>C and 188<sup>0</sup>C constant temperature chamber (CTC). Statisticall analysis have been applied to assess the effects of moulding energy, temperature and time of cure within the range of values adopted on the experimental programme. A mathematical expression was developed to predict the shear strength measured in simple compression tests.

Fly ash and bottom ash from the Candiota plant have been used to product the artificial pozolanics. The material was stabilized with dolomitic lime and Guaiba's River Sand. ABNT and DNER standards were adopted in simple compression, absorption and durability tests. Two experimental planning were used in the present research: Split-Plot for the autoclave process and Quadrado Latino for the constant temperature chamber.

Shear strength measured in samples cured in the constant temperature chamber process at 7, 14 and 28 days were lower than shear strength measured in the autoclave process. At 60 days, the shear strength measured in constant temperature chamber layed in between the values measured in the autoclave process, being the 149<sup>0</sup>C sample the lower boundary and the 188<sup>0</sup>C the upper boundary. When sand, fly ash and lime mixtures were used a clear trend emerged. The results obtained in the constant temperature chamber process were consistently lower than in the autoclave process for times of cure of 7, 14, 28 and 60 days.

An important conclusion of the study is that the shear strength in simple compression is influenced by the lime and ash contents and the specific surface of the ash independently of the moulding energy, time and temperature of cure adopted.

As for the statisticall analysis, the moulding energy was the dominant effect when the autoclave process was used whereas the time of cure is dominant for constant temperature chamber process.

## INTRODUÇÃO

A grande demanda de energia elétrica que se impôs nas últimas décadas fez com que o carvão se tornasse importante fonte de energia. Dados de 1965 revelaram nos Estados Unidos que 33% da energia total era produzida pela queima do carvão, **MARKON (1976)**; na Espanha, dados de 1992 mostram que essa porcentagem chega a 44,8%, **ABREU (1992)**.

No Brasil, a maioria das jazidas de carvão mineral encontram-se no Sul do país e 92% dessas estão localizadas no Estado do Rio Grande do Sul. Do total de energia elétrica gerada no país, a obtida pela queima do carvão em termoelétricas corresponde a 1,3%, **CPRM (1989)**.

O Rio Grande do Sul atualmente é responsável pela concentração de aproximadamente 1.600.000 toneladas/ano de resíduos de carvão gerados pelas termoelétricas. Essa quantidade inclui as cinzas volante, pesada e escórias. Com a implantação da Termoelétrica Jacuí I, projetada para uma potência de 350 MW, essa concentração aumentará em 600.000 toneladas/ano.

Se pôr um lado verificamos que o carvão faz gerar energia, fator preponderante para o desenvolvimento de uma região, de outro lado, seu resíduo traz ao meio ambiente grande quantidade de substâncias potencialmente tóxicas, como hidrocarbonetos aromáticos polinucleares e várias espécies químicas inorgânicas, algumas de características conhecidamente carcinogênicas e mutogênicas, **ANDRADE (1989)**.

Ao nos conscientizarmos do problema ambiental, fica evidente a preocupação do destino desse resíduo. No Brasil, seu emprego resume-se apenas na utilização da cinza volante na fabricação de cimento pozolânico, onde aproximadamente 25 a 30% da cinza volante gerada é consumida. A maior parte é colocada no meio ambiente de formas muitas vezes inadequadas, enquanto em outros países o espectro de utilização é muito mais abrangente, constituindo excelente material de construção.

O problema relacionado com o resíduo do carvão no Brasil é tipicamente regional. Caberia à União e ao Governo Estadual lançar uma política

ambiental de proteção ao meio ambiente, com normas mais rígidas no que tange a fábricas que geram resíduos tóxicos.

Uma das formas viáveis de política ambiental seria através do fomento técnico-científico junto às instituições de pesquisa, com a participação do meio empresarial, tendo como finalidade empregar essa matéria prima industrialmente.

Pôr seu lado caberia ao Estado, através de leis severas, que obrigassem as fábricas geradores de resíduos tóxicos, a proteção do meio ambiente, através de projetos para o depósito desses resíduos ou o emprego desses caso confirmassem sua qualidade e viabilidade econômica.. Em síntese, o estado estaria preservando o meio ambiente e gerando um pólo de desenvolvimento na região, enquanto os empresários, no caso de seu emprego, teriam um produto de ótima qualidade e baixo custo para competir no mercado.

Alguns centros de pesquisas têm estudado uma forma de emprego da cinza, como pôr exemplo a **UFRGS**, **COPPE** e Fundação de Ciência e Tecnologia (**CIENTEC**). Esta última, desde 1980, tem realizado pesquisas com esse material, iniciando com o emprego de cinza volante para construção de bases de pavimentos através do projeto **CICASOL (1982)** e atualmente o estudo de cinza volante e pesada na fabricação de tijolos para habitação, através do projeto **CINCAL (1993)** e **CIPECAL (1996)**, respectivamente. Estes dois projetos foram desenvolvidos objetivando dois aspectos de extrema importância atualmente no estado:

- a) preservação do meio ambiente, com uma política de emprego desses resíduos;
- b) o aspecto social, pois estudos de viabilidade econômica realizados na **CIENTEC** comprovam o baixo custo desse material para a fabricação de tijolos/blocos para habitação.

Este fato poderá trazer benefícios à população de baixa renda, pois poderão ser desenvolvidos projetos habitacionais nas diversas prefeituras próximas à região desses resíduos, com baixos custos. A questão da moradia é problemática, a tal ponto que, através de estudos feitos no governo do Estado (1987 a 1991),“Na construção do novo Rio Grande” verificou-se uma crise habitacional estimada em 500.000 famílias sem teto. Segundo a **METROPLAN**, no ano 2000 haverá na região

metropolitana de Porto Alegre uma população de 3.061.982, necessitando de 927.605 novas moradias.

## **1.1 OBJETIVO DA PESQUISA**

Este trabalho propõe-se:

- 1 - Estudar o comportamento físico e mecânico da estabilização da cal dolomítica hidratada e areia com as cinzas volante e pesada, utilizando processos de cura de temperatura ambiente (câmara à temperatura constante) e acima das temperaturas ambientes (autoclave).
- 2 - Utilizar análises de variância dos fatores principais (energia de moldagem, temperatura e tempo de cura e umidade de moldagem) com o objetivo de determinar o efeito destes sobre a variabilidade dos resultados de ensaio.

## **1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA**

A pesquisa está desenvolvida em seis capítulos:

O capítulo 2 trata sobre o estado de conhecimento dos resíduos do carvão, através de uma revisão bibliográfica. São abordados os efeitos tóxicos desses resíduos no meio ambiente e a produção e emprego no âmbito internacional e nacional. Na segunda parte são apresentados estudos de diversos pesquisadores sobre o mecanismo da reação pozolânica, as principais variáveis responsáveis pela variação do comportamento mecânico de materiais pozolânicos estabilizados com cal hidratada e algumas características da autoclave e materiais curados pôr este processo de cura.

Os capítulos 3 e 4 tratam do experimento da pesquisa propriamente dito. O capítulo 3 descreve o programa de pesquisa, ou seja, os tipos de mistura empregados no trabalho, as variáveis estudadas pelos processos de cura da câmara à temperatura constante (CTC) e autoclave (ATC) e a metodologia de análise de

resultados. O capítulo 4 caracteriza física e quimicamente os materiais utilizados na mistura, bem como descreve os processos de cura e as metodologias de moldagem dos corpos-de-prova e descrição dos ensaios.

O capítulo 5 apresenta a análise dos resultados de ensaios e uma análise estatística destes, com a finalidade de determinar o efeito dos fatores principais (energia e umidade de moldagem, temperatura e tempo de cura) na variabilidade dos resultados através da análise de variância (ANOVA) e modelos matemáticos através das regressões simples e múltiplas. No capítulo 6 são apresentadas as discussões e conclusões dos resultados de ensaios e sugestões de pesquisas para futuras teses.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EFEITO DA CINZA SOBRE O MEIO AMBIENTE

A cinza, resultado da combustão do carvão mineral, tem fundamental importância na economia mundial, conforme Figura 2.1 **MARKON (1976)**. Todos os países que produzem cinzas estão hoje empenhados em encontrar aplicações industriais para as mesmas, isto porque esse resíduo apresenta um alto grau de toxicidade.

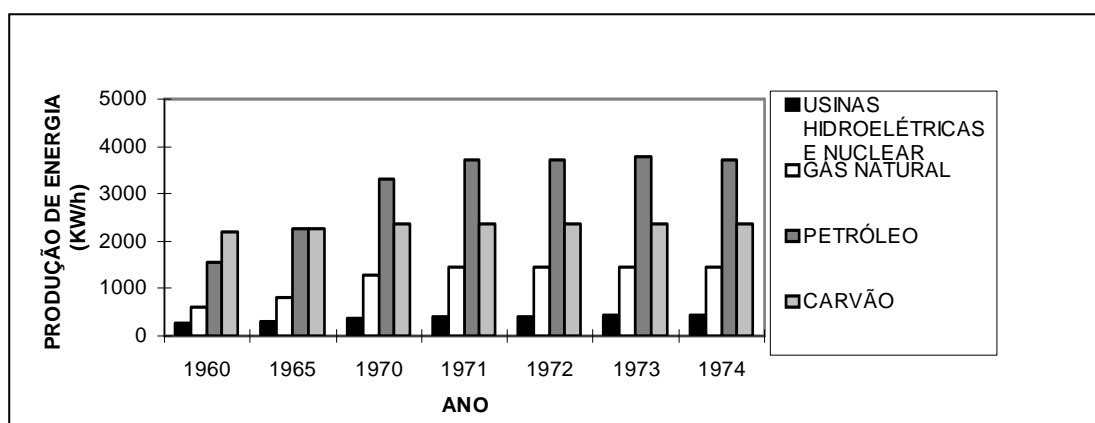


Figura 2.1 Produção de energia no mundo ( $\times 10^3$  ton.)

A partir da crescente produção de cinzas nos países que utilizam a queima de carvão como energia, houve uma preocupação de se estudar os efeitos desse resíduo sobre o meio ambiente. Estudos neste aspecto foram realizados por **SMITH ET AL (1979)**, **KAAKINEN ET AL (1985)** e **REPETTO (1988)**.

Estudos sobre a potencialidade dos elementos tóxicos e seus efeitos sobre o meio ambiente também são preocupações de pesquisadores brasileiros, que realizaram estudos dessa ordem na termoelétrica de Candiota, no Rio Grande do Sul, **ANDRADE e SOLARI (1985)** e **FIEDLER, MARTINS E SOLARI (1991)**, **MARTINS E ZANELLA (1990)**.

As características químicas das cinzas estão ligadas ao tipo de carbono que as originou e as transformações que ocorrem conforme a temperatura de queima; portanto, trata-se de um produto bastante heterogêneo.

Aqueles elementos que se apresentam com maior abundância e que se denominam "componentes maiores" são: sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e carbono (C). Porém, existem outros elementos denominados de "elementos-traços", como por exemplo zinco, cobre, cromo, chumbo, mercúrio, fósforo etc, que são responsáveis pelo potencial tóxico da cinza.

No Quadro 2.1 são apresentados quantitativos de alguns elementos-traços e o pH da solução onde estes estavam presentes. **ABREU (1993)** fez a análise das águas do arroio Carvoeiro e Poacá, que estão próximos à Termoelétrica de Candiota. Observa-se que alguns metais pesados encontram-se com concentrações acima dos valores máximos exigidos pelo **CONAMA**, segundo a classe de água para consumo. Neste quadro também são mostrados resultados quantitativos de metais pesados da água originada do ensaio de lixiviação realizado em uma amostra de solo do aterro subjacente ao da cinza volante da **COPEL**.

Elemento	(1) Arroio Carvoeiro	(2) Arroio Poacá		(3) Aterro COPEL	Padrão CONAMA
		Nascente	pós mina		
Fe	3,9-27,3	0,3	0,5-1,1	-	0,3
Zn	0,14-1,01	0,02	0,04-0,16	18,9	0,18
Co	0,07-0,09	0,009	0,016	-	0,2
Cr	< 0,01	< 0,01	< 0,01	4,1	0,5
Cu	0,009-0,016	0,004	< 0,002	2,7	0,02
Pb	0,024-0,030	0,026	0,02	6,3	0,03
pH	1,7-3,6	6,0-7,0	3,1-4,6	-	6,9-9,0

Quadro 2.1 Resultados quantitativos de metais pesados provenientes de cinza (mg/l)

(1) Dados de amostras do arroio Carvoeiro, que recebe todos os afluentes e drenagem da mina de Candiota;

(2) Dados de amostras do arroio Poacá, que recebe as águas do arroio Carvoeiro;

(3) Dados de amostras do solo subjacente (prof.-7,45m) ao aterro de cinza da COPEL



## 2.2 UMA VISÃO DO EMPREGO DE RESÍDUOS DO CARVÃO NO MUNDO

Com o crescimento da produção dos resíduos de carvões das grandes termoelétricas, gerou-se uma preocupação de estudar o seu emprego industrialmente, devido principalmente ao potencial tóxico de seus elementos.

O Quadro 2.2 mostra a produção de cinza dos países com grande potencial de jazidas de carvão, bem como uma previsão do potencial de exploração de carvão no ano 2000. Os dados foram retirados do trabalho de **MARKON (1976)**.

ANO	1974		2000
País	Produção de cinza (x 10 <sup>6</sup> ton)	Porcentagem de cinza em relação à produção total (%)	Produção de carvão (x 10 <sup>9</sup> ton)
Estados Unidos	53,780	24,2	1.500
(Ex) U.R.S.S.	69,000	31,0	1.000
China	-	-	800
Polônia	12,061	5,40	300
Índia	-	-	200
Reino Unido	11,000	4,90	150
Austrália	-	-	100
África do Sul	-	-	100
Checoslováquia	14,000	6,30	-
Alemanha (unida)	27,600	12,1	-
outros	34,654	16,1	200

Quadro 2.2 Produção de cinza e previsão de consumo de carvão no mundo (MARKON, 1976).

**BRACKETT(1967)** apresentou resultados quantitativos da produção e emprego da cinza volante em alguns países no ano de 1965. O Quadro 2.3 apresenta esses números.

País	Produção (x 10 <sup>6</sup> t)	Empregado (x 10 <sup>6</sup> t)
Inglaterra	10,0	2,7 (27%)
França	9,0	3,6 (40%)
Alemanha Oriental	4,0	2,0 (50%)
União Soviética	20,0	1,3 (6,5%)

Quadro 2.3 Produção e emprego de cinzas no mundo (BRACKETT, 1967)

No Quadro 2.4 são mostrados os resultados da quantidade de carvão consumido e de cinza produzida e empregada nos Estados Unidos, demonstrando que o potencial de emprego desse resíduo ainda é pouco explorado se compararmos com a quantidade gerada. O Quadro 2.5 mostra onde são mais aplicados os resíduos de carvão produzidos nas termoelétricas dos Estados Unidos **FABER (1976)**.

ANO	Produção (x10 <sup>6</sup> ton)				
	1979	1980	1981	1982	1983
Carvão consumido	526,0	568,3	595,6	585,3	600,1
Cinza produzida	57,5	48,3	50,7	47,9	52,3
Cinza utilizada	10,0 (17,4%)	6,42 (13,3%)	9,41 (18,6%)	7,95 (16,6%)	7,52 (14,39%)

Quadro 2.4 Análise quantitativa do consumo, produção e utilização da cinza no Estados Unidos.

Utilização da cinza	Cinza volante (x 10 <sup>6</sup> ton)	Cinza pesada (x 10 <sup>6</sup> ton)	*Escória (x 10 <sup>6</sup> ton.)
1. Cinza coletada	40,0	14,3	4,8
2. Cinza utilizada:			
a- Mistura com cimento	0,4	< 0,1	-
b- Aplicação no concreto	0,6	-	-
c- Estabilização para base de pav.	0,3	0,6	1,2
d- Agregado leve	0,1	0,1	-
e- Filler na mistura em asfalto	0,1	< 0,1	< 0,1
f- Outros	0,5	0,9	1,0
Total do item 2	2,0	1,6+	2,2+
3. Utilização para agricultura	0,4	0,6	0,1
4. Utilização da cinza para armazenagem	1,0	0,7	0,1
5. Total da utilização (ton.)	3,4	2,9	2,4
6. Total da utilização (%)	8,4	20,3	50,0

Quadro 2.5 Produção e emprego da cinza nos Estados Unidos - 1974

\* = considerada também cinza pesada, é chamada de escória por apresentar frações granulares acima de 76 mm

### 2.3 EMPREGO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO NO BRASIL

No Brasil, a cinza volante atualmente está sendo utilizada na fabricação de cimento ou na adição no concreto. Pesquisas têm sido desenvolvidas nesse sentido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **CERATTI (1979)**; a **COPPE (UFRJ)**, com a dissertação de mestrado de **PINTO (1971)**, pesquisou a estabilização de areia de praia com adição de cinzas volantes e a Fundação de Ciência e Tecnologia - **CIENTEC**, pesquisou a mistura de solos com cal e cinza volante (fly ash) na aplicação em pavimentação, utilizando-a como base, **PROJETO CICASOL (1982)**. As misturas utilizadas neste projeto foram empregadas em algumas obras que foram fiscalizadas pela CIENTEC:

a) 14 km de pavimento utilizando como base cinza volante + cal + areia no terminal de Santa Clara (COPEL) e ruas de infra-estrutura da PETROFLEX, ambas localizadas no município de Triunfo (RS);

b) revestimento para quatro bacias de decantação para receber efluentes líquidos da Usina de Candiota ;.

c) execução de base do arruamento da Usina de Candiota, fase III.

No Brasil temos estimado  $32.933,55 \times 10^6$  toneladas de carvão em jazidas, sendo  $30.993,55 \times 10^6$  toneladas localizadas no sul do País: o Rio Grande do Sul com 92,32%, Santa Catarina com 7,23%, Paraná com 0,42% e o Estado de São Paulo com 0,03%, conforme Figura 2.2, **ABREU (1993)**, **MINFRA(1991)** e **CPRM (1989)**.

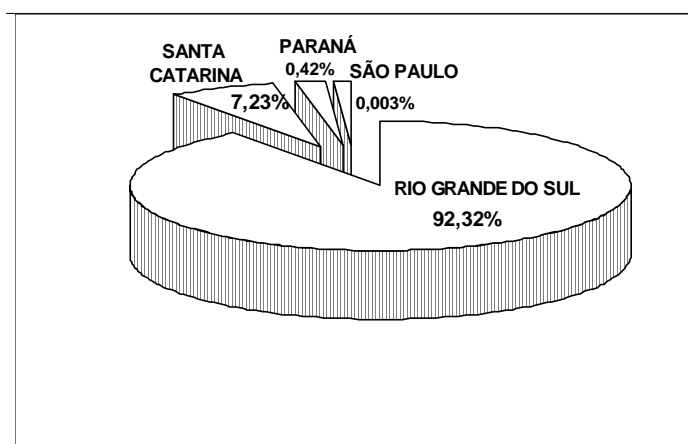


Figura 2.2 Jazidas de carvão dos principais estados produtores

A produção atual de carvão brasileiro para produção de energia elétrica, segundo o "**Balanco Energético Nacional - BEN**", no ano de 1991 foi de  $3.164 \times 10^3$  toneladas por ano e foram geradas  $1.645 \times 10^3$  toneladas por ano de resíduos da combustão do carvão (cinza volante, cinza pesada e escória). A produção de cinza volante foi de  $1.100 \times 10^3$  ton./ano. Com a entrada em operação das usinas termoelétricas de Jacuí I, Candiota III e Jorge Lacerda C, a previsão é aumentar para  $3.000 \times 10^3$  ton./ano de resíduos, sendo  $2.460 \times 10^3$  ton. de cinza volante.

No Quadro 2.6 são apresentados o consumo de carvão e a produção de seus resíduos nas principais Usinas Termoelétricas do sul do país, **ABREU (1990)**. A indústria cimenteira é a principal responsável pela absorção da cinza

volante, pois emprega cerca de 24 a 35% da produção, segundo informações verbais da ELETROSUL.

CENTRAIS TERMOELÉTRICAS	CONSUMO DE CARVÃO(ANUAL) (ton.)	PRODUÇÃO DE CINZA(ANUAL)	
		PESADA (ton.)	VOLANTE ton.)
Candiota (RS)	1.334.795	139.859	559.435
Charqueadas (RS)	321.682	95.873	113.765
São Jerônimo (RS)	157.696	<del>63.072</del>	-
Jorge Lacerda	1.266.696	152.000	354.675
Total (ton.)	3.080.869	450.804	1.027.875

Quadro 2.6 Consumo de Carvão e produção de cinzas das principais Termoelétricas Brasileiras (ABREU, 1990)

✕A cinza pesada de São Jerônimo é do tipo escória

## 2.4 MECANISMO DA REAÇÃO POZOLÂNICA

Os estudos sobre as reações químicas entre os materiais pozolânicos e a cal são complexos e não estão bem definidos, seja no mecanismo preciso da cal e das pozolanas para formar o componente cimentante, seja na natureza ou tipo de comportamento de silicato ou aluminato de cálcio hidratado formado na reação pozolânica.

### 2.4.1 COMPONENTES DO SISTEMA DA REAÇÃO POZOLÂNICA

Para melhor entendermos a reação pozolânica, inicialmente é necessário entendermos que os componentes dessa reação são um sistema simples formado por sílica/alumina + hidróxido de cálcio + água.

Estudos realizados por **AHLBERG e BARENBERG (1975)** mostraram que ao adicionarmos o hidróxido de cálcio com água haverá liberação do íon de cálcio, na Figura 2.3. Observa-se que a solubilidade do hidróxido de cálcio

depende da variação da temperatura. Prosseguindo em seus estudos, eles verificaram que o aumento do pH na solução dependerá da quantidade de íon de cálcio presente na solução. A Figura 2.4 mostra o efeito da concentração do hidróxido de cálcio no pH da solução.

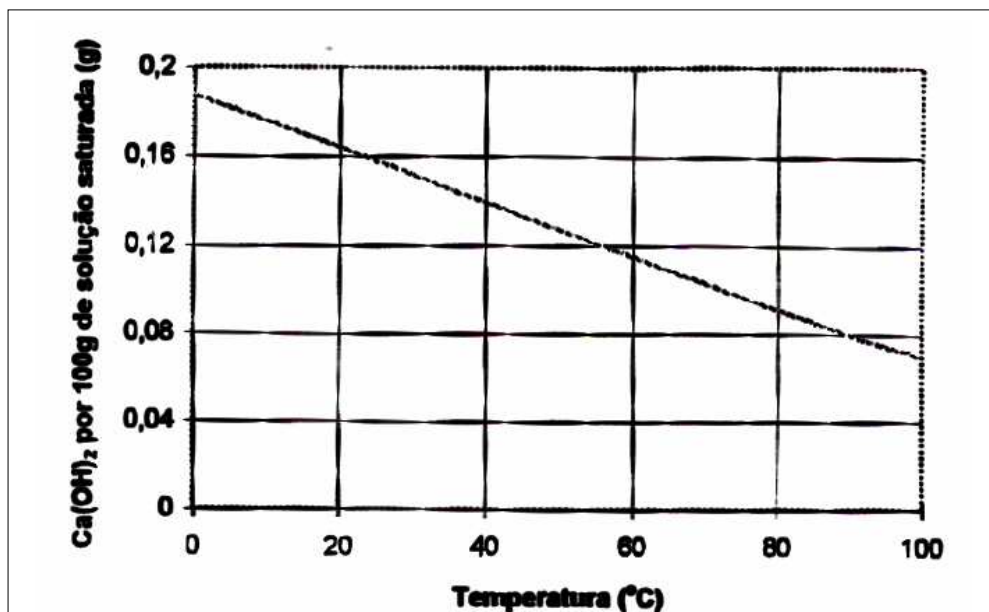


Figura 2.3 Efeito da temperatura sobre a solubilidade do Hidróxido de Cálcio (AHLBERG e BARENBERG, 1975).

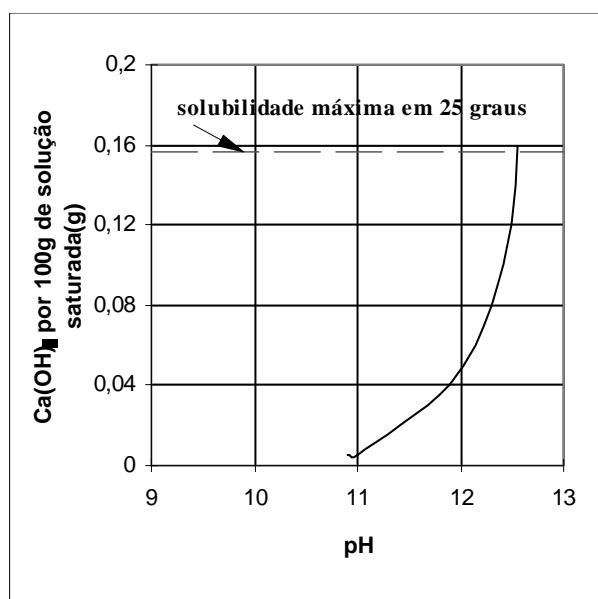


Figura 2.4 Efeito do pH sobre a solubilidade do Hidróxido de Cálcio (AHLBERG e BARENBERG, 1975).

Para que ocorra a reação pozolânica, além da presença do íon de cálcio na solução, é importante que haja solubilidade da sílica presente no material pozolânico, então torna-se importante conhecer os fatores que afetam essa solubilidade.

**ILER (1955)** realizou estudos de um sistema formado por sílica e água, variando a temperatura na solução, conforme Figura 2.5, e concluiu que a sílica na forma cristalina torna-se insolúvel em temperaturas ambiente, portanto, não haverá reações pozolânicas, enquanto que a sílica na forma amorfa torna-se solúvel em temperaturas normais, e sua solubilidade será linearmente dependente da temperatura no sistema sílica-água.

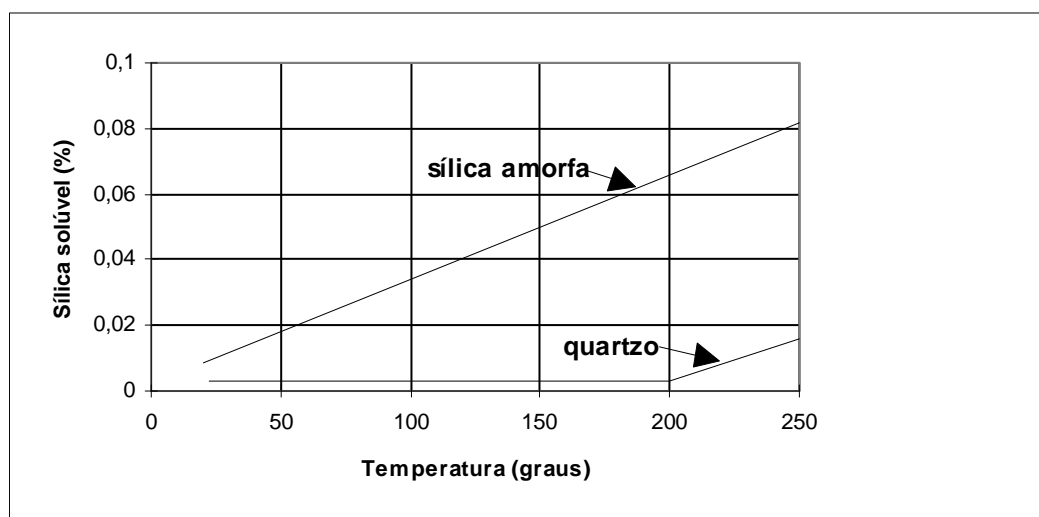


Figura 2.5 Efeito da temperatura na solubilidade da Sílica (ILER, 1955)

**ALEXANDER ET AL (1954)** mediram o efeito do pH na solubilidade da sílica amorfa, Figura 2.6. Eles concluíram que o pH tem pouco efeito na solubilidade quando seu valor está próximo ou menor do que 9 e apresentaram uma equação teórica que permite calcular a quantidade de sílica amorfa solubilizada com valores de  $\text{pH} > 11$ .

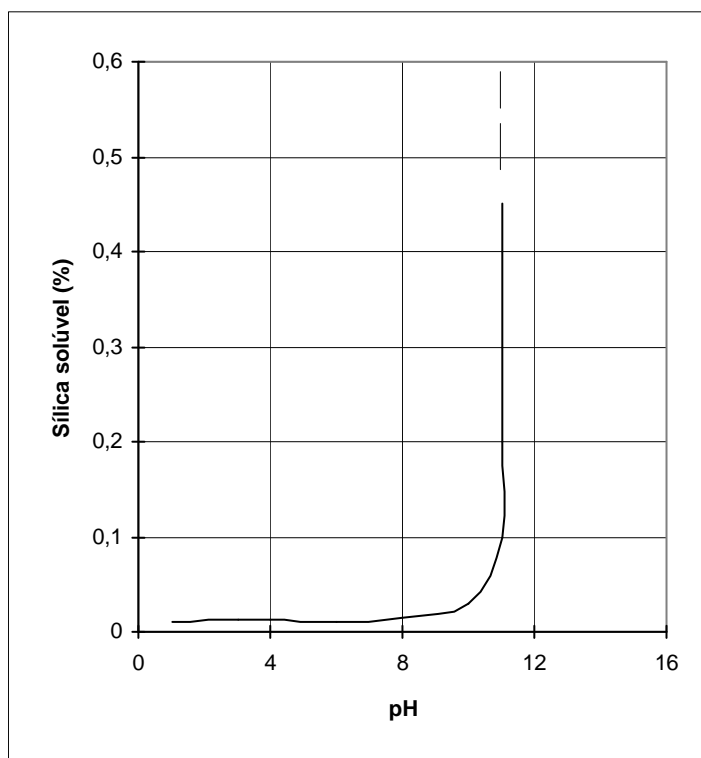


Figura 2.6 Solubilidade de sílica amorfa na água com a variação do pH (ALEXANDER, 1954)

**GREENBERG (1956)** conduziu estudos sobre a interação do cálcio pela sílica onde ele observou que há uma quimissorção, que por definição é um fenômeno químico em que ocorrem ao mesmo tempo a adsorção e a absorção do hidróxido de cálcio pela sílica. Ele apresentou uma correlação entre a quantidade de cálcio adsorvido e a superfície específica da sílica, conforme a Figura 2.7. Posteriormente à quimissorção, surgem os novos minerais com propriedades cimentantes, tais como silicatos de cálcio hidratado, aluminatos de cálcio hidratado etc.



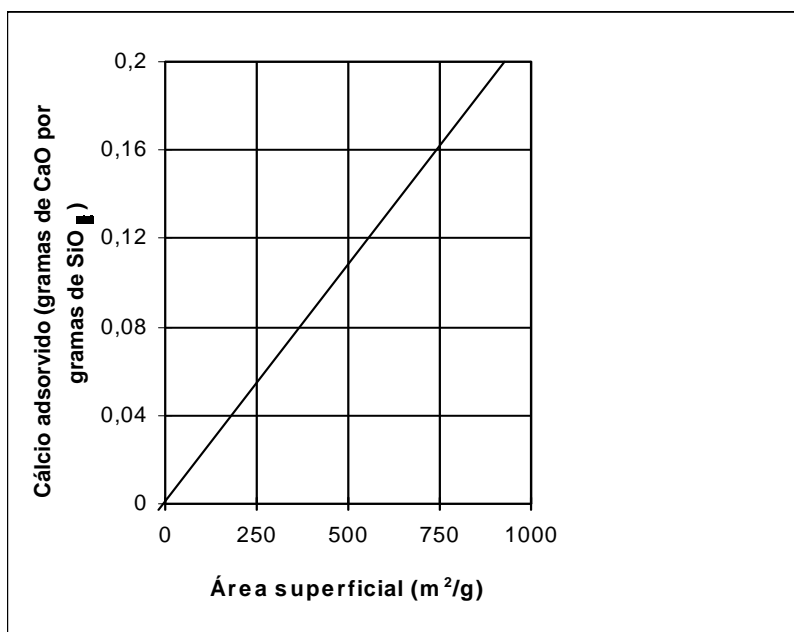
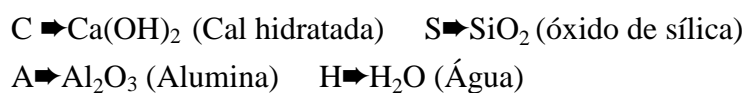


Figura 2.7 Efeito da variação da área superficial da Sílica na adsorção do hidróxido de cálcio (GREENBERG, 1956)

#### 2.4.2 NATUREZA DOS COMPONENTES CIMENTANTES DA REAÇÃO POZOLÂNICA

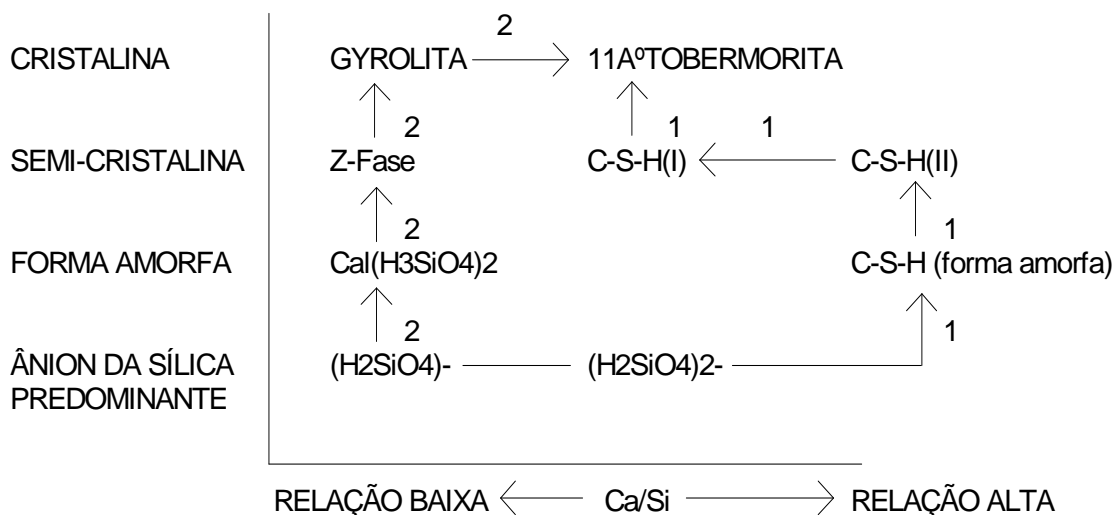
A natureza dos componentes cimentantes, consequência da quimissorção do íon do hidróxido de cálcio e o óxido de sílica, depende de muitos fatores, tais como a relação de Ca/Si, temperatura, tipos de cales, tempo de cura, tipo de material pozolânico etc. Sabe-se através de análise de diferenciação térmica e difração de raio-X que, inicialmente, a formação das estruturas dos reagentes é gelatinosa (estrutura amorfa) e só com o amadurecimento (tempo e temperatura de cura) da amostra haverá o aparecimento de estruturas cristalinas **BENTON (1962)**.

Foi observado que a reação pozolânica entre a sílica/alumínio e a cal hidratada em solução, gera componentes de propriedades cimentantes denominados de silicato e aluminato de cálcio hidratado (C-S-H ; C-A-H), **LEONARD E DAVIDSON (1959)**, **TOWNSEND, CHARLES E DONAGHE (1976)**, sendo que as letras representam os seguintes elementos:



A formação desses componentes cimentantes devido a reação química é muito semelhante tanto para os resíduos de carvão como para areia. Vários pesquisadores observaram o aparecimento de grupos de silicatos de cálcio que se formam na cristalização da estrutura, sendo o mais importante aquele semelhante ao mineral tobermorita, **SAUMAN(1973)**, **TAYLOR(1965)**, **KONDO AT AL (1973)**.

Foram realizados estudos de análises químicas por **ROY e JOHNSON(1965)**, na qual apresentam os principais grupos de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, que podem surgir na reação química da sílica com o óxido de cálcio disponível, Quadro 2.7; **TAYLOR(1965)** apresentou as fases do grupo da tobermorita, principal elemento que aparece nas reações químicas entre a sílica e a cal hidratada curadas em autoclave, Quadro 2.8; **ASSARSOON (1960)** mostra um possível estágio de sílica amorfa e cristalina estabilizada com cal hidratada e curada por autoclavagem, Figura 2.8. Na fase inicial é um gel, onde nos materiais em que a sílica está na forma cristalina, a relação Ca/Si será alta, pois a fase é pobre em íons de sílica, uma vez que só a altas temperaturas terá início um crescimento da solubilidade da sílica. Em materiais que apresentam a sílica na forma amorfa, a reação Ca/Si será baixa, significando que inicialmente haverá um rápido crescimento da sílica.



1. Relação com sílica cristalina
2. Relação com sílica amorfa

Figura 2.8 Fases de reação química da sílica amorfa e cristalina com a cal (ASSARSOON, 1960)

GRUPO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
Tobermorita (11 A°)	5	6		5
Gyrolita	2	3		2
Xonotlita	6	6		1
Fase Z	3	2		0-1/2
Wallastonita	1	1		-
*Hidrogarnete	3		3	6
	3		9	3

Quadro 2.7 Tipos de silicatos e aluminatos de cálcio que se formam após a reação química da cinza com a cal hidratada

\*forma-se da reação do hidróxido de alumínio com o hidróxido de cálcio disponível

SUBDIVISÃO PRIMÁRIA	SUBDIVISÃO SECUNDÁRIA	COMPOSIÇÃO
Forma cristalina	14 A°	C <sub>5</sub> S <sub>6</sub> H <sub>9</sub>
	11 A°	C <sub>5</sub> S <sub>6</sub> H <sub>5</sub>
	9 A°	C <sub>5</sub> S <sub>6</sub> H(0-2)
Forma semi-cristalina	C-S-H(I)	Ca/Si < 1.5
	C-S-H(II)	Ca/Si ≤ 1.5
Forma amorfa	Tobermorita Gel	Ca/Si ≥ 1.5 (Provavelmente)

Quadro 2.8 Fases do grupo tobermorita (TAYLOR, 1965)

**TOWNSEND, CHARLES e DONAGHE(1959)**, em estudos feitos com cinza e cal utilizando o processo de cura em baixas temperaturas (temperatura ambiente), apresentaram os seguintes passos prováveis das reações pozolânicas:



**TAYLOR e MOOREHEAD(1965)** estudaram blocos de cal e areia curados pelo processo de autoclavagem e verificaram que a máxima resistência, nas mesmas condições de moldagem mas variando a temperatura, está ligada à relação do peso molecular do óxido de cálcio e óxido de sílica que se combinaram na reação, pois, conforme o valor da relação, aparecerão grupos de silicatos de cálcio hidratados distintos. Eles observaram que a melhor relação entre cálcio e sílica está entre 0,80 a 1,20.

**BUTT et al and MALININA(1957)** também obtiveram resultados que confirmaram que altas resistências à compressão poderiam ser obtidas se a relação de Ca/Si estivesse no intervalo de 0,8 a 1,0.

## 2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE

Neste trabalho a denominação "**materiais estabilizados pozolanicamente**" refere-se a misturas que contenham sílica e/ou alumínio que reajam com a cal hidratada em temperatura ambiente ou em altas temperaturas na presença de água, formando componentes com propriedades cimentantes.

**AHLBERG e BARENBERG (1978)** apresentaram uma variedade de fatores que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas de materiais estabilizados pozolanicamente, Figura 2.9.

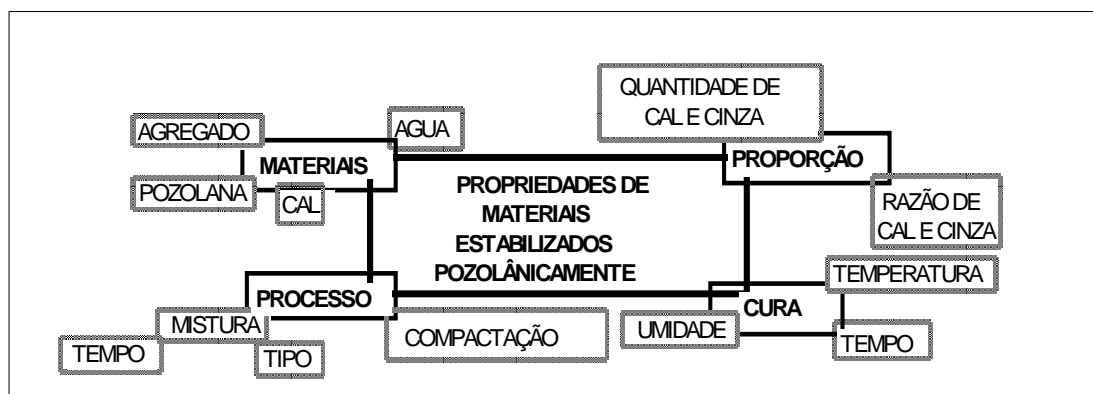


Figura 2.9 Fatores que influenciam as propriedades de materiais estabilizados pozolanicamente

Dos fatores relacionados na Figura 2.9, nem todos serão discutidos neste trabalho, apenas aqueles que são de interesse da pesquisa.

## 2.5.1 MATERIAIS

O tipo de cal utilizado, bem como o tipo de cinza e as suas características físicas, influenciam na reação pozolânica da mistura, como será mostrado posteriormente.

### 2.5.1.1 TIPOS DE CALES

Estudos realizados por pesquisadores mostram que o tipo de cal influenciará no comportamento mecânico da mistura com cinza, conforme **CROSBY (1957)**, **DAVIDSON, SHEELERE E DELBRIDGE (1958)**, **GOECKER, MOH, DAVIDSON E CHU (1956)**.

**MATEOS (1961)** estudou dois tipos de cales: dolomítica monohidratada e calcítica dihidratada e misturou com quatro tipos de solo (areia de dunas, argila, argila aluvionar e argila siltosa) e oito tipos de cinzas volantes. Seu objetivo entre outros, foi mostrar qual o tipo de cale mais eficiente para reagir com os diversos tipos de cinza e solos. Neste seu trabalho esta eficiência está ligada a reação pozolânica que gerou as maiores resistências à compressão.

Mateos observou que na mistura com **areia de dunas** e cinzas volante, o tipo de cal mais efetivo no ganho de resistência dependerá intrinsecamente das propriedades da cinza utilizada até os 28 dias de cura; a partir desse período a cal dolomítica obteve os melhores resultados de resistência.

Na mistura com **solo argiloso**, a cal dolomítica, com ou sem cinza, obteve os melhores resultados de resistência à compressão do que a cal calcítica. Com o solo **argila siltosa**, a cal calcítica obteve melhores resultados de resistência para baixas quantidades de cal (3 a 6%), para quantidades superiores a 6% a cal dolomítica obteve os melhores resultados de resistência. Para o solo **argiloso aluvionar**, a cal calcítica obteve melhores resultados de resistência para baixas quantidades (3%), a efetividade é revertida quando acrescenta-se uma quantidade de 9% de cal dolomítica. Mateos conclui que:

i- geralmente a cal dolomítica monohidratada é mais efetiva na mistura com as cinzas volantes do que a cal hidratada calcítica, para CPs curados pelos processos de cura utilizando temperatura ambiente, sendo que a efetividade está ligada à reação pozolânica, quantificada neste trabalho através dos resultados do ensaio de resistência à compressão.

ii- Para baixas quantidades de cal, isto é, igual ou inferiores a 3%, a maior efetividade na mistura com cinzas volantes foi a cal calcítica, onde ela obteve os maiores resultados de resistência à compressão quando misturada com solos argilosos e utilizando um processo de cura de câmara climatizada com temperaturas acima de 60°C.

Estudos feitos por **MINNICK (1967)** sobre o aspecto físico da reação pozolânica concluíram que o ganho de resistência é afetado pela quantidade e finura dos materiais reagentes presentes, especificamente, hidróxido de cálcio, óxido de magnésio, sílica amorfa etc. Como o peso molecular do óxido de magnésio é inferior ao hidróxido de cálcio, mais reações podem ocorrer, resultando um produto cimentante melhor. Baseado nestas considerações os tipos de cal podem ser classificados quimicamente em uma ordem decrescente, de acordo com a sua receptividade pozolânica como segue na ordem decrescente:

$\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO} \Rightarrow$  Cal dolomítica monohidratada

$\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow$  Cal calcítica

$\text{Ca(OH)}_2 \text{ Mg(OH)}_2 \Rightarrow$  Cal dolomítica dihidratada

### **2.5.1.2 TIPOS DE CINZA**

A atividade pozolânica do material está ligada ao tipo de cinza, a qual é diretamente proporcional ao potencial das propriedades cimentantes. Por outro lado, o crescimento da atividade pozolânica de uma cinza dependerá :

i) do aumento da superfície específica das partículas que está ligado à velocidade da reação pozolânica;

ii) do aumento da porcentagem de sílica e alumina, elementos que reagem com o hidróxido de cal livre;

iii) do aumento da porcentagem de estruturas amorfas, que está ligada à velocidade de solubilidade da sílica;

iv) ao acréscimo do conteúdo de carbono orgânico.

Em seus experimentos **MATEOS (1961)** fez ensaios de resistência à compressão, com amostras utilizando 6% de cal, 76,5% de areia e 17,5% de cinza volante. Foram utilizados dois tipos de cinzas, sendo que, a superfície específica e porcentagem de matéria-prima orgânica na cinza A foi de  $2.663 \text{ cm}^2/\text{g}$  e 7,2% e na cinza B foi de  $4.650 \text{ cm}^2/\text{g}$  e 18,6%, respectivamente. A porcentagem de sílica e alumínio das duas cinzas são muito próximas, indicando pouca influência nos resultados de resistência no que se refere a quantidades desses dois elementos.

O Quadro 2.9 apresenta as características físicas e mecânicas das cinzas A e B. Foram adicionadas cal calcítica para a cinza A e a cal dolomítica para a cinza B, para ambas foi utilizado a areia de dunas.

Processo da cinza volante	M.E.A. Seca ( $\gamma_s$ ) (kN/m <sup>3</sup> )		Resistência à compressão simples (MPa)			
	cinza A	cinza B	cinza A		cinza B	
			7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Direto da Usina	17,95	16,83	0	1,10	0,63	2,16
Moído para passar na # 270	18,59	17,71	0	1,42	0,81	2,86
Descartar grãos > # 270	18,91	20,27	0	1,22	0,72	6,24

Quadro 2.9 Comparações de resultados de resistência de dois tipos de cinza do Estados Unidos

**MATEOS (1961)** observou que a mistura de areia, cal e cinza volante aumentou sua massa específica aparente seca, quando a cinza foi modificada por moagem ou separação da fração mais grossa. O aumento da densidade leva a um aumento na resistência, pois há um contato mais próximo e/ou aumenta o número de contatos entre as partículas da cal e a cinza. Ele também observou que os tipos de cinzas com maior superfície específica são mais reativas levando a um maior aumento na resistência.

## 2.5.2 PROCESSAMENTO

### 2.5.2.1 MISTURA E COMPACTAÇÃO

A compactação está intimamente ligada à densidade do material e afeta diretamente sua resistência. Um decréscimo de massa específica aparente seca de  $80,09 \text{ kN/m}^3$  a  $48,05 \text{ kN/m}^3$  frequentemente produzirá uma redução de 25% na resistência à compressão do material, segundo **AHLBERG e BARENBERG (1970)**, que estudaram uma mistura de sílica em pó com superfície específica de  $3.770 \text{ cm}^2/\text{g}$  e cal hidratada.

**TAYLOR et al (1965)** mostram o efeito de altas pressões de moldagem na relação com a resistência à compressão simples, em mistura de cal hidratada e sílica cujas superfícies específicas são de 2500 a  $3770 \text{ cm}^2/\text{g}$ . A proporção em massa foi de 0.5:1.0(cal:sílica), sendo que as amostras foram curadas em autoclave à  $185^\circ\text{C}$  com um tempo de permanência de sete horas. Eles concluíram, conforme os gráficos da Figura 2.10, que um aumento na pressão de moldagem de 0 a 140 MPa resulta num aumento médio de resistência à compressão de 24,5 a 210 MPa; também plotaram o gráfico dos resultados da densidade e verificaram um aumento médio de massa específica seca aparente de 11,22 a  $19,88 \text{ kN/m}^3$ . Acima do valor de 140 MPa de pressão, a resistência à compressão não se altera, mas a massa específica aparente seca cresce lentamente.

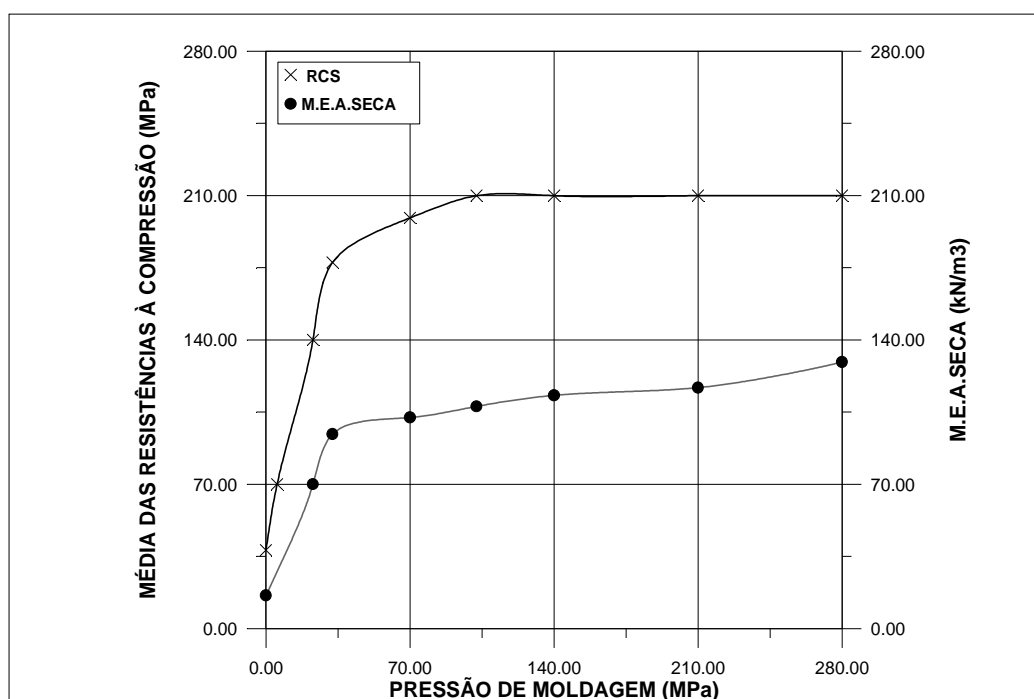


Figura 2.10 Efeito da pressão de moldagem na resistência à compressão simples



**COLE E MOOREHEAD (1965)**, em continuação ao trabalho de Taylor anteriormente exposto, realizaram ensaios de difração de raio-X, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica, com o objetivo de determinar a causa das altas resistências, desenvolvidas pela variação de pressão de moldagem, tempo e temperatura de cura em autoclave. Eles concluíram que a compactação de um corpo-de-prova é o fator mais importante no ganho de resistência pois determinados silicatos de cálcio hidratados que se formam mudam morfologicamente e tornam-se mais estáveis quando cresce a pressão de moldagem. Mostraram que há uma relação linear entre a média das resistências à compressão e a média das massas específicas aparentes secas até  $43 \text{ kN/m}^3$  ou pressão de moldagem de 105 MPa. Para pressões de moldagem maiores desenvolvem-se corpos-de-prova mais densos mas não aumentam as resistências, Figura 2.11. **POWERS apud COLE (1958)** afirmou que as ligações físicas são talvez mais importantes na determinação da resistência do que as ligações químicas.

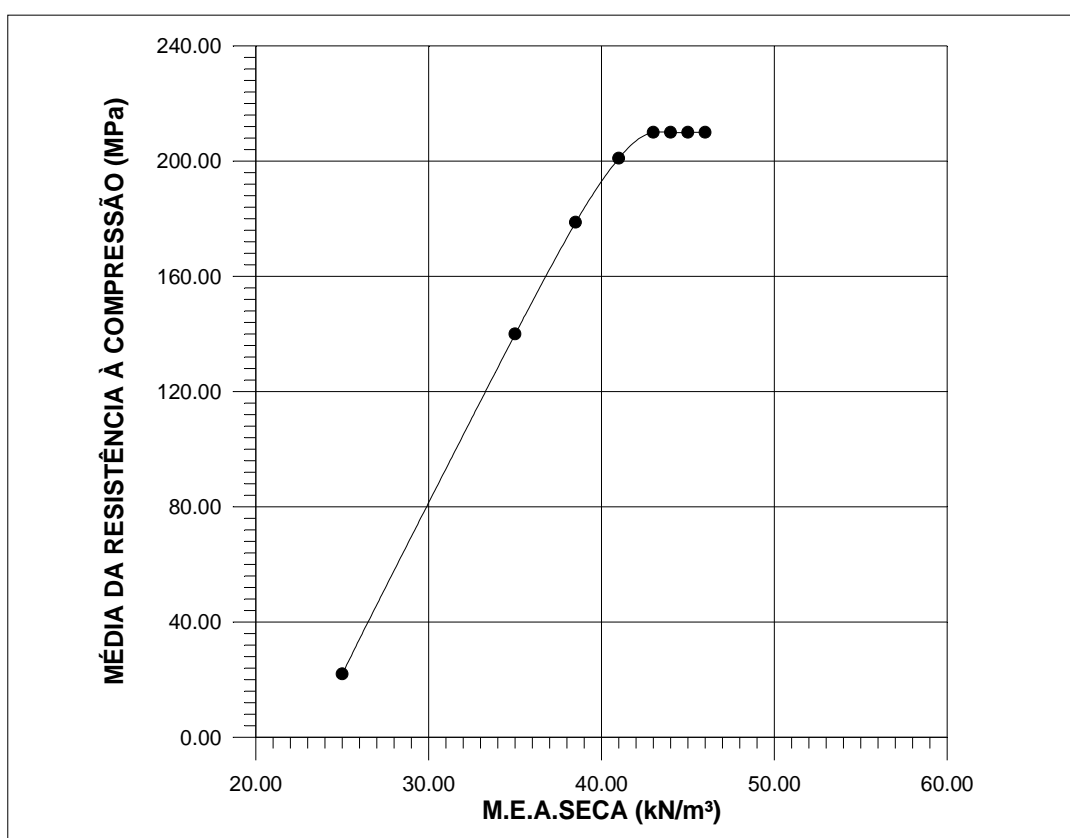


Figura 2.11 Correlação das variáveis resistência à compressão versus M.E.A. Seca

MATEOS realizou uma análise qualitativa e quantitativa do efeito do esforço de compactação sobre os resultados das resistências de misturas de cinza, cal e areia, curadas em câmara com temperatura de  $\pm 21^{\circ}\text{C}$ . Ele observou que na energia modificada do ensaio de Proctor apresentou resistência consideravelmente superior ao da energia normal. Este aumento é apreciável em todos os períodos de cura, e a variação foi de 50% de aumento até o máximo de 160%, dependendo do tipo de solo, cinza e provavelmente o tipo de cal também.

O tempo de mistura, para melhor homogeneizar os materiais, é outro fator que poderá influenciar na resistência e durabilidade de materiais estabilizados pozolanicamente. Estudos feitos por **AHLBERG e BARENBERG (1970)** em pavimentação utilizando uma mistura de areia, cinza volante e cal hidratada, concluíram que a operação de mistura deve proporcionar um material final mais uniforme e intimamente combinado para melhorar à resistência à compressão. Eles apresentaram resultados de variação de tempos de mistura com a resistência à compressão simples de misturas estabilizadas pozolanicamente, conforme observa-se na Figura 2.12.

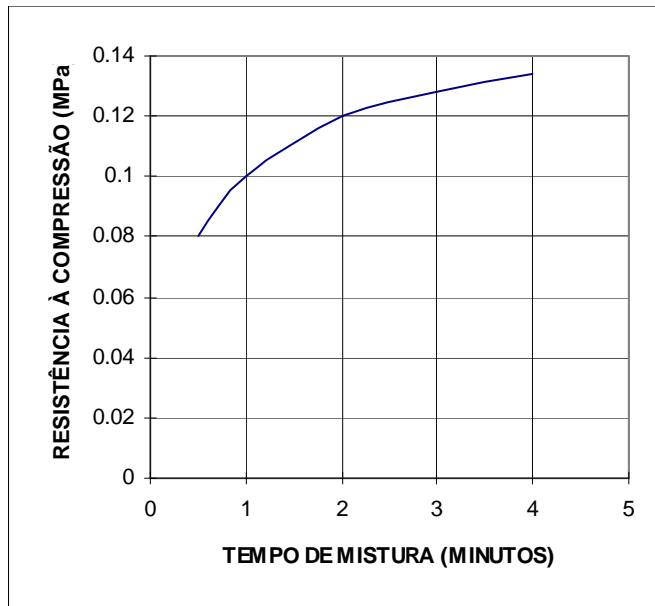


Figura 2.12 Efeito do tempo de mistura na resistência

## 2.5.3 CURA

### 2.5.3.1 EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO

As condições de cura são extremamente importantes nas misturas de materiais pozolânicos com cal hidratada, pois fatores como tempo e temperatura, que são intrínsecos ao processo de cura, quando variam podem modificar o comportamento mecânico de materiais estabilizados pozolanicamente.

Tem sido verificado aumento da resistência à compressão após vários anos, mas é nos primeiros anos que o potencial de crescimento da resistência se desenvolve, o tempo deve ser considerado na avaliação da estabilização química do material, embora a relação tempo e resistência seja fortemente influenciada por outros fatores, tais como: composição da mistura, temperatura e umidade, **MATEOS (1961)**.

Dados apresentados por **HOLLON e MARKS (1949)** indicam que a resistência de materiais estabilizados pozolanicamente e curados à temperatura de 60°C por 7 dias é aproximadamente equivalente à resistência desenvolvida após alguns anos no campo.

**MATEOS (1961)** estudou o efeito da temperatura e tempo de cura em materiais em que se utilizaram cinza e cal hidratada, Figuras 2.13 e 2.14. Ele variou a temperatura de 10 a 120°C e o tempo de cura de 3 a 28 dias utilizando dois tipos de cinza volante, em uma proporção em peso de 6% de cal calcítica, 17,5% de cinza volante e 76,5% de areia de dunas, sendo que as cinzas n° 1 e 2 possuem uma superfície específica: 2820 e 2663 cm<sup>2</sup>/g, 43,5 e 36,7% de óxido de sílica(SiO<sub>2</sub>) e 23,2 e 21,3% de óxido de alumínio(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), respectivamente.

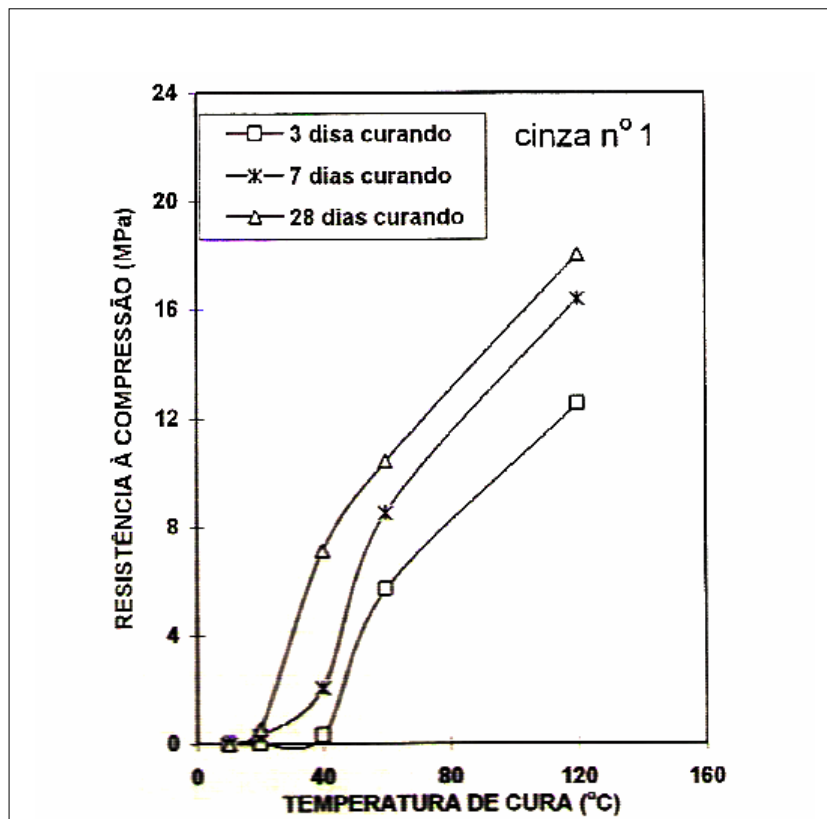


Figura 2.13 Efeito da temperatura e tempo de cura na resistência à compressão na cinza nº 1

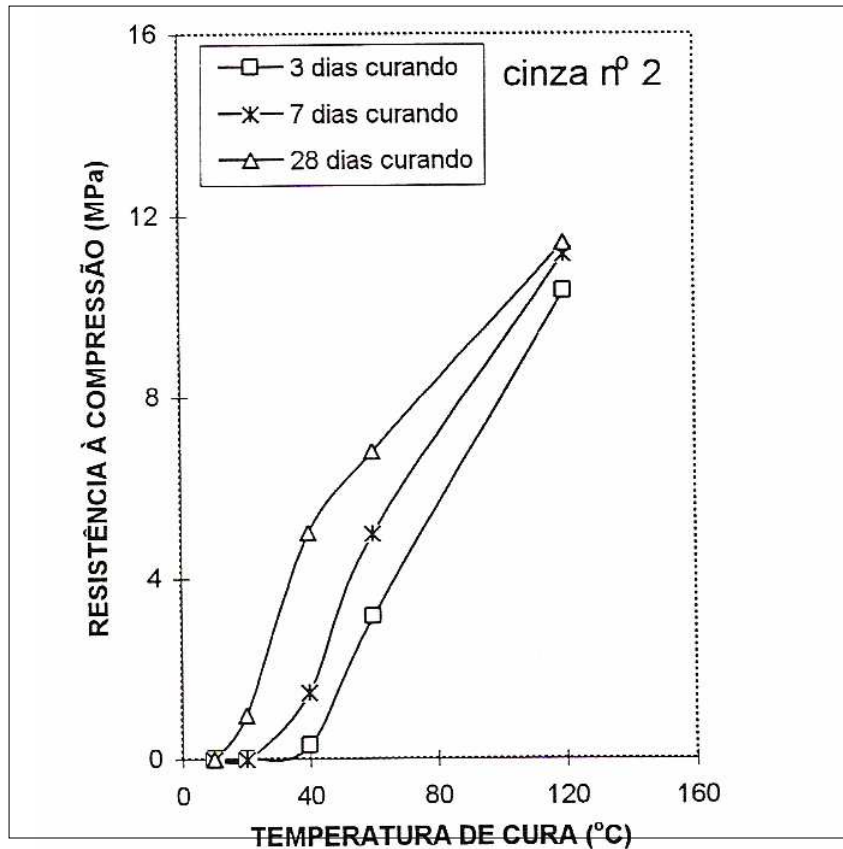


Figura 2.14 Efeito da temperatura e tempo de cura na resistência à compressão na cinza nº 2

Observa-se que até os 7 dias de cura na temperatura de 10 a 21°C os valores foram iguais a zero. Os gráficos mostram que o fator temperatura influencia os resultados de resistência mais do que o tempo de cura. Mateos concluiu que a temperatura é responsável pela aceleração da reação pozolânica e que a atividade pozolânica é fortemente influenciada pela temperatura.

**TAYLOR ET AL (1965)** estudaram o efeito da temperatura e tempo de cura da sílica em pó estabilizada com cal hidratada e curada em autoclave, com temperaturas de 175, 185 e 195°C e tempos de cura de 1 a 12 horas, para amostras moldadas em uma pressão de 140 MPa. Concluíram que os resultados estabeleceram um tempo de cura ótimo, para obter a máxima resistência à compressão. Este tempo estaria em torno de 7 horas para as temperaturas de 175 e 195°C, ocorrendo após uma queda da resistência. Em outro ensaio, eles fixaram o tempo de permanência em 4 e 7 horas e variaram a temperatura de 145 a 220°C e verificaram que no período de 7 horas a resistência à compressão desenvolvida aumentava linearmente com o crescimento da temperatura de cura, não havendo o desenvolvimento de uma resistência máxima.

## **2.6 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM**

Hoje em dia são muito utilizadas autoclaves para a produção de blocos de concreto, tijolos/blocos sílico calcários etc. As condições são determinadas na prática por considerações econômicas, como por exemplo a quantidade de combustível consumido, a utilização plena (sem tempo ocioso) das autoclaves, picos de produção etc.

Segundo **ROBERT apud SABATTINE (1982)**, existe uma relação entre o tempo e a pressão de autoclavagem de maneira a otimizar sua operação. Esta relação é dada pela seguinte inequação:

$6,4 < p.T < 7,2$  onde:

p = pressão de vapor em  $N/mm^2$

T = tempo em horas

Assim, segundo **SABATTINE (1982)**, podemos obter corpos-de-prova de resistência à compressão aproximadamente iguais, submetendo-os a uma pressão de  $1,2 \text{ N/mm}^2$  por 6 horas ou  $2 \text{ N/mm}^2$  por 3,6 horas.

A idéia da utilização de autoclaves data de 1866, patenteada por Van Derburgh na Inglaterra, mas só em 1894 começou a ser aplicada industrialmente na fabricação de tijolos de areia e cal na Alemanha, **BESSEY (1965)**.

**WALKER E PURPON (1973)** estudaram os efeitos nos corpos-de-prova do processo de cura por autoclavagem. Através de uma janela fixa na autoclave eles observaram amostras de tijolos sílico-calcários, com uma proporção de 85% de areia fina e 15% de cal hidratada e cuja objetivo foi verificar a variação da umidade, durante o ciclo de autoclavagem.

Ganhos e perdas no peso do corpo-de-prova foram observados, devido à condensação e evaporação da água na superfície e interior do corpo-de-prova, respectivamente. A Figura 2.15 mostra a variação de umidade de um corpo-de-prova com o tempo de autoclavagem. Leva-se 45 minutos para alcançar a pressão máxima de 16 atm; nesse período há um ganho de umidade, pois a amostra encontra-se em uma temperatura menor do que o vapor dentro da autoclave. Ocorrendo a condensação na superfície do corpo-de-prova a água penetra pelo efeito da capilaridade, após, há um equilíbrio em que a umidade permanece constante mesmo após a descompressão no tempo de 75 minutos, sendo que no final a umidade pode alcançar valores menores do que a inicial. A umidade de moldagem variou entre 4 a 14% com intervalos de 1% e as peças foram moldadas com uma pressão de 35 MPa, sendo que o tempo e pressão de autoclavagem foram de 30 minutos e 16 atm, respectivamente.

No Rio Grande do Sul a Fundação Universidade de Caxias/RS utilizou cinzas volantes do Rio Grande do Sul e Santa Catarina para fabricação de blocos maciços de concreto celular sendo o processo de cura a autoclave, com pressão de 9 atm e tempo de cura de 12 horas, as resistências médias à compressão foram de 20 e 40 Mpa, **(DEPEA (1987))**.

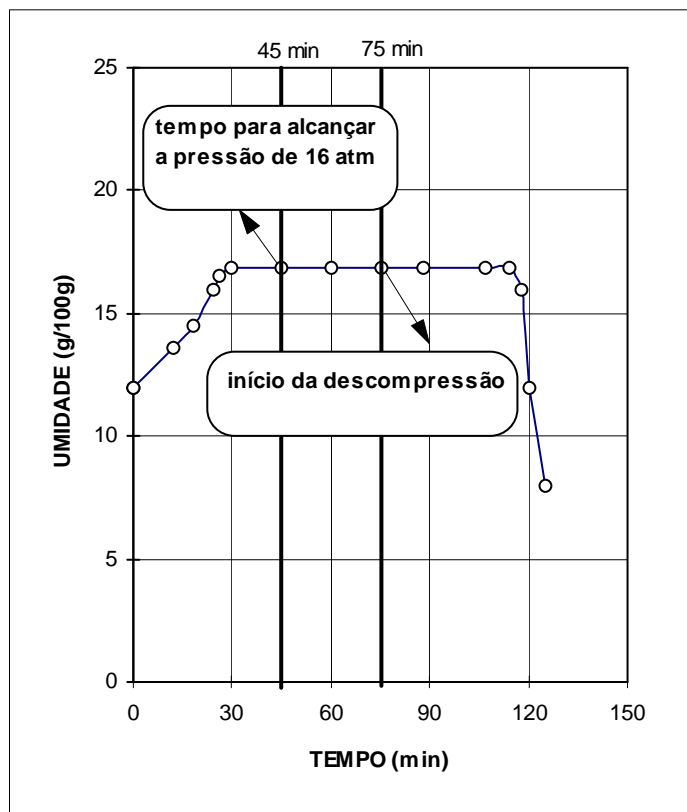


Figura 2.15 Efeito do tempo de permanência de CPs curados por autoclave

**WALKER E PURPON (1973)** também estudaram o problema de corpos-de-prova de sílico-calcário que se expandiam e trincavam durante a autoclavagem. Em suas pesquisas, com corpos-de-prova a várias umidades iniciais, observaram que o vapor produzido pela autoclave encontrava-se a uma temperatura superior a das amostras. Portanto, ocorria a condensação no contato com a superfície do corpo-de-prova, fazendo com que houvesse um aumento de peso, devido a absorção de água (vapor condensado) pela amostra.

A Figura 2.16 mostra a relação entre a umidade inicial de ensaio e absorção de água da amostra na autoclavagem. Observa-se que na faixa de 13 a 14% de umidade inicial de moldagem o corpo-de-prova se expande e danifica-se. Esses estudos levaram-nos às seguintes conclusões:

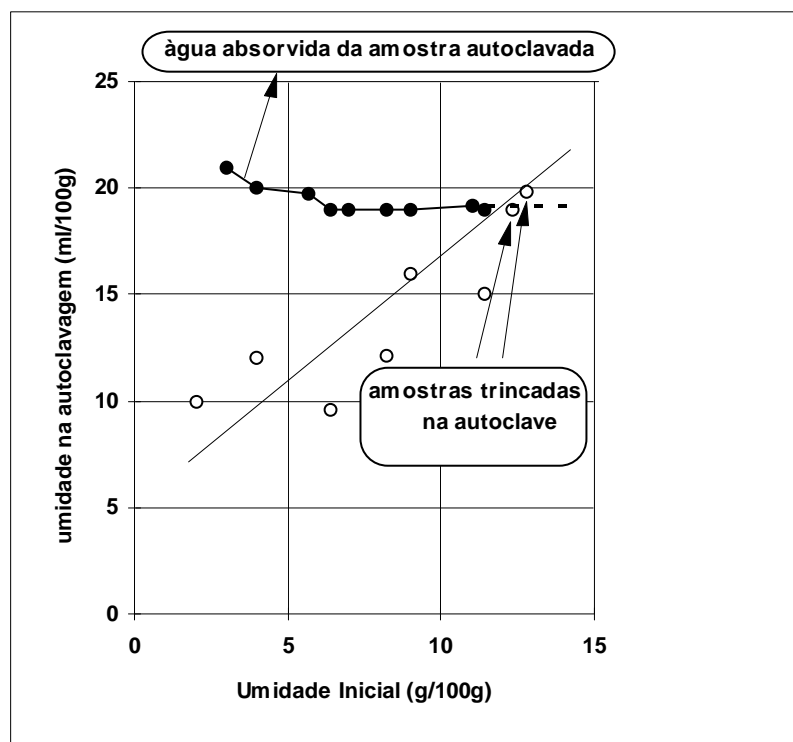


Figura 2.16 Resultados de ganhos de umidade durante a cura de autoclavagem

- i) as amostras absorvem aproximadamente 3% de umidade, independentemente da umidade inicial de moldagem;
- ii) o mecanismo de falha assume duas hipóteses:
  - ii.1) a expansão e fissuramento das amostras estão ligados ao rápido aumento da pressão dentro da autoclave, fazendo com que o ar sofra uma compressão dentro dos poros; não havendo tempo de dissipação, a amostra trinca;
  - ii.2) quando os poros da amostra são totalmente preenchidos com água, esta se expande causando expansão e fissuras na amostra. Isto só ocorrerá numa umidade crítica por autoclavagem, pois haverá uma condensação do vapor de água sobre a superfície do corpo-de-prova, fazendo com que esta penetre por capilaridade no interior do material, causando a expansão e fissuras, quando somados com a umidade crítica de moldagem;
- iii) o peso permanece constante na amostra após a pressão se estabilizar, mas durante a descompressão há perda de água, fazendo com que o peso final seja menor do que o peso inicial da amostra.



### 3. PROGRAMA DE PESQUISA

#### 3.1 MISTURAS UTILIZADAS NA PESQUISA

Foram estudadas misturas compostas de cinzas volante (fly ash), pesada (bottom ash), cal hidratada e areia do Rio Guaíba. Os resultados das análises química e física destes materiais serão apresentados no Capítulo 4.

Não houve preocupação em variar os teores de cal com a cinza, pois já existem diversos trabalhos mostrando que a variação da quantidade de cal influirá no comportamento mecânico dos corpos-de-prova. **ANDRADE (1991), PINTO (1973) PROJETO CICASOL(1982).**

Segundo **ANDRADE (1991)**, os ensaios realizados com a mistura de cinza volante e cal, mostraram um crescimento da resistência à compressão do corpo-de-prova com o aumento da proporção de cal na mistura mas, quando a proporção de cal alcançava uma quantidade em torno de 15 a 20%, os ganhos de resistência do material praticamente cessavam.

A escolha do teor de cal utilizado no experimento baseou-se na qualidade e economia da mistura. Trabalhos realizados pela CIENTEC mostraram que os resultados de resistência à compressão utilizando 10% de cal enquadram-se dentro dos limites mínimos exigidos para atender as exigências das Normas e métodos da ABNT(1994) e DNER(1987), respectivamente.

O emprego da cinza pesada deve-se ao fato que este material apresentou uma boa atividade pozolânica e sua quantidade gerada pelas usinas de Candiota e Charqueadas viabiliza seu emprego. A utilização da areia justifica-se para se fazer comparações de ganhos de resistência devido ao efeito químico (reação pozolânica) e ao efeito físico (melhoria na curva granulométrica).

A escolha da proporção de cinza e areia baseou-se no fato de que a curva granulométrica gere um material bem graduado que poderá desenvolver melhores resultados de resistência à compressão na mistura com cinza volante. Utilizou-se o método de Rothfuchs, **BAPTISTA (1979)** para a determinação da proporção de cinza volante e areia.

Foram realizados estudos preliminares com cinco misturas no primeiro estágio, e posteriormente, para o segunda etapa foram utilizadas quatro misturas. No Quadro 3.1 são apresentadas as misturas utilizadas na segunda etapa, no capítulo 5 são apresentados todas as misturas empregadas no experimento.

Misturas	Proporção em peso (%)			
	cinza volante	cinza pesada	areia	cal
1	90			10
2		90		10
3	20	70		10
4	32		58	10

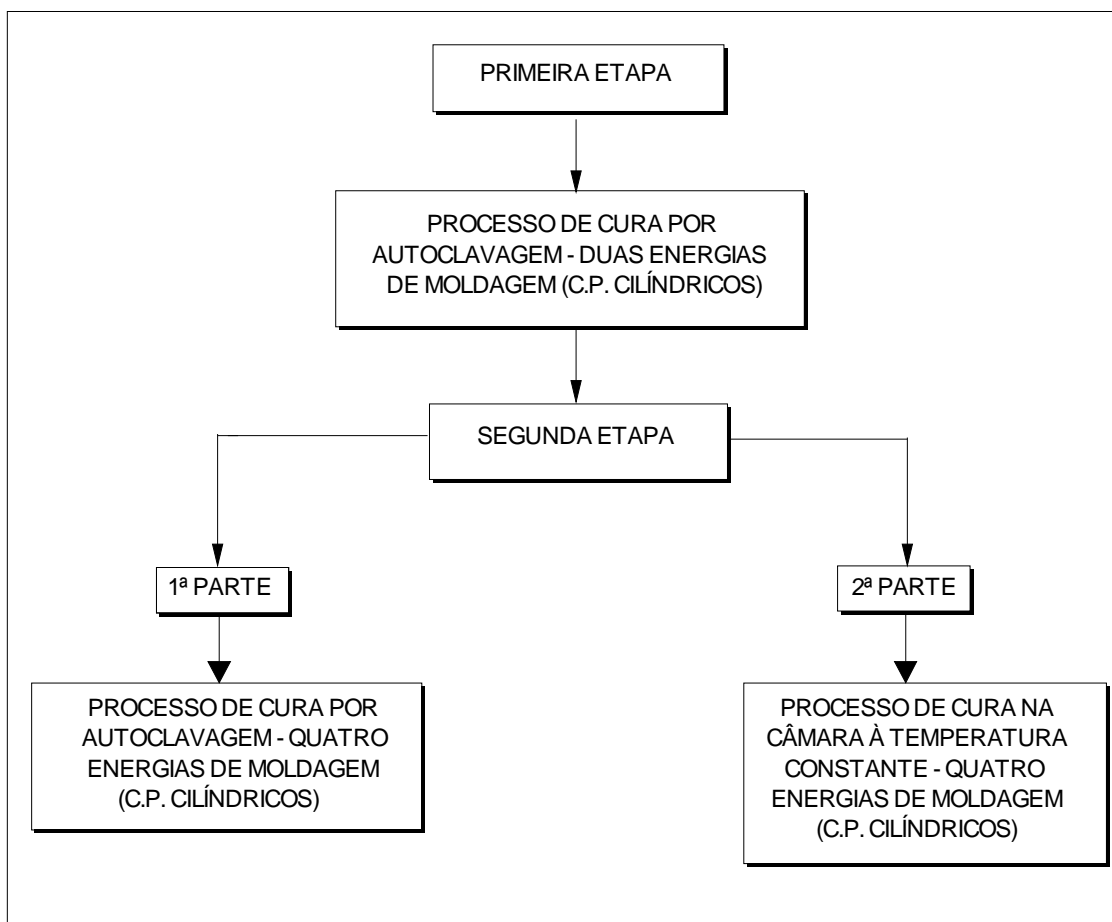
Quadro 3.1 Misturas utilizadas na segunda etapa do experimento

### 3.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS NO EXPERIMENTO

As variáveis estudadas são denominadas de principais e dependentes. As variáveis principais são aquelas responsáveis pela variabilidade dos resultados dos ensaios. O critério de escolha recaiu na experiência do técnico frente aos resultados preliminares de análise estatística. No trabalho foram estudadas as seguintes variáveis principais: energia de moldagem (densidade), tempo de cura, temperatura e umidade de moldagem.

As variáveis dependentes são aquelas de interesse do problema (resistência à compressão, absorção, durabilidade, sucção e aderência), mas a variabilidade de seus resultados depende do efeito das variáveis principais.

O plano de trabalho foi dividido em duas etapas, sendo que a segunda etapa foi dividido, em duas partes conforme o esquema que é apresentado no Fluxograma 3.1.



Fluxograma 3.1 Atividades de trabalho da pesquisa

### 3.2.1 PRIMEIRA ETAPA

Estudos preliminares foram realizados com o objetivo de determinação dos fatores principais responsáveis pela maior variabilidade dos resultados de ensaio. Foi utilizado um processo de cura, denominado de autoclavagem, descrito no Capítulo 4.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, com as seguintes condições de ensaio:

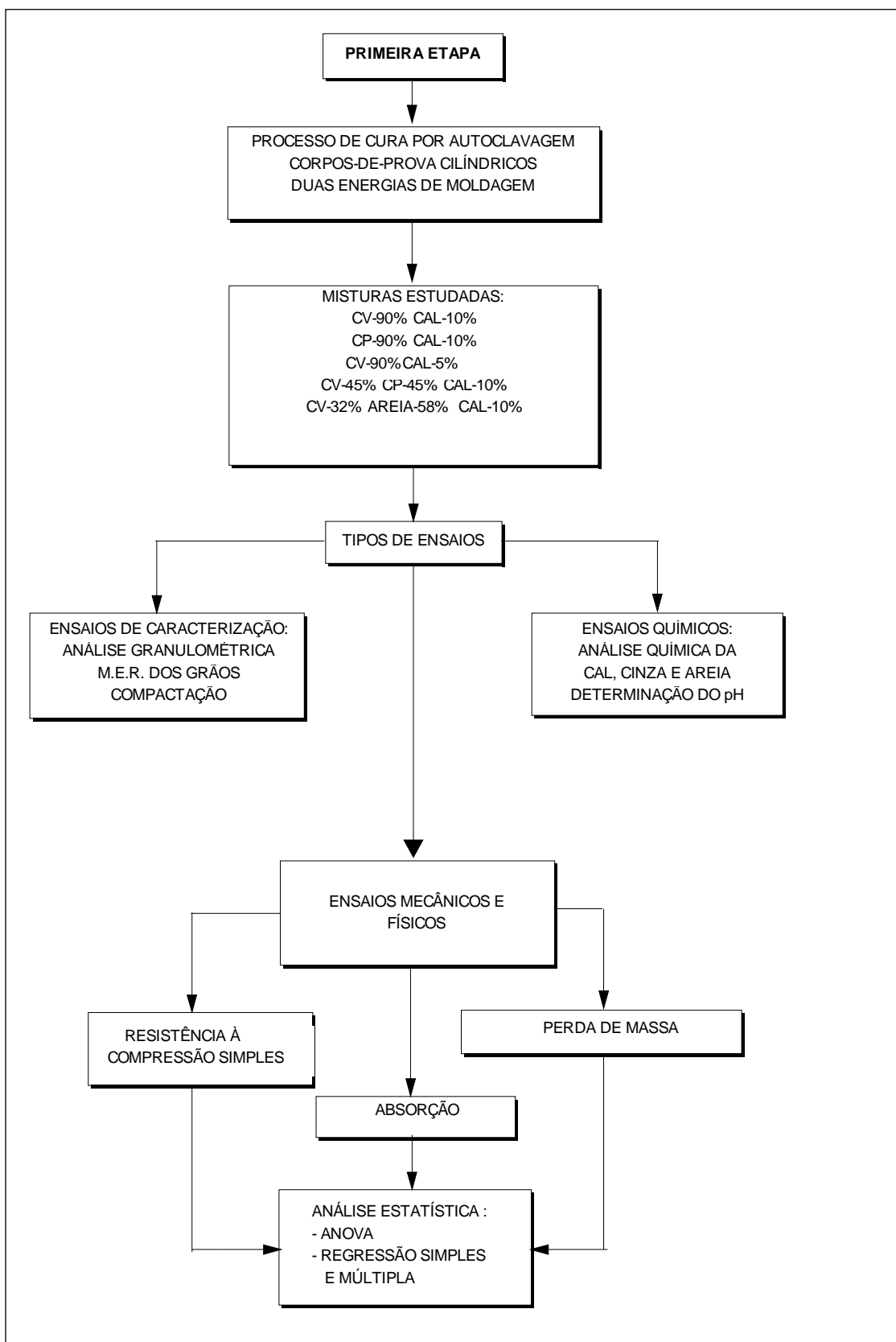
- i) aplicaram-se dois níveis de energias. Baseando-se no ensaio de Proctor, determinou-se a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) e umidade ótica ( $h_{ót}$ ) da energia normal e modificada;

ii) três níveis de temperatura de cura foram estudados: 155, 165 e 175 °C. Para cada energia de moldagem foram aplicadas as três temperaturas para que se pudesse verificar sua influência;

iii) tempo de cura é a permanência em que os corpos-de-prova ficaram dentro da autoclave. Foram utilizados dois níveis de tempo: 4 e 6 horas. Para verificar seu efeito, aplicou-se a cada temperatura de ensaio os dois tempos de cura;

iv) foram estudados três níveis de umidade de moldagem: umidade ótima do ensaio de Proctor e a redução de menos três e cinco por cento em relação à umidade ótima. Para se verificar o efeito desta variável foram moldados três corpos-de-prova para cada tempo de cura.

No Fluxograma 3.2 estão apresentados, o tipo de cura, misturas, ensaios utilizados e métodos de análise estatísticas dos resultados da primeira etapa de trabalho.



Fluxograma 3.2 Atividades de trabalho da primeira etapa

### 3.2.2 SEGUNDA ETAPA

Baseando-se nos resultados do estudo preliminar, onde foi realizada análise de variância (ANOVA), verificou-se que todas as variáveis principais foram significativas, sendo que a que apresentou maior efeito foi a energia de moldagem, enquanto que a umidade de moldagem foi a que apresentou o grau de significância mais baixo.

Considerando os resultados anteriores dividiu-se a segunda etapa em duas partes :

#### 3.2.2.1 PRIMEIRA PARTE

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com as mesmas dimensões daqueles da primeira etapa. A cura realizou-se pelo processo de autoclavagem e os ensaios realizados foram de resistência à compressão simples e absorção. As condições de ensaio foram as seguintes:

i) aplicação de quatro níveis de energia. Baseando-se no ensaio de Proctor, determinou-se a massa específica aparente seca máxima da energia normal, modificada e duas intermediárias. Quanto à umidade de moldagem, por ser pouco significativa, optou-se pela umidade ótima reduzida de três por cento, isto porque acima desta umidade o corpo-de-prova expandia-se e trincava. No Quadro 3.2 são apresentados os valores das massas específicas aparentes secas máximas e umidades ótimas das quatro energias de moldagem;

Tipo de mistura	Energias de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos							
	Normal		♠ I1		♠ I2		Modificado	
	$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\acute{o}t}$ (%)
1	11,06	31,3	11,40	27,1	11,70	26,0	11,96	25,2
2	11,53	29,0	12,05	26,0	12,20	24,6	12,55	23,3
3	11,53	28,0	11,78	27,0	12,10	25,2	12,42	23,6
4	16,33	13,0	16,67	12,0	17,20	11,0	17,63	10,0

Quadro 3.2 Resultados dos parâmetros do ensaio de Proctor

♠ Energias intermediárias entre a normal e a modificada

ii) utilizaram-se quatro níveis de temperatura de cura: 149, 161, 175 e 188°C com o objetivo de verificar a influência da temperatura para cada energia de moldagem;

iii) os corpos-de-prova foram submetidos a três tempos de cura: 2, 4 e 6 horas. O objetivo foi de se verificar a influência do tempo de permanência dentro da autoclave para cada temperatura de cura.

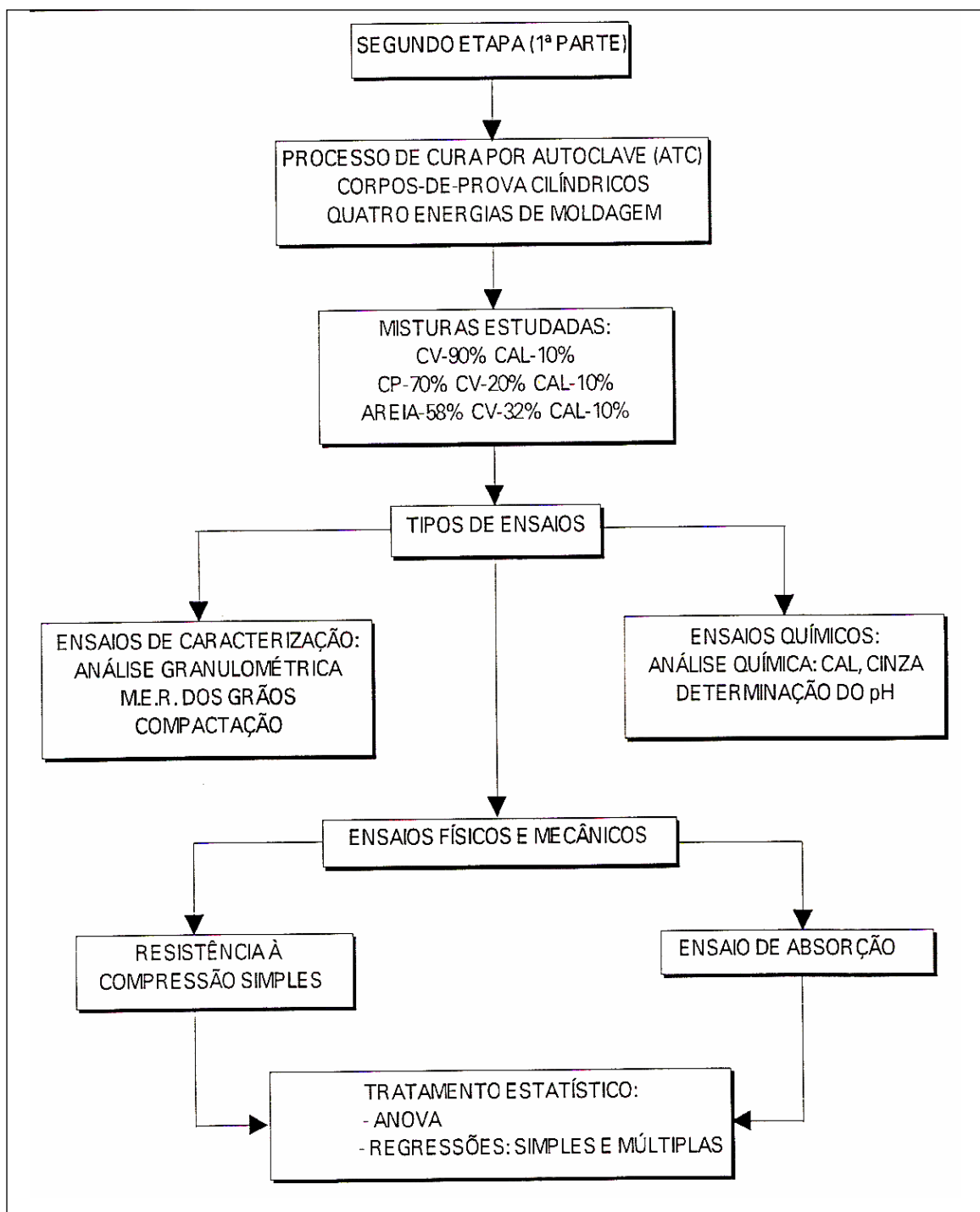
### **3.2.2.2 SEGUNDA PARTE**

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com as mesmas dimensões da primeira etapa. O processo de cura utilizado foi o da câmara úmida à temperatura constante. Como esse processo usa temperatura ambiente ( $\pm 21^{\circ}\text{C}$ ), o objetivo de sua utilização foi de estabelecer uma comparação com o processo de autoclavagem (temperaturas superiores a de ambiente) para verificar a influência da temperatura sobre a reação pozolânica. As condições de ensaio foram as seguintes:

i) foram aplicadas as mesmas energias de moldagem da primeira parte. Neste processo de cura escolheu-se a umidade ótima, isto porque as reações ocorrem de uma forma mais lenta do que o processo anterior, significando que o aumento de quantidade de água ajudará a atividade das reações pozolânicas nos primeiros dias de cura;

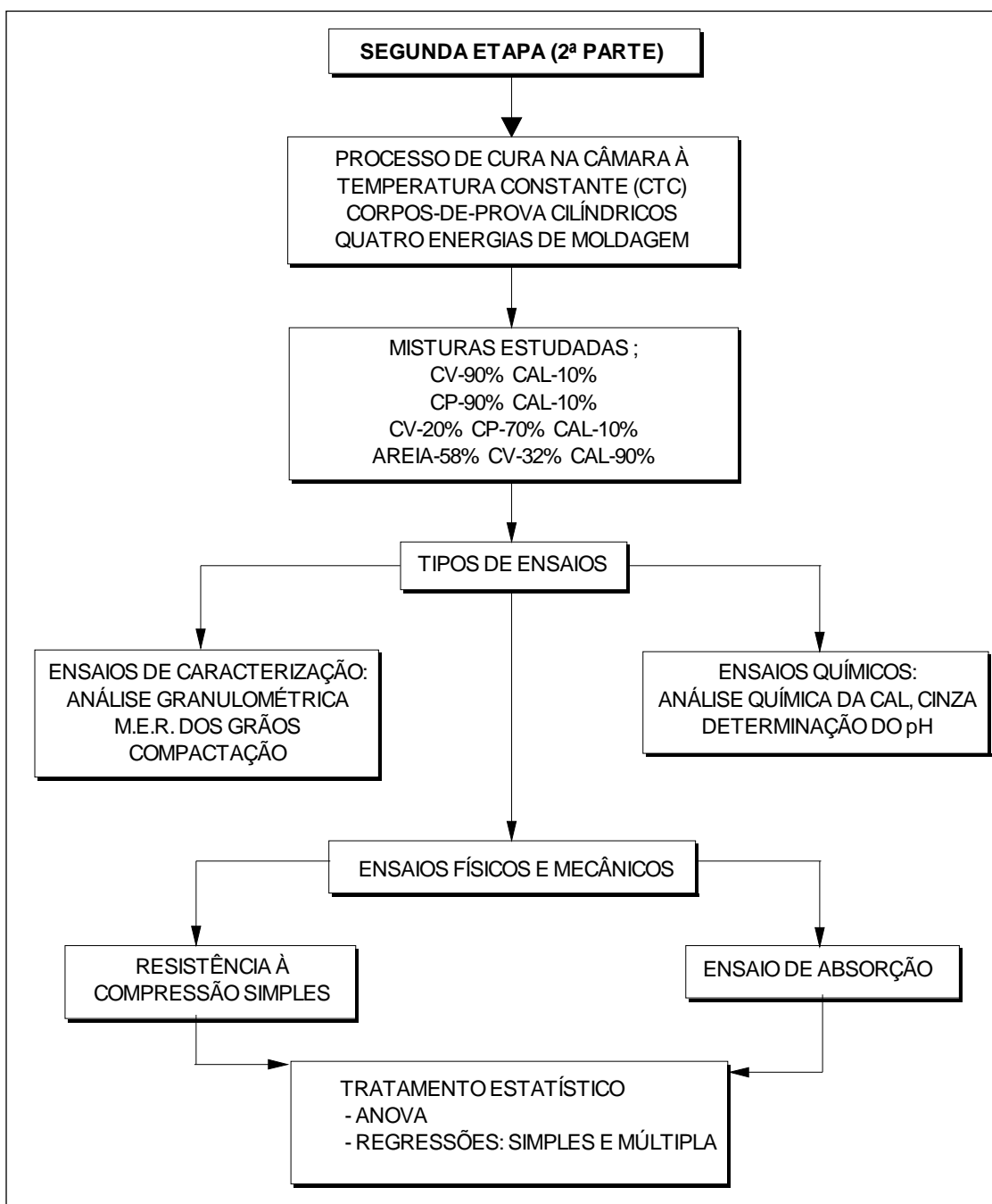
ii) os tempos de cura utilizados foram: 7, 14, 28 e 60 dias. O objetivo foi de estudar a influência do tempo de cura para cada energia de compactação.

Nos Fluxogramas 3.3 e 3.4 são apresentados os tipos de cura, misturas, ensaios utilizados e métodos de análise estatística dos resultados da primeira e segunda parte, respectivamente.



Fluxograma 3.3 Atividades de trabalho da segunda etapa (primeira parte)





Fluxograma 3.4- Atividades de trabalho da segunda etapa (segunda parte)

### 3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Exceção feita na primeira etapa, todos ensaios realizados seguiram um projeto de experimento (planejamento), que obedeceu os seguintes procedimentos:

1. definição das restrições originadas pelas condições experimentais, como por exemplo, limitação de corpos-de-prova que podiam ser moldados e posteriormente curados por dia;
2. definição do modelo matemático e estatístico.

Após a definição do projeto experimental, foi realizada a avaliação dos resultados que compreendeu:

- processamento dos dados coletados;
- teste de significância (ANOVA), teste de comparação entre grupos;
- interpretação dos resultados.

Estes conceitos e procedimentos foram adotados no método e foram baseados nas publicações de **NANNIE RIBEIRO(1984)**

Foram utilizados dois tipos de planejamentos experimentais:

#### 3.3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL I

No processo de cura por autoclavagem, onde os corpos-de-prova foram submetidos a temperaturas maiores do que as temperaturas ambientes e para os posteriores ensaios de resistência à compressão, absorção e sucção, havia dois tipos de restrições, que impossibilitavam o ensaio de todo o bloco num dia: quantidade limitada de corpos-de-prova na autoclave e restrições operacionais, devido ao tempo e às temperaturas da autoclave diferentes. Em média deixava-se 2 horas até alcançar a pressão desejada e 16 horas para a cura e o resfriamento, após retirava-se os corpos-de-prova.

Concluiu-se então em adotar o experimento parcionado em célula (split-plot), onde a cada dia moldava-se corpos-de-prova nas quatro energias de moldagem, para cada nível de temperatura ligado a cada nível de tempo de cura para as três misturas. A escolha de cada célula foi feita aleatoriamente para minimizar os erros devidos às variáveis auxiliares (equipamento, pessoal e material empregado no experimento).

O modelo matemático empregado neste experimento está mostrado na equação 1.

$$X_{ijk(l)} = \mu + E_i + T_j + t_k + ET_{ij} + Et_{ik} + Tt_{jk} + \varepsilon_{l(ijk)} \quad (1)$$

$\mu$  = média total;

$E_i$  = efeito do grupo de energia de moldagem;

$T_j$  = efeito do grupo da temperatura;

$t_k$  = efeito do grupo do tempo de cura

$ET_{ij}$ ;  $Et_{ik}$ ;  $Tt_{jk}$  = efeito da interação entre as variáveis;

$\varepsilon_{l(ijk)}$  = erro aleatório.

### 3.3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL II

No processo de cura na câmara à temperatura constante, onde os corpos-de-prova foram submetidos à temperatura ambiente e para posteriores ensaios de resistência à compressão, absorção, havia um tipo de restrição que impossibilitava o ensaio de todo o bloco (somatória de todos os corpos-de-prova para os quatro tempos e energias nas quatro misturas) em um dia: limitação de horas trabalhadas na moldagem dos corpos-de-prova.

Concluiu-se então em adotar o experimento quadrado latino, com uma matriz 4 x 4, para cada mistura, onde a cada dia moldava-se corpos-de-prova nas quatro energias de moldagem, com níveis de tempo de cura diferentes para cada uma delas, com a finalidade de se espalhar os erros das variáveis auxiliares (equipamento, pessoal materiais utilizados na mistura etc).

O modelo matemático empregado neste experimento está mostrado na equação 2.

$$X_{ijk(l)} = \mu + E_i + T_j + t_k + \varepsilon_{l(ijk)} \quad (2)$$

$\mu$  = média total;

$E_i$  = efeito do grupo de energia de moldagem;

$T_j$  = efeito do grupo da temperatura;

$t_k$  = efeito do grupo do tempo de cura

$\varepsilon_{l(ijk)}$  = erro aleatório.

### 3.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a coleta de todos os resultados experimentais dos ensaios, buscou-se fazer a análise estatística. Utilizando o programa computacional **STATGRAFH** disponível na CIENTEC, foram realizados os seguintes estudos estatísticos: determinação dos parâmetros básicos estatísticos de todos os ensaios (média, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação), análise de variância (ANOVA) e regressões simples e múltiplas para previsões das variáveis dependentes.

#### 3.3.3.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Na utilização dos modelos, buscou-se determinar a significância dos efeitos de cada fator principal, utilizando-se como instrumento a ANOVA.

O modelo restringiu-se ao caso de fator com níveis fixos, na qual verifica-se teste  $F_{(k-1, N-k)}$  se a hipótese de igualdade das médias dos níveis dos grupos são iguais. Na primeira etapa pelo método de Duncan foi realizada a comparação múltipla das médias. Este método permite a determinação de qual ou quais médias que diferem significativamente das outras.

#### 3.3.3.2 REGRESSÃO

O objetivo da utilização de regressões é encontrar a equação que melhor se ajuste às variáveis consideradas, a qual é empregada para prever valores de

y para certos valores de  $X = X_0$ . O erro dessas previsões depende do erro de ajustagem (erro-padrão de estimativa) e da distância do valor  $X_0$  à média dos valores usados na amostragem. Através desse erro calcula-se o coeficiente de variação da previsão, que é um parâmetro valioso à avaliação da equação matemática ajustada, ou seja, se o coeficiente de variação é aceitável ( $CV \leq 25\%$ ), o modelo de regressão é bom. Importante é salientar que, quanto maior o campo de variação dos dados amostrais de  $X$ , menores serão os erros nas previsões de  $Y$  para um dado valor.

A regressão múltipla foi realizada para todos ensaios, onde utilizou-se o programa STATGRAFH. O modelo matemático utilizado é uma particularidade da regressão, cuja fórmula é a seguinte:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j X_j + \varepsilon \quad (3)$$

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de se conhecer as propriedades mecânicas e físicas das misturas estabilizadas pozolanicamente, são apresentados os resultados de análises química e física de cada material utilizado no experimento. Em países como Estados Unidos e Espanha, onde o emprego da cinza é muito comum, existem normas onde constam os mínimos requisitos físicos e químicos para o emprego em cimento e concreto. Esses valores são expostos num quadro junto aos resultados das cinzas volantes e pesadas de Candiota, apenas para efeito de comparação, não significando que, caso essas cinzas não se enquadrem nessas faixas de valores, não seja possível seu emprego.

Posteriormente, são apresentados os métodos de confecção empregados nos corpos-de-prova, bem como os tipos de cura e ensaios utilizados no experimento.

### 4.2 MATERIAIS EMPREGADOS NAS MISTURAS

#### 4.2.1 CAL DOLOMÍTICA MONOHIDRATADA

A cal é definida pela **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS** como "expressão geral na qual inclui as várias formas químicas e físicas da cal virgem, cal hidratada e cal hidráulica usada para qualquer propósito".

Pode-se encontrar, dependendo da origem da rocha e processo de fabricação, as seguintes cales:

- $\text{CaO} \Rightarrow$  cal virgem calcítica
- $\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow$  cal hidratada calcítica
- $\text{CaO} + \text{MgO} \Rightarrow$  cal virgem dolomítica
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO} \Rightarrow$  cal monohidratada dolomítica
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2 \Rightarrow$  cal dihidratada dolomítica

Sabe-se que a qualidade e quantidade da cal são fatores importantes na estabilização química com materiais pozolânicos. Neste trabalho não houve interesse em verificar o efeito químico sobre os tipos de cales existentes. Utilizou-se um tipo de cal com maior predominância no Estado do Rio Grande do Sul, que é a cal dolomítica monohidratada.

Nos Quadros 4.1 e 4.2 encontram-se as características químicas e físicas da cal utilizada no experimento e ao lado dos resultados estão os requisitos mínimos da qualidade da cal, segundo **NBR 7175, ASTM C533, ASTM C821**.

Propriedades Físicas		Requisitos Mínimos			Cal Primor tipo C
		NBR 7175	ASTM C533	ASTM C821	
Finura (%) retidas acumuladas)	Peneira 0,60 mm (n° 30)	≤ 0,5	≤ 2,0		0
	Peneira 0,075 mm (n° 200)	≤ 15	≤ 30		9,55
Superfície específica Blaine (m <sup>2</sup> /g)				1000	20415
Massa específica dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )					25,5
Densidade aparente solta (kN/m <sup>3</sup> )					6,3
pH					11,5

Quadro 4.1 Análise física da cal dolomítica monohidratada

Propriedades Químicas	Requisitos (NBR-7175)	Cal Dolomítica Tipo C
Perda ao fogo (95°C) (%)		17,1
Resíduo insolúvel (%)		2,2
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)		9,3
Óxido de cálcio (CaO) (%)		44,9
Óxido de magnésio (MgO) (%)		30,3
Óxido de cálcio disponível (%)		39,4
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO) (%)	≥ 88	90,7
Anidrido carbônico (na fábrica) (%)	≤ 5	1,8

Quadro 4.2 Análise química da cal dolomítica monohidratada

Estudos feitos por **BESSEY(1974)**, fixam os seguintes parâmetros para a cal hidratada com areia, em cura por autoclave, cuja reação química é similar à mistura de cinza com cal hidratada:

#### **i) Conteúdo de óxido de cálcio**

Não há norma que estabeleça o limite mínimo de óxido de cálcio disponível na cal para utilizá-la com materiais pozolânicos no Brasil. Segundo a norma NBR 6475 , a exigência para o óxido de cálcio disponível na cal virgem e hidratada, quanto à sua qualidade, é de 90% e 68%, respectivamente. A cal hidratada utilizada apresenta em média 39% de óxido de cálcio disponível, abaixo do permitido, mas, misturando-a com as cinzas, os resultados quanto ao comportamento mecânico foram bons, se considerarmos seu emprego para fabricação de tijolos/blocos, como pode-se observar no Capítulo 5.

#### **ii) Conteúdo de óxido de magnésio**

Segundo **SABATTINE(1982)**, tem que existir um mínimo de óxido de magnésio na cal, pois ele possui hidratação mais lenta que o óxido de cálcio, podendo não se hidratar no reator. No momento da cura por autoclavagem, poderá ocorrer expansão e destruição do corpo-de-prova; então, a limitação aceitável é de 3%. Nas análises químicas da cal utilizada no experimento não foi identificada qual a forma em que se encontra o magnésio, mas, provavelmente, está na forma de óxido, pois a hidratação da cal foi sob processo de fabricação com pressão normal.

### **4.2.2. POZOLANAS**

Foram utilizados dois tipos de pozolana artificial: cinza volante (fly ash) e cinza pesada (bottom ash). Ambas da termoelétrica Presidente Médici (Candiota), localizada no município de Bagé - RS.

#### **- Cinza Pesada (bottom ash)**

São de granulometria mais grosseira do que a cinza leve (fly ash), sendo freqüentemente retiradas por um fluxo de água, como nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor. Podem ter elevados teores de carbono, não queimado, de 5 a 20%.



### - Cinza Volante (fly ash)

São constituídas de partículas finas, geralmente baixas massas específicas, e são arrastadas pelos gases de combustão. A maioria dessas partículas são retidas por sistemas de captação como filtros de tecidos, precipitadores eletrostáticos e outros.

Os principais métodos empregados na combustão do carvão são a queima em leito fixo, leito fluidizado e em suspensão, que é o mais empregado no Rio Grande do Sul. O carvão é pulverizado a dimensões finas, inferiores a 0,1 mm e injetado através de queimadores semelhantes aos empregados para os combustíveis fluidos em misturas íntimas com o ar, assegurando a queima quase instantânea e completa, **ZWONOK (1989) e EPTAIN (1986)**.

Os carvões do Rio Grande do Sul são classificados como betuminosos alto volátil C, segundo a norma **ASTM - D 3888 /1980**, caracterizados como baixo poder calorífico, gerando em sua queima 50% de cinza.

As cinzas possuem propriedades pozolânicas, devido à alta porcentagem de sílica e alumínio. Pozolanas são definidas pela American **Society for Testing and Materials ASTM C593** como: "um material sílico ou sílico-aluminoso, o qual possui, por si só, pouco ou nenhum valor cimentante, mas que na forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas ordinárias para formar componentes que possuem propriedades cimentantes".

Quanto ao aspecto morfológico, no produto final do processo de combustão, as partículas são esféricas e podem ser sólidas e/ou ocas. Essas esferas podem ser cenosferas, que são partículas de cinza com microvazios, formados pela geração de gases dentro da bolha fundida no forno ou plenosfera, que são esferas contendo outras esferas em seu interior **ANDRADE (1986)**.

Nos Quadros 4.3 e 4.4 estão apresentadas algumas propriedades físicas da cinza volante (fly ash) e cinza pesada (bottom ash) oriundas da Usina Termoelétrica de Candiota. Na coleta desses dois tipos de cinzas, verificou-se que, nos tanques de armazenamento, parte da cinza volante é misturada com a cinza pesada. Nesse quadros são apresentados requisitos físicos para uso da cinza com cal,

segundo a norma ASTM C593 e para o uso com o concreto de cimento Portland ASTM C618.

Propriedades Físicas		Requisitos físicos		Resultados	
		ASTM C593	ASTM C618	CINZA VOLANTE	CINZA PESADA
Finura	n° 30 (0,60 mm)	≤2,0		0,0	10,0
% retida na peneira	n° 200 (0,075 mm)	≤30		26,0	56,0
	n° 325 (0,045 mm)		≤34	42,0	74,0
Índice das atividades pozolônicas:	Mistura com cal, curadas aos 7 dias (MPa)	5,5		6,1	2,4
Limites de Atterberg				NP	NP
M.E.Real dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )				19,3-21,5	18,8-22,7
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)				2860-3500	

Quadro 4.3 Resultados da análise física das cinzas de Candiota

Propriedades Físicas		Resultados	
		CINZA VOLANTE	CINZA PESADA
Análise granulométrica (%)	> 4,8 mm	0,0	0,0
	(4,8 - 2,0 mm)	0,0	4,0
	(2,0 - 0,42 mm)	0,0	10,0
	(0,42 - 0,075 mm)	40,0	56,0
	(0,05 - 0,005 mm)	56,0	28,0
	< 0,005 mm	4,0	2,0

Quadro 4.4 Resultados da análise granulométrica das cinzas de Candiota

Comparando-se os resultados dos requisitos físicos das duas normas da ASTM, constata-se que a cinza volante (fly ash) passa nas exigências quanto a finura para o uso com cal, enquanto a cinza pesada (bottom ash) apresenta resultados acima do limite exigido. No emprego das cinzas para o uso do concreto de cimento Portland, os valores de finura das cinzas estão acima do limite, mas como veremos no capítulo de análise dos resultados essas pozolanas obtiveram bons resultados de resistência à compressão para o emprego em tijolos.

A heterogeneidade morfológica, mineralógica e química das cinzas se faz refletir na variação da massa específica real dos grãos. Segundo **ANDRADE (1986)**, as cinzas podem apresentar frações com densidade menor do que  $10 \text{ kN/m}^3$  até maior do que  $28,8 \text{ kN/m}^3$ . As mais baixas densidades foram atribuídas à presença de cenosfera e/ou plenosfera e as mais altas a baixo teor de sílica e alto conteúdo de material cristalino (mulita) e magnético (hematita e magnetita). As cinzas de Candiota mostram valores baixos de densidade, indicando presença de matéria orgânica na cinza pesada e a presença de partículas ocas (cenosfera e plenosfera) em ambas.

Comparando-se dimensionalmente com solos, a cinza volante aproxima-se a um solo silto-arenoso, enquanto que a cinza pesada, por apresentar granulometria mais grossa, aproxima-se a uma areia fina, segundo a classificação HRB.

Ainda segundo **ANDRADE (1986)**, um aspecto importante é o caráter vítreo (estrutura amorfa) da maioria das partículas. É de concordância geral que, em média, 70% ou mais das cinzas volantes não apresentam característica cristalina e que sua composição química, expressa em óxidos, é predominantemente  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Essa predominância de óxido de silício e alumínio é que confere o caráter pozolânico, enquanto que a estrutura amorfa da cinza facilita a solubilização da sílica e alumínio para que possa reagir com o óxido de cálcio livre.

No Quadro 4.5 são apresentadas as características químicas da cinza volante e pesada da Usina de Candiota, no Quadro 4.6 são mostrados, através de uma comparação quantitativa, os dois tipos de cinzas empregadas na experiência, e os requisitos químicos, segundo a norma ASTM C618, da cinza volante como adição em concreto de cimento Portland.

Característica química	Cinza leve (fly ash)	Cinza pesada (bottom ash)
perda ao fogo (%)	0,2	0,45
óxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)	68,0	61,6
óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	19,1	18,6
óxido de cálcio (CaO) (%)	1,3	0,7
óxido de magnésio (MgO) (%)	0,63	0,5
óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)	0,13	0,2
óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O) (%)	0,13	< 0,3
óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	7,8	15,7
carbono (C) (%)	0,11	
pH.(H <sub>2</sub> O (27°C))	4,2	6,4
pH.(H <sub>2</sub> O (27°C) (10% cal))	10,1	10,9

Quadro 4.5 Análise química das cinzas da Usina de Candiota

Propriedades Químicas	Requisitos Químicos	Resultados das Cinzas Usadas no Experimento	
	ASTM C-618	Cinza leve (fly ash)	Cinza pesada (bottom ash)
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) min	70,0	94,9	95,9
Perda ao fogo(%) máx.	6,0	0,2	0,45
Anidrido sulfúrico(%) máx.	5,0	0,13	0,2
Equivalente alcalino(%) -máx.	1,5	0,13	< 0,3

Quadro 4.6 Resultados comparativos das cinzas utilizadas no experimento com os quantitativos de análise química exigidos para o emprego no cimento

### 4.2.3. AGREGADO

O agregado utilizado foi uma areia do Rio Guaíba. O objetivo do emprego desse material foi o de melhorar a curva de distribuição granulométrica, tornando-a melhor graduada, e verificar, pelos resultados do ensaio de resistência à compressão, se o efeito físico, devido ao aumento do coeficiente de uniformidade da curva, é mais significativo que o efeito químico nas várias etapas de temperatura e tempo de cura do corpo-de-prova.

Sabe-se que nos corpos-de-prova compostos de areia, cinza e cal, curados em temperatura ambiente, apenas os elementos amorfos da cinza (sílica, alumínio) reagirão com a cal, enquanto que a areia servirá como modificador das características físicas, já que, por apresentar microscopicamente uma estrutura cristalina, não ocorrerá a solubilidade da sílica presente no material. Já na cura por autoclavagem, em que os corpos-de-prova são submetidos a altas temperaturas, poderá ocorrer a solubilidade da sílica presente na areia, **TAYLOR(1965)**, **SAUMAN(1973)**.

Estudos realizados em corpos-de-prova de areia e cal hidratada, curados por autoclavagem, cuja a reação química é muito semelhante à mistura de cinza com cal, curados em temperatura ambiente, mostram que há fatores importantes para a boa qualidade da estabilização com areia.

**BESSEY (1974)**, forneceu critérios preliminares, no aspecto químico, para a escolha da areia adequada à mistura com cal hidratada, utilizando o processo de cura por autoclavagem. No Quadro 4.7 encontram-se os limites dos critérios da areia, desde aquelas que mostram uma boa adequabilidade até as que apresentam valores inadequados para o uso com a cal hidratada. Junto a esses resultados, encontram-se os resultados da areia utilizada no experimento.

CRITÉRIOS	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo A
Conteúdo total de sílica (%)	> 90	75 a 90	< 75	92
Conteúdo de feldspato (%)	< 10	10 a 20	> 20	
Sais solúveis (%)	< 0,05	0,05 a 0,20	> 0,20	0,04
Total de álcalis ( $K_2O + NaO_2$ ) (%)	< 1	1 a 3	> 3	1,98
Sulfato solúvel ( $SO_4$ ) (%)	< 0,02	0,02 a 0,10	> 0,10	< 0,01
Argilas e siltes (material mais fino que $20\mu m$ ) (%)	< 4	4 a 10	> 10	NP

Quadro 4.7 Critérios de adequabilidade de areias para a fabricação de blocos sílico-calcários curados na autoclave

Tipo I - areias geralmente adequadas ;  
 Tipo II - areias que exigem ensaios para demonstrar sua adequabilidade ;  
 Tipo III - areias geralmente inadequadas ;  
 A - areia empregada no experimento;  
 NP - Não Possui material fino

Outro aspecto de importância a ser considerado é a característica física, através da análise granulométrica da areia empregada. **BESSEY e PURTON(1967)** concluíram que essa propriedade física e o conteúdo de cal hidratada são fatores dominantes para a determinação de resistência à compressão.

Eles fizeram as seguintes recomendações quanto às características granulométricas da areia para ser utilizada na mistura com cal hidratada e curados em autoclave: composição granulométrica contínua, porém com maior quantidade de grãos de dimensão maior que 1 mm - no máximo 10%; grãos de dimensão menor que 0,1 mm - no máximo um terço do total de agregados; dimensão máxima dos grãos 6 mm. No Quadro 4.8 está o resultado da análise granulométrica da areia empregada no Rio Guaíba.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	
DIÂMETRO DOS GRÃOS	PORCENTAGEM RETIDA
> 4,8 mm	1,90
4,8 - 2,0 mm	9,50
2,0 - 0,42 mm	53,60
0,42 - 0,075 mm	34,85
> 0,075 mm	0,15

Quadro 4.8 Análise granulométrica da areia do Rio Guaíba

Na Figura 4.1 são mostradas as curvas granulométricas das cinza volante, pesada e areia empregada no experimento. Na Figuras 4.2, as curvas granulométricas das quatro misturas .

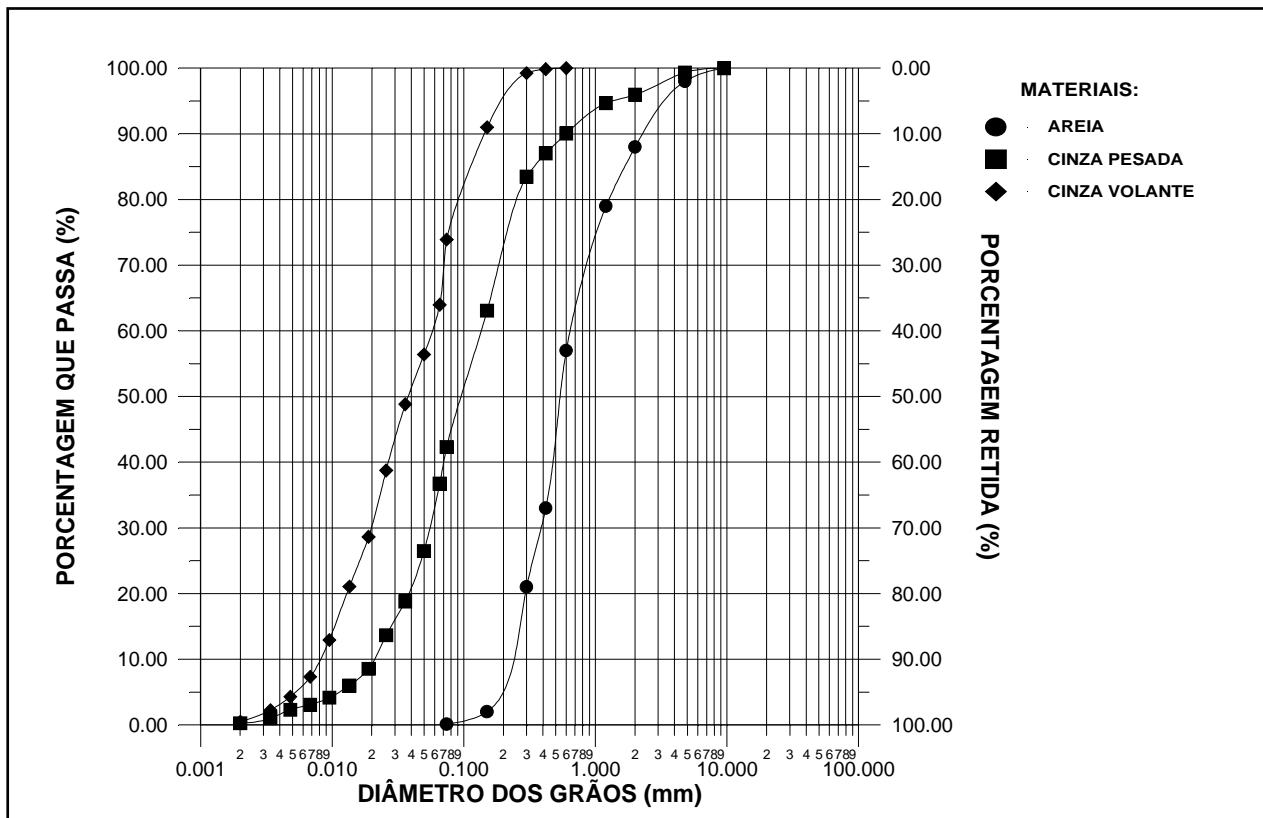


Figura 4.1 Curvas granulométricas das cinzas e areia

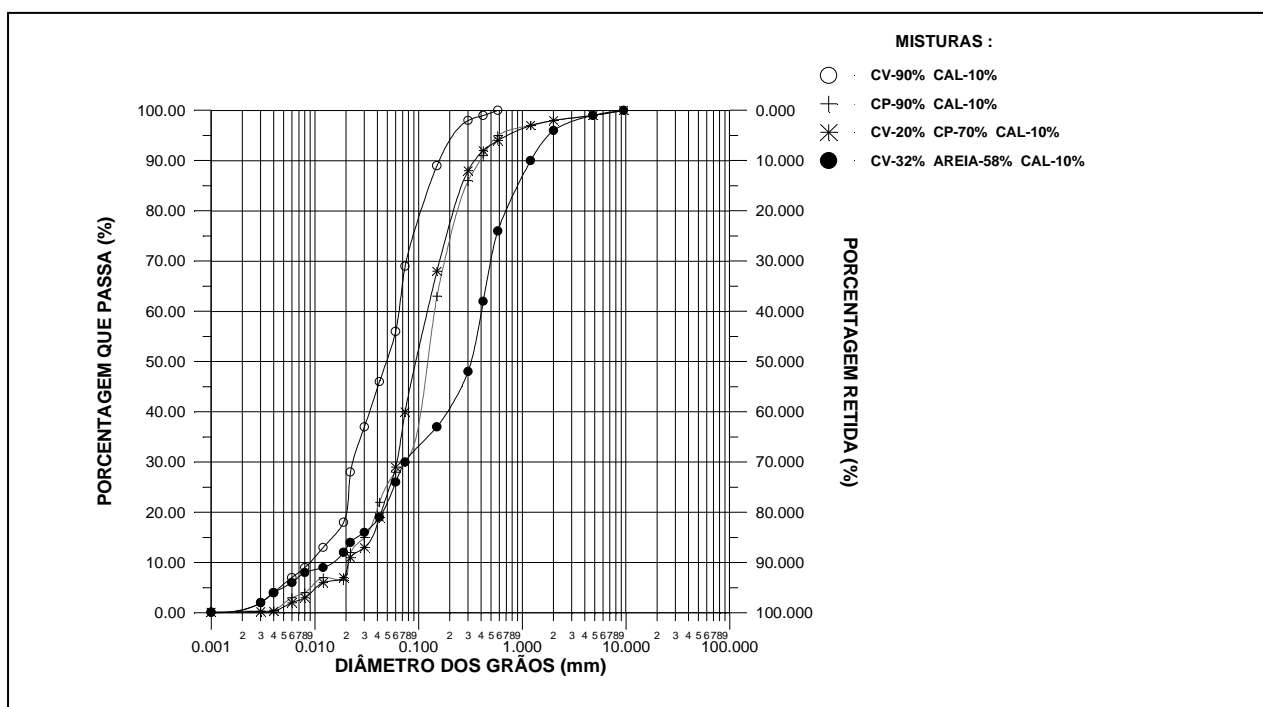


Figura 4.2 Curvas granulométricas das misturas utilizadas na segunda etapa

### **4.3 PROCESSO DE CURA, METODOLOGIA DE CONFECÇÃO E ENSAIOS EMPREGADOS NO EXPERIMENTO**

#### **4.3.1 METODOLOGIA EMPREGADA NA CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA**

Para a moldagem dos corpos-de-prova foi usado o método de compactação Carlos de Souza Pinto (corpos-de-prova cilíndricos), **ABPV (1971)**.

##### **4.3.1.1. CONFECÇÃO PELO MÉTODO DE SOUZA PINTO**

Na confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão, absorção e perda de massa, a determinação da densidade máxima e umidade ótima foram baseadas no ensaio de Proctor. Após a determinação desses dois parâmetros, utilizou-se o método de Eng<sup>o</sup> Carlos Souza Pinto para a confecção de corpos-de-prova cilíndricos com altura de 10 cm e diâmetro de 5 cm. O equipamento para moldagem é bastante simples, Foto 4.1. Ele é usado em vários laboratórios dos Estados Unidos e se presta principalmente para ensaios de resistência à compressão de misturas de solos e produtos químicos estabilizantes, como por exemplo cimento, cal e outros aglomerantes.



Foto 4.1 Equipamento para confecção de corpos-de-prova



O processo é análogo ao sugerido pela Portland Cement Association para a determinação da resistência à compressão simples do solo-cimento, quando o solo não contenha partículas superiores a 4,8 mm de diâmetro.

Nas Figuras 4.3 a 4.6 são mostradas as curvas do ensaio de Proctor nas energias normal e modificada das quatro misturas usadas no experimento.

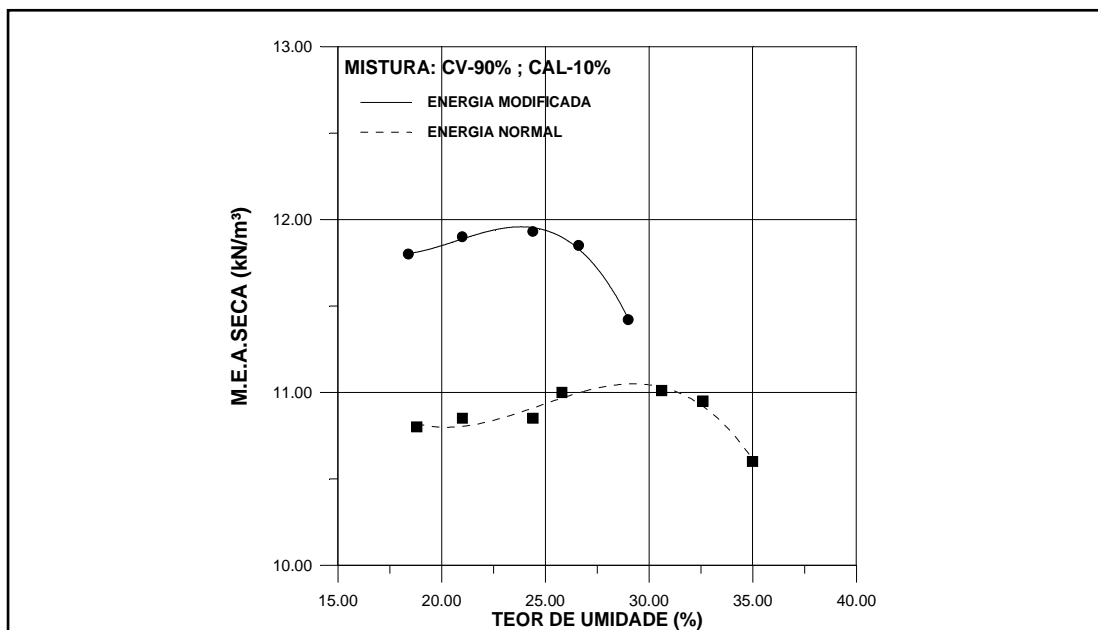


Figura 4.3 Curvas de ensaio de compactação (2ª etapa) - Mistura 1

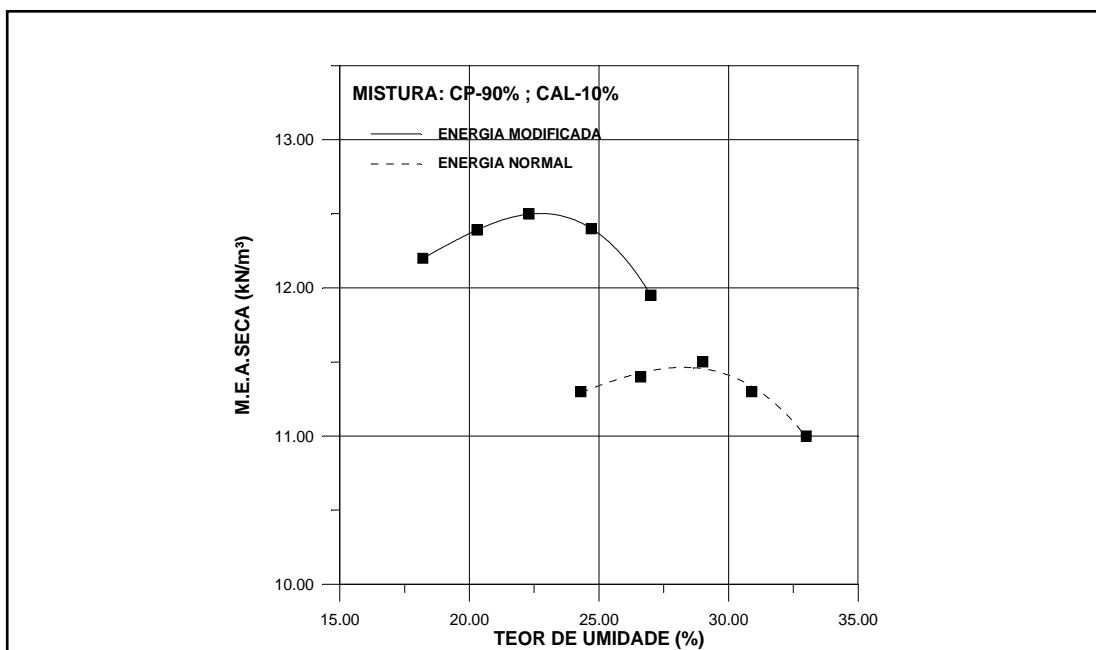


Figura 4.4 Curvas de ensaio de compactação (2ª etapa) - Mistura 2

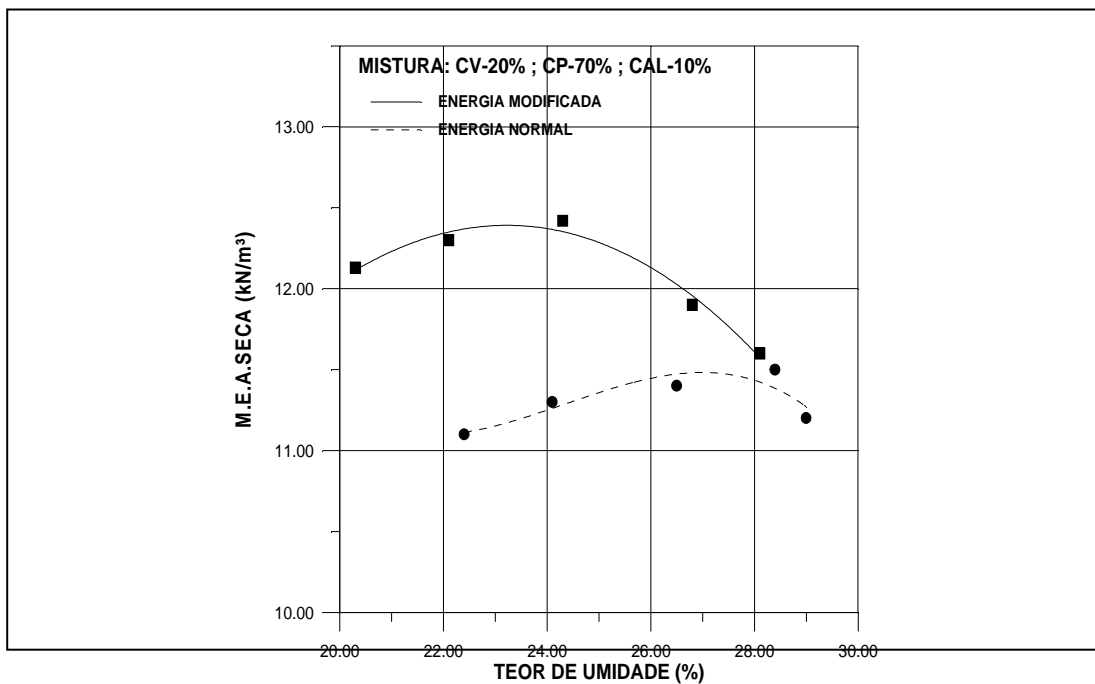


Figura 4.5 Curvas do ensaio de compactação (2ª etapa) - Mistura 3

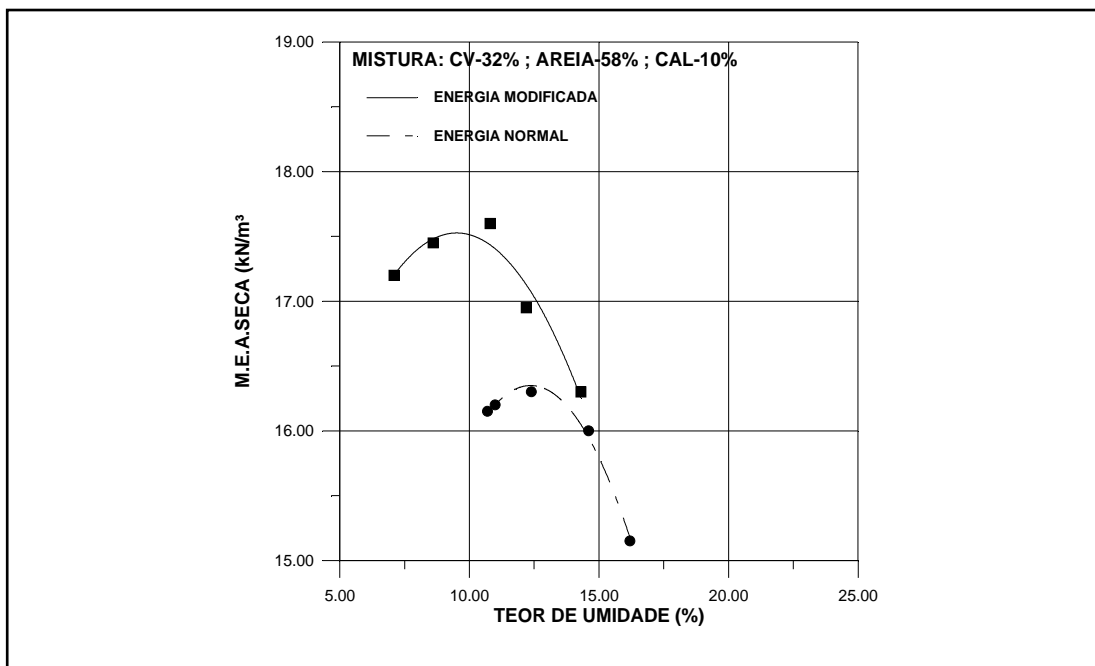


Figura 4.6 Curvas do ensaio de compactação (2ª etapa) - Mistura 4

## 4.3.2 TIPOS DE CURA UTILIZADOS

### 4.3.2.1 PROCESSO DE CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)

Os corpos-de-prova cilíndricos e tijolos eram mantidos em uma câmara de temperatura constante a 21°C com tolerância de mais ou menos 1°C. Não havia controle da umidade relativa do ar e os corpos-de-prova eram acondicionados em sacos plásticos para evitar a perda de umidade e a carbonatação da cal pela presença do dióxido de carbono no ar, Foto 4.2.



Foto 4.2 Processo de cura na câmara à temperatura ambiente

### 4.3.2.2 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)

Nesse processo utiliza-se de um equipamento denominado autoclave, Foto 4.3. Basicamente, é um processo hidrotérmico, isto é, utiliza-se do vapor d'água para saturar o ambiente hermeticamente fechado e elevar a temperatura interna mediante o aumento da pressão.

A finalidade de se autoclavar o corpo-de-prova é para acelerar as reações pozolânicas entre a cinza e a cal hidratada, fazendo com que apareçam novos grupos de silicatos de cálcio, que forneçam ganhos de resistência.

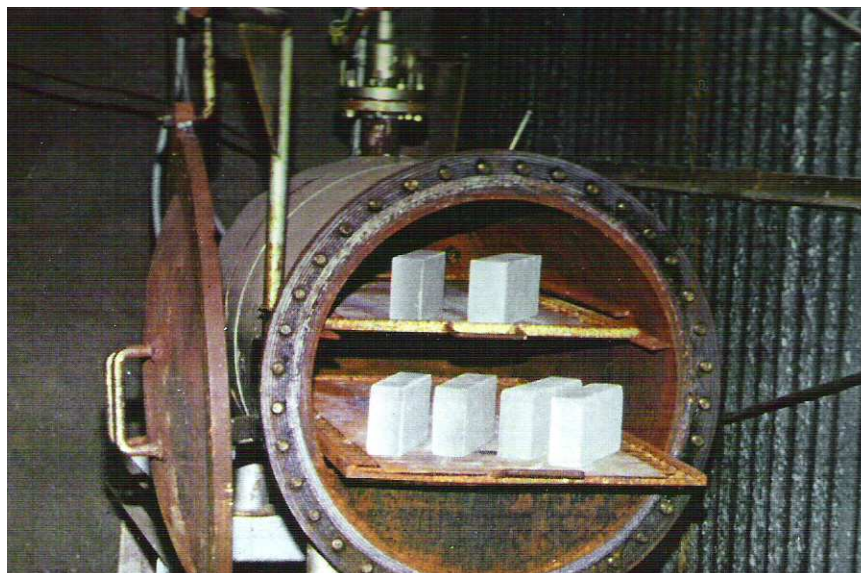


Foto 4.3 - Processo de cura em temperaturas acima da ambiente (autoclave)

A determinação dos limites mínimos e máximos das variáveis temperatura de cura e tempo de autoclavagem baseou-se na precisão do equipamento autoclave.

Condicionando-se os estudos apenas por considerações econômicas, estar-se-ia fora deste campo de variação, pois, segundo **SABATTINE(1982)**, as condições extremas de produção comercial estão nos limites de 8 horas à pressão de  $0,9 \text{ N/mm}^2$  até 2,6 horas à pressão de  $2,5 \text{ N/mm}^2$ .

Mas ao se condicionar os estudos em nível de pesquisa pura, ter-se-ia que trabalhar em condições extremas mais elevadas, pois sabe-se que ocorrem aparecimentos de novos grupos de silicatos de cálcio, responsáveis pelo ganho ou perda de resistência, conforme estudos feitos por **TAYLOR e MOON (1965)**, em misturas de areia e cal hidratada, na qual eles variaram a temperatura e tempo de autoclavagem em condições extremas altíssimas, através de ensaios de microscopia eletrônica, difração de raio-X e análise térmica diferencial.

### 4.3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS EMPREGADOS

Os ensaios realizados têm como objetivo o conhecimento quantitativo e qualitativo do comportamento mecânico e físico das várias misturas.

#### 4.3.3.1 ANÁLISES QUÍMICAS

O objetivo é verificar a porcentagem dos diversos elementos que compõem os materiais que foram utilizados. Alguns elementos, dependendo de sua quantidade presente no material, poderão afetar a atividade de reação pozolânica da mistura, como por exemplo o óxido de silício e alumínio presente na cinza e óxido de cálcio disponível presente na cal.

As técnicas analíticas utilizadas para determinação dos principais elementos das cinzas e da cal estão apresentadas no Quadro 4.9.

TÉCNICA	ELEMENTO	MATERIAL
AA	- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cal dolomítica hidratada
G	- res. insolúvel, SiO <sub>2</sub> , MgO	
V	- óxido de cálcio disponível - óxido de cálcio	
FRX	- óxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) - óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) - óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) - óxido de cálcio (CaO) - óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	cinza  volante e  pesada
AA	- óxido de magnésio (MgO) - óxido de sódio (NaO)	

Quadro 4.9 Métodos empregados nas análises química dos materiais

AA = espectrometria de absorção atômica (método CIENTEC)

G = gravimetria (NBR6473/93)

FRX = espectrometria de fluorescência de raio-X (método CIENTEC)

V = volumetria (NBR6473/93)

#### 4.3.3.2 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Os ensaios de caracterização realizados neste trabalho são normalizados e seguiram os mesmos procedimentos para os ensaios de solo.

Restrições podem ser analisadas quanto a determinação das curvas granulométricas, pois no ensaio de sedimentação, para a determinação do diâmetro das partículas, os diâmetros são determinados baseando-se na lei de Stokes, a qual determina a velocidade de queda livre de uma esfera com um determinado diâmetro num meio fluido.

Para um solo, os diâmetros das partículas são considerados equivalentes ao diâmetro de partículas esféricas, com a mesma massa específica dos grãos. Nas cinzas de Candiota, morfologicamente as partículas são esféricas, mas contêm microvazios (cenosfera e plenosfera), o que, baseando-se na lei de Stokes, podem não representar a curva granulométrica da mistura.

Mas, estudos feitos por **ANDRADE (1986)** na cinza da Usina de Candiota, em que foram utilizados métodos de análises granulométricas mais sofisticados, como por exemplo difração de raio-X, mostraram que o método por sedimentação na apresentação das curvas está muito próximo aos outros métodos, concluindo que, provavelmente, não haverá influência na análise física da mistura.

#### **4.3.3.2.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)**

Este ensaio tem como objetivo verificar o efeito cimentante da mistura, através dos resultados da resistência máxima à compressão simples. Foram realizados ensaios de corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm.

O ensaio de resistência baseou-se no método DNER-ME 180/94. A resistência à compressão simples é obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, equação (4), Foto 4.4.

$$f_b = F_b / A_b \quad (4)$$

$f_b$  = resistência máxima à compressão (MPa)

$F_b$  = carga média máxima (kN)

$A_b$  = área bruta da seção transversal (superfície perpendicular à aplicação de carga) (m<sup>2</sup>)





Foto 4.4 - Ensaio de resistência à compressão simples

#### 4.3.3.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO

O conhecimento do potencial de absorção é necessário para se poder avaliar a penetração de água no corpo-de-prova. Sabe-se que a quantidade de volume líquido absorvido é função da quantidade e distribuição no sólido dos poros e da viscosidade dos líquidos.

A finalidade do ensaio é verificar se a reação pozolânica que ocorre entre a cinza e a cal, analisando diversos tempos e temperaturas de cura, irá influenciar de modo significativo nos resultados de ensaios de absorção.

Há variações na metodologia de ensaios de absorção no Brasil. Segundo referências do engenheiro **SABBATTINE (1982)**, o volume de água absorvido em porcentagem depende do tipo de procedimento de ensaio. Comumente se define a absorção por imersão em água fria por 24 horas ( $A_{24h}$ ) e absorção por imersão em água em ebulição por 2 horas ( $A_{2h}$ ). Diz-se que a absorção é total ( $A_t$ ) quando esta última for feita em seqüência àquela.

Neste trabalho foi aplicado o método para tijolos maciços de solo-cimento, onde os corpos-de-prova são imersos em água fria por 24 horas, Foto 4.5.

Os valores para determinação da absorção, expressos em porcentagem, são obtidos pela seguinte equação (5) :

$$A_{(24)} = ((M2 - M1) / M1) \times 100 \quad (5)$$

M1 = massa do corpo-de-prova seco em estufa (g)

M2 = massa do corpo-de-prova imerso em água por 24 horas (g)

$A_{(24)}$  = umidade de água absorvida por imersão em 24 h (%)

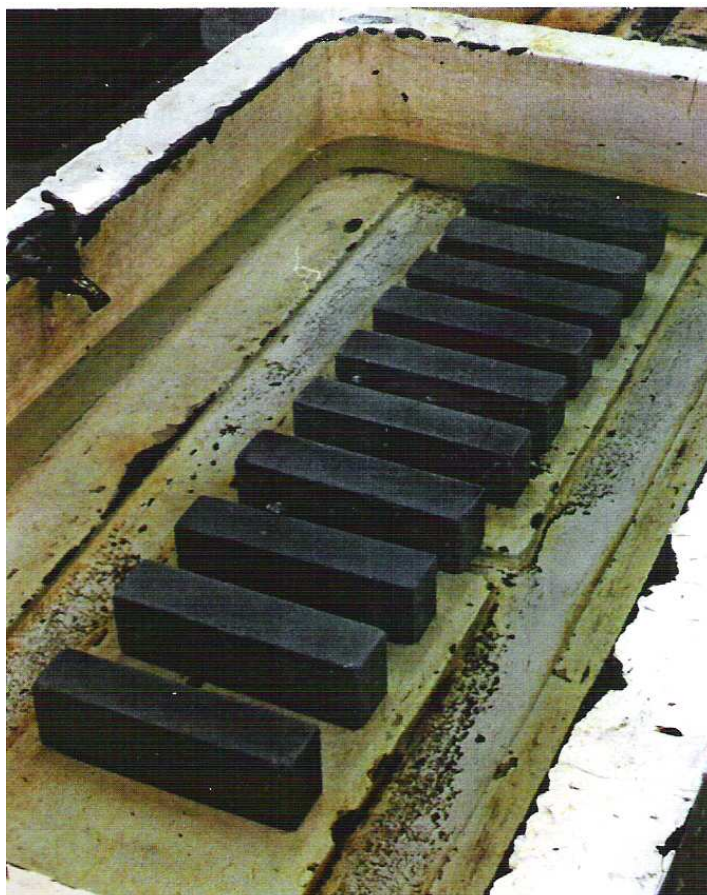


Foto 4.5 - Ensaio de Absorção



#### 4.3.3.2.3 ENSAIO DE PERDA DE MASSA

Este ensaio baseia-se na norma DNER-ME 203/67106, cuja finalidade é verificar a habilidade do material em manter sua estrutura íntegra, sob condições nas quais ele é exposto. O método baseia-se em que as forças de deterioração, as quais destroem a integridade do corpo-de-prova, são a variação da temperatura e a umidade em contínuos ciclos de repetição, num total de 12, Foto 4.6. Esse ensaio só foi realizado no primeiro estágio, com a finalidade de se verificar a integridade do corpo-de-prova devido ao surgimento de novos silicatos de cálcio ao se variar a temperatura.

A equação (6) para o cálculo da perda de massa, após 12 ciclos, segue abaixo:

$$P_m = ((m_i - m_c) / m_i) \times 100 (\%) \quad (6)$$

$P_m$  = perda da massa do corpo-de-prova após 12 ciclos (%)

$m_i$  = massa seca inicial (g)

$m_c$  = massa seca final corrigida (g)       $m_c = (m_f / A + 100) \times 100$

$m_f$  = massa seca final após 12 ciclos (g)

A = parâmetro função da classificação do solo



Foto 4.6 - Ensaio de Perda de massa

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS

### 5.1 PRIMEIRA ETAPA

Este estágio foi um estudo preliminar para verificar se os fatores principais (energia de moldagem, temperatura e tempo de cura e umidade de moldagem) tem um efeito significativo sobre a variabilidade dos resultados de resistência, absorção e perda de massa (durabilidade). Os CPs foram curados apenas por autoclave. No Quadro 5.1 são mostradas as misturas que foram utilizadas nesta etapa

Tipo de Mistura	Materiais (%) *			
	Cinza Volante	Cinza Pesada	Areia	Cal Hidratada
1	90			10
2	95			5
3		90		10
4	45	45		10
5	32		58	10

Quadro 5.1 Misturas utilizadas na primeira etapa da pesquisa.

\*Porcentagem em peso das misturas

### 5.1.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

#### 5.1.2.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO

No Quadro 5.2 são mostrados os resultados de ensaio de resistência à compressão simples das cinco misturas em estudo em corpos-de-prova moldados na  $h_{ót-3\%}$ . Os valores determinados são a média de três corpos-de-prova para cada condição de cura. Inicialmente, os corpos-de-prova foram moldados em três umidades de moldagem ( $h_{ót}$  ;  $h_{ót-3\%}$  ;  $h_{ót-5\%}$ ), mas a maioria dos corpos-de-prova trincaram na umidade ótima, durante o processo de cura na autoclave, provavelmente por expansão da água dentro dos vazios, confirmando as observações de **WALKER e PURTON (1973)** (capítulo 2). Posteriormente, os estudos apresentados por análise

de variância (ANOVA) mostraram que a umidade de moldagem obteve o menor efeito na variabilidade dos resultados de ensaios

Misturas	Tempo de cura (horas)	Resistência à compressão simples (MPa)					
		Energia normal			Energia modificada		
		157° C	165° C	175° C	157° C	165° C	175° C
1	4	10,00	9,80	8,90	14,60	15,20	14,80
	6	trinca	trinca	trinca	9,20	8,40	10,20
2	4	4,80	4,70	5,50	8,40	7,10	7,30
	6	5,00	5,30	6,40	7,35	7,70	9,60
3	4	3,70	4,10	3,30	6,00	5,10	4,60
	6	2,30	trinca	4,10	3,70	6,80	6,50
4	4	5,30	5,10	6,40	5,80	6,30	7,40
	6	5,20	3,90	6,50	6,60	5,30	7,70
5	4	6,40	6,60	7,60	8,00	10,20	10,70
	6	7,50	9,20	10,00	11,00	12,00	14,6

Quadro 5.2 Média do resultados de ensaios de resistência à compressão simples dos CPs curados pelo processo de autoclave

O aparecimento de trincas nos corpos-de-prova, conforme Quadro 5.2, talvez seja devido à má execução de compactação. Para uma melhor avaliação do comportamento mecânico das cinco misturas, são apresentados gráficos relacionando as variáveis dependentes com a variação da temperatura de cura, pois esta foi a única das variáveis principais neste estágio em que foram aplicados três níveis, possibilitando observar a tendência do comportamento mecânico das misturas. Os resultados dessas análises restringem-se dentro dos intervalos estudados.

Nas Figuras 5.1 e 5.2, para tempo de cura de 4 horas, observa-se que a variação da temperatura de cura por autoclavagem pouca influência exerceu na variação da resistência à compressão para cada mistura moldada nas energias normal e modificada de moldagem. Na maioria das misturas, o efeito da temperatura fez crescer levemente a resistência à compressão. A explicação poderia estar no aparecimento do mesmo tipo de silicatos/aluminato de cálcio para os intervalos de temperatura estudados para a mesma mistura.

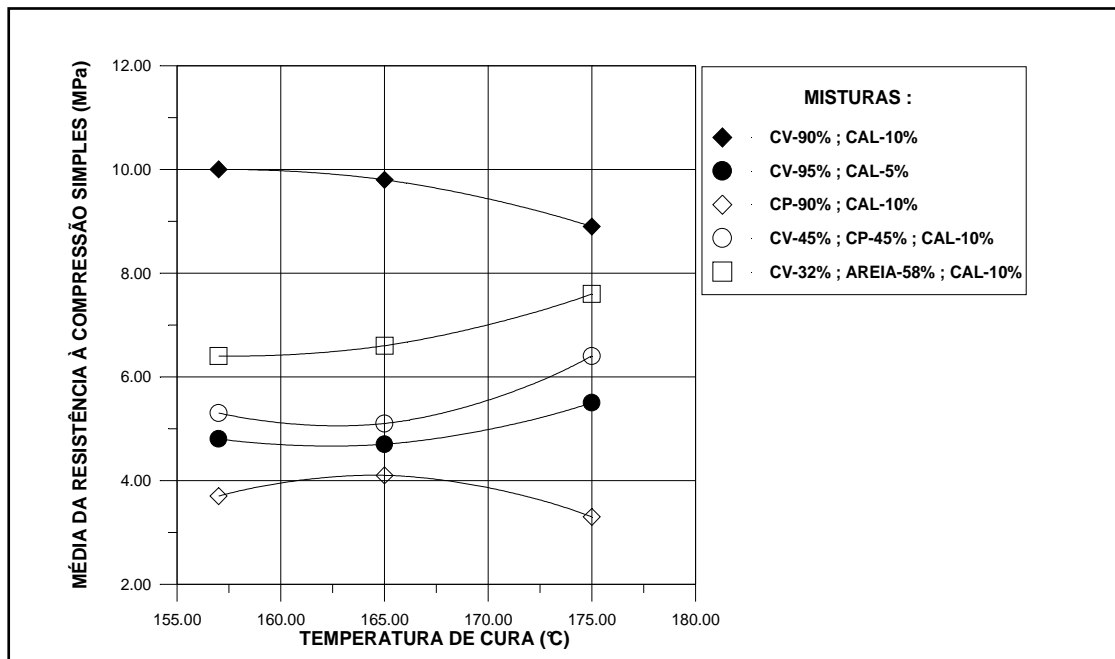


Figura 5.1 Efeito da temperatura na RCS (Energia Normal)

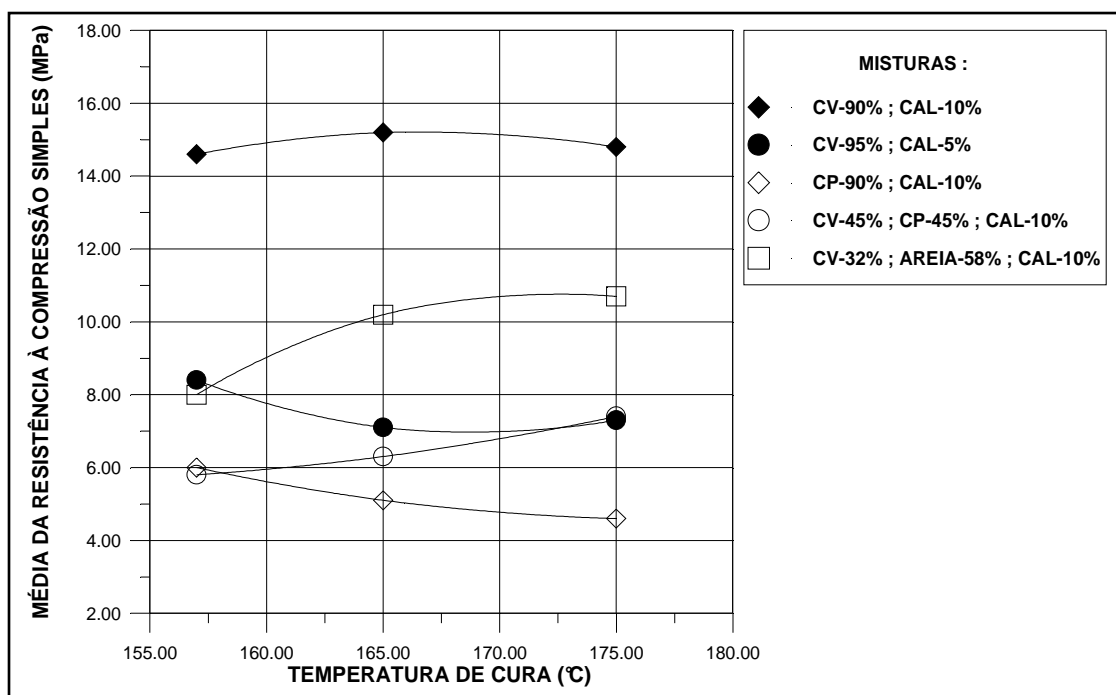


Figura 5.2 Efeito da temperatura na RCS (Energia Modificada)

As misturas 1 e 3, nas quais foram usadas 90% de cinza volante e pesada, respectivamente, são as que apresentaram em média os limites máximos e mínimos de resistência à compressão simples na comparação com as outras três misturas, este comportamento foi observado para as duas energias de moldagem. Para as outras três misturas, em que suas faixas de resistências situam-se entre a

mistura 1 e 3, observa-se que a mistura 5 foi a que apresentou os melhores resultados, levando a crer que houve reação da sílica presente na areia com o hidróxido de cálcio, pois esta mistura na sua composição utilizou a menor porcentagem de cinza volante, enquanto que, na comparação de resultados entre as misturas 2 e 4, houve inversão de ganhos de resistência ao mudarmos as energias de moldagem.

Observando-se os resultados das curvas de resistências das cinco misturas, verifica-se que aquelas que utilizaram cinza volante foram as que apresentaram maior efetividade de resistência. A mistura 2 que na sua composição reduziu a proporção de cal de 5% em massa da mistura com um aumento proporcional para a cinza volante, repetiu o mesmo comportamento de estudos anteriores de corpos-de-prova curados na câmara à temperatura constante, na qual a redução da cal traz uma queda de resistência.

Estes resultados presunõe-se que :

i - A cinza volante que apresenta uma melhor atividade pozolânica (superfície específica), desenvolve elementos com propriedades cimentantes que geram um crescimento na resistência de materiais estabilizados pozolanicamente.

ii - O teor de cal apresenta-se com extrema relevância para a perda ou ganho de resistência de materiais estabilizados pozolanicamente. Seu efeito se nos basearmos nos comportamento das curvas de resistência das Figuras 5.1 e 5.2 é mais importante do que a atividade pozolânica da cinza.

Na Figura 5.3 são analisados os resultados de resistência entre as mistura 1, 3 e 5, mostrando as curvas para os tempos de cura de 4 e 6 horas e os corpos-de-prova moldados na energia modificada, pois a energia normal apresentou comportamentos semelhantes apenas com resultados de menor magnitude.

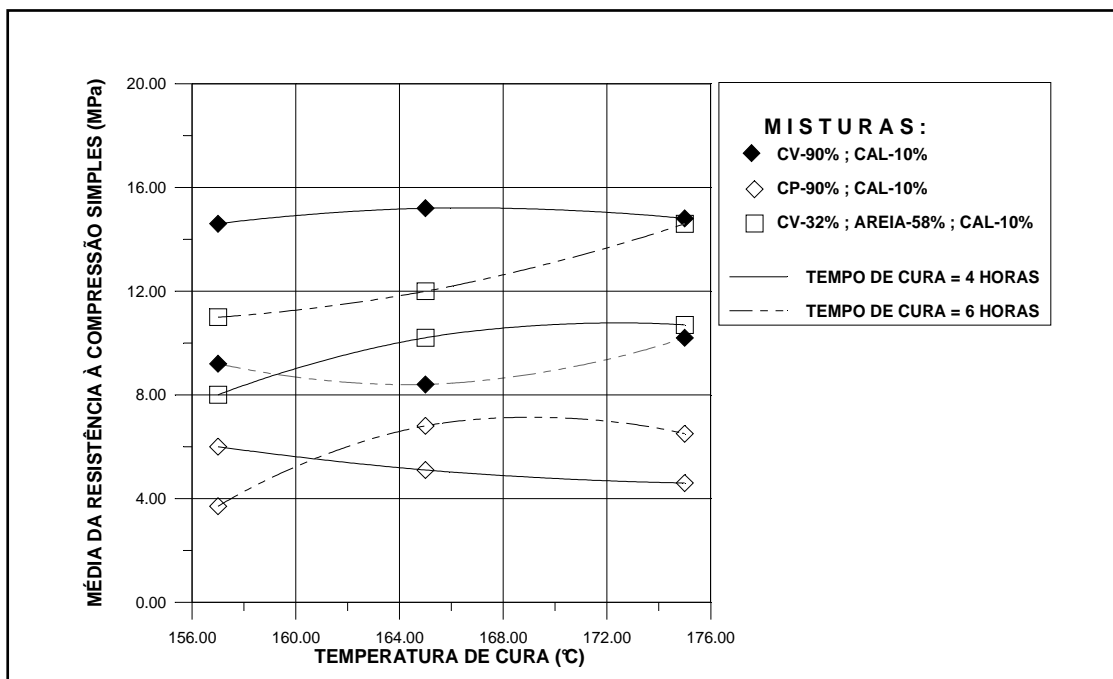


Figura 5.3 Efeito do tempo de cura na RCS (Energia Modificada)

Observa-se que em média o tempo de 4 horas foi aquele que desenvolveu os maiores resultados de resistência à compressão para a mistura 1, enquanto o tempo de cura de 6 horas gerou os maiores resultados para a mistura 3 e 5.

A mistura 1 em que na sua composição tem somente cinza volante com cal, foi aquela que apresentou as maiores variações de resistência, comparando as curvas para os tempos de cura de 4 e 6 horas, enquanto que as misturas 3 e 5 obtiveram menores variações de resistência quando comparadas as curvas desses dois tempos de cura.

Tudo leva a crer que a quantidade e tipo de cinza, mantido o mesmo teor de cal, pode influenciar para que o tempo de cura tenha um efeito sobre os resultados de resistência em corpos-de-prova estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave, ou seja, quanto maior a quantidade de cinza e sua superfície específica maior será a influência do tempo de cura sobre a resistência à compressão.

Estabelecer um tempo ou temperatura ideal, se raciocinarmos em nível de pesquisa, fica difícil até o momento, o ideal é aumentarmos os níveis destes

dois fatores. Estudos realizados por **COLE E MOOREHEAD(1965)** demonstraram que a temperatura e o tempo de cura podem desenvolver novos tipos de silicatos de cálcio que geram perdas ou ganhos de resistência em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave.

Na Figura 5.4 são plotadas as curvas de resistência em função da temperatura de cura para corpo-de-prova moldados na energia normal e modificada com um tempo de cura de 4 horas. O objetivo é verificar se há influência deste dois níveis de energia sobre materias estabilizados pozolanicamente. Foram analisadas as misturas 1, 3 e 4, para o tempo de cura de 6 horas o comportamento foi bem semelhante.

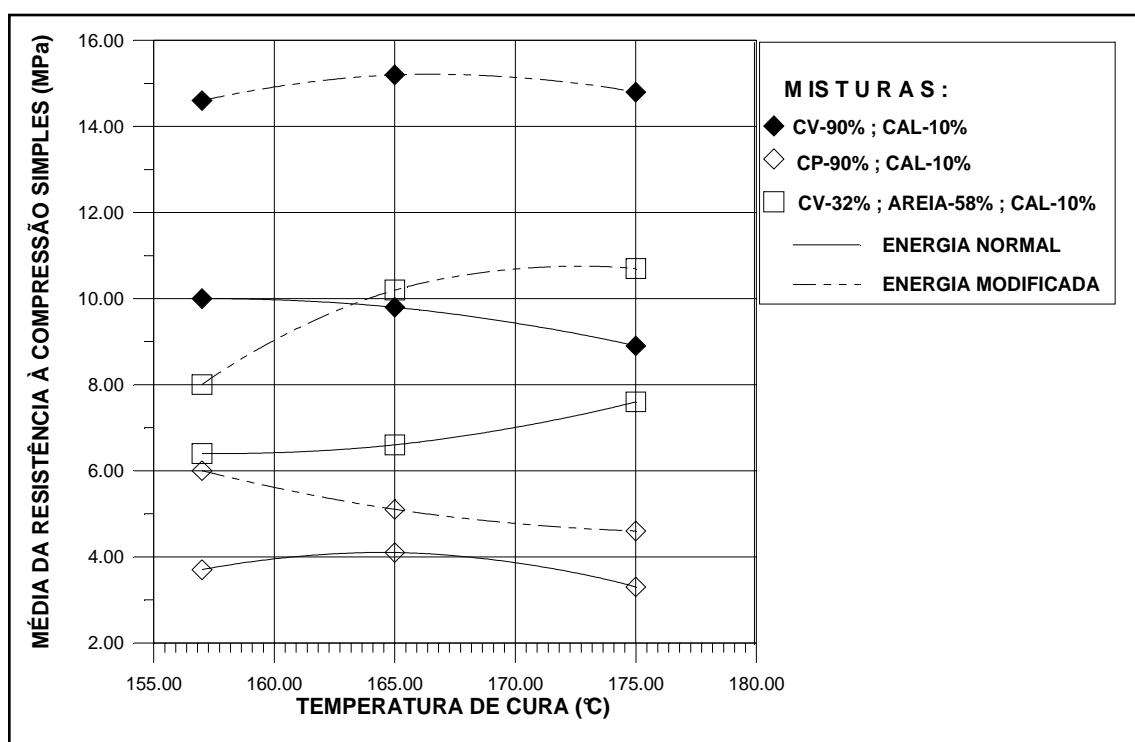


Figura 5.4 Efeito da energia de moldagem na RCS

Os resultados demonstram que para as três misturas a maior energia de moldagem (energia modificada) foi a que gerou os maiores resultados de resistências. Volta-se a repetir o mesmo comportamento apresentado na Figura 5.3, onde a quantidade e tipo de cinza são importantes para que haja um maior efeito da

energia de moldagem sobre a variabilidade dos resultados de resistência em corpos-de-prova estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave.

Provavelmente, para o intervalo de energia de moldagem estudado, o efeito deste fator dá-se de uma forma diferente daquela do tempo de cura. A maior energia de moldagem produz um crescimento na massa específica aparente da mistura, isto significa dizer uma maior aproximação das partículas devido a diminuição dos vazios pelo efeito da compactação. A consequência desta aproximação é aumentar o número de reações químicas entre o hidróxido de cálcio e a sílica/alumina presente na cinza, gerando um aumento da resistência à compressão dos materiais estabilizados pozolanicamente.

Devemos observar também que a variação de resistência, devido ao fator energia de moldagem da qual faz aumentar o efeito químico (reação pozolanica), tem uma outra parcela de contribuição que é devido ao efeito físico (distribuição dos poros, textura etc). Quando a composição da mistura envolve somente cinzas volantes e/ou pesada e cal em que a curva granulométrica apresentasse bastante uniforme a parcela do efeito químico é muito mais significativo do que o efeito físico.

#### **5.2.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO**

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) dos fatores principais predeterminados, com o objetivo de se determinar a significância de cada um quanto a variabilidade dos resultados do ensaio de resistência à compressão.

Utilizou-se o programa STATGRAFH para confirmar o efeito desses fatores na resistência à compressão dos corpos-de-prova. No Quadro 5.3 estão mostrados os valores de F calculado e tabelado, em um nível de significância  $\alpha=0,05$  encontrados para testar a hipótese de não-existência de efeito desses fatores



FATORES PRINCIPAIS	CV-90% CAL-10%		CV-95% CAL-5%		CP-90% CAL-10%		CV-45% CP-45% CAL-10%		AREIA-58% CV-32% CAL-10%	
	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>
Energia	409,5	4,06	288,8	4,03	155,0	4,10	88,60	3,96	106,5	4,16
Temperatura	0,25	3,21	12,50	3,19	24,06	3,25	140,60	3,11	20,8	3,31
Tempo	351,7	4,06	27,62	4,03	4,21	4,10	40,67	3,96	56,5	4,16
Umidade	0,41	4,06	22,06	4,03	4,02	4,10	10,50	3,11		

Quadro 5.3 Resultados da Análise de Variância do ensaio de RCS

Observa-se nos resultados que os fatores na maioria das misturas comprovaram a existência de seus efeitos, ou seja,  $F_{cal} > F_{tab}$ . A energia de moldagem apresentou-se como o efeito de maior significância na variabilidade dos resultados de resistência na maioria das misturas, comprovando que a maior aproximação dos grãos devido ao aumento da energia favorece um maior número de reações.

A temperatura de cura para a mistura 4 mostrou-se mais significativa do que a energia de moldagem. Os fatores tempo e temperatura mostraram-se que são os segundos em importância no efeito da variabilidade dos resultados de resistência. Para as misturas 1, 2 e 5, o tempo foi mais significativo, enquanto nas misturas 3 e 4, onde foi usada cinza pesada, a temperatura foi mais significativa.

O fator umidade foi o que apresentou o menor efeito sobre a variabilidade dos resultados de resistência, sendo que, para a mistura 5, os C.P.s moldados na umidade ótima trincaram, enquanto que na umidade com 5% inferior a ótima não foi possível moldar. Os resultados apresentados e discutidos no ensaio de resistência, referem-se apenas aos intervalos estudados neste experimento, não se podendo prever se o comportamento será o mesmo para intervalos de maior alcance destes fatores.

## 5.2.2 ABSORÇÃO

### 5.2.2.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO

Este ensaio refere-se à absorção do material, que permaneceu submerso em um tanque de água fria por um período de 24 horas. Os corpos-de-prova foram submetidos as mesmas condições de moldagem e tipo de cura do ensaio de resistência.

Os resultados que estão mostrados no Quadro 5.4 são de corpos-de-prova moldados no ramo seco com uma diferença para menos de 3% em relação à umidade ótima do ensaio de Proctor.

Mistura	Tempo de cura (horas)	Absorção por 24 horas em água fria (%)					
		Energia normal			Energia modificada		
		157° C	165° C	175° C	157° C	165° C	175° C
Mistura1	4	26,60	26,10	32,20	20,50	21,90	21,90
	6	28,60	26,50	32,90	20,70	21,30	22,30
Mistura2	4	30,70	31,70	30,70	24,80	25,00	24,90
	6	30,80	32,40	31,20	24,30	25,20	24,60
Mistura3	4	38,50	40,10	39,80	33,70	33,60	34,30
	6	40,80	46,30	39,10	33,50	31,70	32,60
Mistura4	4	33,00	33,50	32,20	30,60	31,20	28,50
	6	32,20	36,70	30,80	28,30	33,10	28,10
Mistura5	4	16,30	17,50	17,60	trincado	14,60	14,80
	6	16,80	17,50	18,20	14,50	14,90	15,80

Quadro 5.4 Média dos resultados de ensaio de absorção em CPs curados pelo processo de autoclave

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentados os resultados de absorção das cinco misturas curadas no tempo de 4 horas e moldadas na energia normal e modificada, para o tempo de 6 horas o comportamento foi semelhante. As duas energias de moldagem mostram que as curvas de resistência tem comportamento similar, a diferença está na magnitude, onde a maior energia gerou resultados de absorções menores para todas as misturas.

A mistura 5 foi a que apresentou os mínimos valores de absorção e a mistura 3 os valores máximos. A mistura que utilizou somente cinza volante com cal obteve o segundo menor resultado de absorção. Estas observações levam a sugerir que tal qual a resistência há uma parcela devido ao efeito químico (reação pozolânica) e ao efeito físico (distribuição dos poros, textura etc).

Ao compararmos todas as misturas verificamos que aquela com menor grau de uniformidade na sua curva granulométrica foi a que apresentou os menores resultados de absorção. Estas observações leva-nos a concluir que:

i - o efeito físico quando comparamos as cinco misturas foi a parcela mais importante para a diminuição da absorção, ou seja, a entrada de um material na composição da mistura que leve a um menor grau de uniformidade da curva granulométrica será mais importante do que o tipo de cinza incluído na mistura em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave ;

ii - Quando comparamos as misturas 1, 2, 3 e 4 na qual o grau de uniformidade são muito similares, a parcela do efeito químico torna-se mais significativo para o aumento ou diminuição da absorção de materiais estabilizados pozolanicamente, ou seja, a quantidade de cal, cinza e sua atividade pozolânica (superfície específica) são importantes para gerar menor ou maiores absorções.

iii- Para cada mistura, o intervalo da temperatura estudado foi muito pouco significativo para a variabilidade dos resultados de resistência, evidente que torna-se importante quando comparamos os resultados de absorção das misturas.

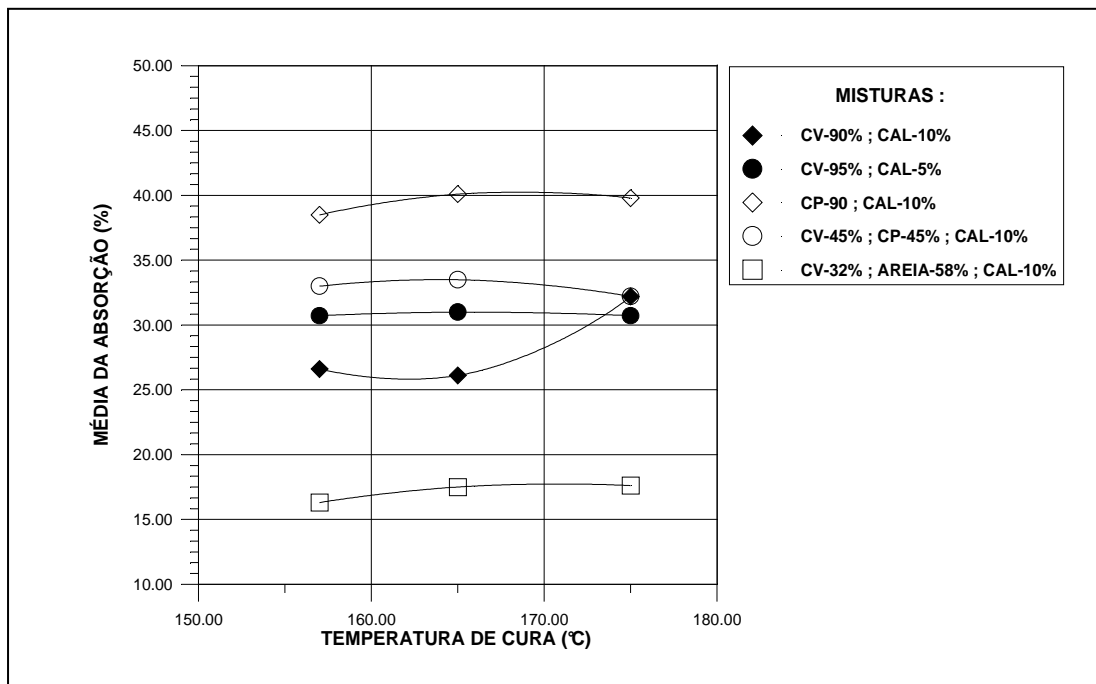


Figura 5.5 Efeito da temperatura na absorção (Energia normal)

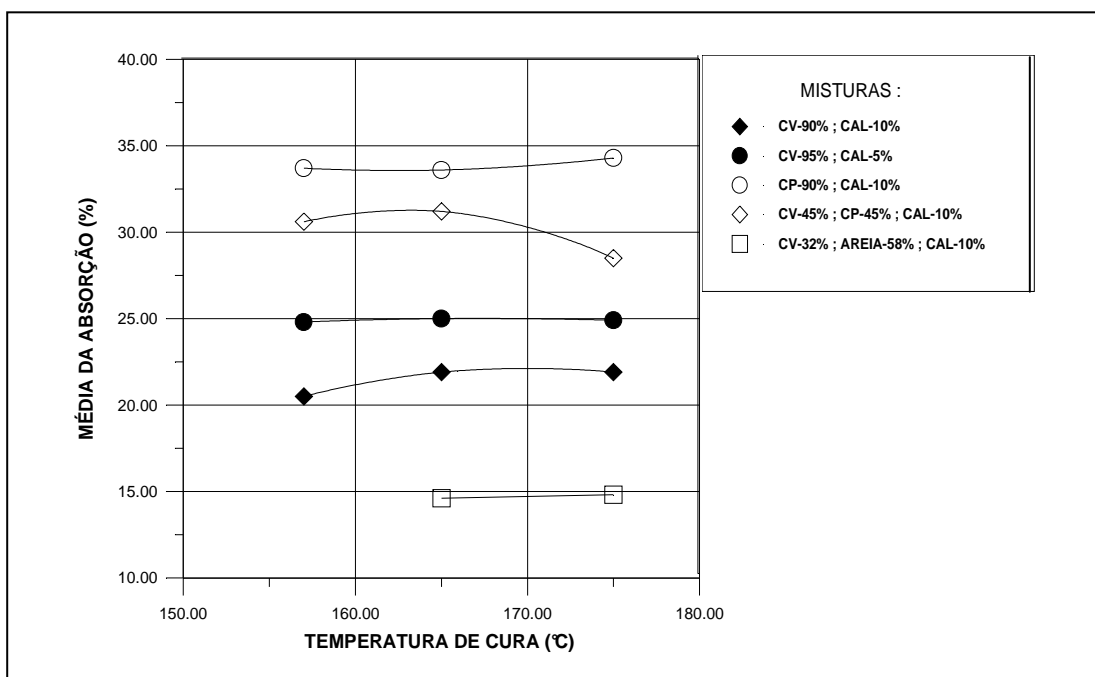


Figura 5.6 Efeito da temperatura na absorção (Energia Modificada)

A Figura 5.7 mostra o efeito do tempo de cura de 4 e 6 horas em função da temperatura na qual foram plotadas as curvas de absorção em corpos-de-prova moldados na energia normal.

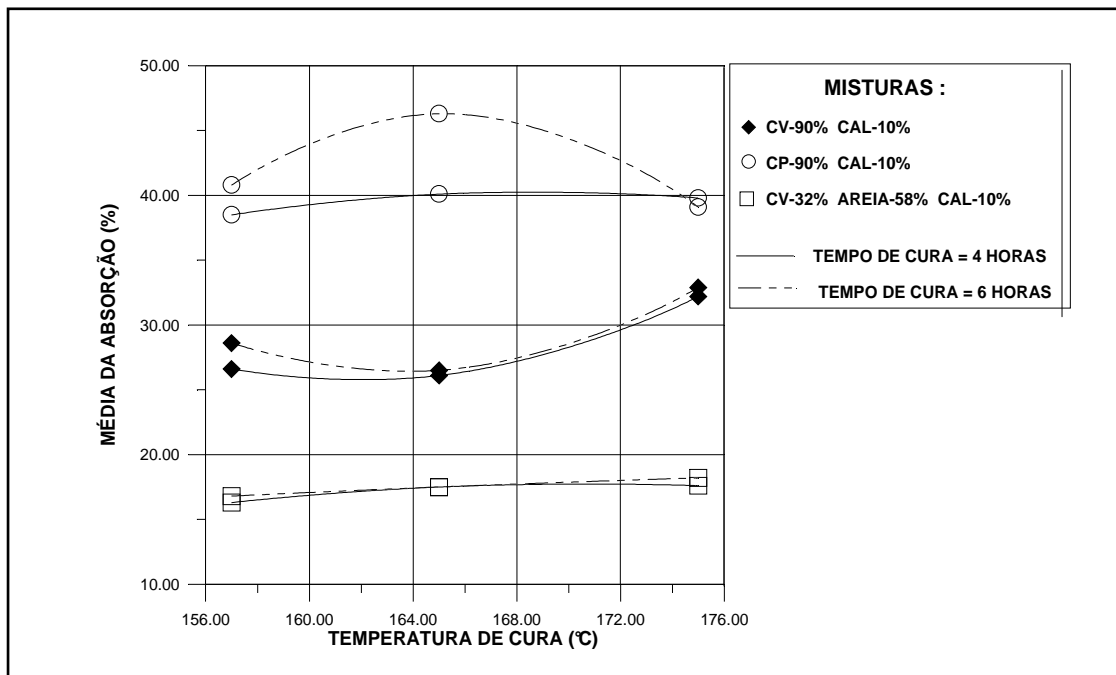


Figura 5.7 Efeito do tempo de cura na absorção (Energia Normal)

Observa-se que não houve alteração de resultados de absorção quando deixamos os corpos-de-prova curando dentro da autoclave para 4 e 6 horas, excessão feita aos corpos-de-prova curados aos 165 °C onde o tempo de 6 horas apresentou os menores resultados de absorção, provavelmente seja erro mais de moldagem ou de leitura de ensaio.

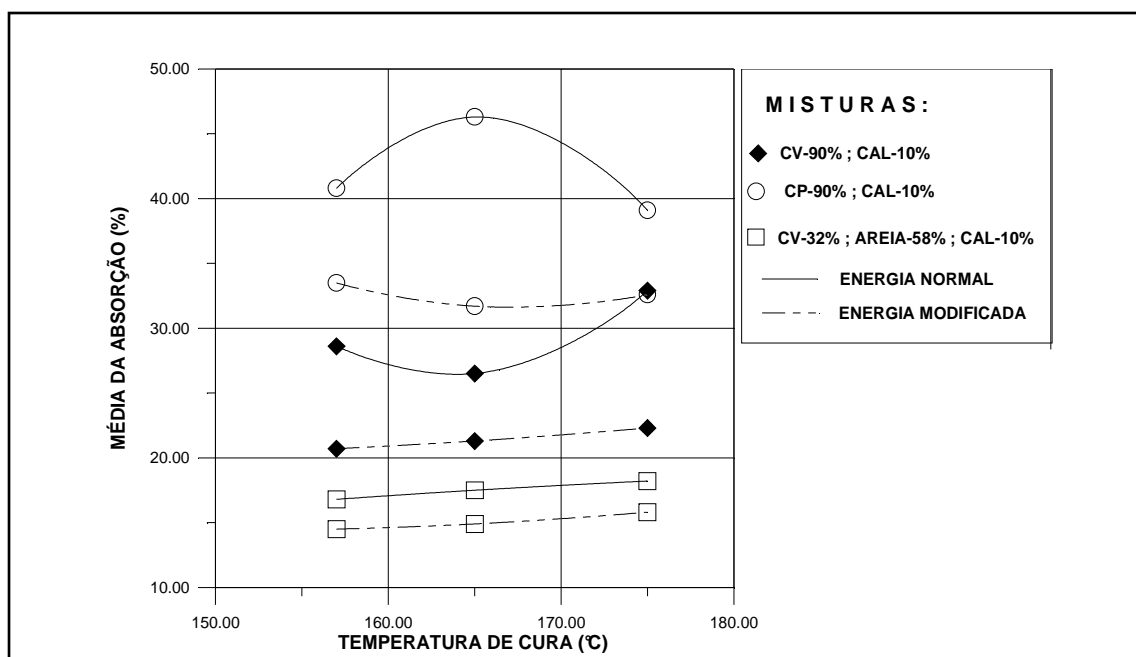


Figura 5.8 Efeito da energia de moldagem na absorção

A Figura 5.8 novamente mostra as curvas dos resultados de absorção para verificar o efeito da energia de moldagem em função da temperatura, para um tempo de cura de 6 horas . Estes resultados comprovam as observações feitas anteriormente, apenas podemos citar, baseando-se nestes resultados, que a mistura 2 onde somente foi utilizada cinza pesada, foi a que apresentou a maior variação de resultados de absorção quando comparamos as curvas da energia normal e modificada.

### 5.2.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) dos fatores considerados significativos na variabilidade dos resultados do ensaio de absorção

Utilizou-se o programa STATGRAFH para confirmar o efeito desses fatores na absorção dos corpos-de-prova. No Quadro 5.5 estão os valores de F calculado e tabelado para um nível de significância  $\alpha=0,05$  encontrados para testar a hipótese de não existência de efeito destes fatores.

Fatores principais	CV-90% CAL-10%		CV-95% CAL-5%		CP-90% CAL-10%		CV-45% CP-45% CAL-10%		CV-32% AREIA-32% CAL-10%	
	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>
Energia	378,4	4,01	897,5	3,97	536,2	4,01	262,8	3,96	762,0	4,28
Temperatura	31,80	3,16	7,80	3,12	3,43	3,16	63,90	3,11	54,90	3,42
Tempo	3,40	4,01	81,20	3,97	6,17	4,01	10,60	3,96	30,00	4,28
Umidade	0,30	4,01	33,40	3,12	35,70	3,16	38,70	3,11	----	----

Quadro 5.5 Resultados de Análise de Variância do ensaio de absorção

Observa-se nos resultados que os fatores na maioria das misturas comprovaram a existência de seus efeitos, ou seja,  $F_{cal} > F_{tab}$ . A energia de moldagem apresentou-se como o efeito com maior significância na variabilidade dos resultados de absorção para todas as misturas , sendo que para as misturas 1 a 4, onde utilizou-se cinza volante e/ou pesada o crescimento da energia (densidade) leva a uma maior aproximação dos grãos favorecendo um maior contato entre as partículas ,fazendo aumentar possivelmente o número de reações pozolânicas (efeito químico) e

favorecendo a redução de absorção dos corpos-de-prova. Para a mistura 5 onde o efeito físico foi maior, a energia de moldagem aumentará o entrosamento entre as partículas do material diminuindo os vazios e conseqüentemente reduzindo a absorção.

Nos fatores de temperatura e tempo de cura, a significância dos efeitos foi bem menor e apresentaram uma alternância de maior valor entre as misturas, aparentemente sem uma lógica. O ideal seria fazer uma análise mineralógica, visto que esses dois parâmetros são os responsáveis pela alteração da forma estrutural e tipos de silicatos/aluminatos de cálcio hidratado que aparecem na reação. Quanto à umidade de moldagem, esta mostrou-se pouco significativa sobre variabilidade dos resultados de absorção.

### **5.2.3. PERDA DE MASSA**

#### **5.2.3.1 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO**

Este ensaio tem como objetivo determinar a integridade física dos materiais. Nesta pesquisa, o objetivo é avaliar o desempenho do efeito químico (reação pozolânica) e físico (curva granulométrica) frente à ação de agentes agressivos, em que os corpos-de-prova são submetidos, por molhagem e secagem num total de 12 ciclos.

Existem outros tipos de agentes para verificar a integridade física, que não foram incluídos. **SABATINE apud EVERETT(1982)** concluiu que blocos sílico-calcário, curados em autoclave, cujo produto final da reação é similar à mistura de cinza e cal, quando encontram-se em um meio ácido, o dióxido de enxofre ataca o agente cimentante da mistura, provocando a decomposição dos hidrossilicatos de cálcio em sulfato de cálcio e sílica hidratada. Por isso eles recomendam que materiais que apresentam essa característica química não entrem em contato com águas residuais (esgoto) ou ar úmido que contenha em níveis elevados, o dióxido de carbono.

No Quadro 5.6 estão apresentados os resultados do ensaio de perda de massa por molhagem e secagem das cinco misturas. Seus valores para cada condição de energia de moldagem, temperatura e tempo de cura são a média das umidades ótima menos 3% e ótima menos 5.

Mistura	Tempo de cura (horas)	Perda de massa ( % )					
		Energia normal			Energia modificada		
		157° C	165° C	175° C	157°C	165°C	175°C
Mistura 1	4	1,80	2,00	1,20	1,60	1,70	1,00
	6	2,90	2,70	3,00	2,20	2,50	2,50
Mistura 2	4	6,40	7,70	6,40	5,70	5,30	5,00
	6	6,60	5,80	4,30	4,20	3,60	2,90
Mistura 3	4	13,00	7,70	5,70	7,70	5,50	4,50
	6	23,50	11,40	6,80	4,60	4,50	4,50
Mistura 4	4	3,70	3,70	4,20	3,10	3,40	2,80
	6	3,80	5,30	3,70	3,10	3,10	2,40
Mistura 5	4	6,00	4,00	3,80	13,92	3,40	3,30
	6	3,70	3,70	3,60	3,70	3,50	3,10

Quadro 5.6 Média dos resultados da perda de massa de corpos-de-prova curados pelo processo de autoclavagem.

Na Figura 5.9 são apresentadas curvas das cinco misturas, referentes à perda de massa em porcentagem quando se varia a temperatura de 155°C a 175°C, para um tempo de permanência de 4 horas, moldados na energia normal do Proctor .



Se observarmos a curva de cada mistura isoladamente, concluímos que praticamente a variação da temperatura não influenciou na perda de massa de materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave. Exceção feita em alguns pontos das curvas de perda de massa das misturas 3, 5 onde seus corpos-de-prova apresentaram microfissuras que poderiam ter influenciado nos resultados de perda de massa.

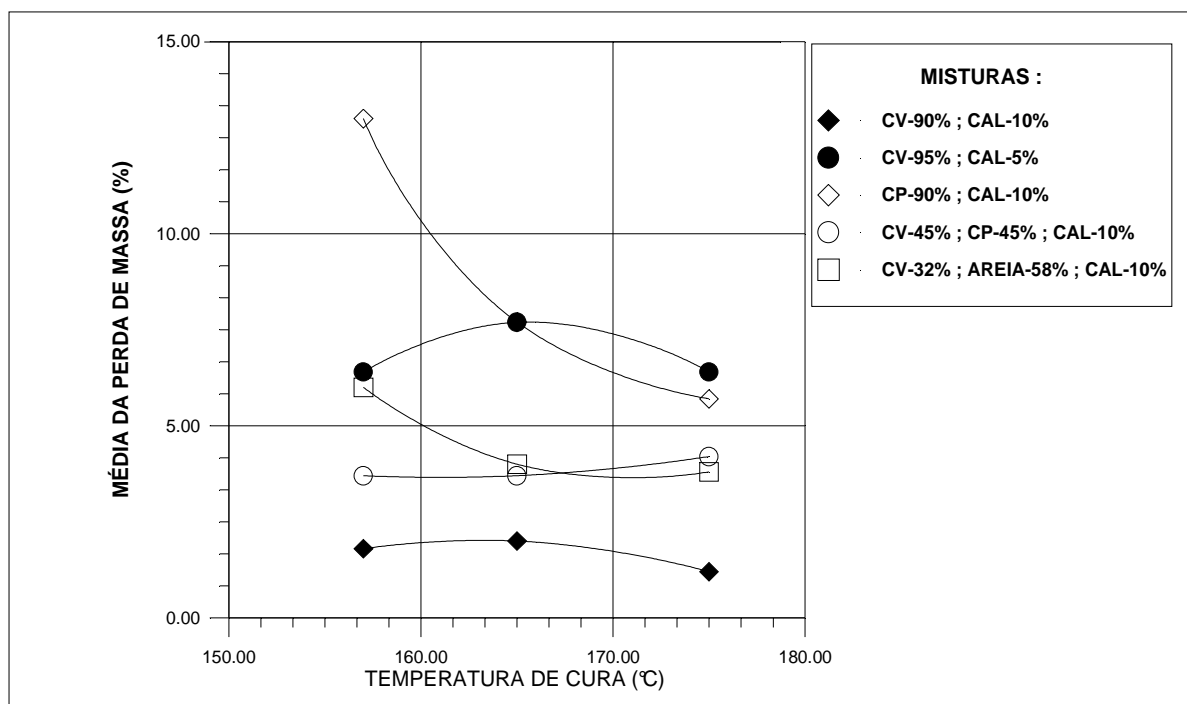


Figura 5.9 Efeito da temperatura na perda de massa (energia normal)

Comparando as curvas das misturas da Figura 5.9, verificamos que a mistura que utilizou somente cinza volante com 10% de cal (mistura 1) foi a que apresentou a menor perda de massa, enquanto a mistura 2 e 3 apresentaram os máximos valores.

A integridade física medida pelo ensaio de perda de massa e representada pelo comportamento das curvas na Figura 5.9 mostra que a quantidade de cal, cinza e sua atividade pozolânica (superfície específica) influenciam-na. O teor de cal e o tipo de cinza são os fatores que demonstram os maiores efeitos para a maior ou menor perda de massa em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave.

A Figura 5.10 mostra as curvas de perda de massa em relação a variação da temperatura, para as misturas 1, 3 e 5. São plotados os resultados do tempo de cura de 4 e 6 horas de cada mistura, para corpos-de-prova moldados na energia normal.

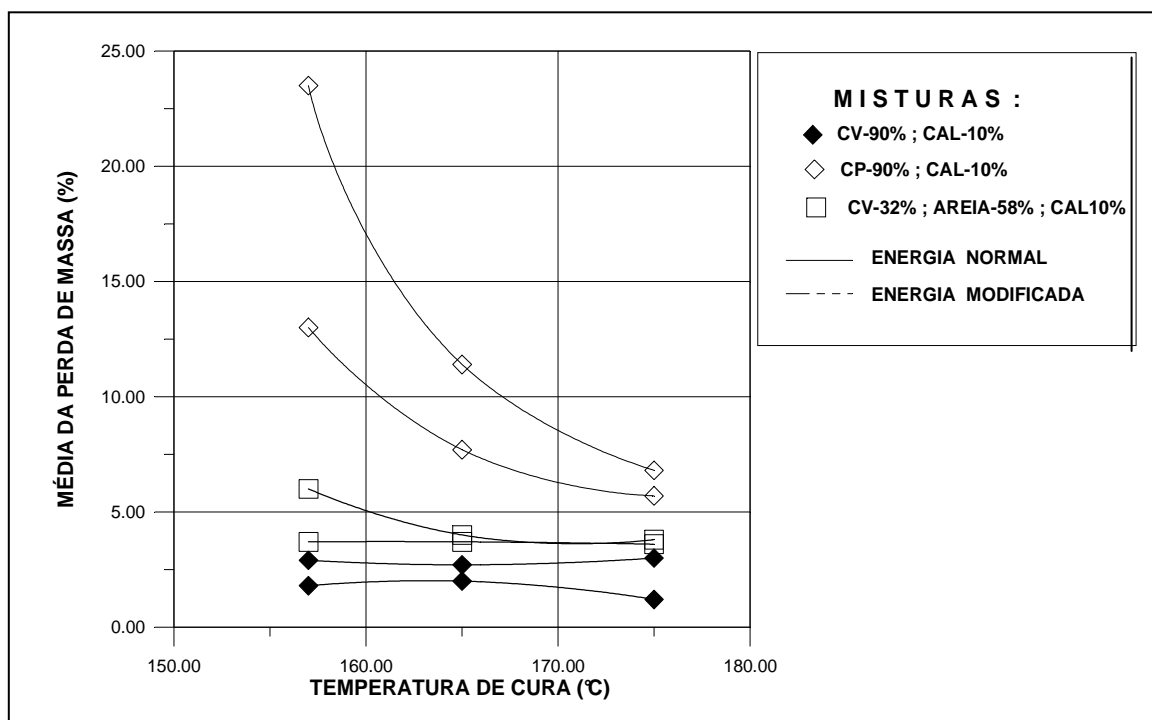


Figura 5.10 Efeito do tempo de cura na perda de massa (energia normal)

Observa-se que as misturas 1 e 5 não foram influenciadas pela variação do tempo de permanência dos corpos-de-prova na autoclave, enquanto a mistura 3 para as temperaturas de 157 e 165 °C mostram que há uma influência deste fator, na qual o tempo de 4 horas apresentou os menores resultados de perda de massa.

Não foram feitas análises químicas para se determinar os tipos de minerais que surgiram após a cura dos corpos-de-prova mas talvez a mistura 3 por apresentar somente cinza pesada e esta apresentar uma atividade pozolânica menor do que a cinza volante gere tipos de silicatos de cálcio que sejam mais influenciados

pelo tempo de cura e pelo processo executivo do ensaio. Devemos levar em conta que o ensaio de perda de massa pode ser fortemente influenciado pelo operador.

Na Figura 5.11 são plotadas as curvas de perda de massa em relação à temperatura com o objetivo de verificar a influência da energia de moldagem, para corpos-de-prova curados em um tempo de 4 horas.

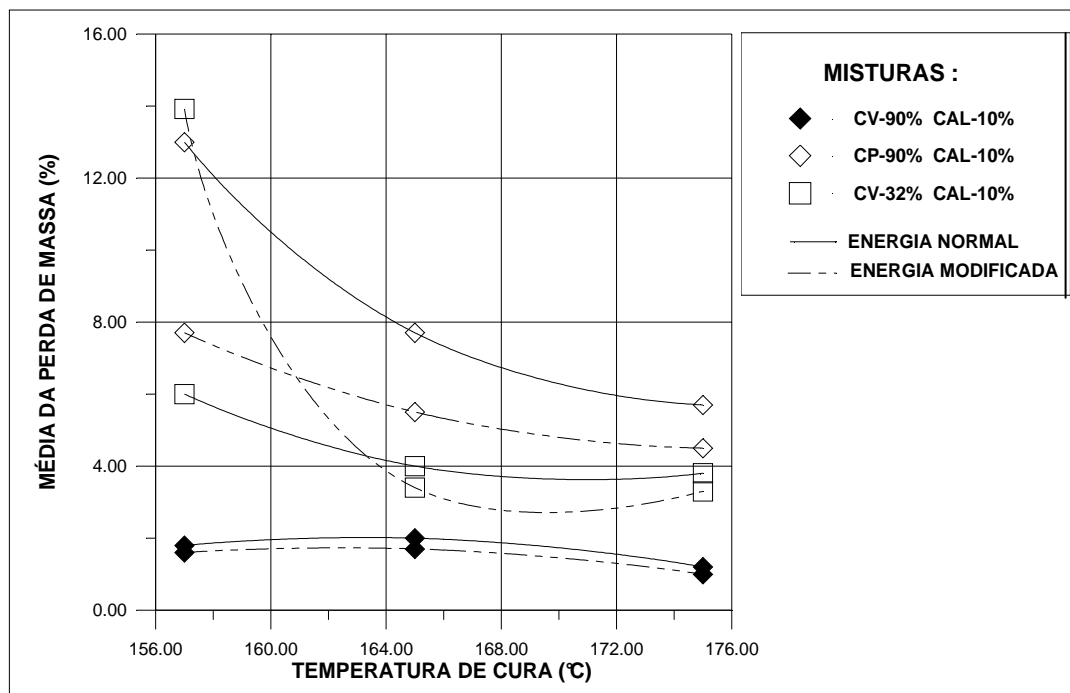


Figura 5.11 Efeito da energia de moldagem na perda de massa

Verifica-se o mesmo comportamento das curvas daquelas mostradas na Figura 5.10, onde a energia não influenciou para as misturas 1 e 5, mas seu efeito foi maior na mistura que na sua composição utilizou cinza pesada (mistura 3). A explicação deste comportamento é o mesmo apresentado para a variação do tempo de cura.

Baseando-se nas Normas de dosagem de misturas de solo-cimento da ABCP, e considerando que pela classificação HRB as misturas 1,2,3,4 são tipo de solo A-4 e a mistura 5 é do tipo A-2-4, a perda máxima permitida é de 10 e 14%, respectivamente. Observando a Figura 5.12, onde são feitas comparações de gráficos de barra dos valores mínimos e máximos de perda de massa das misturas com o

limite máximo permitido da ABCP para solo-cimento, verifica-se que apenas parte dos resultados da cinza pesada não se enquadram nos limites da norma.

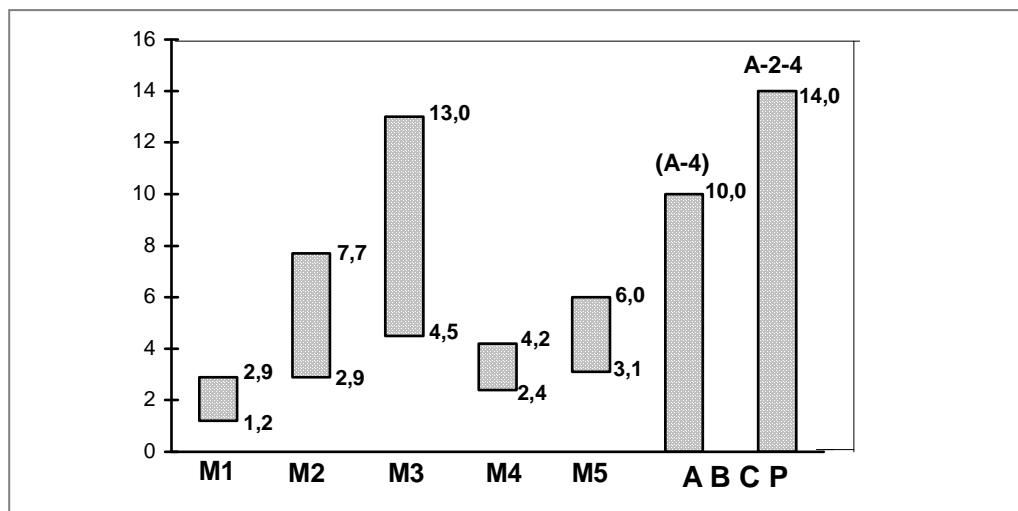


Figura 5.12 Resultados comparativos entre os valores máximos e mínimos das misturas e os limites máximos exigidos pela ABCP

### 5.2.3.2- ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO

Os fatores principais estudados, para se verificar seus efeitos no comportamento do material, quanto a sua perda de massa por molhagem e secagem, foram os mesmos dos outros dois ensaios.

No Quadro 5.7 são mostrados os resultados da análise estatística básica das cinco misturas do ensaio de perda de massa (ensaio de durabilidade).

RESUMO ESTATÍSTICO	Tipos de mistura				
	CV-90% CAL-10%	CV-95% CAL-5%	CP-90% CAL-10%	CV-45% CP-45% CAL-10%	CV-32% AREIA-58% CAL-10%
MÉDIA(%)	2,10	5,20	7,00	3,70	3,50
MEDIANA(%)	2,10	5,20	6,30	3,70	3,40
DESVIO PADRÃO (%)	0,58	1,53	3,05	0,67	0,83
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO(%)	27,61	29,42	43,57	18,10	23,71

Quadro 5.7 Resultados estatísticos do ensaio de perda de massa de CPs curados pelo processo ATC.

O valor da média traduz os resultados dos gráficos apresentados anteriormente, onde observa-se que a média dos resultados da perda de massa por molhagem e secagem das misturas que se utilizaram de cinza volante com um teor de 10% de cal foram as que obtiveram as menores perdas.

Os valores altos do coeficiente de variação para todas as misturas indicam apenas que alguns fatores foram significativos no seu efeito de variabilidade em relação aos resultados de perda de massa das misturas.

No Quadro 5.8 são mostrados os valores de F (a um nível de significância  $\alpha=0,05$ ), para testar a hipótese de não-existência do efeito dos fatores considerados como principais. Essa tabela é complementada com o valor da variância do resíduo (efeitos de fatores que não foram considerados na análise e estão distribuídos no erro); os valores de F para verificar a influência de um fator sobre outro (interação) e o valor da variância em porcentagem em relação a variância total.

Tipos de Mistura	Dados Estatísticos	FATORES PRINCIPAIS				RESÍDUO	INTERAÇÃO
		ENERGIA	TEMPERATURA	TEMPO	UMIDADE		
CV-90% Cal-10%	$F_{cal}$	12,00	6,40	223,6	6,60	-	3,76
	$F_{tab}$	4,21	3,35	4,21	4,21	-	2,25
	Efeito(%)	4,14	3,10	82,40	2,07	0,52	7,77
CV-95% Cal-5%	$F_{cal}$	37,10	6,40	22,30	$4,10 \times 10^{-4}$	-	2,40
	$F_{tab}$	4,21	3,35	4,21	4,21	-	2,25
	Efeito(%)	46,65	11,46	29,25	0,53	12,57	0,53
CP-90% Cal-10%	$F_{cal}$	44,80	13,30	$9 \times 10^{-3}$	5,30	-	7,80
	$F_{tab}$	4,21	3,35	4,21	4,21	-	2,25
	Efeito(%)	47,99	20,05	1,08	4,60	22,55	3,73
CV-45% CP-45% Cal-10%	$F_{cal}$	60,70	6,50	0,16	4,00	-	3,50
	$F_{tab}$	4,14	3,29	4,14	4,14	-	2,18
	Efeito(%)	61,51	8,48	0,86	3,15	24,70	1,30
Ar-58% CV-32% Cal-10%	$F_{cal}$	17,30	4,80	5,80	-	-	4,30
	$F_{tab}$	4,26	3,40	4,26	-	-	2,62
	Efeito(%)	37,94	11,97	10,30	-	36,11	3,68

Quadro 5.8 Resultados de Análise de Variância da perda de massa

### **Mistura 1**

Observa-se que para todos os fatores,  $F_{cal} > F_{tab}$ , significa dizer que a hipótese de não existência do efeito dos fatores foi rejeitada, ou seja, os efeitos dos fatores são significativos na variabilidade dos resultados de perda de massa. O fator que mais contribui para a variabilidade dos resultados foi o tempo de cura, sendo que 82,40% da variância total é devido a este fator.

### **Mistura 2**

Nesta mistura a quantidade de cal foi reduzida por igual valor daquela acrescida para a cinza volante. Observa-se a mudança de comportamento do material verificando que o fator de maior efeito em relação a variabilidade dos resultados de ensaio agora é a energia de moldagem, na qual 46,65% da variância total é devido a variância deste fator. Único fator em que seu efeito não foi significativo, isto é,  $F_{cal} < F_{tab}$ , foi a umidade de moldagem.

### **Mistura 3**

Nesta mistura apenas o fator tempo de cura mostrou que seu efeito não foi significativo para a variabilidade dos resultados de perda de massa, ou seja,  $F_{cal} < F_{tab}$ . O fator com maior influência na variabilidade dos resultados foi a energia de moldagem em que 47,99% da variância total é devido a este fator.

### **Mistura 4**

Observa-se que esta mistura mostra que dos quatro fatores, apenas a energia de moldagem e temperatura foram as que rejeitaram a hipótese de não-existência de seus efeitos, ou seja,  $F_{cal} > F_{tab}$ . O fator energia de moldagem foi aquele que mais influenciou nos resultados de ensaio, 61,50% da variância total é devido a este fator.

## **Mistura 5**

Os fatores energia de moldagem, temperatura e tempo de cura rejeitaram a hipótese de não-existência de seus efeitos, ou seja,  $F_{cal} > F_{tab}$ , sendo que, os corpos-de-prova conseguiram ser moldados apenas na umidade ótima reduzida de 3%. Verifica-se que o fator energia foi o que mais contribuiu para o efeito de variabilidade dos resultados, onde 37,94% da variância total é devido a este fator.

O ensaio de perda de massa por molhagem e secagem pode apresentar dispersões significativas de seus resultados em relação à média, porque a determinação da perda de material é feita após a aplicação de escovamento realizada pelo laboratorista em 12 ciclos, isto significa que poderá existir uma influência deste sobre os resultados de ensaio, pois dificilmente será aplicada uniformemente a força de escovamento sobre os CPs, talvez seja a explicação dos valores altos dos resíduos observados no Quadro 5.8, nas misturas 3, 4 e 5.

### **5.2.3.2.1 Comparação múltipla de médias**

A comparação múltipla de médias é realizada quando existem diferenças significativas do efeito do fator estudado, ou seja, quando a hipótese de não existência do efeito dos fatores foi rejeitada, verifica-se quais dos níveis dentro do grupo difere significativamente. O estudo só foi realizado para o fator temperatura, pois foi o único fator nesta primeira bateria de ensaios que se empregou três níveis de temperatura.

As Figuras 5.13 a 5.17 apresentam os gráficos em barra das comparações múltiplas de média dos resultados de perda de massa por molhagem e secagem para as três temperaturas das cinco misturas.

Nas Figuras 5.13 e 5.14 somente foi usada cinza volante com cal, variando a proporção da mistura e em ambas a maior temperatura (175 °C) diferenciou significativamente da média das outras duas. Os valores de perda de

massa para os CPs curados nas três temperaturas estão abaixo dos limites da ABCP. Então, pode-se concluir que a melhor temperatura de cura para os ensaios de perda de massa foi a T1 se analisarmos em relação a qualidade e economia.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 foi empregada cinza pesada em proporções diferentes, sendo que as temperatura T1 e T2 diferenciaram significativamente para as misturas 3 e 4, respectivamente. As melhores temperaturas de cura que podem ser utilizadas no ensaio de perda de massa das misturas 3 e 4 são as temperaturas T3 e T1, respectivamente, pois estas geram CPs de boa qualidade e são as mais econômicas.

Na Figura 5.17 foi empregada areia e cinza volante e, distintamente dos resultados das outras quatro misturas, as temperaturas T1 e T3 diferenciaram significativamente, sendo que a temperatura T2 não diferenciou significativamente das outras duas. A escolha da melhor temperatura de cura para o ensaio de perda de massa da mistura 5 é a T1, sempre analisando-se em relação a qualidade e economia.

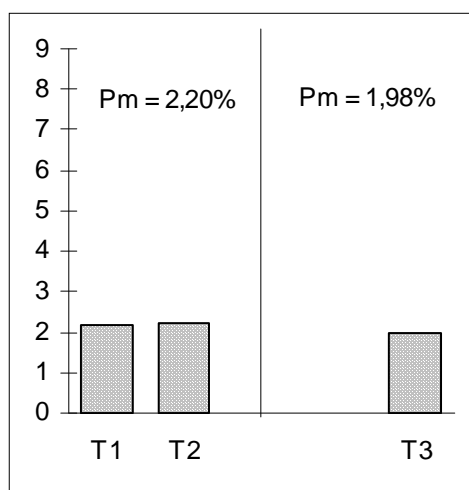


Figura 5.13 Perda de massa da mistura 1 - C.M.M.

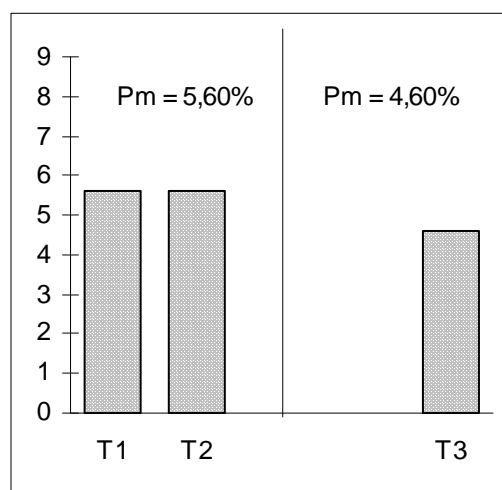


Figura 5.14 Perda de massa da mistura 2 - C.M.M.



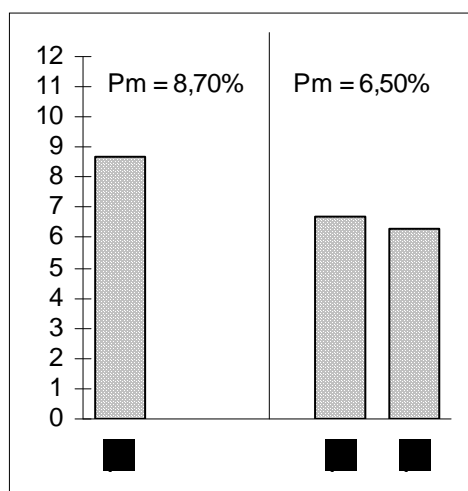


Figura 5.15 Perda de massa da mistura 3 - C.M.M.

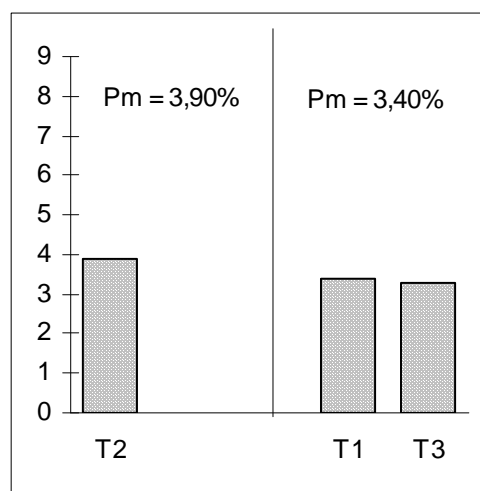


Figura 5.16 Perda de massa da mistura 4 - C.M.M.

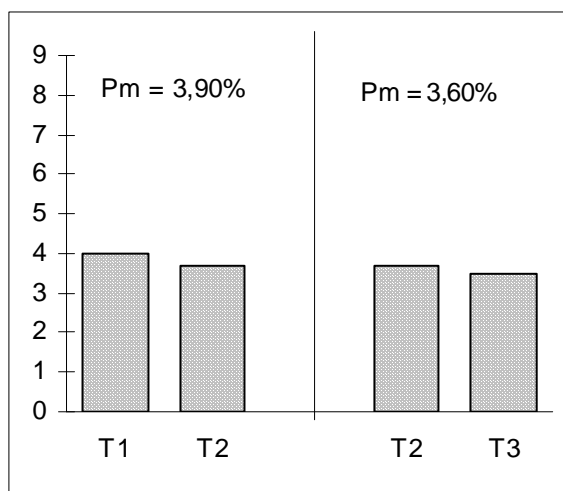


Figura 5.17 Perda de massa da mistura 5 - C.M.M.

T1 = 157 ° C

T2 = 165 ° C

T3 = 175 ° C

### 5.3. SEGUNDA ETAPA

Baseando-se nas análises dos resultados da primeira bateria de ensaios (primeira etapa), foram realizados experimentos com dois tipos de cura com o objetivo de se verificar a eficiência da estabilização pozolânica ao passarmos de um tipo de cura de temperatura ambiente (21°C) para um tipo de cura com temperaturas maiores do que a ambiente (143 a 188 °C). Os fatores principais responsáveis pela variabilidade dos resultados dos ensaios indicados na primeira bateria de ensaios tiveram seus níveis aumentados para que verificássemos melhor o comportamento mecânico e físico dos resultados de ensaios.

As misturas utilizadas no processo de cura pela câmara à temperatura constante (CTC) e autoclave (ATC) estão mostradas no Quadro 5.9 , que segue :

TIPO DE CURA	TIPO DE MISTURA	CINZA VOLANTE (%)	CINZA PESADA (%)	AREIA (%)	CAL (%)
ATC/CTC	1	90			10
CTC	2		90		10
ATC/CTC	3	20	70		10
CTC/ATC	4	32		58	10

Quadro 5.9 Misturas empregadas na segunda etapa

#### 5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (PRIMEIRA PARTE)

##### 5.3.1.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO

Nos Quadros 5.10 a 5.13 estão apresentadas as médias dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das quatro misturas e no Quadro 5.14 são mostradas as relações de resistência entre os resultados do processo de cura da câmara à temperatura constante para 28 e 60 dias e os resultados do processo de cura por autoclave.

CV-90% CAL-10%						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)						
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (horas)	ENERGIA NORMAL	ENERGIA INTERM.1	ENERGIA INTERM.2	ENERGIA MODIFICADA	MÉDIA
149	2	-	4,70	5,50	6,80	5,70
	4	5,20	5,00	6,80	7,20	6,00
	6	6,30	6,20	7,40	7,60	6,90
MÉDIA		5,80	5,30	6,60	7,20	6,20
161	2	4,00	4,50	4,60	6,00	4,80
	4	-	7,00	8,10	8,50	7,90
	6	6,00	7,00	8,80	9,80	7,90
MÉDIA		5,00	6,20	7,20	8,10	6,90
175	2	5,80	6,00	6,50	7,70	6,50
	4	-	6,10	-	7,20	6,70
	6	-	7,00	6	9,90	7,60
MÉDIA		5,80	6,40	6,40	8,30	6,90
188	2	4,50	6,70	6,60	8,90	6,70
	4	-	6,70	6,50	8,70	7,30
	6	5,50	7,30	7,20	8,70	7,20
MÉDIA		5	6,90	6,80	8,80	17,10
MÉDIA TOTAL		5,40	6,20	6,80	8,10	6,80

Quadro 5.10 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado .

CV-20% CP- 70% CAL-10%						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)						
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (horas)	ENERGIA NORMAL	ENERGIA INTERM. 1	ENERGIA INTERM. 2	ENERGIA MODIFICA	MÉDIA
149	2	3,80	6,60	5,10	5,40	5,20
	4	5,20	5,40	6,00	7,10	6,00
	6	4,70	5,30	6,00	5,30	5,30
MÉDIA		4,60	5,80	5,70	5,90	5,50
161	2	3,50	5,40	6,50	7,00	5,60
	4	5,50	5,90	6,90	7,30	6,40
	6	5,10	5,80	6,70	7,30	6,20
MÉDIA		4,70	5,70	6,70	7,20	6,10
175	2	5,30	5,20	6,50	7,30	6,10
	4	-	-	-	6,10	6,10
	6	5,40	6,50	6,10	6,10	6,00
MÉDIA		5,30	5,90	6,30	6,50	6,10
188	2	5,20	5,00	6,60	6,60	5,90
	4	5,90	5,90	6,50	6,50	6,20
	6	6,00	5,90	7,20	7,90	6,80
MÉDIA		5,70	5,60	6,80	7,00	6,30
MÉDIA TOTAL		5,10	5,70	6,30	6,70	6,00

Quadro 5.11 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado.

CV - 32% ; AREIA - 58% ; CAL-10%						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)						
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (horas)	ENERGIA NORMAL	ENERGIA INTERM.1	ENERGIA INTERM.2	ENERGIA MODIFICA	MÉDIA
149	2	4,70	6,00	7,30	8,60	6,65
	4	7,60	8,40	8,20	9,50	8,42
	6	6,80	7,50	8,10	11,90	8,58
MÉDIA		6,40	7,30	7,90	10,00	7,90
161	2	6,50	7,70	8,00	9,70	7,98
	4	6,20	8,00	9,70	10,70	8,65
	6	8,00	9,00	10,50	12,30	9,95
MÉDIA		6,90	8,20	9,40	10,90	8,85
175	2	7,10	8,70	9,30	10,10	8,80
	4	7,60	9,80	10,80	12,10	10,08
	6	9,60	8,10	11,30	13,10	10,53
MÉDIA		8,10	8,90	10,50	11,70	9,80
188	2	9,10	10,70	11,80	13,10	11,18
	4	7,60	8,90	12,00	14,50	10,75
	6	10,20	11,70	12,00	14,50	12,10
MÉDIA		9,00	10,40	11,90	14,00	11,33
MÉDIA TOTAL		7,60	8,70	9,90	11,70	9,48

Quadro 5.12 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo de autoclave.

TIPO DE MISTURA	TEMPO DE CURA (DIAS)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES -(MPa)				
		ENERGIA NORMAL	ENERGIA INTERM.1	ENERGIA INTERM.2	ENERGIA MODIFICAD A	MÉDIA
CV-90% CAL-10%	7	0,80	1,20	1,30	1,40	1,20
	14	2,00	2,40	2,70	2,40	2,40
	28	3,20	3,60	4,10	4,60	3,90
	60	6,00	6,40	6,80	8,10	6,80
MÉDIA		3,00	3,40	3,70	5,00	3,60
CP-90% CAL-10%	7	0,50	0,80	0,90	1,00	0,80
	14	1,40	1,80	1,50	1,70	1,60
	28	2,20	2,80	2,90	2,00	2,50
	60	4,60	5,90	5,30	-	5,30
MÉDIA		2,20	2,80	2,70	-	2,60
CP-20% CV-70% CAL-10%	7	0,90	1,10	1,40	1,50	1,20
	14	1,60	1,90	2,40	2,40	2,10
	28	3,50	3,60	4,40	4,00	3,90
	60	4,80	6,60	7,00	6,20	6,10
MÉDIA		2,70	3,30	3,60	3,50	3,30
CV-32% AREIA-58% CAL-10%	7	0,80	0,90	1,10	1,60	1,10
	14	1,50	2,00	2,10	2,30	2,00
	28	3,00	3,50	4,20	5,00	4,00
	60	3,80	4,90	5,90	4,90	4,90
MÉDIA		3,70	2,80	3,30	3,50	3,00
MÉDIA TOTAL		2,90	3,08	3,32	4,00	3,12

Quadro 5.13 Resultados de ensaios de resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo autoclavado.

TIPO DE MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
	ENERGIA NORMAL					ENERGIA MODIFICADA				
	CTC(A)		*ATC (B)	A <sub>28</sub> /B	A <sub>60</sub> /B	CTC(A)		*ATC (B)	A <sub>28</sub> /B	A <sub>60</sub> /B
	28 dias	60 dias				28 dias	60 dias			
CV-90% CAL-10%	2,20	4,60	5,40	0,59	0,85	4,60	8,10	8,10	0,57	1,0
CV-20% CP-70% CAL-10%	3,50	4,80	5,10	0,69	0,94	4,00	6,20	6,70	0,60	0,92
•A.-58% CV-32% CAL-10%	3,00	3,80	7,60	0,40	0,50	4,20	5,90	11,70	0,36	0,50

Quadro 5.14 Relação dos resultados de resistências à compressão simples dos dois processos de cura.

\* Média das quatro temperaturas e dos três tempos de cura do processo ATC.

•A. = AREIA

#### 5.3.1.1.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)

Este processo de cura utiliza temperaturas acima da ambiente, com a finalidade de acelerar as reações pozolânicas e a forma estrutural dos elementos gerados por este tipo de cura. Os Quadros 5.10 a 5.12 apresentam os resultados de resistência à compressão simples das misturas 1, 3 e 4. Observa-se que a média total de todas as misturas apresenta uma evolução da resistência com um aumento da energia de moldagem, sendo que a mistura que apresentou os maiores valores foi aquela em que na sua composição utilizou areia.

Os ganhos de resistência na comparação de corpos-de-prova moldados na energia normal e modificada para os resultados da média total foi de 33%, 24% e 35% para as misturas 1, 3 e 4, respectivamente. Observa-se que repete-se o comportamento do estudo anterior (primeira etapa), onde o tipo de cinza utilizado influencia na resistência de materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave. Podemos observar também que mesmo a mistura 1 tendo um teor de cinza volante praticamente tres vezes superior ao da mistura 4 e com os mesmos teores de cal apresentou resultados de resistência menores, tudo leva a crer

que houve reação da sílica presente na areia com o hidróxido de cálcio disponível na cal.

Em geral as três misturas curadas por autoclave (ATC) mostraram que há um ganho de resistência no aumento dos níveis dos tres fatores principais (energia, temperatura e tempo), mas para verificarmos se os efeitos são significativos na variabilidade dos resultados de ensaio, somente as análise de variância darão este tipo de resposta.

Provavelmente a temperatura e o tempo sejam responsáveis pelo aparecimento de novos silicatos/aluminatos de cálcio e pelo desenvolvimento da forma estrutural do elemento e a energia de moldagem pela maior quantidade de reações pozolânicas entre as partículas.

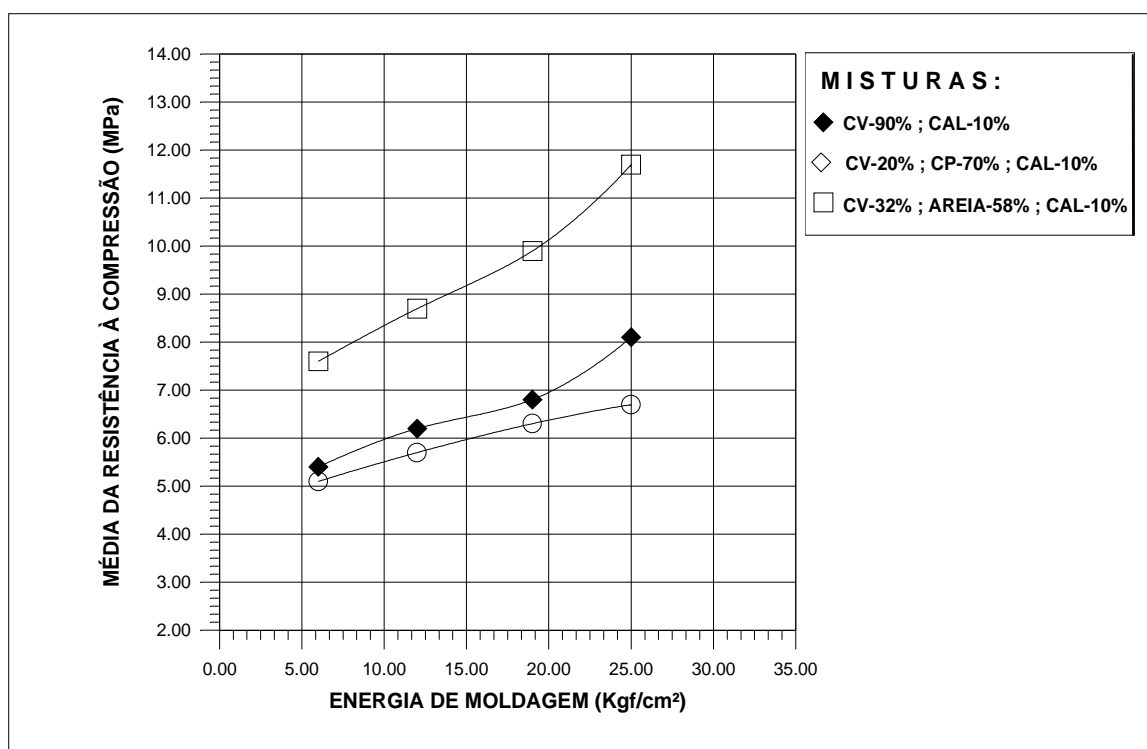


Figura 5.18 Efeito da energia de moldagem na RCS

Na Figura 5.18 são plotadas as curvas de resistências à compressão simples das três misturas com a finalidade de se verificar o efeito dos quatro níveis

de energia de moldagem . Foram determinados a média das temperaturas e tempos de cura para os pontos das curvas.

O comportamento para as três misturas tende a uma proporcionalidade linear positiva, indicando que o crescimento da energia de moldagem gera a um aumento da resistência à compressão simples para materiais estabilizados e curados em autoclave. O ganho de resistência é uma resultante do efeito físico que está relacionado com a curva granulométrica da mistura e o efeito químico que está relacionado com a reação pozolânica da mistura. Provavelmente por se tratar de cura com temperaturas acima da ambiente, a importância do efeito químico torna-se importante para estes três tipos de misturas, pois este fator tende a acelerar e mudar a forma estrutural que poderá gerar aumento de resistência.

Verifica-se também que ao compararmos as curvas da Figura 5.18, as maiores resistências para as quatro níveis de energia estão todas localizadas naquela mistura que utilizou na sua composição areia (mistura 4), o que nos leva a sugerir para materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave:

i - A escolha das características físicas e químicas da areia são importantes para que ocorram reações químicas com o hidróxido de cálcio disponível em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperaturas acima da ambiente, neste trabalho acima de 149 °C ;

ii - A proporção de 70% de cinza pesada com 20% de cinza volante foi suficiente para que, em média, a curva de resistência da mistura 3 aproximasse a da mistura 1 ;

iii- Para todas as misturas a variação da resistência à compressão simples é diretamente proporcional à energia de moldagem.

. Nos estudos anteriores a mistura 4 apresentou resultados de resistência inferiores aos da mistura 1, porém agora o comportamento inverteu-se. Uma das explicações estaria na variação da superfície específica da cinza volante em

que a faixa observada foi de 2500 a 3500 cm<sup>2</sup>/g, sendo que a redução da superfície específica gera menos reações e por consequência decresce a resistência.

Na Figura 5.19 são plotadas as curvas de resistências das três misturas para verificarmos o efeito a temperatura de cura. Os pontos observados da curva são a média da temperatura e energia de moldagem.

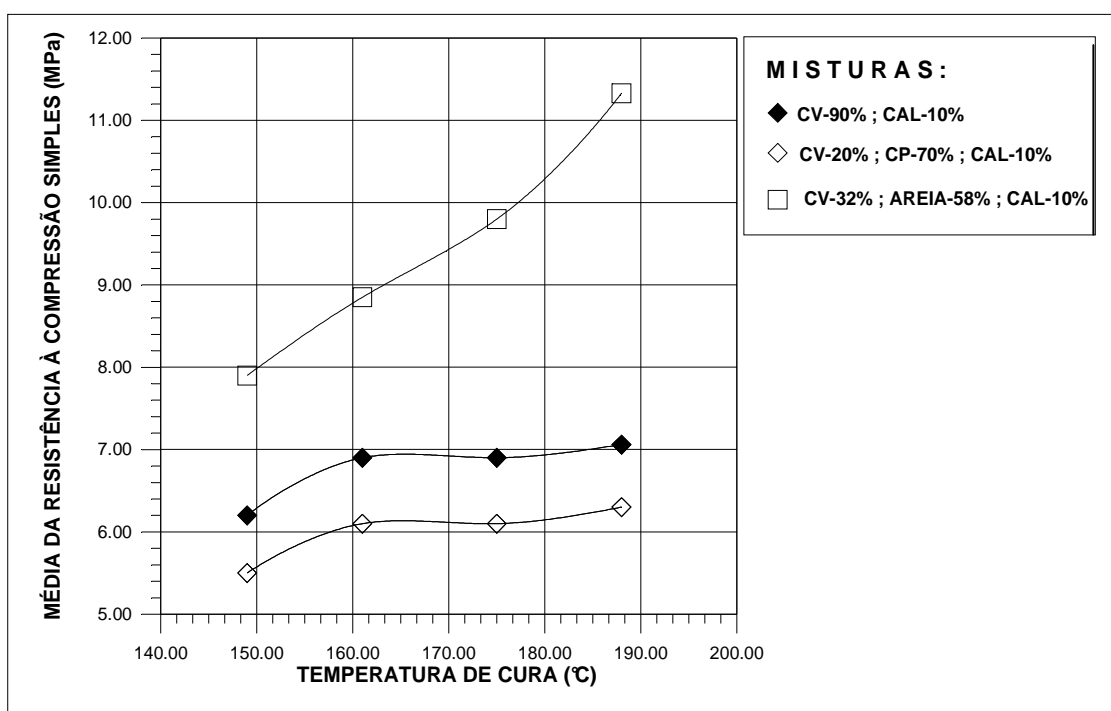


Figura 5.19 Efeito da temperatura de cura na RCS

Observa-se que o comportamento é semelhante ao das curvas da Figura 5.17. As misturas 1 e 3 apresentam valores próximos, com maiores ganhos de resistência para a mistura 1, comprovando que a cinza volante apresenta maior atividade pozolânica e que este fator influencia na resistência à compressão.

Podemos constatar também que as curvas das misturas 1 e 3 tendem a uma assíntota, isto é, resistência constante a partir da temperatura de 165 °C, mas nada garante este comportamento para temperaturas maiores, pois se houver mudanças de grupos de silicatos/aluminatos de cálcio poderá haver variação na resistência à compressão de materiais estabilizados pozolanicamente e curados com



temperatura acima da ambiente, como foi verificado nas pesquisas realizadas por **TAYLOR (1965)**.

A Figura 5.20 mostra o efeito do tempo de cura para as três misturas, onde o resultado de cada tempo são as médias das temperaturas e energias de moldagem. Este fator é um dos responsáveis pela variação dos grupos dos silicatos de cálcio e a sua forma estrutural.

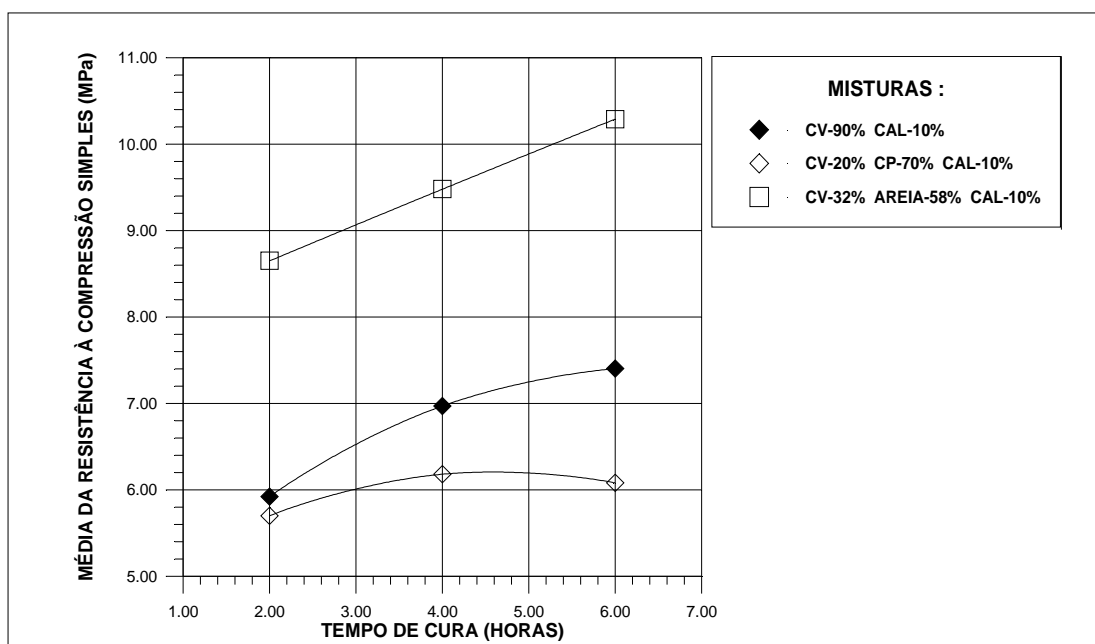


Figura 5.20 Efeito do tempo de cura na RCS

Observa-se que para as misturas 1 e 3, a partir do tempo de 4 horas, a curva do comportamento da resistência aproxima-se de uma curva assintótica, enquanto que para a mistura 4 a tendência é que, com o aumento do tempo de cura, haja um aumento proporcional na resistência. Este comportamento talvez esteja ligado aos tipos de minerais que se formam da reação química da sílica presente na areia com o hidróxido de cálcio disponível na cal, somado à parcela do efeito físico que esta ligado à textura, distribuição de poros etc.

### 5.3.1.1.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)

Este tipo de processo de cura foi estudado em trabalhos anteriores mas, como ele é realizado em temperatura ambiente ( $\pm 21^{\circ}\text{C}$ ), servirá como comparativo, para avaliarmos o seu comportamento mecânico com aqueles corpos-de-prova curados pelo processo de autoclavagem nas mesmas condições de moldagem.

Na Figura 5.21 são plotados as curvas de resistências de corpos-de-prova estabilizados pozolanicamente, com a finalidade de se verificar o efeito do tempo de cura. Os pontos das curvas são a média das quatro energias de moldagem.

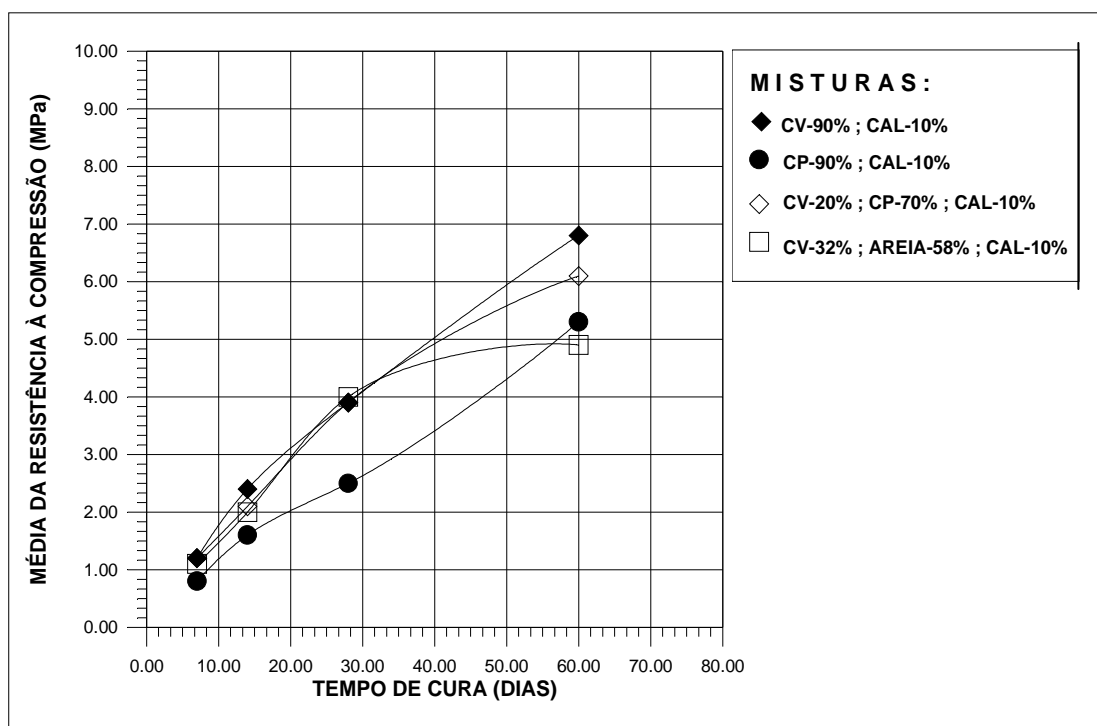


Figura 5.21 Efeito do tempo de cura na RCS

Como era de se esperar para todas as misturas, o tempo de cura é diretamente proporcional à resistência de materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperaturas ambientes.

Na mistura 4, a presença da areia na composição tem como objetivo aumentar a parcela do efeito físico, para materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperatura ambiente, pois este agregado é inerte a baixas temperaturas.

Pode-se observar que até os 28 dias as misturas 1, 3 e 4, em média, geraram praticamente os mesmos resultados de resistência à compressão, enquanto a mistura 2 que se utilizou de cinza pesada apresentou os menores resultados de resistência. Baseando-se neste comportamento até os 28 dias, conclui-se que :

i - Para este tipo de cura o ganho ou perda de resistência para materiais estabilizados pozolanicamente dependerá do tipo de cinza (superfície específica) ;

ii - A proporção de 70% de cinza pesada e 20% de cinza volante na mistura 3 bastou para que gerasse resistência igual a mistura 1, sabendo-se que a cinza pesada também teve sua parcela de ganho de resistência devido à reação pozolânica com a cal;

iii - Nesta temperatura a areia é um material inerte, isto é, não há liberação de sílica presente neste agregado para que reaja com a cal. O teor de cinza volante foi a terça parte daquele utilizado na mistura 1, mas até os 28 dias praticamente obtiveram as mesmas resistências, fazendo crer que a parcela do efeito físico (textura, distribuição dos poros etc) foi a mais significativa nos resultados de resistência do que as outras duas misturas, onde a parcela mais atuante foi o efeito químico (reação pozolânica).

Analisando a Figura 5.21 observamos ainda que, aos 60 dias de cura começa existir uma distinção de resultados de resistências entre as misturas. Observa-se nas curvas que há uma tendência de continuar aumentando a resistência para as misturas 1, 2 e 4, enquanto que para a mistura que na sua composição empregou areia a curva começa a apresentar um comportamento assintótico.

Baseando-se no comportamento dessas curvas leva-se a concluir que para materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperatura ambiente o fator de maior responsabilidade ao longo do tempo para os maiores ganhos de

resistência é o efeito químico, logo torna-se importante escolher para a mistura a cinza que apresenta a melhor atividade pozolânica. Nesta pesquisa não foi estudado o tipo de cal e o seu teor, que também são fatores que influenciam na resistência à compressão.

Na Figura 5.22 são plotadas as curvas de resistências das quatro misturas com o objetivo de verificar o efeito da energia de moldagem para o tempo de cura de 28 dias.

Todas as curvas são diretamente proporcionais à resistência, excessão feita aos resultados moldados na energia de moldagem das misturas 2 e 3, que talvez tenham apresentado problemas em sua moldagem.

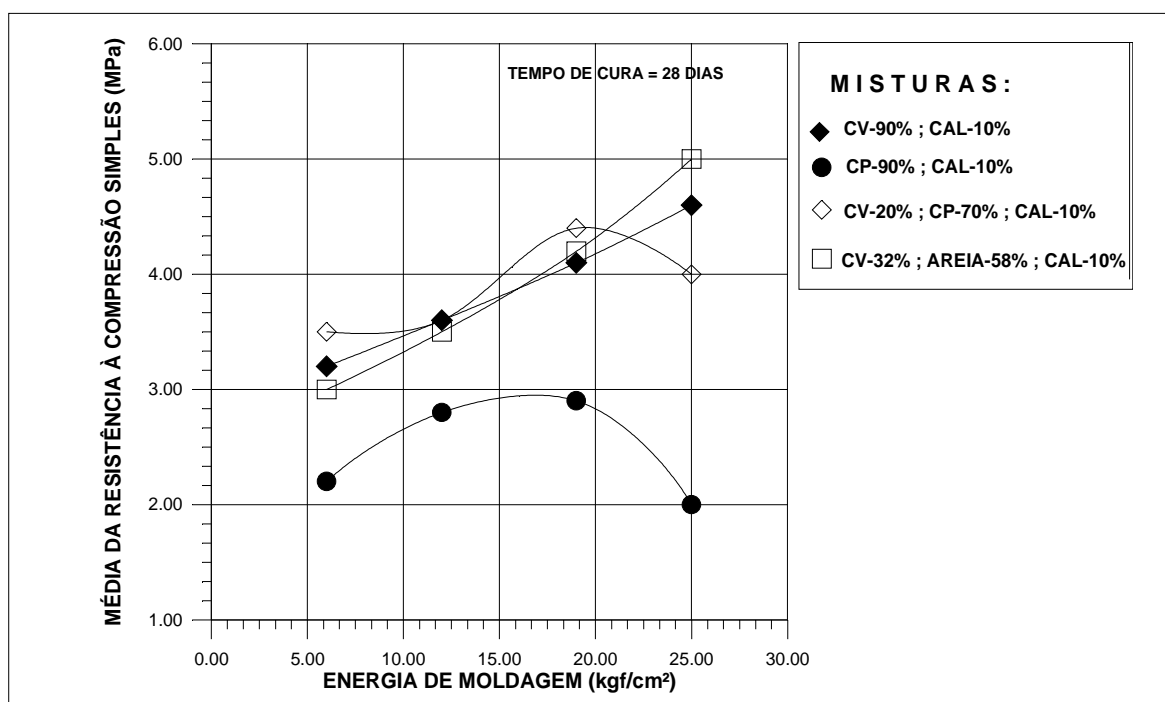


Figura 5.22 Efeito da energia de moldagem na RCS

O comportamento destas curvas em relação à variação da energia de moldagem é muito semelhante daquele apresentado ao longo do tempo. A finalidade da energia de moldagem, para materiais que são estabilizados quimicamente, é de aproximar as partículas das misturas para que haja um maior contato e como consequência um maior número de reações químicas e redução nos vazios.

Se compararmos somente a mistura 1 e 2, voltamos a comprovar que o tipo de cinza (superfície específica) é o fator preponderante para o ganho de resistência ao longo de energia de moldagem.

Nas Figuras 5.23 e 5.24 são plotadas as curvas de resistência para cada energia de moldagem ao longo do tempo de cura para as misturas 1 e 4 , respectivamente.

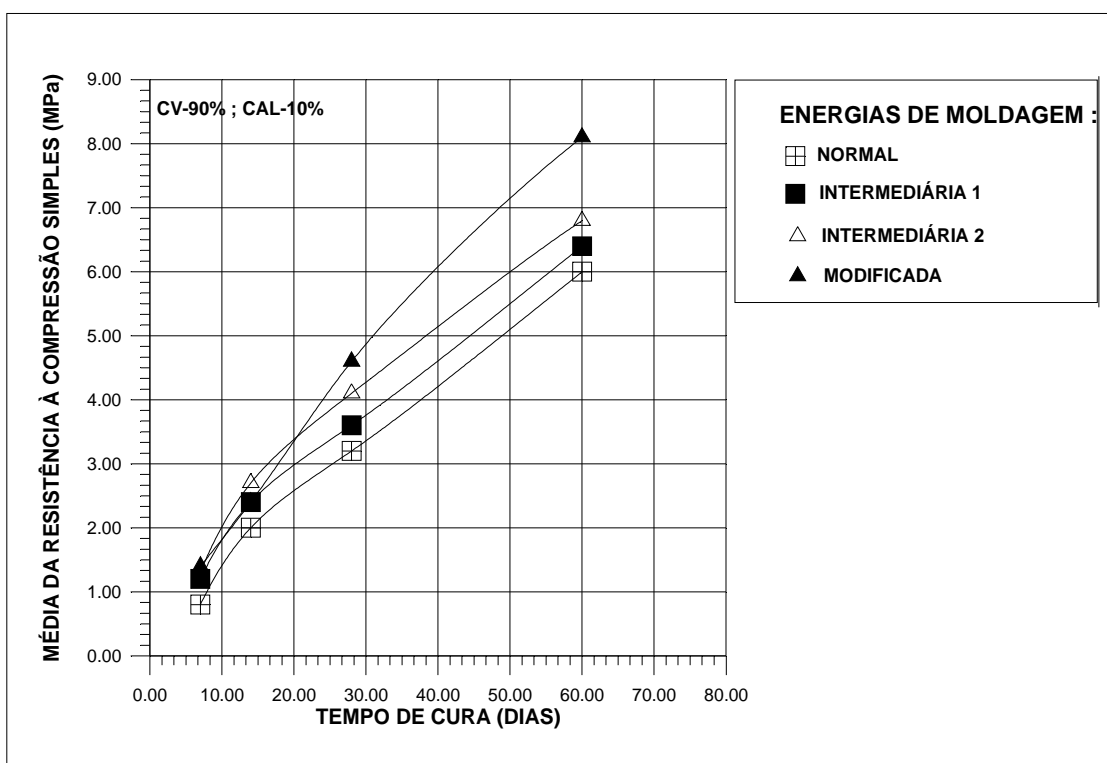


Figura 5.23 Efeito do tempo de cura, com variação da energia de moldagem, na RCS

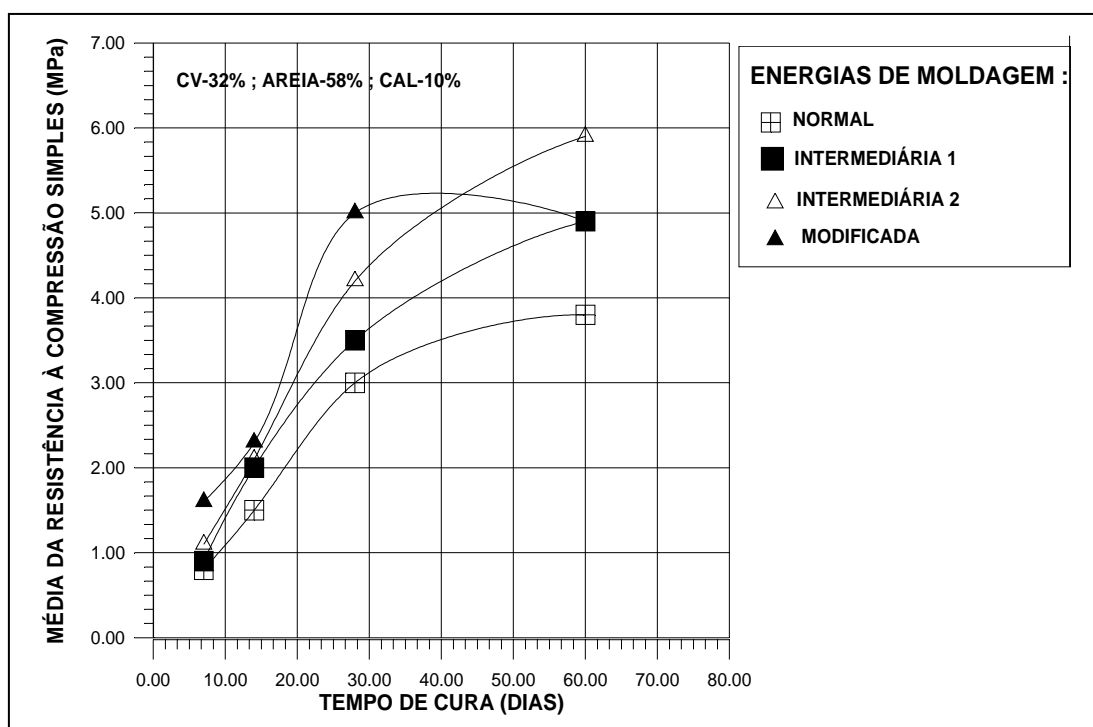


Figura 5.24 Efeito do tempo de cura, com variação da energia de moldagem, na RCS

As curvas apresentadas na Figura 5.23 comprovam que há uma tendência de aumentar a resistência ao longo do tempo para todos os níveis de energia de moldagem, enquanto que as curvas da Figura 5.24 mostram que há um aumento da resistência até os 28 dias e a partir deste período as curvas mostram um comportamento assintótico. Possivelmente a maior quantidade de cinza volante na mistura 1 produza um número maior de reações pozolânicas, gerando um maior crescimento na resistência, sendo necessário um período maior para que tenha um comportamento assintótico.

Pode-se observar também que a variação do tempo de cura leva a ganhos de resistência maiores do que a variação da energia de moldagem, isto porque, as reações sendo lentas não favorecessem a ganhos de resistência muito grandes, quando há uma maior aproximação das partículas de cinza e cal devido o aumento da energia de moldagem.

### 5.3.1.1.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROCESSOS DE CURA ATC E CTC

Nas Figuras 5.25 a 5.27 são plotadas as curvas de resistência dos dois tipos de cura, para as misturas 1, 3 e 4, em função da energia de moldagem. Foram escolhidas as médias dos resultados das temperaturas de 149 e 188°C e os períodos de cura de 28 e 60 dias dos processos de cura autoclavado (ATC) e câmara à temperatura constante (CTC), respectivamente.

Na Figura 5.25 são apresentados os gráficos dos processos de cura ATC e CTC da mistura 1. Observa-se que, para o tempo de cura de 28 dias, o comportamento é linear e seus resultados de resistência estão abaixo dos resultados do processo ATC para as temperaturas de 149 e 188 °C.

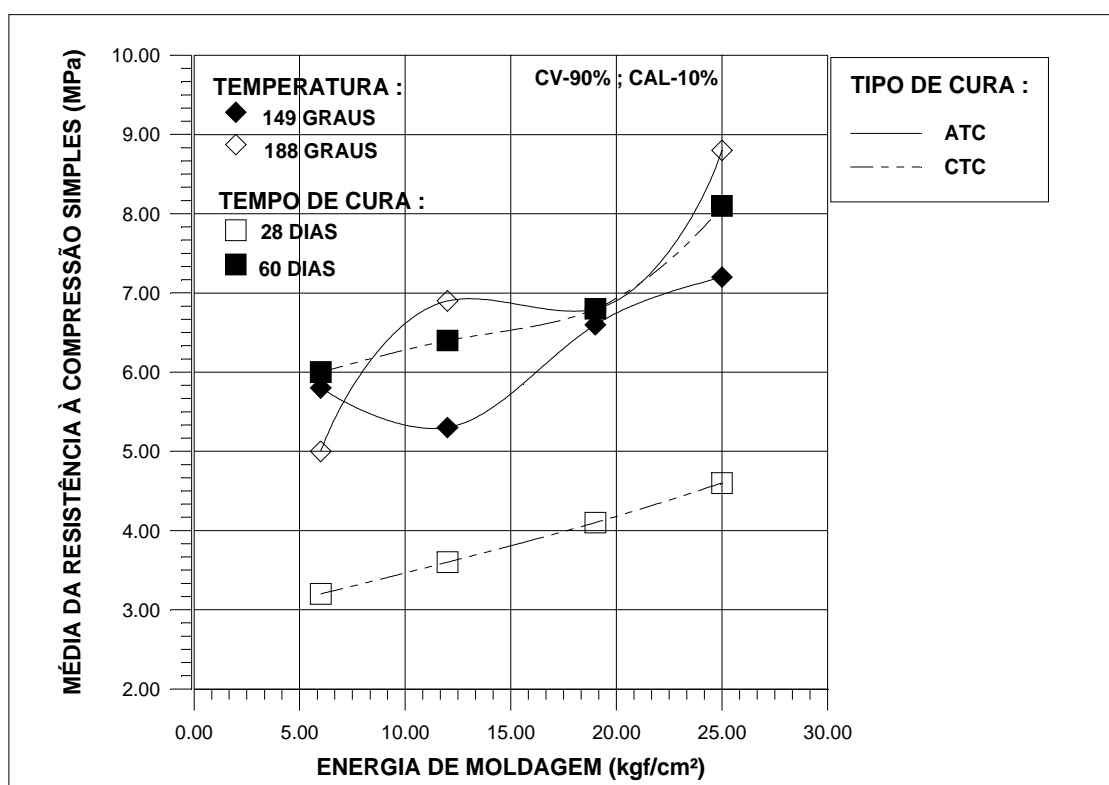


Figura 5.25 Comparação dos resultados de RCS dos processos de cura ATC e CTC

Para os CPs curados pelo processo CTC no tempo de 60 dias, os resultados de resistência à compressão praticamente ficaram entre os valores intermediários das temperaturas mínima(149 °C) e máxima(188 °C) dos CPs curados

pelo processo ATC ao longo das energias de moldagem estudadas, conforme Figura 5.25. Observa-se ainda que, os resultados de resistência de 28 e 60 dias ao longo das energias de moldagem estudadas, para os CPs curados pelo processo ATC, apresentam um comportamento praticamente linear, enquanto que, para os CPs curados pelo processo CTC, para as temperaturas de cura de 149 e 188°C, ao longo das energias de moldagem estudadas, apresentam resultados de resistência não lineares, talvez seja resultante de formas e tipos de minerais que surgem em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperaturas acima da ambiente.

Na Figura 5.26 são plotadas as curvas da mistura 3 em função da energia de moldagem. Observa-se o mesmo comportamento da mistura 1, onde o tempo de cura aos 60 dias pelo processo CTC obteve em média as mesmas resistências dos CPs curados pelo processo ATC à 149 e 188 °C, enquanto que para o tempo de 28 dias obteve resultados inferiores.

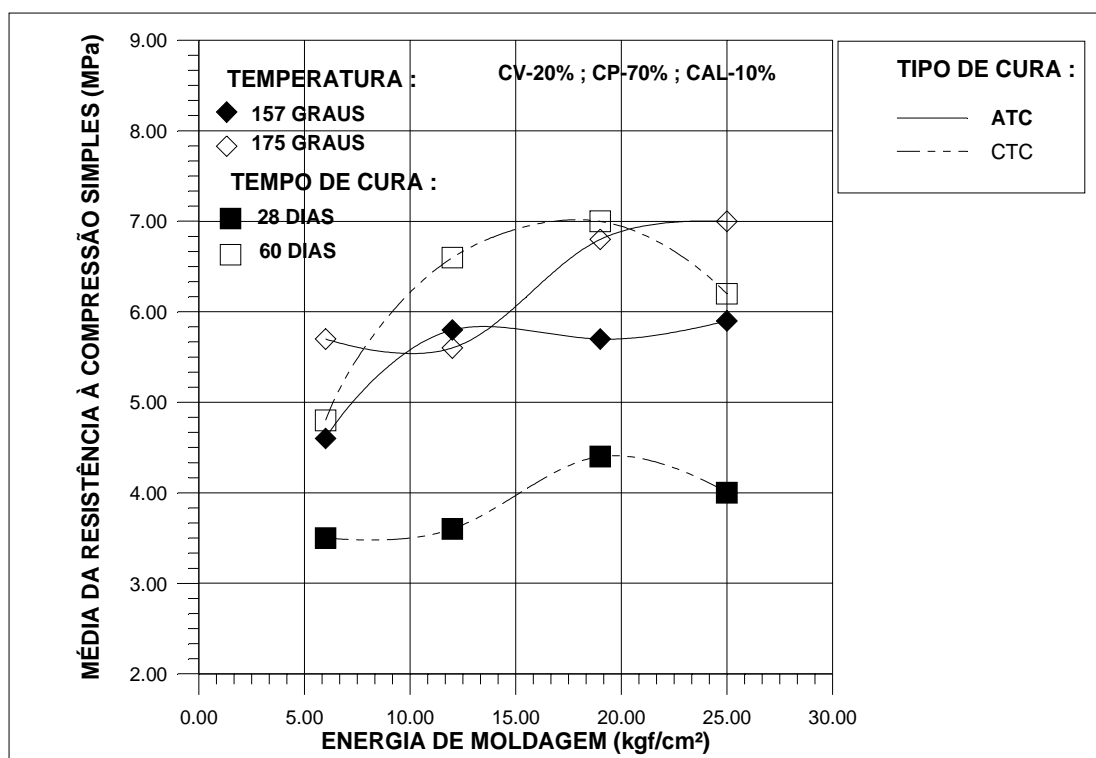


Figura 5.26 Comparação dos resultados de RCS do processos de cura ATC e CTC

Em ambas as misturas 1 e 3 a resistência aos 60 dias de cura para CPs curados pelo processo CTC alcançou aqueles curados pelo processo ATC. A explicação deve estar nas formas estruturais e tipos de minerais que ambos geraram



durante a cura e que irá influenciar na resistência de materiais estabilizados pozolanicamente.

Na Figura 5.27 são plotadas as curvas da mistura 4 em função da energia de moldagem. O comportamento é distinto das outras duas misturas e observa-se que nos CPs. curados aos 28 e 60 dias os resultados de resistência são inferiores aos CPs. curados em autoclave à 149 e 188 °C. Este comportamento pode comprovar que houve uma reação química da sílica presente na areia com hidróxido de cálcio disponível na cal hidratada.

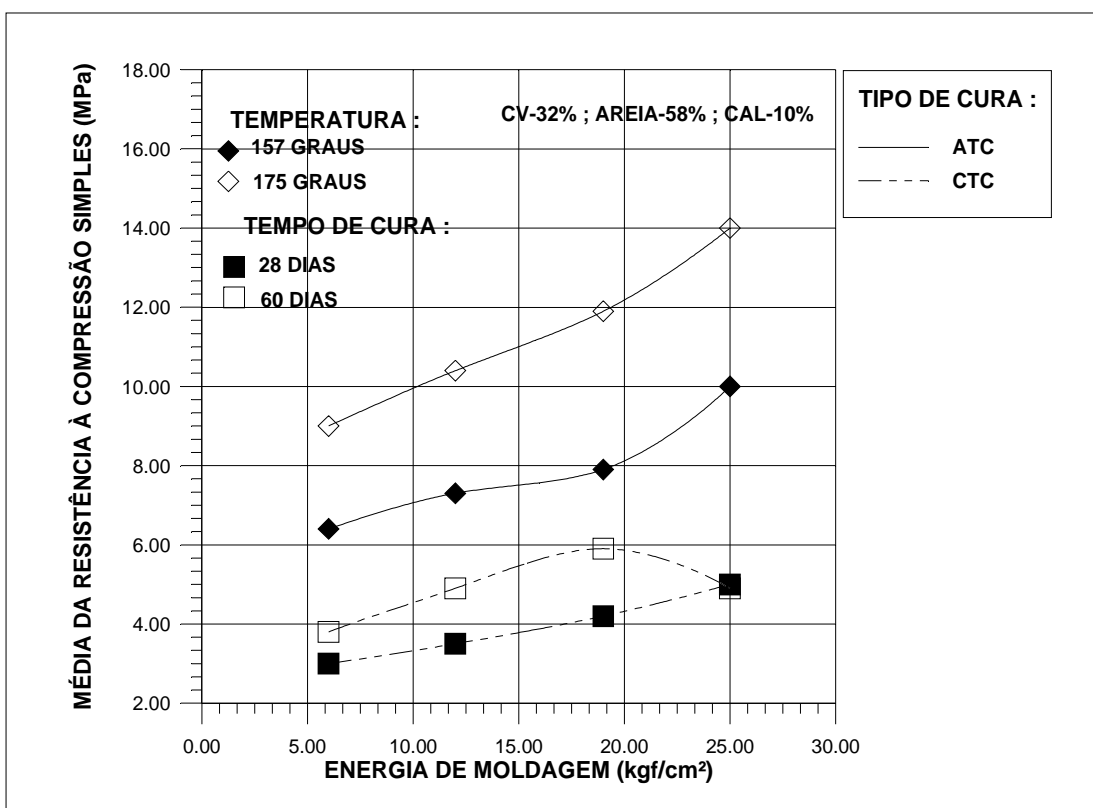


Figura 5.27 Comparação dos resultados de RCS dos processos de cura ATC e CTC

O comportamento das curvas das misturas 1 e 4 comprovam também que a quantidade de cinza influencia na resistência de materiais estabilizados pozolanicamente e curados à temperatura ambiente, pois se observarmos por comparação as curvas destas duas misturas curados aos 28 e 60 dias (Figuras 5.25 e

5.27) verificamos que a mistura com maior quantidade de cinza volante em sua composição é aquela que apresentou os maiores ganhos de resistência entre estes dois períodos.

A Figura 5.27 apresenta um comportamento praticamente linear, isto é, o crescimento da energia é proporcional ao crescimento da resistência. Talvez a inclusão da areia tenha ajudado a uma melhor estabilização na formação de grupos de silicatos e/ou houve também uma maior influência no efeito físico (curva granulométrica) que, talvez, tenha compensado nas quedas de resistências apresentadas nas outras misturas.

Nas Figuras 5.28 a 5.30 são apresentados gráficos de barra comparando as faixas de valores individuais entre as resistências mínimas e máximas das quatro misturas, para CPs curados aos 28, 60 dias e autoclavado com a faixa de valores exigida pelas normas para tijolos cerâmicos(NBR - 7170) e blocos cerâmicos cerâmicos( NBR - 7171).

Caso se pretendesse utilizar estas cinzas para fabricação de tijolos e blocos, a faixa de valores de resistência à compressão de todas as misturas se enquadrariam nas exigências das duas normas. Para utilizar em fundação e/ou pavimentação, baseando-se nestas faixas de resultados, provavelmente estes dois tipos de cinza, poderiam ser aplicados. Evidente que outros ensaios deveriam ser realizados de acordo com as condições de contorno do problema.

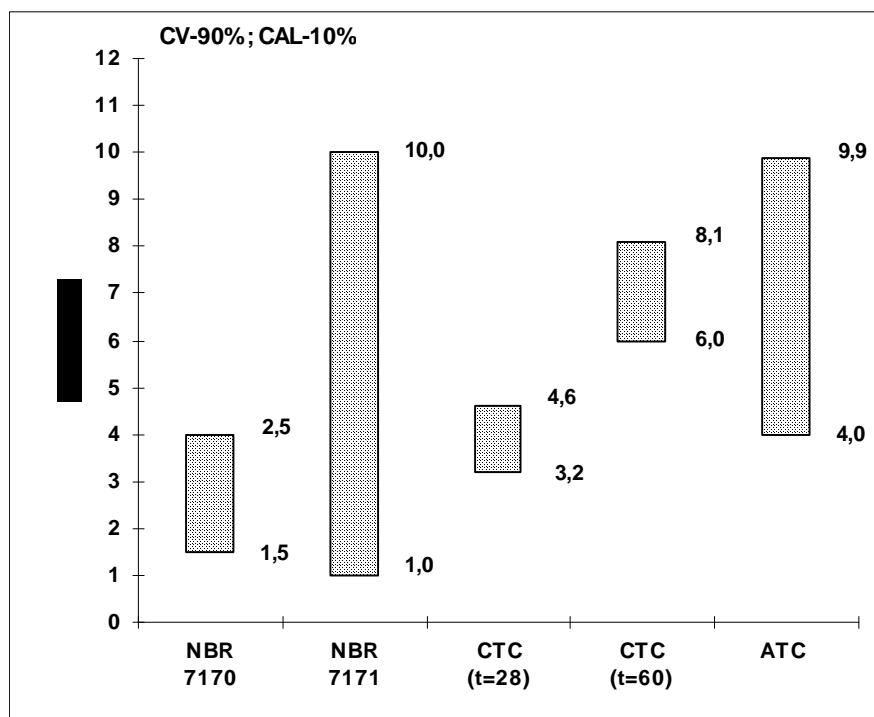


Figura 5.28 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos

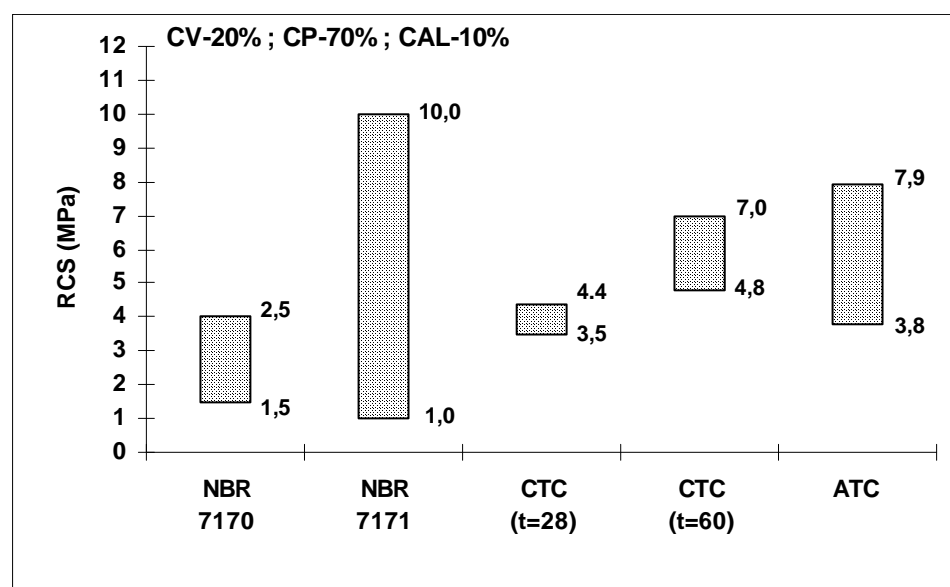


Figura 5.29 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos

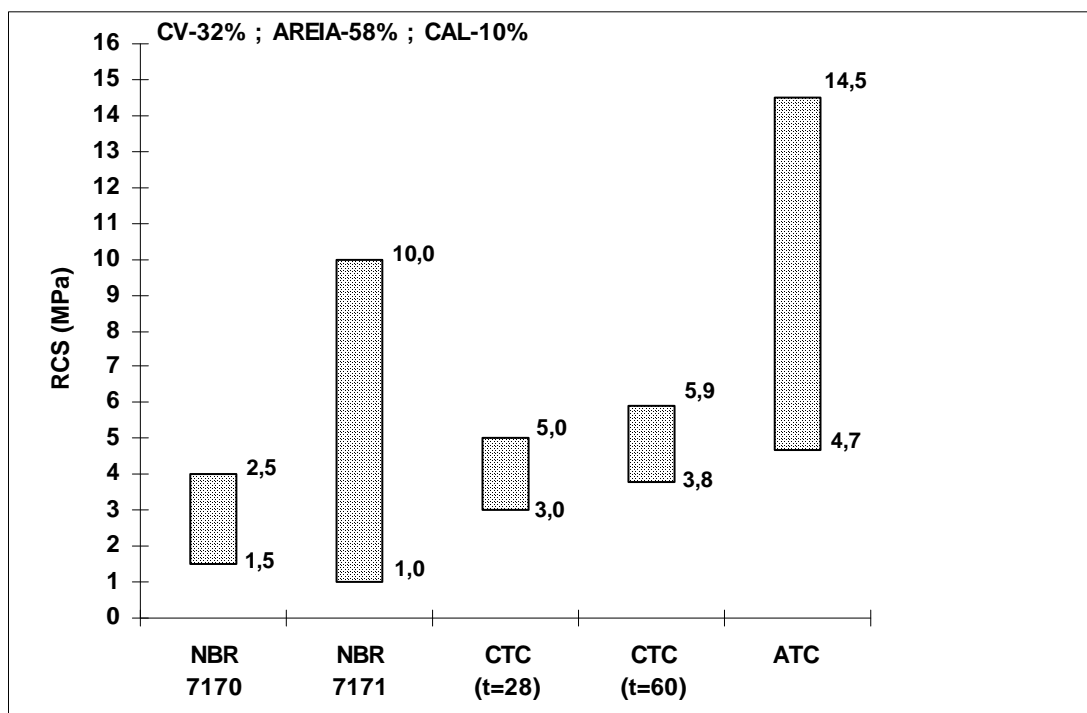


Figura 5.30 Resultados de resistência dos processos CTC e ATC e valores máximos e mínimos da norma ABNT para tijolos e blocos

### 5.3.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste item serão apresentados os resultados de análise estatística e modelos matemáticos para previsões da resistência à compressão simples de CPs curados pelo processo ATC e CTC, através de regressão múltipla para as misturas 1, 3 e 4 e regressão simples para as misturas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

#### 5.3.1.2.1. PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM

No Quadro 5.15 são apresentados resultados estatísticos das misturas 1, 3 e 4. Observa-se que há aproximação dos resultados da média com a mediana em todas as misturas, indicando que há uma tendência de uma distribuição normal dos resultados do experimento. Os valores do coeficiente de variação giraram em torno de 16 a 25%.

Tipo de Mistura	ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA					
	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desvio padrão (%)	Coeficie. de Var. (%)	Valores Mínimo (MPa)	Valores Máximo (MPa)
1	6,90	6,93	1,50	21,7	3,60	10,00
3	5,34	5,90	0,98	16,4	3,10	8,10
4	9,40	9,10	2,40	25,5	4,10	15,20

Quadro 5.15 Dados de resultados estatísticos da resistência à compressão

No Quadro 5.16 estão apresentados os resultados das análises de variância dos fatores principais do processo de cura ATC referentes ao ensaio de resistência à compressão das três misturas.

FATORES PRINCIPAIS	cv-90% ; cal-10%			cv-20% ; cp-70% ; cal-10%			cv-32% ; areia-58% ; cal-10%		
	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	EFEITO (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	EFEITO (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	EFEITO (%)
Energia	2,78	71,20	53,16	2,77	25,97	45,30	2,75	68,21	46,18
Temperatura	2,78	14,94	10,12	2,77	6,06	9,45	2,75	45,84	30,80
Tempo	3,17	40,53	21,59	3,16	5,23	5,81	3,14	14,02	6,71
Resíduo	-	-	15,13	-	-	39,44	-	-	16,31

Quadro 5.16 Resultados de Análise de Variância (ANOVA) dos fatores principais

Pode-se observar que para as três misturas, os fatores principais foram significativos, isto é, a hipótese de não existência dos efeitos dos fatores principais foram rejeitados para um  $\alpha_{95\%}$  de confiabilidade, o que podemos constatar neste quadro em que  $F_{tab} < F_{cal}$ .

Para mistura 1, a energia de moldagem obteve o maior valor de  $F_{cal}$  e observando a coluna do efeito, que representa em porcentagem o valor da variância de cada fator em relação à variância total, verificamos que a energia de moldagem é responsável por 53,16 % da variabilidade dos resultados da resistência, enquanto que os fatores tempo e temperatura de cura são responsáveis por 21,59 e 10,12%, respectivamente.

As misturas 3 e 4 apresentam a energia de moldagem como o fator mais significativo. Para a mistura 3, a energia é responsável por 45,30% da

variabilidade dos resultados em relação à variância total ; para mistura 4 a energia é responsável por 46,18% da variabilidade dos resultados de resistência em relação a variância total.

Verificamos também que os resultados da mistura 3 mostram que 39,44% da variância total é devido a variância do resíduo, este valor foi devido a fatores que não foram analisados ou problemas de amostragem.

#### **5.3.1.2.1.1 REGRESSÃO MÚLTIPLA**

Nas Figuras 5.30 a 5.32 estão mostradas as superfícies dos modelos matemáticos para previsão da resistência à compressão das misturas 1, 3 e 4, respectivamente, determinadas por regressão múltipla. Não foi possível encontrar um modelo matemático por regressão simples, pois o coeficiente de determinação foi abaixo de 50% para as várias equações estudadas. A explicação talvez esteja no fato que os tres fatores principais obtiveram efeitos significativos na relação das médias entre os níveis e os resíduos. As três superfícies plotadas foram para um tempo fixo de 6 horas, sendo que cada equação previu-se a resistência à compressão simples em função das quatro temperaturas e energias de moldagem estudadas. Os pontos plotados são a média das observações dos resultados de ensaio. Nos Quadros 5.17 a 5.19 estão mostrados alguns resultados da análise de variância, coeficientes da equação e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

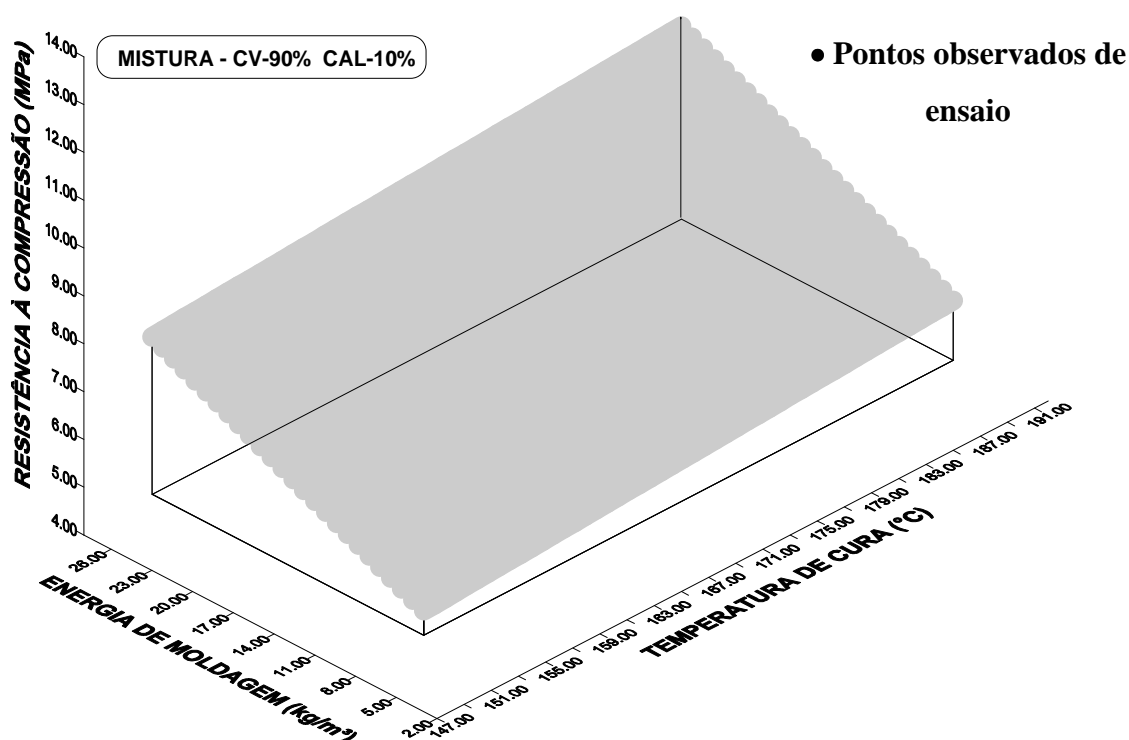


Figura 5.31 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 1

$$RCS = E \cdot a + T \cdot b + t \cdot c + E^2 \cdot d \quad (\text{equação da mistura 1})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

E = energia de moldagem ( $\text{kgf/m}^2$ )

T = temperatura de cura ( $^{\circ}\text{C}$ )

t = tempo de cura (horas)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	a = 0.14 b = 0.019 c = 0.33 d = -0.000032
QUADRADO DAS MÉDIAS	QM = 1027.39
RAZÃO F	F = 1306.27
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 98.43\%$

Quadro 5.17 Resultados do modelo matemático da mistura 1

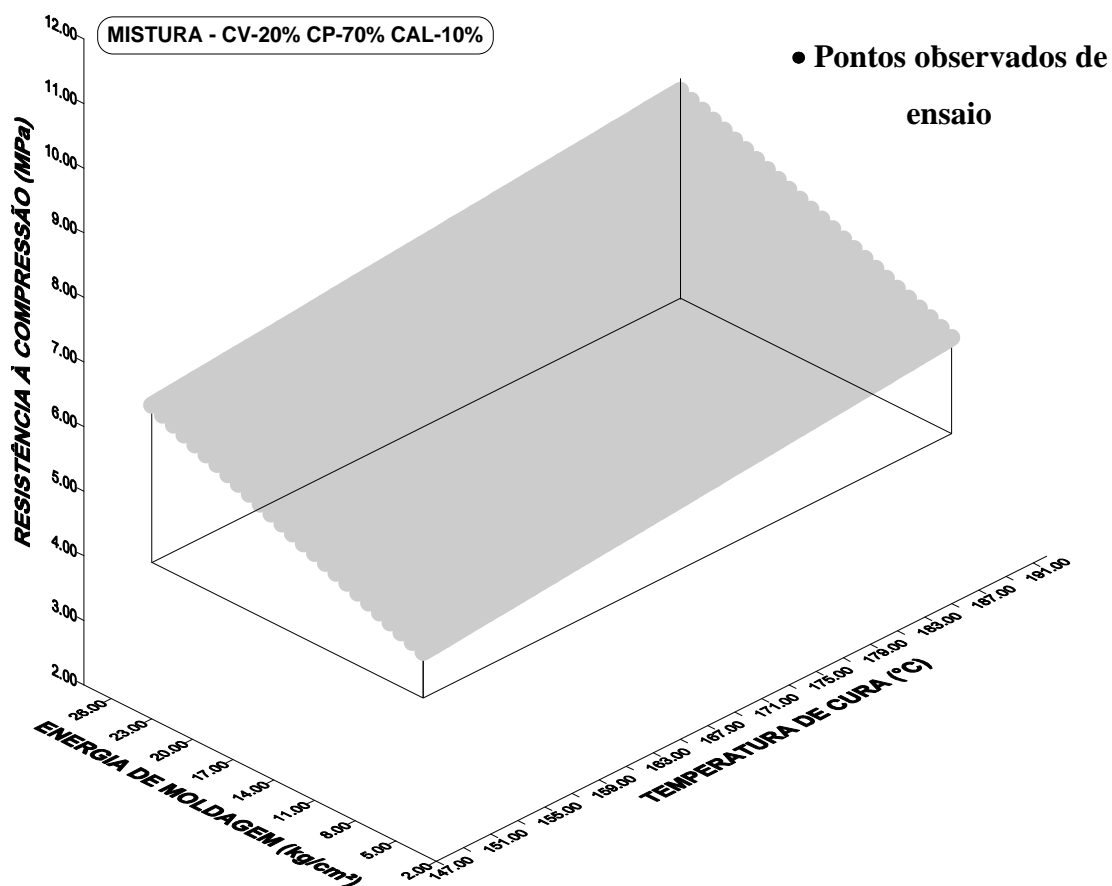


Figura 5.32 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 3

$$RCS = E*a + T*b + t*c + E^2*d \quad (\text{equação da mistura 3})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

E = energia de moldagem (kgf/m<sup>2</sup>)

T = temperatura de cura (°C)

t = tempo de cura (horas)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	a = 0.20 b = 0.020 c = 0.11 d = -0.0038
QUADRADO DAS MÉDIAS RAZÃO F	QM = 778.47 F = 1521.52
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	R <sup>2</sup> = 98.65%

Quadro 5.18 Resultados do modelo matemático da mistura 3



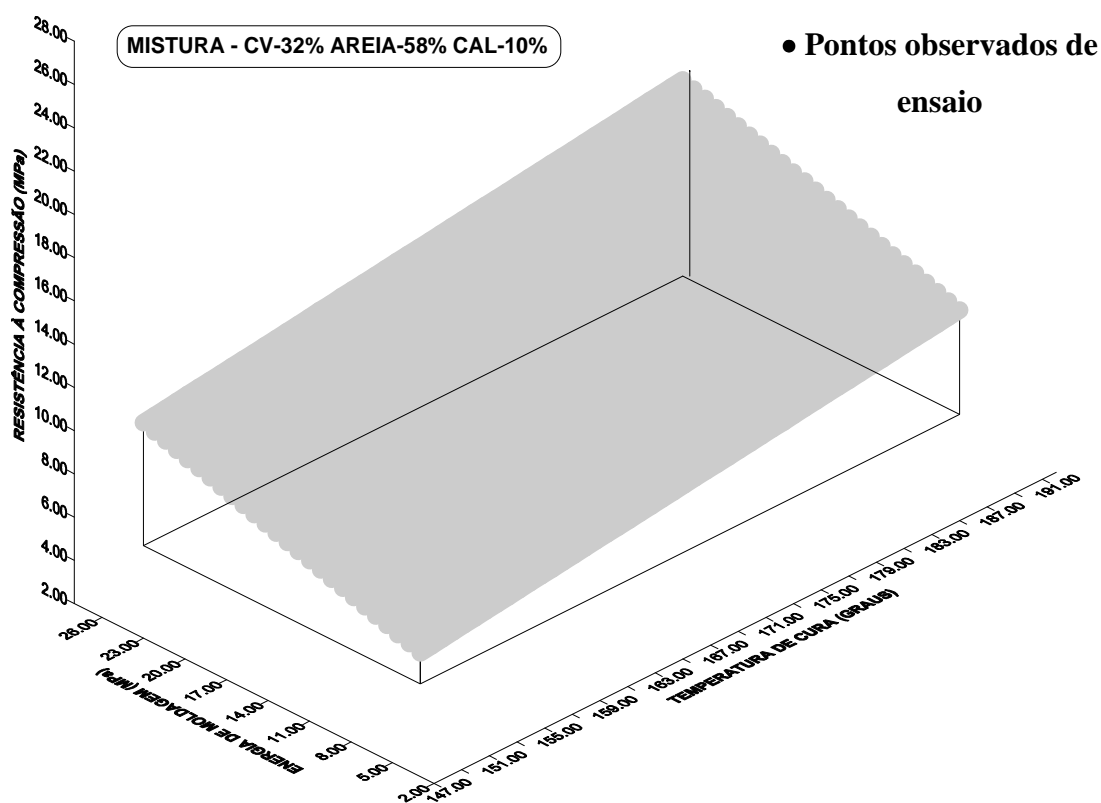


Figura 5.33 Superfície do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 4

$$RCS = E*a + T*b + t*c + E^2*d + T^2*e + t^2*f \text{ (equação da mistura 4)}$$

RCS = resistência à compressão (MPa)

E = energia de moldagem ( $\text{kgf/m}^2$ )

T = temperatura de cura ( $^{\circ}\text{C}$ )

t = tempo de cura (horas)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	a = 0.042 b = -0.011 c = -0.028 d = 0.0057 e = 0.00029 f = 0.0485
QUADRADO DAS MÉDIAS RAZÃO F	QM = 2192.44 F = 1670.21
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 98.65$

Quadro 5.19 Resultados do modelo estatístico da mistura 4

### 5.3.1.2.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)

No Quadro 5.20 são apresentados resultados estatísticos das quatro misturas. Por ser uma cura de temperatura ambiente, suas reações são lentas e como consequência afetam à resistência dos materiais estabilizados pozolanicamente. Por isso os valores mínimos de resistência das misturas apresentam-se baixos, pois foram determinados em um tempo de cura de 7 dias.

Tipo de Mistura	ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA					
	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desvio padrão (%)	Coeficie. de Var. (%)	Valores Mínimo (MPa)	valores Máximo (MPa)
1	3,52	2,93	2,2	62,5	0,82	8,1
2	2,29	1,93	1,5	65,5	0,51	5,86
3	3.32	2.95	1.98	59,63	0,87	7,03
4	2,98	2,7	1,63	54,69	0,76	5,91

Quadro 5.20 Resultados estatísticos da resistência à compressão simples

No Quadro 5.21 são apresentados os resultados da análise de variância e o valores dos efeitos dos fatores principais em relação as variâncias totais das quatro misturas curadas na câmara à temperatura constante.

Fatores Principais	cv-90% ; cal-10%			cp-90% ; cal-10%			cv-20% ; cp-70% cal-10%			cv-32% ; Areia.-58% cal-10%		
	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Efeito	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Efeito	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Efeito	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Efeito
Energia	11,3	3,2	8,4	4,0	3,2	3,5	10,9	3,2	3,9	10,7	3,2	7,3
Tempo	275,1	3,2	83,1	65,1	3,2	93,7	234,9	3,2	92,9	114,5	3,2	86,7
Resíduo	-	-	9,5	-	-	2,6	-	-	3,2	-	-	6,0

Quadro 5.21 Resultados de análise de variância da resistência à compressão simples

Verifica-se que para as quatro misturas , os fatores principais foram significativos, isto é, a hipótese de não existência dos efeitos dos fatores principais foram rejeitados para um  $\alpha_{95\%}$  de confiabilidade, o que podemos constatar neste quadro em que  $F_{tab} < F_{cal}$  .

Para todas as misturas curadas pelo processo CTC, o fator mais significativo foi o tempo de cura. O Quadro 5.21 mostra que, 83,1, 93,7, 92,9 e 86,7% da variância total é devido ao fator tempo, para as misturas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

#### **5.3.1.2.2.1 REGRESSÃO SIMPLES**

Nas Figuras 5.34 a 5.36 são plotadas as curvas dos modelos matemáticos das misturas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, para a previsão dos resultados de resistência à compressão. O modelo que melhor se ajustou para a previsão em função do tempo de cura foi a multiplicativa ( $y = a \cdot X^b$ ).

Nos Quadros 5.22 a 5.24 estão os resultados dos coeficientes da equação matemática, resultados da análise de variância do modelo e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), os pontos plotados são as observações das médias dos resultados de ensaio. Foram traçados em linhas pontilhadas o intervalo de confiança da média da curva do modelo matemático e o intervalo de confiança do valor individual de cada ponto observados, para uma confiabilidade de 95%.

Observa-se que para todas as misturas o coeficiente de determinação obtido foi acima de 85%, neste modelo apenas 15% não é explicado.

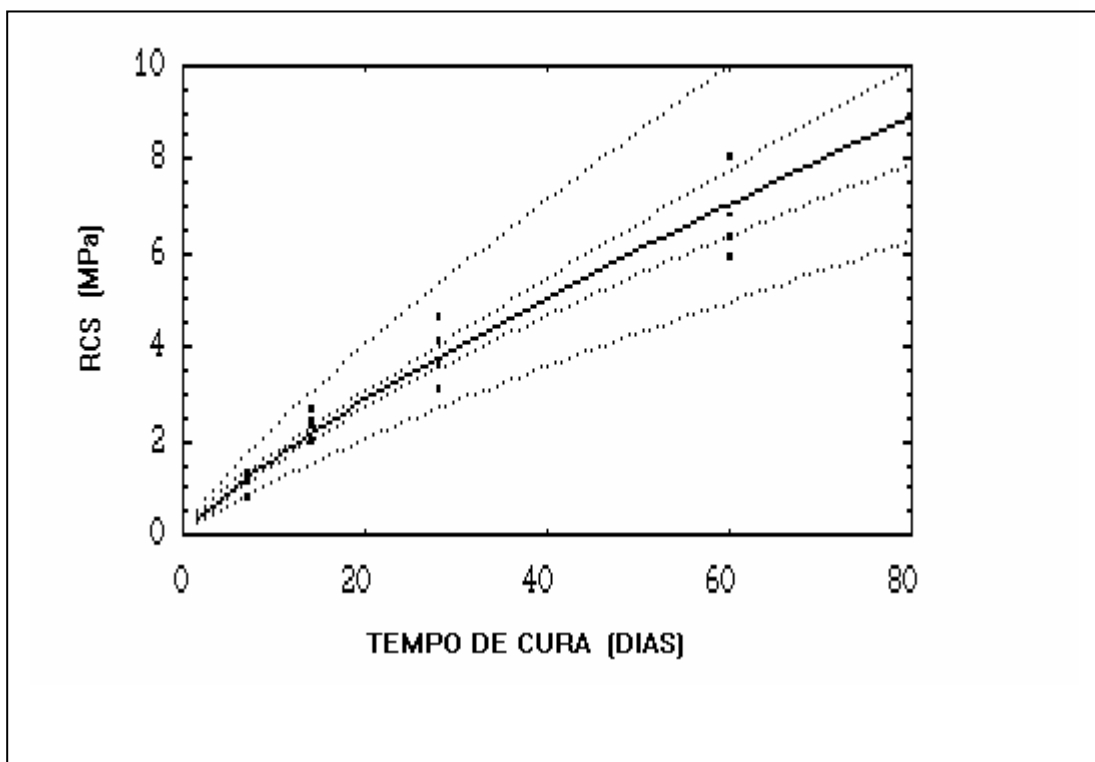


Figura 5.34 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 1

$$RCS = a \cdot t^b \quad (\text{equação da mistura 1})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

t = tempo de cura (dias)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a = -1.38</li> <li>• b = 0.814</li> </ul>
QUADRADO DAS MÉDIAS RAZÃO F	<p>QM = 13.52</p> <p>F = 502.06</p>
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 94.36\%$

Quadro 5.22 Resultados do modelo matemático da mistura 1

•intercepto igual a log a

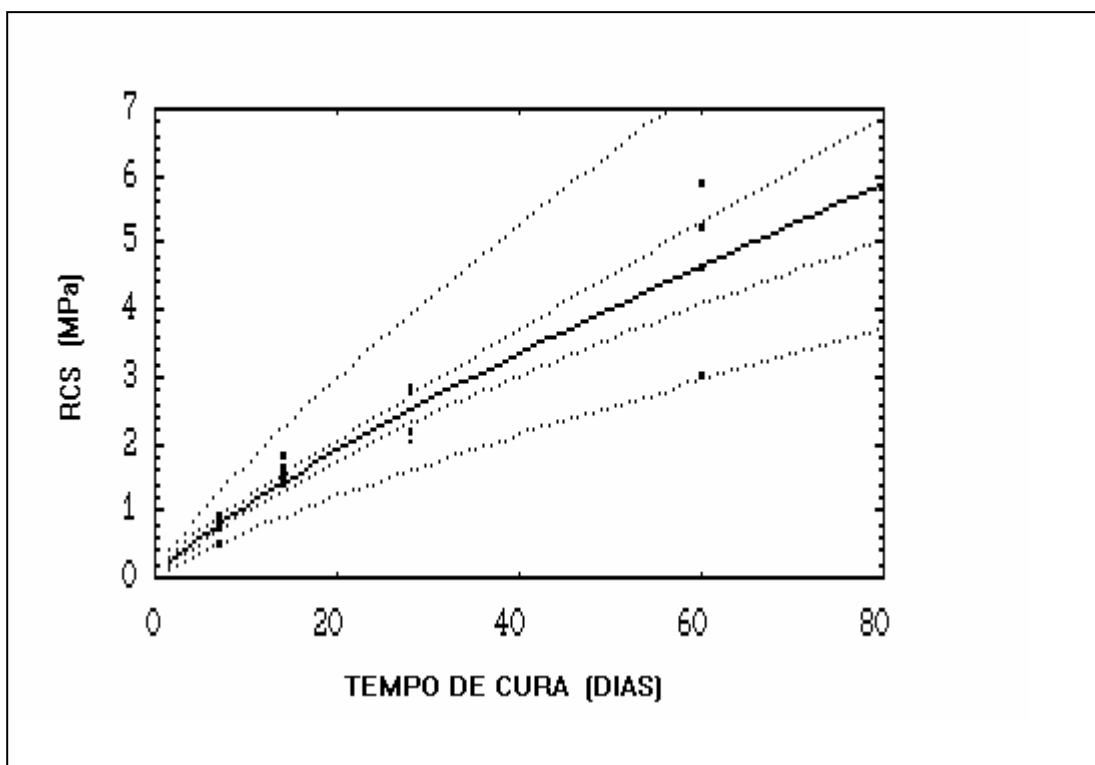


Figura 5.35 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 2

$$RCS = a \cdot t^b \quad (\text{equação da mistura 2})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

t = tempo de cura (dias)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>a = -1.78</li> <li>b = 0.812</li> </ul>
QUADRADO DAS MÉDIAS	QM = 13.45
RAZÃO F	F = 289.63
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 90.61\%$

Quadro 5.23 Resultados do modelo matemático para a mistura 2

•intercepto igual a log a

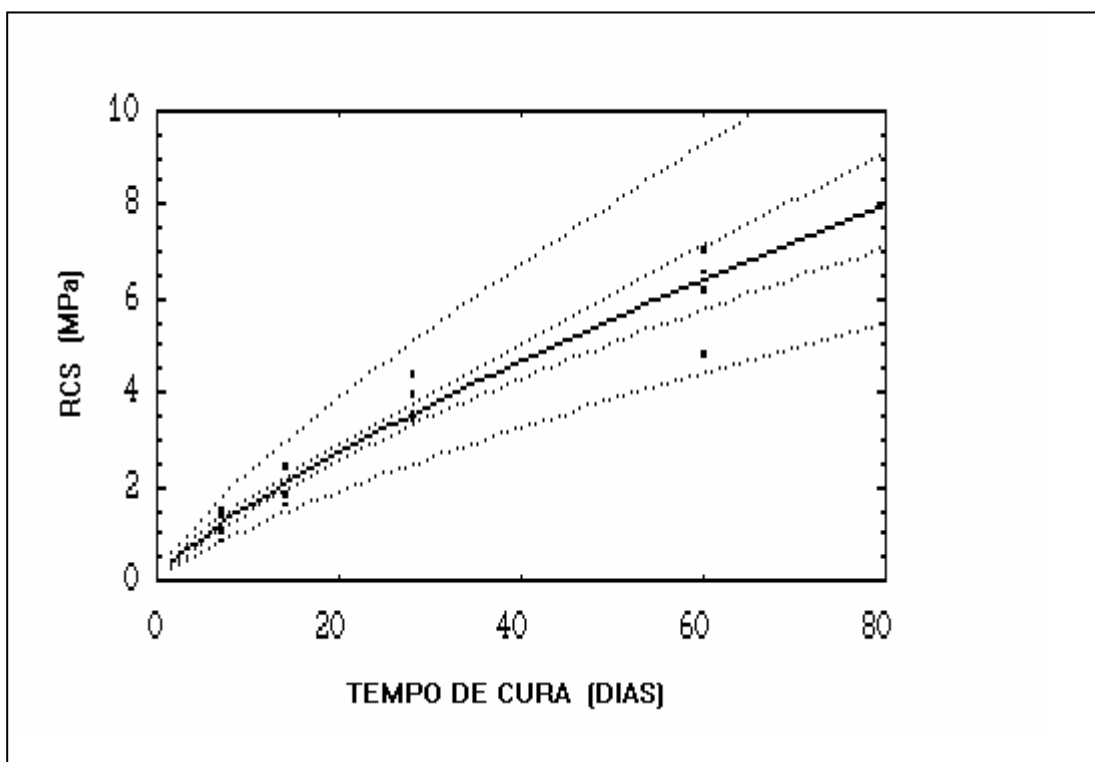


Figura 5.36 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 3

$$RCS = a \cdot t^b \quad (\text{equação da mistura 3})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

t = tempo de cura (dias)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>a = -1.32</li> <li>b = 0.776</li> </ul>
QUADRADO DAS MÉDIAS	QM = 12.3
RAZÃO F	F = 407.99
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 93.15\%$

Quadro 5.24 Resultados do modelo matemático da mistura 3

•intercepto igual a log a

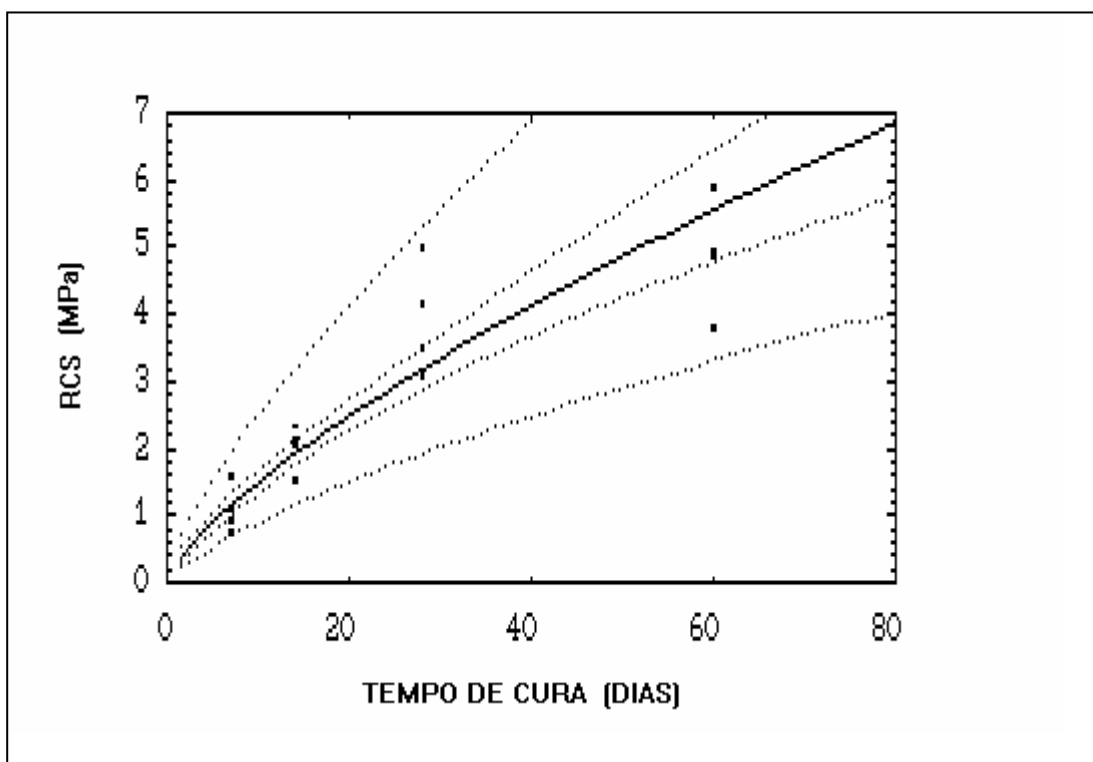


Figura 5.37 Curvas do modelo matemático para previsão da RCS da mistura 4

$$RCS = a \cdot t^b \quad (\text{equação da mistura 1})$$

RCS = resistência à compressão simples (MPa)

t = tempo de cura (dias)

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>a = -1.27</li> <li>b = 0.729</li> </ul>
QUADRADO DAS MÉDIAS	QM = 10.84
RAZÃO F	F = 181.71
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	$R^2 = 85.83\%$

Quadro 5.25 Resultados do modelo matemático da mistura 4

•intercepto igual a log a

## 5.3.2. ABSORÇÃO

### 5.3.2.1 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS

Nos Quadros 5.25 a 5.28 estão apresentados os resultados dos ensaios de absorção para os corpos-de-prova curados pelo processo de Autoclavagem. São também apresentadas as médias dos resultados de absorção dos tres tempos de cura para cada temperatura, das quatro energias de moldagem para cada tempo de cura e a média total dos tempo e temperatura de cura para cada energia de moldagem.

COMPOSIÇÃO (%) CINZA VOLANTE: 90 CAL HIDRATADA: 10		ABSORÇÃO (%)				
		ENERGIA DE MOLDAGEM				
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (HORAS)	NORMAL	INTERM.1	INTERM.2	MODIFICADA	MÉDIA
149	2	40,5	33,6	29,6	26,9	32,6
	4	30,6	32,0	28,8	28,5	30,0
	6	34,9	34,2	32,0	31,0	33,0
<b>MÉDIA</b>		35,3	33,3	30,1	28,8	31,9
161	2	34,4	31,3	31,0	30,7	31,8
	4	26,8	25,6	24,4	24,4	25,3
	6	33,6	24,8	22,6	21,2	25,6
<b>MÉDIA</b>		31,6	27,2	26,0	25,4	27,6
175	2	31,4	29,4	26,2	27,4	28,6
	4	39,9	32,4	30,0	30,6	33,2
	6	35,6	32,8	26,1	26,8	30,3
<b>MÉDIA</b>		35,6	31,5	27,4	28,3	30,7
188	2	35,8	32,1	30,3	27,9	31,5
	4	40,1	33,1	30,1	29,1	33,1
	6	34,5	35,8	35,4	32,0	34,4
<b>MÉDIA</b>		36,8	33,7	31,9	29,7	33,0
<b>MÉDIA TOTAL</b>		34,8	31,4	28,8	28,0	30,8

Quadro 5.26 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.



COMPOSIÇÃO (%)		ABSORÇÃO (%)				
CINZA VOLANTE: 20 CINZA PESADA: 70 CAL HIDRATADA: 10		ENERGIA DE MOLDAGEM				
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (HORAS)	NORMAL	INTERM.1	INTERM.2	MODIFICADA	MÉDIA
149	2	30,7	21,8	23,1	25,9	25,4
	4	25,4	25,6	23,4	22,8	24,3
	6	30,0	29,4	27,3	26,6	28,3
<b>MÉDIA</b>		28,7	25,6	24,6	25,1	26,0
161	2	31,3	29,7	28,0	26,1	28,8
	4	26,8	25,6	24,4	24,4	25,3
	6	28,7	28,6	30,9	30,2	29,6
<b>MÉDIA</b>		28,9	28,0	27,8	26,9	27,9
175	2	26,4	27,8	25,8	23,8	26,0
	4	32,5	32,5	30,6	27,6	30,8
	6	27,7	27,2	24,6	24,6	26,0
<b>MÉDIA</b>		28,9	29,2	27,0	25,3	27,6
188	2	28,6	27,5	26,0	26,4	27,1
	4	29,4	28,0	27,2	25,2	27,4
	6	29,2	30,0	28,2	26,6	28,5
<b>MÉDIA</b>		29,1	28,5	27,1	26,1	27,7
<b>MÉDIA TOTAL</b>		28,9	27,8	26,6	25,8	27,3

Quadro 5.27 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.

COMPOSIÇÃO (%)		ABSORÇÃO				
CINZA VOLANTE: 32 AREIA: 58 CAL HIDRATADA: 10		ENERGIA DE MOLDAGEM				
TEMPERATURA (°C)	TEMPO (HORAS)	NORMAL	INTERM.1	INTERM.2	MODIFICADA	MÉDIA
149	2	16,1	15,4	14,3	13,6	14,8
	4	16,0	15,4	14,4	14,0	15,0
	6	17,0	16,0	15,2	14,2	15,6
<b>MÉDIA</b>		16,4	15,6	14,6	13,9	15,1
161	2	16,2	15,1	14,2	12,8	14,6
	4	15,6	14,8	13,0	12,4	14,0
	6	16,0	15,6	13,4	15,0	15,0
<b>MÉDIA</b>		15,9	15,2	13,5	13,4	14,5
175	2	15,5	14,7	14,2	12,8	14,3
	4	16,7	16,3	15,4	14,0	15,6
	6	16,2	14,9	14,0	12,6	14,4
<b>MÉDIA</b>		16,1	15,3	14,5	13,1	14,8
188	2	17,5	14,7	14,2	13,0	14,8
	4	17,2	16,0	14,4	13,3	15,2
	6	16,8	15,9	15,2	14,3	15,6
<b>MÉDIA</b>		17,2	15,5	14,6	13,5	15,2
<b>MÉDIA TOTAL</b>		16,4	15,4	14,3	13,5	14,9

Quadro 5.28 Resultados de ensaios de absorção - processo de cura ATC.

### 5.3.2.1.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM (ATC)

O objetivo desta análise é verificar se a energia de moldagem influenciará nos resultados de absorção, bem como os fatores ligados à aceleração da reação pozolânica e a mudança e/ou aparecimento de novos silicatos de cálcio, que em síntese são a temperatura e o tempo de cura. Sabe-se que o volume de líquido absorvido é função da quantidade e distribuição no sólido dos poros e dos procedimentos de ensaios adotados.

Na Figura 5.38 são plotados as curvas das misturas 1, 3 e 4 dos resultados das médias do ensaio de absorção. Para cada energia foi determinada a média das temperaturas e tempo de cura (média total).

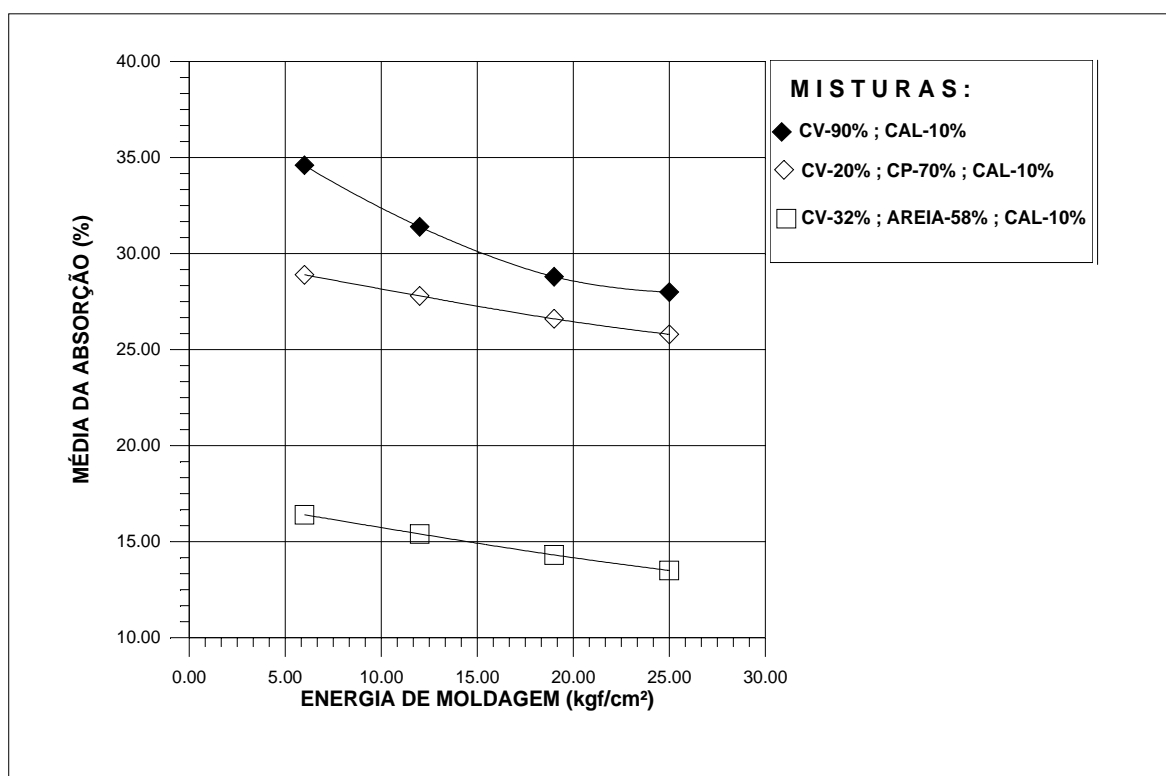


Figura 5.38 Efeito da energia de moldagem na absorção

Observa-se que as três curvas apresentam um comportamento praticamente linearizado, sendo que os resultados de absorção são inversamente proporcionais à energia de moldagem. Verificando-se a variação das curvas para cada

mistura percebe-se que houve pequenos decréscimos de absorção no aumento da energia de moldagem.

Comparando as curvas das três misturas, observa-se que as misturas 1 e 4 foram aquelas que apresentaram os maiores e menores valores dos resultados de absorção, respectivamente. Estes resultados pode-se levar a concluir que o fator de maior efeito pelo decréscimo da absorção para materiais estabilizados pozolanicamente e curados em autoclave é o efeito físico, ou seja, com a introdução do agregado na mistura houve uma modificação da textura e na distribuição dos poros, esta mudanças foram as maiores responsáveis pela diminuição da absorção do que o desenvolvimento de novos materiais que surgiram pela reação química.

**Moorehead (1961)** estudou misturas de sílica em pó com cal hidratada curadas em temperaturas de 136 a 300 °C e verificou que os tamanhos do poros aumentavam com o crescimento da temperatura. Ele supos que houve uma recristalização dos minerais gerados pela reação química, trazendo como consequência o aumento dos vazios. Talvez a explicação na qual as misturas que não utilizaram areia em suas composições obtiveram maiores absorções seja o aumento de seus poros devido à recristalização de seus minerais.

A Figura 5.39 mostra os resultados de absorção das três misturas com a variação da temperatura de cura. Os pontos observados de cada mistura são a média do tempo e energia de moldagem.

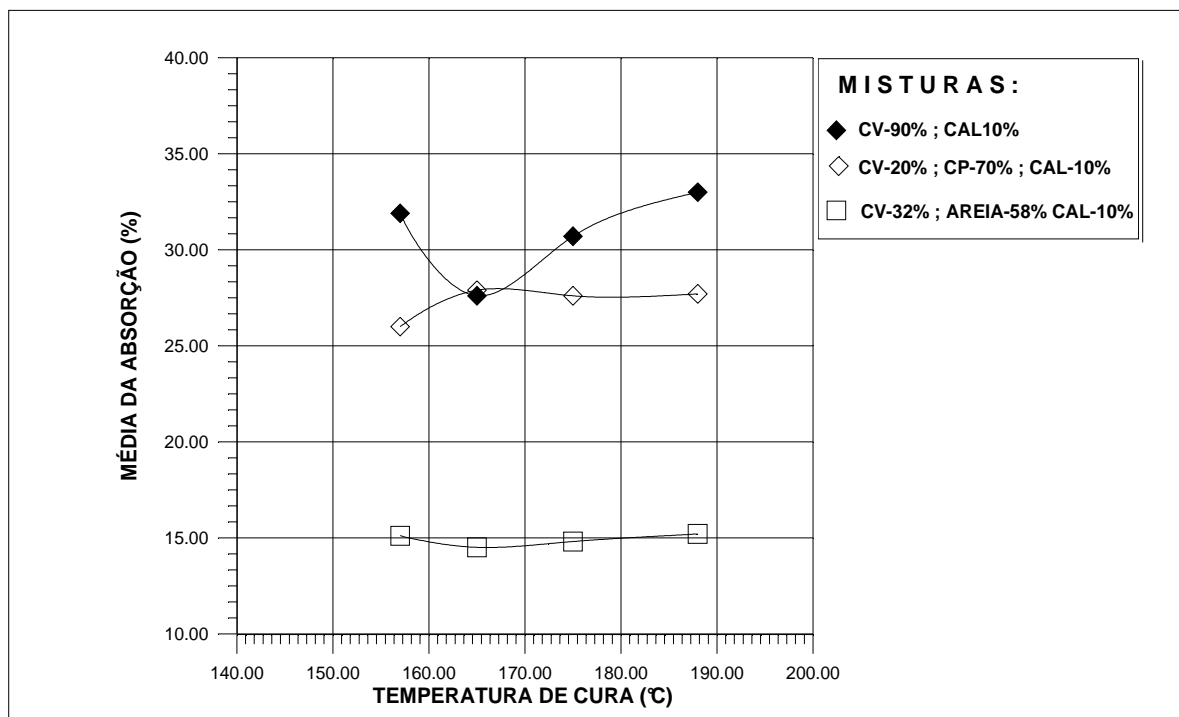


Figura 5.39 Efeito da temperatura de cura na absorção

Verifica-se que para os intervalos de temperaturas estudados (149 a 188 °C), os resultados de absorção de cada mistura praticamente não sofreram influência da temperatura, exceção feita no ponto de temperatura de 161 °C da mistura 1. Este gráfico apresenta o comportamento muito semelhante ao da Figura 5.38 na qual a mistura 4 que utilizou areia obteve os menores resultados de absorção. Esta semelhança dos dois gráficos indica a influência da energia de moldagem.

Na Figura 5.40 são plotadas as curvas das misturas 1, 3 e 4 em função do tempo de cura, na qual os pontos observados para cada mistura são a média da temperatura de cura e energia de moldagem.

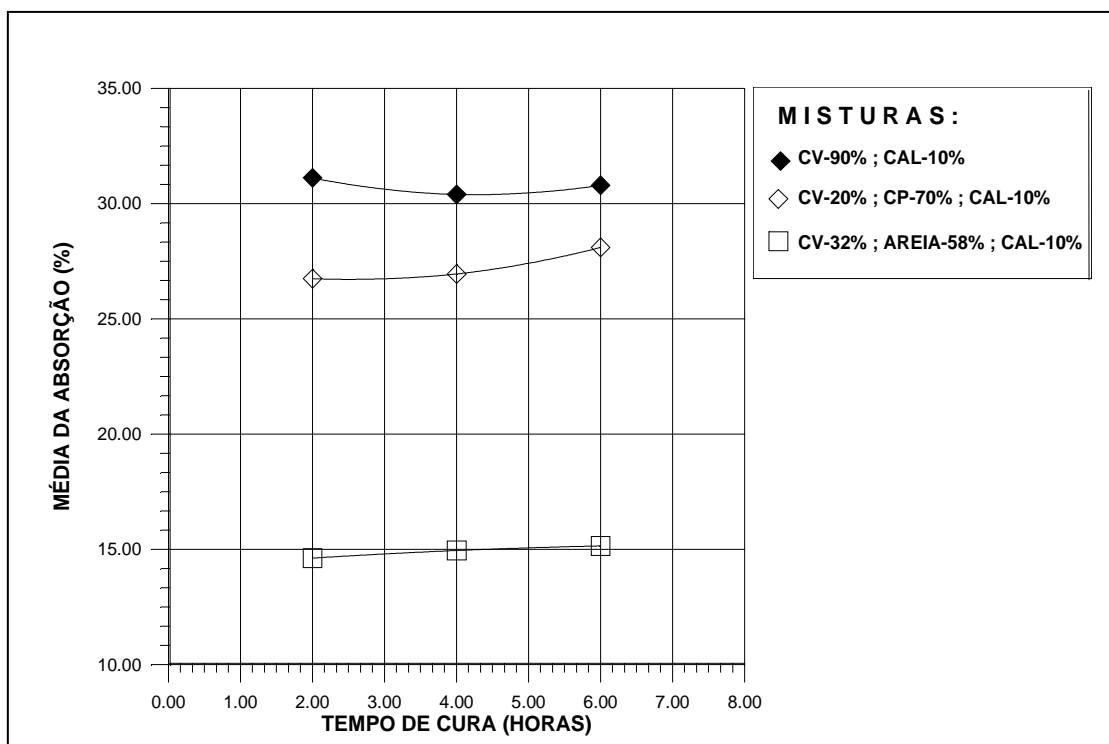


Figura 5.40 Efeito do tempo de cura na absorção

Observa-se que o tempo de cura para todas as misturas apresenta o mesmo comportamento que os gráficos anteriores, onde praticamente as curvas para cada uma das três misturas, variando o tempo de cura, mostra que não há alteração nos resultados de absorção.

O comportamento destas curvas de absorção em função da energia, temperatura e tempo leva-se a sugerir, para materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperaturas de 149 a 188 °C que :

i - o fator principal para o decréscimo da absorção é o efeito físico (textura, distribuição dos poros etc);

ii - Baseando-se nos estudos de Moohead, possivelmente na cinza com maior atividade pozolânica há um maior número de minerais recristalizados, pois a mistura 1, que na sua composição tem somente cinza volante, apresentou os maiores resultados de absorção .

### 5.3.2.1.2 PROCESSO DE CURA PELA CTC

No Quadro 5.29 estão apresentados os resultados dos ensaios absorção para os corpos-de-prova curados pelo processo da câmara à temperatura constante. São indicadas as médias dos tempos de cura para cada energia de moldagem das quatro misturas, bem como as médias das energias de moldagem para cada tempo de cura.

TIPO DE MISTURA	TEMPO DE CURA (DIAS)	ABSORÇÃO (%)				
		ENERGIA DE MOLDAGEM				MÉDIA
		NORMAL	INTERM.1	INTERM.2	MODIFICADA	
CV-90% CAL-10%	7	30,4	28,9	28,1	27,4	28,7
	14	29,1	27,6	25,0	25,5	26,8
	28	29,9	28,6	27,1	27,2	28,2
	60	21,4	17,4	15,8	21,6	19,0
<b>MÉDIA</b>		27,7	25,6	24,0	25,4	25,7
CP-90% CAL-10%	7	37,1	34,3	32,5	32,0	34,0
	14	33,8	31,9	31,2	29,6	31,6
	28	35,6	33,5	32,1	31,7	33,2
	60	26,1	28,0	27,0	27,4	27,1
<b>MÉDIA</b>		33,2	31,9	30,7	30,2	31,5
CP-20% CV-70% CAL-10%	7	31,8	29,9	28,9	28,0	29,6
	14	31,2	29,0	25,9	26,1	28,0
	28	31,3	29,9	28,1	27,5	29,2
	60	24,8	23,0	23,6	22,2	23,4
<b>MÉDIA</b>		29,8	28,0	26,6	26,0	27,6
CV-32% AREIA- 58% CAL-10%	7	16,5	16,3	14,4	13,9	15,3
	14	16,6	14,4	13,8	12,4	14,3
	28	15,6	15,1	13,1	12,8	14,2
	60	16,1	14,4	12,6	12,2	13,8
<b>MÉDIA</b>		16,2	15,0	13,5	12,8	14,4
<b>MÉDIA TOTAL</b>		26,7	25,1	23,7	23,6	24,8

Quadro 5.29 Resultados de ensaios de absorção, processo de cura CTC.

Na Figura 5.41 são plotadas as curvas dos resultados de absorção das quatro misturas em função do tempo de cura, sendo que cada ponto observado é a média das quatro energias de moldagem.

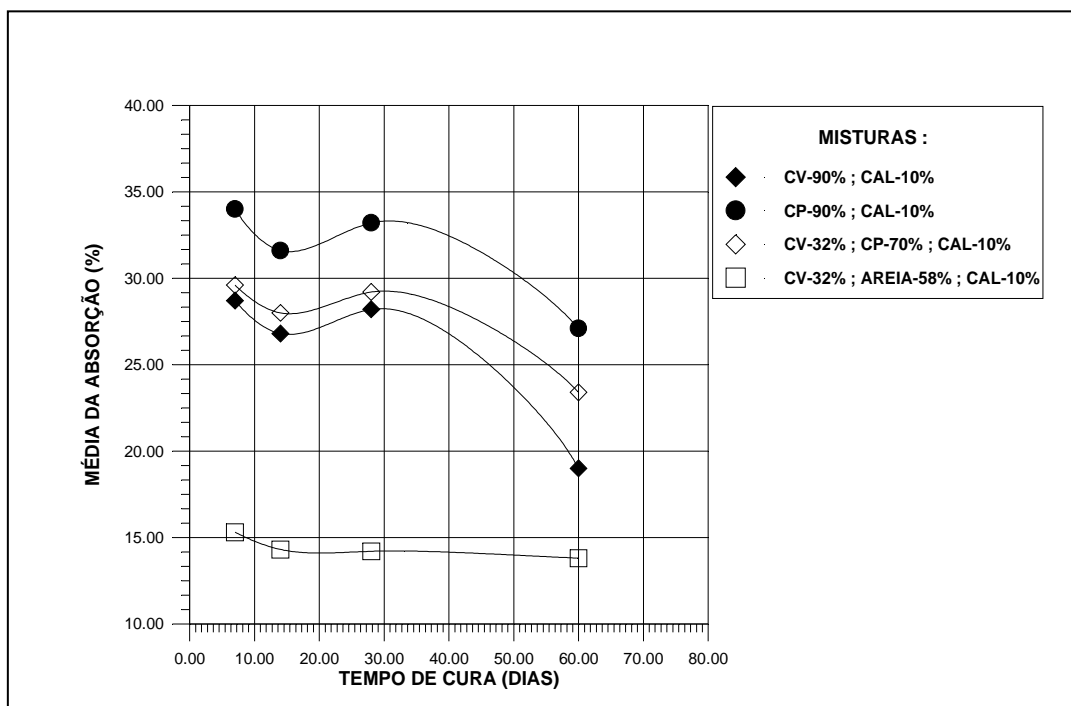


Figura 5.41 Efeito do tempo de cura na absorção

Observa-se que a mistura 4 obteve os menores resultados e ao longo do tempo de 7 a 60 dias praticamente a absorção foi constante. As misturas 1, 2 e 3 ao longo do período de cura de 7 até 28 dias apresentaram uma variação pequena nos resultados de absorção, sendo que aos 60 dias de cura, para estas misturas, houve uma diminuição significativa da absorção, na qual há uma tendência de diminuir cada vez mais ao longo do tempo.

Neste tipo de cura onde é utilizado a temperatura ambiente constante ( $\pm 21$  °C), utilizou-se a areia com o objetivo de tornar curva granulométrica da mistura da cinza e cal melhor graduada, pois ao contrário dos CPs curados pelo processo ATC, a sílica presente na areia não reage com o hidróxido de cálcio disponível.

Esta afirmação acima só vem comprovar que o efeito físico (textura, distribuição de poros etc) é o responsável principal da variação dos resultados de absorção.

Observa-se também, na Figura 5.41, que os minerais gerados pela reação pozolânica também influenciam nos resultados de absorção, visto que, na comparação dos resultados de absorção das misturas 1, 2 e 3, aquelas que na sua composição possuem cinza volante, são as que obtiveram os menores resultados de absorção. Baseando-se nos resultados desta misturas pode-se concluir que: a quantidade de cinza volante e o tipo de cinza (superfície específica) influenciam nos resultados de absorção

Na Figura 5.42 são plotadas as curvas dos resultados de absorção das quatro misturas estabilizadas pozolanicamente em função da energia de moldagem para o tempo de 28 dias.

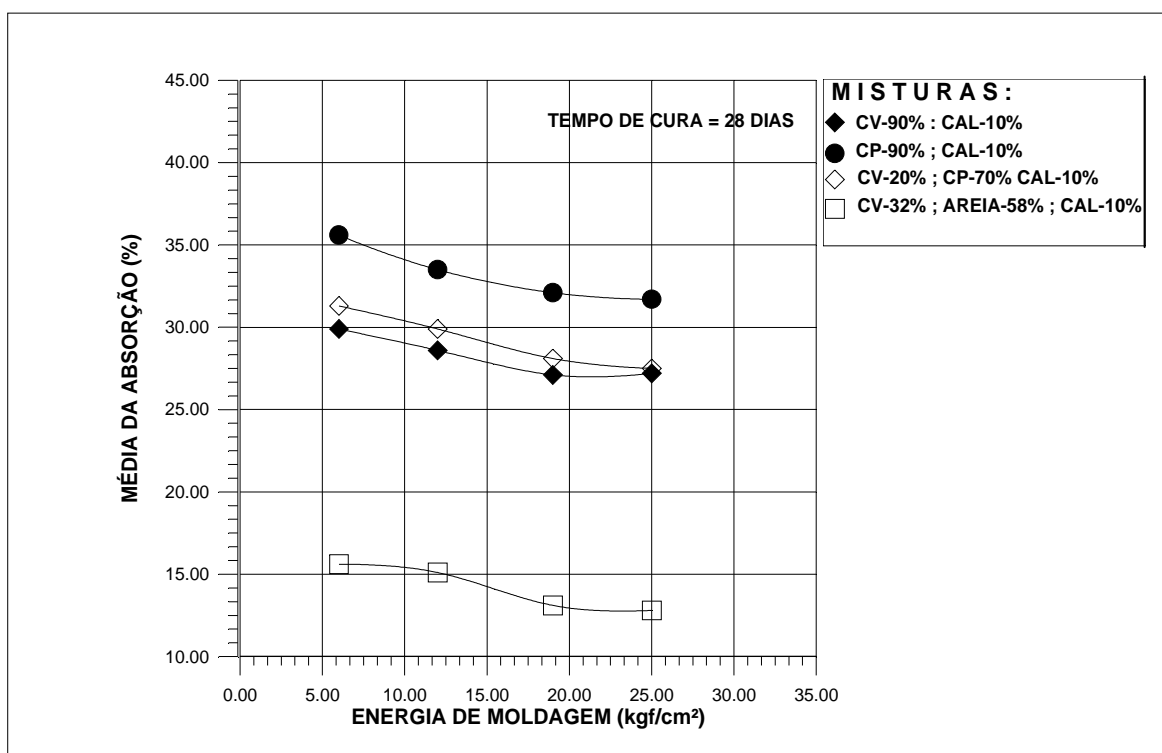


Figura 5.42 Efeito da energia de moldagem na absorção

Observa-se que para as quatro misturas o comportamento das curvas é praticamente linear sendo a energia inversamente proporcional aos resultados de absorção. O comportamento das curvas das quatro misturas também indicam que a variação da energia de moldagem, para os intervalos estudados, influenciou muito pouco nos resultados de absorção. A mistura 4 foi a que



apresentou a maior variação dos resultados de absorção com a variação da energia de moldagem por causa da presença da areia.

Na Figura 5.43 são plotados as curvas dos resultados de absorção em função do tempo de cura, para as quatro energias de moldagem da mistura 1. Este gráfico comprova as afirmações anteriores, onde os níveis de energias estudados tiveram pouca influência nos resultados da absorção se compararmos com o tempo, onde há uma tendência de diminuir a absorção com o crescimento do período de cura.

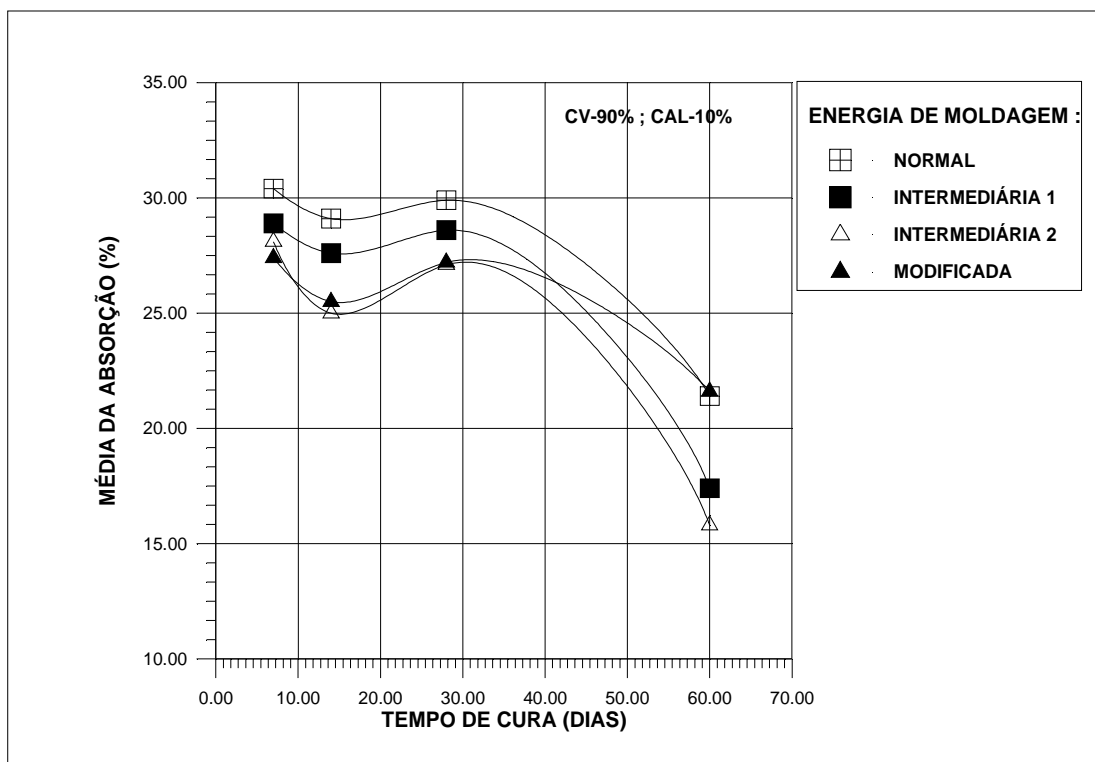


Figura 5.43 Efeito do tempo de cura e energia de moldagem na absorção

Na Figura 5.44 são plotadas curvas dos resultados de absorção da mistura 4 para verificar o efeito da temperatura e energia de moldagem.

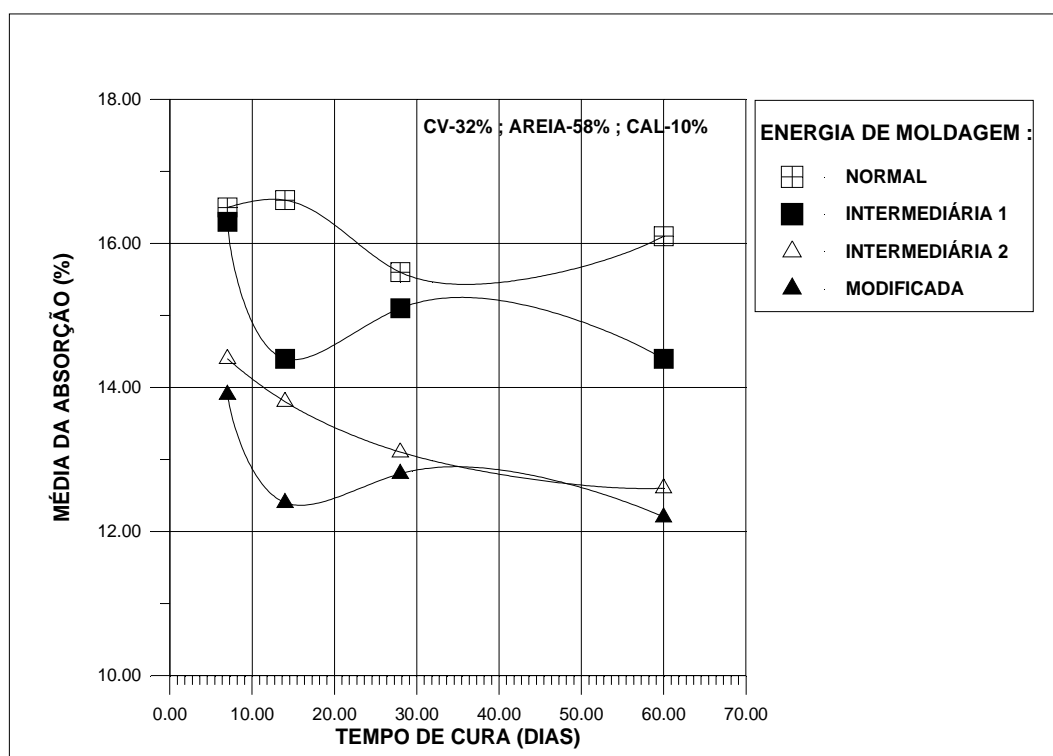


Figura 5.44 Efeito do tempo de cura e energia de moldagem na absorção

Observa-se que o aumento da energia se traduz em uma diminuição da absorção, sendo o efeito deste fator bem maior para esta mistura do que para a mistura 1, levando a crer a importância do efeito físico com a inclusão da areia nesta mistura.

Verifica-se também que as curvas das energias intermediária 2 e modificada, apresentam praticamente o mesmo comportamento ao longo do tempo, mas faltam dados para que se avalie melhor o porquê desse comportamento.

Ao longo do tempo, as curvas de cada energia apresentam uma pequena diminuição nos resultados de absorção, isto porque a areia é um material inerte e a quantidade de cinza volante que irá reagir com a cal afetou muito pouco os resultados de absorção ao longo do tempo de cura. Isto confirma que a parcela do efeito físico (textura, distribuição dos poros) cresceu de importância com o aumento da energia de moldagem, pois houve um maior entrosamento entre os grãos, causando uma diminuição da absorção.

As outras duas misturas apresentaram um comportamento semelhante ao da mistura 1, apenas que as magnitude dos resultados de absorção foram maiores.

### **5.3.2.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO ATC E CTC DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO**

Nas Figuras 5.45 a 5.47 são mostrados os comportamentos das curvas das misturas 1, 3 e 5, respectivamente, em função da energia de moldagem, para os processos de cura por autoclavagem (ATC), na qual foram escolhidos os resultados de CPs curados aos 149 e 188 °C e pela câmara à temperatura constante (CTC), na qual foram escolhidos os tempos de cura de 28 e 60 dias.

Na Figura 5.45 estão plotadas as curvas da mistura 1. Para os corpos-de-prova curados pelo processo ATC, praticamente não houve diferença nos resultados de absorção, mas em ambas há um decréscimo da absorção com o aumento da energia de moldagem. Para os CPs curados pelo processo CTC há uma nítida diferença de resultados de absorção para os corpos-de-prova curados aos 28 e 60 dias, sendo que, o aumento do período de cura é diretamente proporcional à redução de absorção.

Na comparação entre os dois tipos de cura observa-se que os CPs curados em temperatura ambiente (CTC) foram os que apresentaram os menores resultados, possivelmente há influência do tipo de grupo e/ou a forma estrutural do silicato de cálcio hidratado.

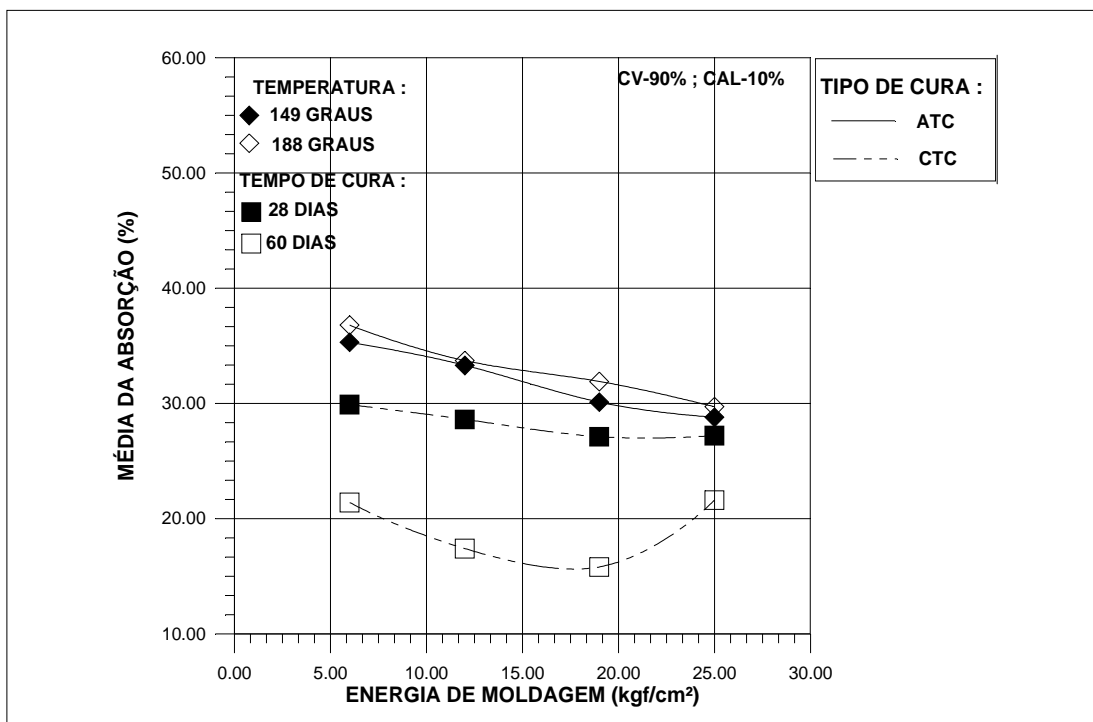


Figura 5.45 Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC

Na Figura 5.46 são plotadas as curvas da mistura 3, repetindo-se as mesmas escolhas de temperatura e tempo de cura dos processos ATC e CTC, respectivamente, predeterminados na Figura 5.45.

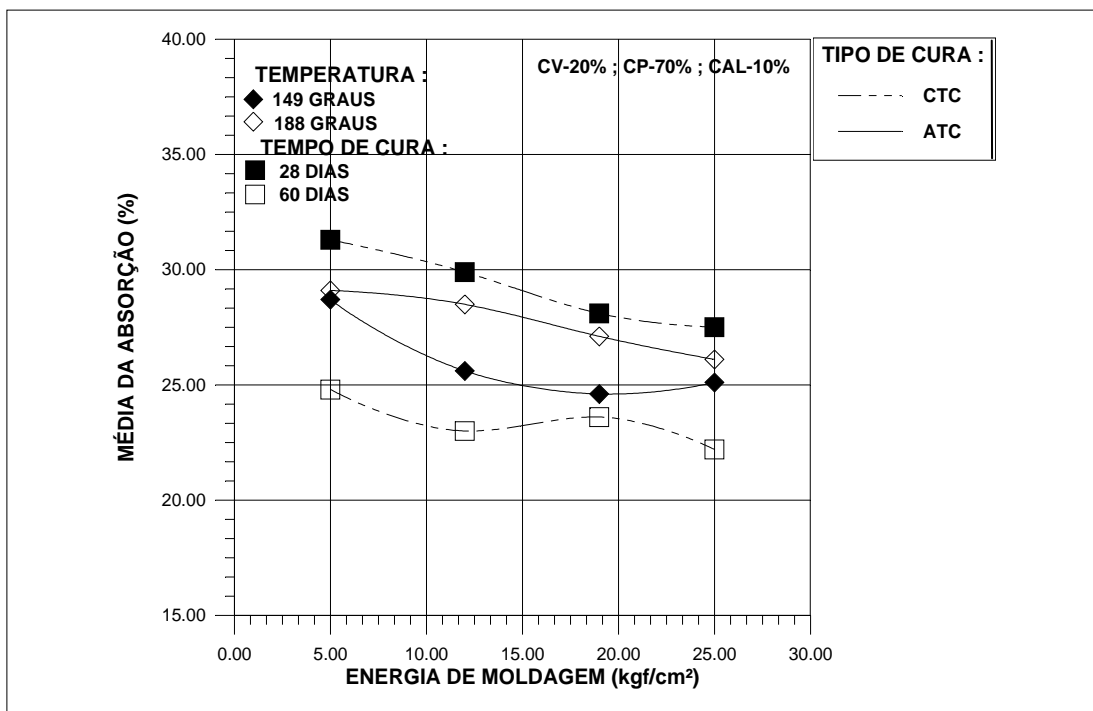


Figura 5.46 Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC

O comportamento das curvas da Figura 5.47 segue o mesmo comportamento da mistura 1, onde os corpos-de-prova curados pelo processo CTC apresentaram resultados de absorção inferiores aqueles curados pelo processo ATC, somente que, a curva para o período de cura de 60 dias aproximou-se mais das outras três curvas, talvez seja decorrente da utilização na composição de 70% de cinza pesada, pois há uma influência dos tipos e forma estruturais dos minerais gerados pela reação pozolânica, como a cinza pesada possui superfície específica menor do que a cinza volante, possivelmente afete a qualidade dos minerais gerados pela reação pozolânica que irão influenciar nos resultados de absorção.

Na Figura 5.47 são plotadas as curvas de absorção da mistura 4., esta mistura, ao contrário das outras duas, mostra que há uma forte influência da energia de moldagem nos resultados de absorção para ambos processos de cura

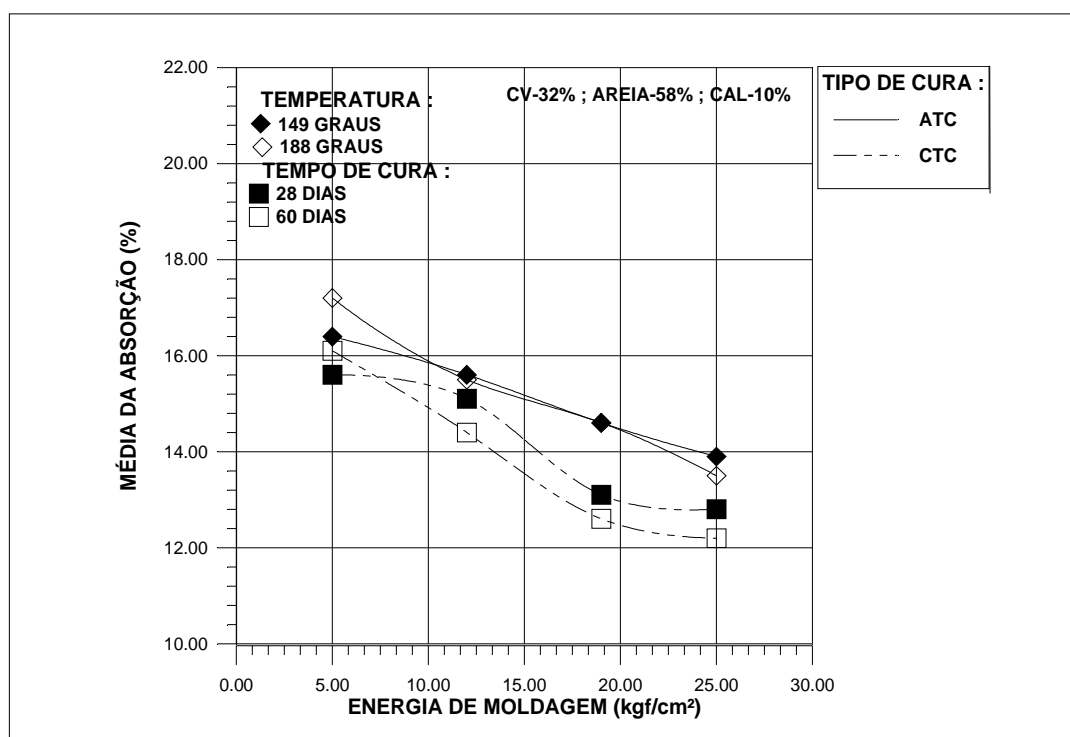


Figura 5.47 Comparação do efeito da energia de moldagem na absorção para os processos ATC e CTC

Pode-se observar, ainda que, somente a partir da energia intermediária 1 começa a existir uma diferenciação dos resultados de absorção entre os dois processos de cura, não importando o período de cura do processo CTC e novamente os resultados aproximam-se na energia modificada. Isto vem a comprovar que a utilização da areia nesta proporção, torna-se a parcela do efeito físico com maior efeito nos resultados de absorção do que o efeito químico (reação pozolânica).

O boletim técnico de fabricação de tijolos de solo-cimento da ABCP apresenta como requisito que a absorção média da água não deve ser inferior em média a 20%, nem apresentar valores individuais inferiores a 22%, enquanto que para blocos cerâmico NBR7171 a absorção de água não deve ser inferior a 8% nem superior a 25%. As misturas 1, 2, 3 e 4 apresentaram uma variação de 21 a 40%, 21 a 34,10% e 12,2 a 19,1% respectivamente.

Na comparação absoluta dos valores de absorção apenas a mistura com areia se enquadraria nos padrões exigidos pela ABCP e NBR - 7171. Em valores absolutos esta afirmação é válida, mas em termos relativos não se pode fazer uma simples comparação entre resultados de absorção, pois a densidade do material cerâmico é diferente do material pozolânico, o certo é comparar o peso de água absorvido pelos dois materiais.

### **5.3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO**

#### **5.3.2.2.1 PROCESSO DE CURA POR AUTOCLAVAGEM**

No Quadro 5.30 estão apresentados os resultados estatísticos do ensaio de absorção das misturas 1,3 e 4, que foram curadas pelo processo ATC.

Tipo de mistura	Resultados de análise estatística				
	média (%)	mediana (%)	desvio padrão (%)	mínimo (%)	máximo (%)
1	30,78	31,00	4,34	21,10	40,60
3	27,28	27,25	2,64	21,00	34,10
4	14,90	14,90	1,36	12,20	19,10

Quadro 5.30 Resultados estatísticos

No Quadro 5.31 estão apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) dos fatores principais do processo de cura por autoclavagem (ATC) dos resultados do ensaio de absorção e os resultados de efeito, em relação a variação total de cada fator e do resíduo, para as misturas 1, 3 e 4. O objetivo da ANOVA é determinar o efeito de cada fator, caso exista, na variabilidade dos ensaios de absorção.

Fatores Principais	Mistura 1			Mistura 3			Mistura 4		
	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	Efeito (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	Efeito (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	Efeito (%)
Energia	2,75	51,44	48,42	2,75	20,12	34,43	2,75	85,06	73,06
Temperatura	2,75	30,70	28,52	2,75	8,51	13,52	2,75	5,43	3,85
Tempo	3,14	1,02	0,02	3,14	7,55	8,84	3,14	4,42	2,23
Resíduo	-	-	23,04	-	-	43,21			20,86

Quadro 5.31 Resultados de análise de variância do ensaio de absorção.

Os resultados do valor F indicam que a hipótese de igualdade das médias dos níveis de cada fator foi rejeitada para quase todas as misturas para um  $\alpha_{95\%}$  de confiabilidade, ou seja,  $F_{cal} > F_{tab}$ , exceção feita para mistura 1, no fator tempo.

A energia de moldagem foi o fator que apresentou o maior valor de  $F_{cal}$ , isto é, o fator de maior efeito sobre os resultados de absorção, para todas as misturas. Pode-se observar que a mistura que utilizou areia (mistura 4) foi aquela que apresentou a maior relação de variâncias ( $F_{cal}$ ) enquanto a mistura que utilizou somente cinza volante com cal (mistura 1) foi a que apresentou, se compararmos apenas os tempos de cura entre as misturas, o maior valor de  $F_{cal}$ . Estas observações sugerem-se:

i - Os minerais formados pela reação química da sílica/alumina e hidróxido de cálcio, geraram pouco efeito nos resultados de absorção das misturas estabilizadas pozolanicamente e curadas em autoclave ;

ii - A introdução de um agregado que melhore a curva granulométrica (torne-a melhor graduada) das misturas de cinza e cal, produz uma redução mais significativa nos ensaios de absorção do que o aparecimento de minerais gerados pela reação química da cinza com a cal em materiais estabilizados pozolanicamente e curados em temperaturas acima da ambiente ;

Como foi verificado anteriormente o fator energia de moldagem foi o mais significativo, isto é, observando a coluna de efeito verifica-se que 48,42, 34,43 e 85,06% da variação total é devido a variação da energia de moldagem. Os resíduos apresentaram valores altos do efeito em relação à variância total, talvez indique que há influência de um fator sobre outro nos resultados de absorção.

#### **5.3.2.2 PROCESSO DE CURA PELA CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE (CTC)**

No Quadro 5.32 estão apresentados os resultados de dados estatísticos dos ensaios de absorção das misturas 1,2,3 e 4, que foram curados pelo processo CTC.

Tipo de mistura	Resultados de análises estatísticas				
	média (%)	mediana (%)	desvio padrão(%)	mínimo (%)	máximo (%)
1	25,69	27,30	4,31	15,8	30,4
2	31,49	31,95	3,10	26,1	37,1
3	27,52	28,05	2,99	22,2	31,8
4	14,39	14,40	1,49	12,2	16,6

Quadro 5.32 Dados estatísticos de ensaio de absorção

No Quadro 5.33 estão apresentados os resultados da análise de variância dos fatores principais para as quatro misturas.



Fatores	cv--90% ; cal-10%			cp-90% ; cal-10%			cv-20% ; cp-70% cal-10%			cv-32% ; areia-58% cal-10%		
principais	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	efeito (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	efeito (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	efeito (%)	F <sub>tab</sub>	F <sub>cal</sub>	efeito (%)
Energia	3,24	8,02	8,36	3,24	7,50	12,1	3,24	31,7	23,7	3,24	76,5	79,3
Tempo	3,24	69,8	85,1	3,24	40,0	72,9	3,24	91,7	70,0	3,24	12,7	12,4
Resíduo	-	-	9,5	-	-	14,9	-	-	6,24	-	-	8,28

Quadro 5.33 Resultados de análise de variância do ensaio de absorção

Os resultados de análise de variância mostram que os fatores principais são significativos para um  $\alpha_{95\%}$  de confiabilidade, ou seja, a hipótese de igualdade de médias entre os níveis de cada fator foi rejeitada ( $F_{cal} > F_{tab}$ ).

Observa-se que para as misturas 1,2 ,3 o fator tempo de cura mostrou-se com um valor mais significativo do que a energia de moldagem, enquanto que para a mistura 4 deu-se o inverso, para materiais estabilizados pozolanicamente. Estes resultados sugerem-se as seguintes conclusões :

i - A introdução de areia aumentou a parcela do efeito físico (textura, distribuição de poros) sobre o efeito químico (reação pozolânica) nos resultados de absorção para materiais estabilizados pozolanicamente e curados a temperatura ambiente, quanto melhor graduada a curva granulométrica maior será a redução de absorção ;

ii - Para misturas em que na sua composição apresentou cinza e cal, o efeito químico (reação pozolânica) foi mais significativo nos resultados de absorção do que o efeito físico. A quantidade e o tipo de cinza, mantendo o mesmo teor de cal, será responsável pela variação dos resultados de absorção.

Os resultados na coluna dos efeitos, para as misturas 1, 2 e 3, mostram que 85,1, 72,9 e 70,0% da variância total é devido a variância do tempo de cura, respectivamente. Para a mistura 4, verifica-se que 79,3% da variância total é devido a energia de moldagem.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Baseando-se nas análises realizadas no capítulo 5, podemos concluir que :

**1.** Independente dos fatores estudados em ambos tipos de cura, a quantidade de cal, cinza e atividade pozolânica, influenciam na resistência à compressão dos materiais estabilizados pozolanicamente.

**2.** Resultados mostram que o fator temperatura de cura tem como finalidade acelerar as reações pozolânicas. Os corpos-de-prova curados em autoclave(ATC) com temperaturas entre 149 a 188°C obtiveram em média um acréscimo de resistência que variou entre 30 à 60% em comparação aos corpos-de-prova curados pelo processo da câmara à temperatura constante(CTC), curados aos 7, 14, 28 e 60 dias.

**3.** Resultados de resistência à compressão simples mostram que o aumento de energia de moldagem desenvolveu um acréscimo de resistência. Provavelmente, grande parte deste aumento foi devido a um maior número de reações pozolânicas que se desenvolveram com a aproximação das partículas devido ao aumento da energia. Em média os acréscimos de resistências foi de 20 a 40% e 5 a 25% para os processos de cura ATC e CTC, respectivamente e estes valores relacionam-se a menor e maior energia.

**4.** Para os intervalos das variáveis estudadas nesta pesquisa, o efeito do tempo de cura na autoclave e a umidade de moldagem para ambos processos de cura pouca influência tiveram nos resultados de resistência.

**5.** Estudos realizados por análise de variância(ANOVA) mostraram que as variáveis energia de moldagem e o tempo de cura, fatores principais desta análise para os processos de cura ATC e CTC, respectivamente, foram as que obtiveram as maiores variabilidades, ou seja, 48 e 88% da variância total é devido a variância entre as energias de moldagem e os tempo de cura, respectivamente.

**6.** Nas misturas 1 e 3, onde não foi empregado areia, os corpos-de-prova curados pelo processo CTC para um tempo de cura de 60 dias, em média, alcançaram a faixa de resistência para os corpos-de-prova curados nas temperaturas de 149 a 188 °C.

**7.** A areia utilizada no experimento mostrou-se adequada para reagir a altas temperaturas, como mostram os resultados de ensaio de resistência.

**8.** Independente do processo de cura os resultados de absorção mostraram que, o maior fator para redução da absorção é o efeito físico, isto é, a forma, textura e distribuição dos poros, influenciaram na maior ou menor redução da absorção em materiais estabilizados pozolanicamente. A utilização da areia na mistura 4 resultou em média uma diminuição de 50% da absorção em relação as misturas 1, 2 e 3.

**9.** Para as misturas onde não foi utilizada areia, o efeito químico(reação pozolânica) foi mais pronunciado do que o efeito físico, sendo que os resultados de absorção para CPs curados pelo processo CTC foram menores do que o processo ATC, talvez esta diferença seja devido às estruturas diferentes que se formaram após a reação e em média o decréscimo de absorção foi de 40, 15 e 4 % para as misturas 1, 3 e 4. Verifica-se por estes resultados a importância do efeito da reação pozolânica nos resultados de absorção.

**10.** Para as misturas 1,2 e 4 onde os corpos-de-prova foram curados pelo processo CTC a tendência é diminuir a absorção com o aumento do período de cura.

**11.** Estudos realizados por análise de variância (ANOVA) mostraram qual as variáveis energia de moldagem e tempo de cura, fatores principais da análise realizadas nos processos de cura ATC e CTC, respectivamente, foram as que apresentaram as maiores variabilidade dos resultados de absorção. Para as misturas 1 e 3 os resultados de 34 e 48% da variância total são devido à variância entre as quatro energias de moldagem, respectivamente, enquanto que para a mistura 4 este valor foi de 79%. Para o fator tempo de cura entre 70 a 85% da variação total foi devido a variância dos quatro períodos de cura.

**12** Os resultados de durabilidade, indicada neste trabalho por porcentagem de perda de massa, mostrou que para corpos-de-prova, moldados na mesma energia, tempo e temperatura de cura pelo processo ATC, há uma forte influência do efeito químico. Quanto maior sua atividade pozolânica e quantidade de cinza e cal menor é a perda de massa. A diminuição da perda de massa foi em média na faixa de 35 a 45%, comparando a mistura com a mistura 2

**13.** Estudos realizados por análise de variância (ANOVA) mostram que para a mistura 1 o fator tempo de cura foi o mais significativo, seu efeito foi de 82 % em relação à variabilidade dos resultados de perda de massa. Enquanto que para as outras misturas foi a energia de moldagem na qual em média seu efeito foi de 48%.

## **6.2 SUGESTÕES**

**1.** Realizar análises mineralógicas para se determinar os tipos de minerais que se desenvolvem após a reação pozolânica em corpos-de-prova curados em altas e baixas temperaturas.

**2.** Estudar outros tipos de cura, como por exemplo, utilização de câmara climatizada, em termos de custo este tipo de processo de cura é um intermediário entre os dois processos estudados.

**3.** Desenvolver um processo expedito para se determinar o melhor traço dos materiais que fazem parte da mistura.

**4.** Realizar mais estudos na cinza pesada, variando sua superfície específica.

**5.** Desenvolver tecnologias na área da engenharia civil para aplicação destes resíduos com cal, por exemplo, processo executivo como base e sub-base de pavimentos , fabricação de blocos para construção civil.

**6.** Estudar outros tipos de resíduos com propriedades pozolânicas como materiais alternativos para construção em geral.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU DE, J. B. **Caracterizacion de cenizas volantes de Centrales Termoeléctricas de carbon Brasileñas.** Catalunya, 1992. tesis de doctoral - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camiws, Canals I Ports.

AHLBERG, H.L.; BARENBERG, E.J. **Pozzolanic Paviments.** University of Illinois, 1965. Engineering Experiment Station Bull. 473. 128 p.

ALEXANDER, G.B.; HESTON, W.M.; ILER, R.K. **The solubility of amorphous silica in water.** The journal of Physical Chemistry, vol. 58, 1954.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **Classification of coals by rank:** D 388. Philadelphia - USA - 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **Specification for fly ash and other Pozzolans for use with liwe:** C 593. Philadelphia - USA - 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **Specification for fly ash and raw or calcined natural Pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concret:** C618. Philadelphia - USA - 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **Specification for line for use with Pozzolans:** C821. Philadelphia - USA - 1990.

ANDRADE , A. **Caracterização das cinzas volantes do carvão de Candiota.** Porto Alegre, 1985, 152p. Dissertação de mestrado - PPGEMM/UFRGS.

ANDRADE, A. ; SOLARI, J.A. **Impacto ambiental do processamento de carvão no Rio Grande do sul e Santa Catarina: avaliação e perspectiva.** Anais do I

encontro de pesquisadores em carvão do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, R.S. 1985, p. 174 - 191.

ANDRADE, A.C. **Tijolos de cinza volante e cal** : estudo do desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência. Porto Alegre, 1991. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, curso de pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

ASSARSSON, G.O. Proc. Fourth Inst. Symp. on **Chemistry of cement** (Washington), 1960, 1, p. 190.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND METODO SC-3  
**Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem** - São Paulo, 1986

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cal hidratado para argamassa**: NBR 7175. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cal virgem, Cal hidratada - Análise Química**. NBR 6473, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tijolo maciço de Solo-Cimento. Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água**. NBR 8482, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. **VI Reunião Anual da ABPv** - 1971.

BAPTISTA, CYRO NOGUEIRA. **Pavimentação - Compactação dos Solos no campo - Camada de base - Estabilização de Solos**. Ed. Globo, 1979 Tomo II.

BENTON, E. J. **Ciment pozzolan reaction**. Highway Research Board bulletin, n<sup>o</sup> 239, 1962 p. 56-65.

BESSEY, G. E.; **Chemistry of elements.** London & New York: Academic Press, 1964, Vol. 2, chapter 16, p. 1-16.

BESSEY, G. E.; PURTON, M. J. **The effect of Grading of the aggregate upon the strength of Calcium Silicate Brick or Blocks:** In Autoclaved Calcium Building Products. London, Society of Chemical Industry, 1967 pg. 18-23.

BOGUE, R. H. **The chemistry of Portland Cement.** Reinhold Publication company, 1947.

BRACKETT. **Availability, Quality and present utilization on fly ash.** In fly ash utilization, 1967, Pittsburgh, Pennsylvania, symposium... Edison Electric Institute National Coal Association - Bureau of Mines.

CAMPANHA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS C.P.R.M., 1989, Vol. 2  
Cap. 13, p. 321-450.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um solo residual compactado.** Porto Alegre/RS, 1979

COLE, W. F.; MOOREHEAD, D. R.; **High-strength calcium Silicate hydrate. II X-Ray, D.T.A., chemical and electron microscope result.** In: Autoclaved calcium Silicate building products, 18, London, 1965, p. 134-141.

CROSBY, R. L.. **Lime-fly ash ratio and admixture content versus strength of stabilized clayed soil.** Unpublished M. S. Thesis. Library, Iowa State University of Science and Technology. Ames, Iowa, 1957.

DAVIDSON, D. T.; SHEELER, J. B.; DELBRIDGE, N. G. **Reactivity of four types of fly ash with lime.** Highway Research Board Bulletin, 193, p. 24-31, 1958.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM-Solo-Cimento.  
**Determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem.** DNER-ME /94.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.**Determinação da resistência à compressão simples de solos estabilizados com cinza volante e cal hidratado.** DNER-ME 180/87.

EVERETT, A. materials. 2<sup>a</sup>.ed London, B.T., Batsford, 1978

FABER, John H.V.S. **Overview of ash production and utilization.** In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIM, 4, 1975, St. Louis, MO. Proceeding...St. Louis: National Coal Association, 1976, p.5-13.

FIEDLER, H; MARTINS, A.F.; SOLARI, J.A. **Meio ambiente e complexo termoelétrico, “Caso Candiota”.** Ciência hoje - Revista da sociedade brasileira para o progresso da ciência,1990, Vol. 12, nº. 68.

FRANK, C.; TOWNSEND; DONAGHE R. T. **Investigation of accelerated curing of soil-lime and lime-fly ash aggregate mixture.** Viksburg, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1976.

GREENBERG, S. A. **The Chemisorption of calcium hidroxide by silica.** Journal of Physical Chemistry, march, 1956.

HOLLON, W.; MARKS, B. A. **A correlation of published data on lime - Pozzolan- Aggregate mixtures for highway base course construction.** Engineering Experiment Station Circular N° 72. Illinois. University of Illinois College of engineering. 1949.

ILER, R. K. **The Colloid Chemistry of silica and silicates.** Cornell University Press, 1954.

KAAKINEN, J. W.; JORDEN, R. M.; LAWASANI, M. H.; WEST, R.E. **Trace Element Behavior in Coal-Fired Power Plant.** Environmental Science and Technology, 1985, p. 862-869.

KONDO, R.; ABO-EL-ENEIN, S. A.; DAIMOW, M. **Reativity of granulated Blastfurnace Slag in hydrothermal reaction.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PRODUCTS AUTOCLOVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,3, 1973, Utrecht. Jaarbeurs Congrescentrum.

LEONARD, R. J. DAVISON, D. T. **Pozzolanic reativity of fly ash.** Higher Research Board Bulletin, n<sup>o</sup> 23, 1959..

LUNGER, R. R. **Use of sodium carbonate with lime-fly ash for stabilization of sand.** Unpublished M.S. Thesis Library, Iowa State University of Science and Tecnology Ames, Iowa, 1958.

MARKON, G. **World overview.** In: INTERENATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 4, 1976, St. Louis, **Proceeding...**St. Louis: National coal association, 1976, p.27-38.

MARTINS, A. F.; ZANELLA, R. **Estudo analítico-ambiental na região carboenergética de Candiota.** Ciência e cultura - Revista da sociedade brasileira, Bagé RS, 1990.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soil with lime and fly ash.** Iowa State University of Science and Technology PHD, 1961, Engineering Civil, p. 229.

MEKSRAITIS, P. R. C.; BOFF, M.; ANDRADE, A. C. F. CHEES, Fradique. **Cinza e Cal: potencialidades na construção de tijolos.** 2<sup>o</sup> Seminário de estudos de aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral,. Florianópolis, 1989.

MINFRA. **Balanco Energético Nacional (BEN)**, Brasilia, DF, Brasil, 1991, 114p.

MINICK, L. J. **Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash.** In: Fly Ash Utilization, 1967, Pittsburgh, Pennsylvania, March 14-16.. Proceedings... Edison Electric Institute - National coal Association - Bureau of Mines Symposium. pg. 330.

MOOREHEAD, D. R. **The rapid hidrothermal tratment of lime-Silica compacts.** In: International Symposium on autoclaved Calcium Silicate building products, 3, Utrecht, Jaabens Congreentrum, 1973, p. 1-26.

NANNI, Luiz F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação dos experimentos.** Caderno de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Cível - UFRGS, 1992, p. 194.

PINTO, C. S. **Equipamento reduzido para moldagem Corpos-de-Prova de solo-aditivo.** IPR - Rio de Janeiro/RJ. 1965.

REPETTO, M. **Toxicologia Fundamental.** Ed. Científico Médicas, 2<sup>o</sup> ed., p.129.1988

ROY, D. M.; JOHNSON, A. M. **Investigation of Stabilities of calcium silicate hidrates at elevated temperature and pressure.** In: Symposium on autoclave calcium silicate bulding products, 18, 1965, London. Proceeding... London:School of Pharmacy (University of London, 1965), p. 114-120.

SABATTINE, F. H. **O processo construtivo de edifício de alvenaria estrutural sílico-calcário.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica - USP. São Paulo/SP. 1984.

SALOMÃO, P. **Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante.** Rio de Janeiro, 1971. Dissertação( Mestrado em Engenharia) - COPPE - UFRJ.

SAUMAN, Z. **Study of gypsi rock effect of the reaction mechanic of quartz or flyash -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  under hidrothermal conditions.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOCLAVE CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS, 3,1973 , Utrecht. Jaarbenrs Congrescentrum.

SMITH, R. D.; CAMPBEL, J. A.; NIELSON, K. K. **Concentration dependence upon particle size of volatilized elements in fly ash.** Enviromental Science and tecnology, Washington, D.C., 13, 1979, p. 553-558.

TAYLOR, F. W. **A review of autoclaved calcium silicate.** In: Symposium on autoclaved calcium silicate bulding products, 18, 1965, London. Proceeding... London School of pharmacy (University of London, 1965), p. 195-205.

WALKER, R. C.; PURTON, M. J.; **Some observations on calcium silicate brick specimens in the autoclave.** In: International Symposium on Autoclave Calcium Silicate Building Products. 3, 1973, Utrecht, Jaarbenrs Congrescentrum. p. 1-13.

ZWONOK, O.; DA SILVA,N.I.; ROCHA, P.V. **PROJETO CINZACAR. Estudo da utilização de cinzas de carvão.-1<sup>a</sup>- fase de levantamento das cinzas na forma do carvão mineral no estado do R.S.** .FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA( CIENTEC) . Publicação interna,1989,pg. 14.

ZWONOK, O; CHIES, F. **PROJETO CICASOL. Pavimentos de Solos estabilizados com cinza volante e cal.** Publicação interna, Porto Alegre, 1989. CIENTEC, FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA.