

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**Cais Pozolânicos, Caracterização e  
Desempenho Mecânico**

**João Batista Melo Lima**

**Dissertação de Mestrado**

Campina Grande – Paraíba  
Maio – 1993

**João Batista Melo Lima**

# **Cais Pozolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico**

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da  
Universidade Federal da Paraíba em Cumprimento às Exigências para  
Obtenção do Grau de Mestre (M.Sc.).

Área de Concentração: **Geotecnia**

Professor Orientador: Dr. **Heber Carlos Ferreira**

Campina Grande – Paraíba  
Maio – 1993



L732c Lima, João Batista Melo.  
Cais pozolânicos, caracterização e desempenho mecânico /  
João Batista Melo Lima. - Campina Grande, 1993.  
127 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -  
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e  
Tecnologia, 1993.  
"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".  
Referências.

1. Cal. 2. Cal - Indústria. 3. Cal Pozolânica. 4.  
Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos.  
II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB).  
III. Título

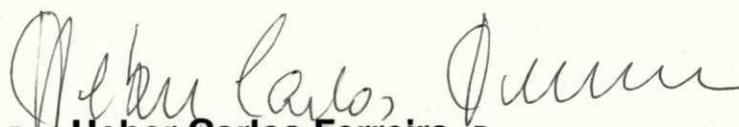
CDU 666.92(043)

# Cais Pozolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico

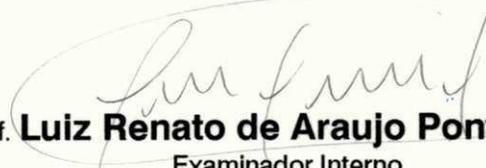
**João Batista Melo Lima**

UFCG

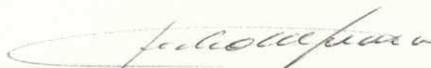
Dissertação Aprovada em: 12/05/93



Prof. **Heber Carlos Ferreira** - Dr.  
Orientador



Prof. **Luiz Renato de Araujo Pontes** - Ph.D  
Examinador Interno



Prof. **Pedro Kunihiro Kiyohara** - Dr.  
Examinador Externo

UFCG

Campina Grande - Paraíba  
Maio - 1993

À minha esposa **Socorrinha**, pelo incentivo, dedicação e despreendimento, que puderam tornar mais amenas as tarefas desenvolvidas.

Às minhas filhas, **Clarissa, Diana e Joana**, pelo longo tempo de ausência, pela paciência e compreensão nos difíceis momentos do trabalho, com todo amor e carinho lhes dedico esta dissertação.

## AGRADECIMENTO

A **DEUS** sobretudo, presença constante em meu aprimoramento intelectual.

Ao prof. Dr. **Heber Carlos Ferreira**, orientador desta dissertação, os sinceros agradecimentos, pelos ensinamentos transmitidos, pela assiduidade, transparência e amizade que contribuíram valiosamente na orientação desta Dissertação.

Aos Engenheiros **Solange e Gelmíres**, pelo auxílio dos ensaios realizados nos laboratórios de Solos.

À **CAPES, ATECEL e EMATERCE**, pelo auxílio financeiro concedido.

Ao prof. **Antônio Nunes de Miranda**, pela contribuição inestimável na transmissão de conhecimentos.

Ao prof. **Myrson Lima**, pela revisão do texto e leitura crítica, que contribuíram fortemente na desenvoltura deste trabalho.

Aos meus pais **Edson Carvalho Lima e Maria Myrtes de Melo Lima**, a quem devo toda a minha estrutura educacional, deixando o caminho aberto para que pudesse um dia saborear os frutos da vitória.

A todos meus irmãos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa, em especial à minha mana **Mirtinha**, que no curto período de convívio conosco sempre procurou buscar incessantemente resolver todos os obstáculos da vida.

**É gratificante viver a vida da forma mais completa;  
ser útil a cada momento, a cada instante, vivendo intensamente  
o caminho projetado por Deus.**

*João Batista Melo Lima*

## ABREVIATÓES

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AF	–	Alto Forno
ATD	–	Análise Térmica Diferencial
ATG	–	Análise Termogravimétrica
CP	–	Cimento Portland
CPII-F	–	Cimento Portland Composto com Filer
RCS	–	Resistência à Compressão Simples
RTI	–	Resistência à Tração Indireta
POZ	–	Pozolana

## RESUMO

A aplicação de materiais alternativos tem-se intensificado ultimamente na construção civil em decorrência do elevado custo dos materiais tradicionalmente utilizados, como os cimentos do tipo Portland. As cais pozolânicas, misturas de cais com pozolanas, poderão ser promissoras, tendo em vista que, dentre outras propriedades, apresentam adequado desempenho mecânico e baixo custo. As cais pozolânicas foram larga e extensivamente utilizadas na Antigüidade, sendo seu uso quase que totalmente abandonado atualmente. Estes aglomerantes têm custo similar ao da cal com desempenho mecânico de 15 a 20 vezes superior, podendo ser obtidas argamassas com valores de resistência à compressão simples acima de 16 MPa.

No presente trabalho, foram estudadas as propriedades caracterizantes e de engenharia de cais pozolânicas na forma isolada, e de argamassas, de acordo com as normas da ABNT, obtidas por misturas de amostras de cais individuais e uma pozolana artificial.

Nos ensaios realizados para a determinação das características das amostras de cais e pozolana, foram usados através da análise química, massa específica real, análise térmica diferencial e gravimétrica e permeâmetro de Blaine. Os ensaios tecnológicos foram determinados através da resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Os resultados dos ensaios caracterizaram as cais como calcíticas e dolomíticas e a pozolana, oriunda de uma argila caulínica, provavelmente com impureza de sílica.

Nos ensaios tecnológicos evidenciou-se uma resistência à compressão simples, que varia de 0,26 MPa a 16,50 MPa em função das amostras utilizadas, das composições cal-pozolana empregada e do tempo de cura. Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem concluir que as cais pozolânicas propiciam resistências mecânicas aceitáveis, podendo ser utilizadas em obras de pequeno e médio porte na engenharia civil.

## ABSTRACT

The use of alternative materials has lately been intensified in civil construction due to the high cost of traditional material such as Portland cement. The lime-pozzolana a mixtures of lime and pozzolanas may be promising since it has an adequate mechanical performance, and low price. The lime-pozzolana was extensively used lately, but at present, it has not been used so largely in civil construction. This material has a similar cost to the lime with superior mechanical performance from 15 to 20 times from which we can obtain some mortar that is resistant to simple compression over 16 Mpa.

In this paper we studied the characterizing properties of lime-pozzolana engineering in its isolated form and the properties of mortar we obtained from mixture of samples of individual lime and artificial pozzolana, taking in account the norms of ABNT.

The tests to determine the characteristics of the samples of lime and pozzolanas were made through chemical analysis, specific gravity, diferencial and gravimetric thermal analysis and Blaine's permeameter. The technological tests were determined through the resistance to simple compression and resistance to traction by diametrical compression of cylindrical proof corps.

The results of tests characterized the lime as calcitics and dolomitics and show that pozzolana comes from caulinitic clay, probably with silic impurity. The technological tests give evidence that this material is resistant to simple compression which changes from 0,26 MPa to 16,50 MPa due to the samples, used the application of lime-pozzolana compositions and the time of season. Thus we can conclude that lime-pozzolana provides the acceptable mechanic resistance to be used in small and medium constructions in civil engineering.

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Histórico dos Materiais de Construção . . . . .	3
2.2 - Cal . . . . .	7
2.2.1 - Caracterização da Cal . . . . .	8
2.2.2 - Classificação e Propriedades das Cais . . . . .	9
2.2.3 - Utilização da Cal em Construção Civil . . . . .	13
2.2.4 - Estabilização com a Cal . . . . .	14
2.3 - Pozolana . . . . .	15
2.3.1 - História das Pozolanas . . . . .	16
2.3.2 - Características e Composição Química das Pozolanas . . . . .	17
2.3.3 - Atividade Pozolânica . . . . .	20
2.3.4 - Vantagens e Uso de Materiais Pozolânicos . . . . .	22
2.4 - Cimento Portland . . . . .	24
2.4.1 - Classificação do Cimento Portland . . . . .	27
2.4.2 - Cimentos com Adição de Pozolana . . . . .	29
2.5 - As Cais Pozolânicas . . . . .	30

## **CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

3.1 - Introdução . . . . .	32
3.2 - Materiais . . . . .	32
3.2.1 - Cais . . . . .	32
3.2.2 - Pozolana . . . . .	34
3.2.3 - Cimento Portland . . . . .	34
3.2.3 - Areia . . . . .	34
3.2.4 - Água . . . . .	35
3.3 - Métodos . . . . .	35
3.3.1 - Ensaio de Caracterização . . . . .	35
3.3.1.1 - Massa Específica Real . . . . .	35
3.3.1.2 - Área Específica . . . . .	35
3.3.1.3 - Análise Química . . . . .	36
3.3.1.4 - Análise Térmica Diferencial - ATD . . . . .	36
3.3.1.5 - Análise Termogravimétrica - ATG . . . . .	36
3.3.2 - Ensaio Tecnológico . . . . .	37
3.3.2.1 - Resistência à Compressão Simples - RCS . . . . .	37
3.3.2.2 - Resistência à Tração Indireta - RTI . . . . .	40
3.3.3.3 - Análise Estatística . . . . .	40

## **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

4.1 - Introdução . . . . .	42
4.2 - Ensaio de Caracterização . . . . .	42
4.2.1 - Massa Específica Real . . . . .	42
4.2.2 - Área Específica . . . . .	43
4.2.3 - Análise Química . . . . .	43
4.2.4 - Análise Térmica Diferencial - ATD . . . . .	45
4.2.5 - Análise Termogravimétrica - ATG . . . . .	47
4.3 - Ensaio Tecnológico . . . . .	48
4.3.1 - Resistência à Compressão Simples - RCS . . . . .	48

4.3.2 - Resistência à Tração Indireta - RTI . . . . .	54
4.4 - Análise Estatística . . . . .	61

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES**

5.1 - Carbomil . . . . .	66
5.2 - Megaó . . . . .	66
5.3 - Cimencaí . . . . .	66
5.4 - Calcimento . . . . .	66
5.5 - Pozolana . . . . .	67
5.6 - Comportamento Mecânico das Cais . . . . .	67
5.7 - Comportamento Mecânico das Cais Pozolânicas . . . . .	67
5.8 - Comportamento Mecânico das Cais Pozolânicas Aditadas com Cimento . . . . .	67
5.9 - Conclusões Finais . . . . .	68

## **CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>70</b>
---	-----------

# ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1	. . . . .	. 77
TABELA 2	. . . . .	. 77
TABELA 3	. . . . .	. 78
TABELA 4	. . . . .	. 79
TABELA 5	. . . . .	. 80
TABELA 6	. . . . .	. 81
TABELA 7	. . . . .	. 82
TABELA 8	. . . . .	. 83
TABELA 9	. . . . .	. 84

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	. . . . .	85
FIGURA 2	. . . . .	86
FIGURA 3	. . . . .	87
FIGURA 4	. . . . .	88
FIGURA 5	. . . . .	89
FIGURA 6	. . . . .	90
FIGURA 7	. . . . .	91
FIGURA 8	. . . . .	92
FIGURA 9	. . . . .	93
FIGURA 10	. . . . .	94
FIGURA 11	. . . . .	95
FIGURA 12	. . . . .	96
FIGURA 13	. . . . .	97
FIGURA 14	. . . . .	98
FIGURA 15	. . . . .	99
FIGURA 16	. . . . .	100
FIGURA 17	. . . . .	101
FIGURA 18	. . . . .	102

FIGURA 19 . . . . .	103
FIGURA 20 . . . . .	104
FIGURA 21 . . . . .	105
FIGURA 22 . . . . .	106
FIGURA 23 . . . . .	107
FIGURA 24 . . . . .	108
FIGURA 25 . . . . .	109
FIGURA 26 . . . . .	110
FIGURA 27 . . . . .	111
FIGURA 28 . . . . .	112
FIGURA 29 . . . . .	113
FIGURA 30 . . . . .	114
FIGURA 31 . . . . .	115
FIGURA 32 . . . . .	116
FIGURA 33 . . . . .	117
FIGURA 34 . . . . .	118
FIGURA 35 . . . . .	119
FIGURA 36 . . . . .	120
FIGURA 37 . . . . .	121
FIGURA 38 . . . . .	122
FIGURA 39 . . . . .	123
FIGURA 40 . . . . .	124
FIGURA 41 . . . . .	125
FIGURA 42 . . . . .	126
FIGURA 43 . . . . .	127

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Inicialmente, o homem utilizava materiais de construção como o barro, o gesso e as cals, elementos essenciais nas obras de engenharia. Posteriormente, com a descoberta das pozolanas, material de origem vulcânica, passou-se a empregá-las com muito êxito em diversas edificações como atestam, entre outras, as construções do Coliseu, do Panteão, de estádios, de basílicas, etc. Na primeira quadra do século passado, com o advento do cimento Portland, o uso da cal foi quase que esquecido. O comércio do cimento, no entanto, onerou sobremaneira os custos. O cimento tornou-se assim inacessível às camadas menos privilegiadas da população. Vários estudiosos têm pesquisados aglomerantes alternativos entre os quais se encontram as cals pozolânicas.

Apesar de diversas tentativas em baixar seu custo, o cimento brasileiro é mais oneroso que o cimento importado, numa diferença aproximada de US\$ 50,00 por tonelada. No Brasil, onde não se usa exclusivamente a cal, o cimento Portland é amplamente utilizado.

A pozolana tem custo atualmente em torno de US\$ 102,00 por tonelada, enquanto que a cal US\$ 80,00 por tonelada. O estudo das pozolanas, por possuir em custos inferiores ao cimento brasileiro precisa ser desenvolvido, visando-se a um barateamento das construções. As cals pozolânicas, por outro lado, com custo em

---

torno de US\$ 90,00 por tonelada, poderiam ser aproveitadas, pois, além do baixo custo, oferecem padrões de resistências mecânicas aceitáveis.

Dentro deste contexto, as cais pozolânicas se constituem alternativa altamente viável, a ser utilizada, especialmente, na construção de moradias.

A pozolana reage com o hidróxido de cálcio em condições ambientes, donde resultam compostos hidratados com propriedades cimentícias, insolúveis em água.

As cais pozolânicas, como materiais alternativos, podem ser obtidas pela mistura de uma cal hidratada e pozolana, provenientes dos calcários e devem ser tratadas termicamente em temperaturas na ordem de 1000 °C hidratadas, para se chegar às suas propriedades específicas.

O objetivo desta pesquisa foi aprimorar as cais pozolânicas, como material alternativo, através dos ensaios de caracterização e tecnológicos, visando a obter produto final de custo reduzido e com desempenho mecânico satisfatório.

## Capítulo 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Histórico dos Materiais de Construção

Desde os tempos mais remotos da civilização, o homem primitivo procurava construir abrigos que pudessem protegê-lo das intempéries da natureza. A princípio, utilizavam-se blocos de rochas, materiais argilosos e vegetais, como materiais de construção. A descoberta desses materiais surgiu normalmente do seu "habitat".

Dos materiais argilosos, quando misturados com fibras vegetais, resultaram massas de argilas com significativa resistência após secagem. Os blocos rochosos, através de justaposição, ainda perduram até hoje como verdadeiras obras primas inquestionáveis dessas antigas construções (Zampieri, 1989).

Do solo se retira, desde a Antigüidade, material de construção, que deve naturalmente ser adequado às finalidades desejadas. A abundância, a facilidade de obtenção desses materiais, o baixo custo e as facilidades de aplicação são conhecidos e empregados na construção de habitações em diversas partes do mundo (Abiko, 1988).

Os materiais cerâmicos se encontram entre aqueles mais tradicionais empregados na construção civil. Sua origem reporta-se à Antigüidade.

Na Mesopotâmia, em 5000 A.C., já eram endurecidos tijolos ao sol e, a partir de 3000 A.C., surgiram os primeiros fornos para a queima (Mitidieri Filho e Cavalheiro, 1988).

Não é difícil imaginar que o fogo empregado pelo homem antigo tenha casualmente cozido tijolos ou porções constituídas de material argiloso. Constatou-se que este material cozido era efetivamente muito mais resistente às intempéries. A adoção do processo de queima, a partir de então, proporcionaria grande impulso na qualidade e durabilidade desses materiais. Por outro lado, o uso do betume pelo assírios e babilônicos também conferia às suas obras maior resistência à deterioração pelas águas. Utilizado normalmente a quente, como material cimentante de tijolos cozidos ou placas de alabastro (gesso maciço), o betume ficou, todavia, restrito às suas áreas de ocorrência natural (Zampieri, 1989).

O primeiro material considerado cimentante até o período greco-romano, utilizado nas construções egípcias, era derivado da calcinação do gesso e não, de rochas calcárias (Bogue, 1947 e Lea, 1970).

Segundo Ghorab et alii (1986), em recentes estudos desenvolvidos em argamassas extraídas das fundações das pirâmides de Giza e do templo da Esfinge, verificou-se a utilização do gesso como material ligante através de difratogramas de raios X. Em seu trabalho pioneiro sobre as antigas argamassas egípcias, Ghorab e colaboradores (1986) afirmam que a opção pelo gesso se justifica pela escassez de combustíveis da época.

Na Itália, os primeiros a empregar argamassas em suas construções foram os etruscos. Os romanos, por sua vez, se beneficiaram dos conhecimentos muito provavelmente dos etruscos ou dos gregos (Davis, 1934).

As argamassas usadas desde os tempos mais remotos são aquelas cujo poder aderente resulta de processos físicos, com a secagem e a retração. Nas ruínas de Nínive e da Babilônia, encontraram-se, como argamassas, o barro e o pez\* mineral. Os egípcios a princípio edificaram com o barro do Nilo. Logo, no entanto, começaram a utilizar argamassas artificiais, como o gesso e a cal aérea. As construções das primeiras idades da Grécia eram conhecidas sob o nome de "construções ciclópicas". A Coluna do Peristilo do labirinto do Egito, erigida 3600 anos A.C foi, segundo Plínio, construída em pedra artificial. O gesso era a argamassa empregada na construção de quase todas as pirâmides. Pedacos de argamassas retirados de uma sepultura da quinta dinastia (cerca de 2600 anos Antes de Cristo) apresentavam, juntamente com o gesso, o carbonato de cálcio, mistura que é característica de todas as argamassas egípcias antigas (Leprevost, 1953).

Do Egito, a arte da construção passou à Grécia. O archeduto de Argos foi construído com argamassas de mármore e cal. Os hebreus já haviam observado em suas edificações que da adição de pó de tijolo na argamassa de cal resultava um produto resistente à água (Leprevost, 1953). Os romanos empregavam materiais naturais de origem vulcânica dos arredores de Viterbo, o Puteoli ou Pozzuoli, bem como a terra de Santorim na Grécia, localidade do nome genérico de pozolanas. Os holandeses, para a construção dos diques, substituíram esse material pelo trass de Andernach, tufo vulcânico das margens do Reno (Calleja, 1958).

Em 312 A.C., cinzas vulcânicas localizadas perto de Nápoles e Roma foram misturadas com cal viva para compor uma argamassa hidráulica, que ligasse as pedras usadas na construção da Via Áppia e dos primeiros aquedutos. A Via Áppia, magnífica estrada de Roma a Brindes, foi começada por Cláudio Áppio. Essa via era ladeada de suntuosos túmulos, cujos vestígios encontramos até hoje (Nardi, 1975).

\* pez - Do latim, pice. Resíduo das destilação de líquidos densos, alcatrões, piche.

Os romanos ao construírem abóbadas e arcos usavam inicialmente pedras cortadas, o que consistia boa técnica, porém dispendiosa quando empregada em larga escala. Por esta razão, o concreto de cinza vulcânica foi facilmente aceito como substituto. O "concreto romano" assumia importância na arquitetura na metade do segundo século, embora o uso da pozolana, como material de concreto leve e resistente já tivesse sido utilizado pelos romanos desde a metade do primeiro século. Na Era Cristã, as cinzas vulcânicas foram utilizadas na construção do Coliseu Romano e, em 120 D.C., no Panteon (Templo dos Deuses) (Nardi, 1975).

John Smeaton, em publicação de 1791, observou, ao estudar as diferentes cals da Inglaterra e, principalmente a de Abertaw, no condado de Clamorghen, que essas cinzas continham onze por cento de argila, e que os calcários do tipo do mármore e a greda, quando tratados pelo ácido nítrico, não deixavam algum resíduo. Produziam uma cal incapaz de endurecer debaixo d'água, enquanto os calcários deixavam resíduo de areia e argila, "adquiriam pela calcinação uma propriedade que proporcionava solidez às muralhas construídas na água, deixando mais resistente as muralhas expostas ao ar do que construídas com cal isenta de argila" (Leprevost, 1953).

Em 1824, na Inglaterra, obteve Joseph Aspdin, tijoleiro do Condado de York, uma patente relativa à fabricação de um cimento que, ao endurecer, tomava o aspecto do calcário, denominando o produto com o nome "Cimento Portland", por causa do nome de ilha de onde era originário. Calcinava ele uma mistura de calcário e argila até a expulsão do anidrido carbônico. O produto que assim obtinha não passava de uma cal hidráulica, da qual só o nome possuía algo de comum com o cimento Portland atual. (Thober et alii, 1984a, 1984b).

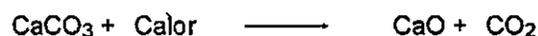
Para fabricar uma cal hidráulica, emprega-se uma rocha calcária argilosa onde, além do carbonato de cálcio e de um pouco de carbonato de magnésio, a matéria prima usada deverá conter quantidade apreciável de material argiloso, em cuja composição figuram sílica, alumina e óxido de ferro (Petrucci, 1979).

Segundo Thober et alii (1984a), nascia desta forma a atual indústria do cimento, iniciando-se, assim, nova etapa em relação às primeiras cals hidráulicas. Foram desenvolvidas paralelamente as duas indústrias, permanecendo, porém, a cal hidráulica por toda a Europa e até nos países da América e Ásia.

## 2.2 – Cal

A cal é uma substância branca, leve, porosa, muito instável, pois se recompõe até com gás carbônico do ar, voltando ao  $\text{CaCO}_3$  (Verçosa, 1975). É o nome genérico de um aglomerante simples, resultante da calcinação de rochas calcárias, que se apresenta sob diversas variedades, com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido (Bauer, 1985).

Basicamente, na calcinação do calcário natural, o carbonato de cálcio, submetido à ação do calor à temperatura aproximadamente de  $800^\circ\text{C}$ , decompõe-se em óxidos de cálcio, conhecido como a cal virgem ou viva, e anidridos carbônicos,  $\text{CO}_2$ , processo representado na seguinte equação química:



e que, em presença de água, produz a hidratação da cal, consoante a equação:



O produto dessa calcinação, que contém predominantemente óxidos de cálcio, exibe estrutura porosa e formatos idênticos aos grãos de rocha original (Bauer, 1985).

A cal hidratada designa um produto constituído por um "pó seco obtido pelo tratamento de cal virgem com a água necessária para satisfazer sua afinidade química e constituído essencialmente de hidróxido de cálcio, ou de uma mistura de hidróxido

de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de magnésio e óxido de magnésio", com características físicas e químicas estabelecidas pela norma brasileira NBR-7175, (1992).

### 2.2.1 – Caracterização da Cal

As rochas carbonatadas na natureza se constituem a parte sólida da superfície terrestre em 29,2% do total; cinco por cento a seis por cento da superfície é povoada por rochas que possuem entre os seus constituintes "minerais", cujas composições químicas correspondem a carbonatos de cálcio e magnésio como elementos predominantes, formando mais de cinquenta por cento do seu todo. Estas rochas são denominadas conforme a participação maior ou menor de um desses dois minerais. Quando predomina o carbonato de cálcio, cujo nome como mineral é calcita, recebe a denominação de calcário; quando predomina o carbonato de cálcio e magnésio, cujo mineral é dolomita, recebe o nome de dolomita (Guimarães, 1984).

Há ainda os tipos intermediários, que se apresentam entre os dois extremos, com proporções variáveis de calcita e dolomita. Recebem o nome de calcários magnesianos. Dado que a formação dessas rochas pela natureza não é totalmente perfeita, constata-se que os depósitos na crosta terrestre se apresentam impuros com outro componentes presentes, tais como, sílica, óxidos de alumínio, ferro, fósforo e enxofre.

Geralmente, as indústrias de cal se completam com instalações que transformam a cal virgem em cal hidratada, pela adição de água. Este derivado, mais fácil de ser transportado e manuseado, por ser menos cáustico, substitui a cal virgem em muitas das aplicações. Conforme a cal virgem que lhe dá origem, a cal hidratada tem composição diferente e, conseqüentemente, nomes diferentes, isto é, cal hidratada cálcica, aquela derivada de cal virgem cálcica; cal hidratada magnesiana, aquela

derivada de cal magnesiana; cal hidratada dolomítica, aquela derivada de cal virgem dolomítica (Guimarães, 1984).

O modelo da estrutura do mercado da cal nos países desenvolvidos, como os Estados Unidos, que produzem em até 20 milhões toneladas/ano, mostra os principais setores de consumo: siderurgia, tratamento de água potável, tratamento de águas servidas e gases poluentes, engenharia civil, álcalis, celulose e papel, açúcar, mineração, carbureto de cálcio, vidro, tratamento de minérios, agricultura, outros, com raízes comuns àquelas do potencial industrial brasileiro.

No Brasil, não considerando os estabelecimentos de caráter artesanal, sem técnica ou controle de produção, a indústria da cal já apresenta as mesmas diretrizes deste modelo, apenas com maior destaque para o setor da construção civil (Guimarães, 1984).

### **2.2.2 – Classificação e Propriedades das Cais**

Basicamente as cais são divididas em cais aéreas e cais hidráulicas, dependendo se a pega e endurecimento se realizam ao ar ou com água (Bauer, 1985), (Petrucci, 1979), (Silva, 1985) e (Verçosa, 1975).

As cais hidráulicas são classificadas em cais hidráulicas propriamente ditas e cais pozolânicas, conceituação pouco divulgada, pois resulta de recentes trabalhos exploratórios da viabilidade das cais pozolânicas (Silva e Ferreira, e Lima et alii, 1992). Desta forma, as cais hidráulicas propriamente ditas são produtos resultantes da calcinação à temperatura inferior a do início de fusão (em torno de 1200 °C) de uma rocha calcária, contendo argilas. Pode haver também óxido de magnésio, de tal forma que o óxido de cálcio possa reagir com as impurezas, formando silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio.

As cais aéreas são constituídas essencialmente de hidróxido de cálcio, podendo conter hidróxido de magnésio e outras impurezas. São materiais tradicionalmente utilizados em diversas finalidades em engenharia (Guimarães, 1986).

Elas são aglomerantes tradicionais utilizados desde os gregos e romanos (Zampieri, 1989). Com o advento dos cimentos do tipo Portland, o uso da cal vem perdendo progressivamente sua importância como aglomerante (Lima et alii, 1992).

Outro critério de classificação é com relação ao rendimento da pasta. A cal apresenta duas variedades: cal gorda e cal magra. Por rendimento denomina-se o volume da pasta que se obtém pela extinção da cal com água. Se o rendimento em pasta for maior do que 1,82, a cal será denominada gorda e se for menor a esse valor, magra. Esse rendimento limite correspondente ao rendimento de 1,82 m<sup>3</sup> de pasta para uma tonelada de cal virgem, (550 quilos de cal virgem para 1 m<sup>3</sup> de pasta) (Bauer, 1985).

A cal hidratada atua como aglomerante em argamassas, através da carbonatação dos hidróxidos, pela ação do anidrido carbônico do ar; portanto a sua qualidade é indicada pelo teor de hidróxidos presentes. Este teor, por sua vez, depende da pureza e do grau de calcinação da matéria prima, do grau de hidratação da cal virgem e do armazenamento do produto hidratado (Cincotto, 1986a).

Se a matéria prima contém teor elevado de silicatos ou de quartzo, estes permanecerão no produto hidratado. Na análise química, essas impurezas são indicadas pelo teor de insolúveis. Quanto maior esse teor, maior o grau de impurezas. A especificação brasileira limita o seu teor quando exige o mínimo de 90% de óxidos de cálcio e de magnésio, referindo ao material não volátil.

O mau armazenamento do produto permite a carbonatação pelo ar. Os carbonatos representam um constituinte inerte, reduzindo a capacidade aglomerante da cal hidratada. Por isso mesmo, a especificação brasileira limita o teor de anidrido carbônico de amostras coletadas no local de sua produção e em depósitos a cinco por cento e sete por cento respectivamente. Além da pureza da matéria prima e da

calcinação completa, é necessário que a hidratação também seja completa (Cincotto, 1990).

A calcinação ou queima da pedra calcária é realizada nos mais variados tipos de fornos, sendo mais comuns os contínuos de chama curta, alternando-se neste caso leitos de combustíveis com leitos de calcários.

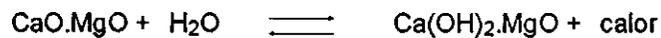
A cor da cal, apagada em pó, é muito variada. De acordo com a composição e demais propriedades da matéria prima, varia desde branco-amarelado até o marron escuro, enquanto o hidróxido de cálcio das cais aéreas é em sua maioria de cor branca.

A perda ao fogo traduz o teor dos constituintes voláteis da cal hidratada, ou seja, a água de hidratação e o anidrido carbônico. Assim, o valor encontrado na diferença entre os valores da perda ao fogo e do anidrido carbônico é indicativo do grau de hidratação (Cincotto, 1986a).

Cincotto (1986a) afirma que as cais dolomíticas apresentam maior dificuldade na hidratação. Propõe que seja incluído entre as exigências para cais hidratadas para argamassas um índice de desempenho medido através de um ensaio mecânico em que a cal seja ensacada como aglomerante aéreo de uma argamassa padrão, reproduzindo melhor as condições de uso.

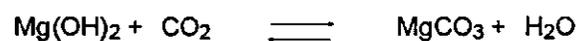
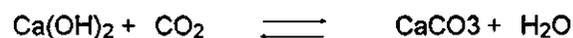
Segundo Cincotto (1977), a reação da cal virgem com a água é fortemente exotérmica, com calor liberado da ordem de 272 cal/g e 211 cal/g, respectivamente, para a cal virgem cálcica e dolomítica.

A hidratação, também chamada extinção da cal viva, de certo modo, pode ser considerada como reação reversível, uma vez que a desidratação realizada por aquecimento regenera a cal virgem, volatilizando a água liberada, segundo as equações a seguir:

**Cal alto cálcio:****Cal dolomítica:**

Quando em contacto com a água, a cal mostra grande afinidade pela umidade, absorvendo-se nos seus poros. Por causa de sua higroscopicidade elevada, a absorção continua simultaneamente ao processo de hidratação que se inicia. Com a penetração da água nos poros, o calor de hidratação liberado cria forças de expansão internas causando a desintegração completa, em um pó ou em um gel, conforme a quantidade de água utilizada na hidratação. A água assimilada está combinada sob a forma de hidróxido de cálcio ou de magnésio.

A propriedade aglomerante da cal hidratada é resultante da reação de carbonatação dos hidróxidos, representada pelas equações:



A carbonatação ocorre, porque o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal, produzindo carbonato de cálcio ou magnésio, dependendo do tipo de cal.

A cal de melhor qualidade deve ser, pois, a mais rica em hidróxidos, aquela que resultou de condições ótimas de calcinação da matéria-prima e de hidratação da cal virgem.

Vorobyev (1965) constata que a recarbonatação acontecida nas argamassas com cal é superficial e afirma que a espessura da interface argamassa/ar atingido pela ação do anidrido carbônico é muito pequena, inferior a 1 cm, alcançando seus valores máximos somente após vários meses. O autor explica que a razão desse dado pelo adensamento progressivo das camadas da argamassa, provocado pela transformação do hidróxido em carbonato de cálcio, é que impede o acesso do anidrido carbônico ao interior dos espaços intergranulares.

### 2.2.3 – Utilização da Cal em Construção Civil

As cals produzidas para a construção e a obtida com subprodutos são caracterizadas segundo métodos normalizados.

A utilização da cal em construção civil é bastante expressiva, cerca de 1,1 saco de cal por m<sup>2</sup> de área construída, atendendo a múltiplas finalidades, tais como aglomerante aéreo de argamassas de assentamento e revestimento, plastificante e retentor de água em concreto e "grouts", estabilizante de solos siltosos, etc (Cincotto, 1986b).

Apesar de ser produto largamente consumido pela indústria da construção civil, nem sempre houve uma preocupação maior dos consumidores com a qualidade tecnológico da cal, provavelmente, por ser aglomerante utilizado nos componentes construtivos sem responsabilidade estrutural, não comprometendo, portanto, a segurança do edifício (Cincotto, 1986a).

O emprego da cal na construção civil representa na produção nacional uma fatia de trinta por cento. Esse consumo é ainda inexpressivo se levamos em conta a demanda habitacional de um país, cuja população cresce em índices consideráveis.

A contribuição da cal para a durabilidade das argamassas é inquestionável, uma vez que muitas obras históricas existem em alvenaria aparente. Essa durabilidade, porém, é também em função da granulometria do agregado, da proporção aglomerante, de técnica de preparo, da aplicação da argamassa (Cincotto, 1990).

As cals podem ocasionar sérios inconvenientes estéticos com prejuízos econômicos que podem ser evitados através do conhecimento correto de sua função e dos ensaios disponíveis para a sua aceitação ou rejeição.

É viável o aproveitamento de materiais residuais, em alguns casos se torna necessário ainda melhor conhecimento do material. Outro aspecto evidenciado é a necessidade de estabelecimento de metodologia adequada ao estudo de argamassas, sendo insuficientes os dados de resistência mecânica para seleção do material (Cincotto, 1985a, 1985b, 1988).

A freqüência com que foram observados os problemas com argamassa de cal motivou a investigação da qualidade da cal hidratada brasileira disponível no mercado da construção.

#### **2.2.4 - Estabilização com a Cal**

Vários engenheiros têm pesquisado a permanência da estabilização de cal (Queiroz de Carvalho, 1981), (Ramezaniapour e Cabrera, 1981), (Cabrera e Nwakanama, 1979), (Mateos, 1961).

A cal hidratada tem sido adicionada na estabilização de solos. Embora haja sido usada de costa a costa nos Estados Unidos e em outras nações, a reação da cal hidratada com o solo é ainda pouco conhecida, particularmente com respeito à eficácia relativa à avaliação de várias reações com os solos.

Segundo Eades e Grim (1960), as reações de pequeno percentual de cal e solo são quase impossíveis, por causa das diferentes composições mineralógicas, tamanho das partículas, grau de cristalinidade, fração argilosa e diferentes íons absorvidos. Em vários casos, é extremamente difícil identificar os componentes mineralógicos de uma fração de amostra de solo por difração de raios-X ou outro meio de análise. E até mais difícil identificar a reação da cal e componentes do solo.

### 2.3 - Pozolana

A pozolana é material natural ou artificial que, quando adicionada a argamassas e concretos, produz produto com características tecnológicas superiores aos produtos sem adição, além de apresentar baixo custo. Os materiais pozolânicos são utilizados em argamassas e concretos (Souza Santos, 1975).

Massazza (1974 e 1980) define as pozolanas como um material natural ou artificial rico em sílica e alumínio capaz de reagir com a cal em presença de água e de formar reação dos produtos com propriedades ligantes.

Segundo Castro Sobrinho (1970), as pozolanas classificam-se em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas que foram formadas por algum processo de natureza e que, em geral, necessitam apenas de uma moagem para o seu uso. As pozolanas artificiais são aquelas obtidas por processo industrial ou como um subproduto.

Consideram, em geral, como pozolana, os materiais que, por si sós, não apresentam propriedades aglomerantes e atividade hidráulica. Contêm constituintes que combinam com a cal à temperatura ambiente e em presença da água, dando lugar a compostos permanentemente insolúveis e estáveis, que se comportam como aglomerantes hidráulicos. Em outras palavras, são materiais reativos à cal (Ruas, 1977).

### 2.3.1 - História das Pozolanas

A adição de materiais pozolânicos deve muito provavelmente ter sido motivada pelo seu desempenho nas antigas argamassas de pozolanas e cal, utilizadas pelos romanos e, mais antigamente, pelos gregos.

Na Antigüidade, tanto gregos como romanos tinham conhecimento de que certos materiais vulcânicos, quando finamente moídos e acondicionados à cal extinta e areia, proporcionavam argamassas de melhor desempenho mecânico, as quais exibiam adicionalmente a propriedade de endurecer, mesmo quando submersas em água.

Desta forma, com o objetivo de elaborar obras mais duráveis e resistentes, os gregos utilizavam um tufo vulcânico encontrado na ilha de Thera (posteriormente denominada de Santorim), enquanto os construtores romanos se valiam de outros depósitos, também de origem piroclástica, encontrados nas vizinhanças da Bacia de Nápoles. Uma vez que os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do monte "Puzzioli", nas proximidades do Vesúvio, atribuiu-se a esses materiais a designação de pozolanas. Quando não dispunham de materiais vulcânicos, os romanos empregavam telhas ou cerâmicas moídas, as quais, segundo registros da época, produziam efeito similar (Zampieri, 1989).

Deve-se destacar, todavia, que o material que recebeu o qualificativo de

"pozolânico" se caracteriza não somente por exibir origem variada, mas também composição bastante diversificada.

As obras antigas, realizadas com pozolanas, existem até hoje como inestimáveis relíquias dos romanos, mais técnicos e menos artistas que os gregos. Eles estenderam o império por três continentes. Citam-se, por exemplo, o Panteão (Templo dos Deuses), Coliseu, estádios, basílicas, aquedutos, cisternas, pontes, portos e as mais diversas estruturas que ainda perduram até hoje (Calleja, 1958).

Na Idade Média, não houve muito progresso na aplicações desses materiais. A partir do século XVIII, ressurgiu o emprego de novas técnicas, conseqüência de maior interesse geral pela ciência e pela tecnologia, nascida no calor da época. É a época em que destacam Lavoisier e Priestley, Dalton e Avogrado, Davy e Berzelius. No campo da ciência dos cimentos, sobressaem os nomes de Smeaton, Higgins, Bergman e Parker. Smeaton ressuscitou o emprego das pozolanas italianas e revalorizou a utilização do "trass" alemão, enquanto Parker batizou um material com o nome de "cimento romano", em memória dos cimentos antigos, feitos à base de pozolana, obtidos com certas cais nodulares do Condado de Kent (Calleja, 1958).

### **2.3.2 - Características e Composição Química das Pozolanas**

Pelo desenvolvimento da química e da física do estado sólido, tem-se que todas as propriedades macroscópicas do material dependem da sua estrutura interna. Assim, pelo conhecimento dessa estrutura, é possível a compreensão das características dos materiais e, conseqüentemente, há a possibilidade de aprimoramento destas características, como também, a utilização mais adequada dos materiais (Agopyan, 1988).

Todas as pozolanas têm em comum um elevado teor de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , que lhes

confere uma característica ácida e uma grande afinidade pela cal. A soma de  $Al_2O_3 + SiO_2$  é na ordem de setenta por cento e até oitenta por cento (Mortureux, 1980).

Um dos importantes estudos para determinar as características de uma cinza volante\* de boa qualidade foi feito por Mateos e Davison (Pinto, 1971). Os resultados obtidos indicaram que a área específica da cinza volante é em função da sua finura e do teor de resíduos e, por conseguinte, não é bom critério de qualidade cinzas com baixas áreas específicas. As cinzas produzidas em centrais térmicas pelos processos de precipitação são mais finas e contêm menos resíduos do que as produzidas pelos processos mecânicos. A porcentagem de cinza que passa na peneira ABNT n° 325 (0,44 mm) fornece uma indicação do teor de resíduo e da qualidade do material reativo. A concentração molecular do teor de  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  está em relação direta com a resistência, e não se encontram relações significativas entre a composição química ou física das cinzas e sua reatividade com a cal.

A composição química oferece poucos elementos para julgar a atividade de uma pozolana. Há muitos tipos de materiais pozolânicos, cada um dos quais varia entre grandes limites quanto às suas características. É muito grande a variedade e percentagem dos constituintes ativos da pozolana. São muito complexos os processos físico-químicos que envolvem as reações pozolânicas (Ruas, 1977).

A perda ao fogo é outro parâmetro que se relaciona à qualidade de uma pozolana. A reatividade de uma pozolana é indicada pelo grau de combinabilidade da pozolana com a cal (Kihara, 1986).

Taylor (1964) explica que as reações das pozolanas naturais e artificiais com o hidróxido de cálcio consiste quantitativamente na combinação alcalina dos constituintes

\* Cinza Volante – São resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizados e granulados.

ativos de sílica e alumínio.

A reatividade da sílica e alumínio nas pozolanas é geralmente determinada pelo método de Florentin, que é baseado em diferentes solubilidades ao ácido clorídrico de uma pozolana e o produto dessa reação com o hidróxido de cálcio (Ferret, 1933).

Segundo Souza Santos (1975), a composição química prevê uma análise das pozolanas em óxidos e especifica os seguintes valores:

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	mínimo	-	70%
MgO	-	máximo	-	5%
$\text{SO}_3$	-	máximo	-	3%
perda ao fogo	-	máximo	-	10%
umidade	-	máximo	-	3%

A análise da composição química de uma pozolana é a que menos identifica suas propriedades. As restrições quanto ao conteúdo de MgO e  $\text{SO}_3$  são apenas para manter coerência com as restrições impostas ao cimento Portland (Castro Sobrinho, 1970).

Segundo Lea (1938), a composição química de argilas utilizadas para pozolanas, geralmente apresenta valores de  $\text{SiO}_2$  entre cinquenta por cento e 65% e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  entre dezessete por cento e 38%. A atividade pozolânica aumenta com o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Esse fato sugere a formação de um composto de alumínio, provavelmente um aluminato cálcico.

Segundo Davis (1949), uma pozolana deve ter no mínimo quarenta por cento de  $\text{SiO}_2$ , máximo trinta por cento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e no máximo vinte por cento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . CaO e MgO devem ser os mais baixos possíveis, bem como os álcalis. Entretanto, boas pozolanas podem conter até cinco por cento desses óxidos alcalino-terrosos e até dez

por cento de óxidos alcalinos. A perda ao fogo, segundo Souza Santos (1975), terá que ser igual ou inferior a dez por cento.

Ruas (1977) afirma que parece lógico que quanto maior a percentagem de sílica de um material, melhor seria sua atividade pozolânica. Entretanto, existem boas pozolanas apenas com quarenta por cento de  $\text{SiO}_2$ .

Segundo Kihara (1978), foram desenvolvidos estudos quantitativos de cinzas volantes japonesas, inglesas e americanas.

### 2.3.3 - Atividade Pozolânica

A expressão atividade pozolânica define aqueles fenômenos que, à temperatura ambiente, transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante. No passado, acreditava-se que a atividade pozolânica era devida a uma atividade do tipo zeólitos, pois muitos pesquisadores tinham encontrado materiais zeolíticos em pozolanas, conhecidos por serem capazes de absorver cal no contato com soluções, através de um mecanismo de troca de bases. A maioria das pozolanas contém fases não cristalizadas em maior ou menor proporção. Em muitos casos, essas fases são verdadeiros vidros, mas em se tratando de argilas calcinadas, diatomitos e cherts opalinos, os constituintes não possuem uma estrutura vítrea e sim, amorfa. Desse modo, considera-se como fator determinante da atividade pozolânica, a instabilidade termodinâmica aos constituintes pozolânicos vítreos ou amorfos. Portanto, do ponto de vista genérico, a atividade pozolânica pode ser explicada por uma instabilidade do sistema composto de cal, pozolana e água. Esta instabilidade, em condições adequadas, causa uma série de reações acompanhadas de endurecimento do sistema, que assume alta resistência mecânica (Kihara, 1982, 1986).

Segundo Cincotto (1984), a atividade pozolânica, por definição, está associada à

fixação do hidróxido de cálcio, na forma de compostos hidratados mais ou menos definidos, os quais contribuem para as resistências mecânicas. O seu critério de avaliação baseou-se nos dois pontos seguintes.

Na quantidade de cal fixada, determinada segundo método Chapelle (Raverdy et alii, 1983), e em misturas com uma quantidade de clínquer Portland, o composto formado deverá comportar-se como um cimento pozolânico, confirmado pelo ensaio Fratini, normalizado no Brasil, segundo norma NBR-9553 (1991).

Nas argilas caulínicas, a atividade pozolânica é devida à formação de metacaulinita entre 500 °C e 800 °C, composto esse de elevado grau de desordem cristalina e, portanto, de elevada superfície específica e grande atividade química (Kihara, 1982).

A atividade pozolânica consiste em uma agressão alcalina na superfície por uma solução saturada de cal, dos minerais sílico-aluminosos, e na combinação subsequente dos íons resultantes dessa agressão com a cal presente nessa solução (Dron, 1977, 1978).

Os minerais argilosos como matérias primas na área de materiais e ligantes especiais, utilizáveis em construção, precisam de diferentes processos de hidratação.

A atividade química consiste em associar ao mineral argiloso (argila crua ou argila calcinada) um reativo capaz de fornecer, em solução, espécies químicas (íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ). Essas espécies realizam o ataque na partícula argilosa, após a precipitação dos hidratados minerais, cuja microestrutura, e arranjo cristalino levam ao fenômeno de endurecimento. O hidróxido de cálcio é o exemplo típico de ativador químico (Murat, 1986).

Existem outros meios de ativação: térmica e ativação mecânica por moagem. A ativação térmica consiste na calcinação de determinados tipos de argilas em ambientes

de temperaturas médias, enquanto que a ativação mecânica, por moagem, leva à formação de sítios superficiais reativos e, conseqüentemente, a um aumento da velocidade de endurecimento.

No aspecto mecânico, a atividade pozolânica define convencionalmente como atividade de resistência à compressão uniaxial e ou de resistência à tração por compressão diametral (Verhasselt, 1980).

De acordo com Ruas (1977), a ação pozolânica é uma combinação de processos físicos e químicos. Os compostos silicosos e aluminosos de uma pozolana finamente moída reagem com a cal hidratada para formar compostos aglomerantes estáveis, em geral silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Desconhecem-se, porém os fatores que afetam o desenvolvimento e velocidade destas reações, porque uns materiais silicosos e aluminosos reagem favoravelmente e outros, não. A sílica e os silicatos amorfos reagem mais rapidamente em suas formas cristalinas, mas não se pode estabelecer uma linha divisória entre pozolana e não-pozolana, segundo esse critério.

#### **2.3.4 - Vantagens e Uso de Materiais Pozolânicos**

Muitos pesquisadores têm estudado as pozolanas de argilas calcinadas, nesses últimos anos: Gitahy (1963), Andriolo (1975), Cincotto (1983), Zampieri (1989), Jambor (1963), Huam Shiyuan (1986), Sersale (1968, 1980), Mattias (1989), Massazza (1980), Ferreira e Neves (1989), Nardi (1986), Largent (1978) e Fournier (1978), Kokubu (1974), que através de pesquisas, contribuíram fortemente para o uso desses materiais no Brasil.

Com as exigências técnicas cada vez maiores, impostas a certos tipos de construções, verificou-se que o emprego de pozolanas permitia melhor desempenho do concreto. Algumas das vantagens advindas da utilização de materiais pozolânicos,

segundo Castro Sobrinho (1970), são:

- 1 – resistência química ao ataque de águas agressivas;
- 2 – permeabilidade do concreto;
- 3 – reação álcali-agregado;
- 4 – calor de hidratação;
- 5 – trabalhabilidade da mistura fresca;
- 6 – resistência mecânica.

Todas essas vantagens, acrescidas ao fato de que os materiais pozolânicos são mais baratos cerca de US\$ 50,00 por tonelada do que o clínquer do cimento Portland, levam a concluir que o custo de comercialização torna-se mais vantajoso. Existe, inclusive, aproveitamento de resíduos industriais poluidores, como é o caso das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termelétricas e da microssilica decorrente das indústrias de ferro-silício e silício metálico (Zampieri, 1989).

Os levantamentos de dados sobre os resíduos, segundo Cincotto (1984), são:

A cana-de-açúcar, que a porcentagem em massa de bagaço de cana, por tonelada de cana-de-açúcar, varia com a região de plantio, por exemplo, nas regiões Norte e Nordeste, RJ, MG e ES é de trinta por cento e no Estado de São Paulo, 27%.

O amendoim, a mamona, a casca produzidas na separação dos grãos de amendoim é de trinta por cento em massa; e de mamona o rejeito de casca é da ordem de 33%, que após a queima, deixa um resíduo de nove por cento de cinza.

Os teores do carvão mineral variam com a jazida, situando-se na faixa ampla de nove por cento a 55%.

O resíduo cerâmico diário de rejeitos e de peças quebradas é de 700 t, ou seja dois por cento da produção diária total no Estado de São Paulo.

A perspectiva de acúmulo do resíduo na exploração de turfa é de 10,5 milhões de toneladas.

A grande novidade na tecnologia de concreto, para obras de grande porte, é o uso de pozolana (Castro Sobrinho, 1970).

As pozolanas, dentro da indústria do cimento, são de extensa aplicação por seu caráter de adição hidráulica (Calleja, 1958).

## **2.4 - Cimento Portland**

O nome do cimento Portland, originalmente à semelhança de cor e de qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland – um calcário extraído em Dorset - é usado até hoje para designar um cimento obtido pela mistura apropriada de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais, contendo sílica, alumina ou óxidos de ferro, aquecendo tudo a uma temperatura necessária para a clínquerização e moendo-se o clínquer resultante (Neville, 1982).

Petrucci (1979) define o cimento Portland como material pulverulento, contido de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica.

As matérias primas, usadas na fabricação do cimento Portland, constituem-se, principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Os principais compostos do cimento Portland são:

---

Silicatos tricálcio	-	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Silicatos dicálcio	-	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Aluminato tricálcio	-	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Aluminoferrito tetracálcio	-	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

Além dos principais compostos relacionados, existem compostos secundários como o  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ; geralmente representam um potencial reduzido de massa do cimento (Neville, 1982).

Dentre desses compostos, o  $\text{K}_2\text{O}$  e o  $\text{Na}_2\text{O}$ , denominados de álcalis, têm efeito negativo na resistência do cimento.

O cimento apresenta desempenho satisfatório em termos de resistência e de durabilidade, se atender aos limites estabelecidos nas normas, para certos compostos químicos, características físicas e propriedades mecânicas (Florindo et alii, 1991).

As reações que transformam o cimento Portland em agente ligante ocorrem na pasta de água e cimento. Em outras palavras, na presença de água, os silicatos e aluminatos relacionados acima formam produtos de hidratação, que, com o decorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e dura, a pasta de cimento endurecida (Neville, 1982).

O cimento Portland, descobriu-se, quando misturado a uma grande quantidade de água, produz em poucas horas uma solução supersaturada com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que contém concentrações de silicato de cálcio hidratado numa condição metaestável (Bogue, 1955).

Um cimento também pode ser expansivo por causa da presença de  $\text{MgO}$ , que reage com a água de um modo semelhante ao  $\text{CaO}$ . No entanto, somente o periclásio ( $\text{MgO}$  cristalino) é capaz de reagir e causar problema, e o  $\text{MgO}$  presente na fase vítrea é inócuo.

A resistência mecânica do cimento endurecido é a propriedade do material talvez mais necessário para uso estrutural. Não é de admirar, portanto, que todas as especificações de cimento contenham ensaios de resistência (Neville, 1982).

Segundo Zampieri (1989), o clínquer do cimento Portland é o material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação até aproximadamente 1450 °C de uma mistura adequada de calcário e argila.

A fabricação do clínquer Portland simula a coexistência de um magna com fonólitos\* instáveis à alta temperatura, tendendo, portanto, a estabelecer um equilíbrio entre seus constituintes mineralógicos através de reações de estado sólido e a parte fundida, através de trocas catiônicas (Neville, 1982).

Em escala industrial, o processo de produção do cimento Portland inicia-se com a extração das matérias primas. O calcário, caracteristicamente mais duro, requer normalmente uma britagem inicial, após o que fica reduzido a fragmentos centimétricos. As argilas, por outro lado, são usualmente obtidas a partir de depósitos superficiais e se encontram, via de regra, em condições de serem processadas diretamente.

É interessante observar que, embora a constituição mineralógica do clínquer Portland não tenha sofrido mudanças ao longo do tempo, as inovações tecnológicas incorporadas ao processo produtivo, notadamente na etapa de queima, alteraram significativamente o consumo específico de fabricação do clínquer e as próprias características dos fornos (Zampieri, 1989).

Os constituintes do clínquer Portland podem simplificarmente ser agrupados em dois grupos principais. O primeiro, representado pelos silicatos cálcicos, responsáveis pela quase totalidade do clínquer (80% – 85% em massa), sendo o principal responsável

\* fonólitos - Rochas que emitem um som metálico.

pela evolução das resistências mecânicas, em particular a médias e longas idades; o segundo, constituído pelos aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos, representa a fase intersticial, que preenche os espaços entre os cristais de alita e belita. Embora, em resistências mecânicas poucas expressivas, as suas presenças são fundamentais (Zampieri, 1989).

Há dois métodos padronizados para ensaio de resistência do cimento à compressão – um usa argamassa, o outro, concreto. No ensaio com argamassa, usa-se uma argamassa cimento-areia de traço 1:3.

Em particular, os cimentos modernos têm um teor de C<sub>3</sub>S mais elevado e uma finura maior do que há aproximadamente 40 anos. O aumento de resistência entre o período de 28 dias e 10 anos permanece inalterado (Gonnerman e Lerch, 1951).

#### **2.4.1 - Classificação do Cimento Portland**

O cimento Portland brasileiro, em 1991, classificaram da seguinte maneira:

##### **I – Cimento Portland Comum (EB-1/NBR 5732)**

- CPI (Cimento Portland Comum)
- CPI-5 (Cimento Portland Comum com adição, contendo 1 a 5% de material carbonático).

##### **II – Cimento Portland Composto (EB-2138/NBR 11578)**

- CPII-E (Cimento Portland com Escória, com 6 a 34% de escória granulada).
- CPII-Z (Cimento Portland com Pozolana, com 6 a 14% de material pozolânico).

- CPII-F (Cimento Portland com Fíler, com 6 a 10% de material carbonático).

### III – Cimento Portland Pozolânico (EB-758/NBR 5736)

- CPIV (Cimento Portland Pozolânico, com 15 a 50% de material pozolânico).

### IV – Cimento Portland de Alto Forno (EB208/NBR 5735)

- CPIII (Cimento Portland de Alto Forno, com 35 a 70% de escória granulada).

### V – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (EB- 2/NBR 5733)

- CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, com 0 a 5% de material carbonático).

O cimento Portland pozolânico como definido pelas normas universais é o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland e pozolana sem adição de outra substância, a não ser um ou mais formas de sulfato de cálcio (Soares, 1978).

A escória normalmente usada na fabricação de cimento é alcalina e absorve apenas pequenas quantidades de cal hidratada, cuja função principal é ativar a hidratação dos seus componentes (Lea, 1938).

Cimentos com adições (POZ e AF) são aqueles em que parte do cimento é substituída por material pozolânico ou por escória granulada de alto forno, respectivamente.

Os cimentos CP, embora não sejam considerados cimentos com adições, podem conter adição de escória, dependendo da região onde são fabricados.

## 2.4.2 - Cimentos com Adição de Pozolana

As vantagens e desvantagens técnicas do uso de materiais pozolânicos e de escórias como adição aos cimentos são razoavelmente conhecidas, pois já foram feitas pesquisas a esse respeito.

Entre as vantagens técnicas, podem-se citar menor calor de hidratação resultando em menor fissuração em concretos de grande volume, menor permeabilidade aos líquidos resultando em maior resistência aos meios agressivos, e, portanto, mais durável.

O uso das adições traz algumas vantagens econômicas. Entre elas está a redução no consumo de energia na fabricação, pois as adições não precisam passar pelo forno, que é a fase mais cara do processo. Além disso, como a escória e a cinza volante (tipo de material pozolânico) são rejeitos da indústria siderúrgica e das usinas termelétricas respectivamente, a sua utilização ajuda a resolver o problema ecológico dos rejeitos, que, além de ocupar grande áreas úteis, criam um problema de contaminação nesses locais.

As RCS de cimento pozolânicos de cinzas volantes aos 3 e 7 dias são menores que no cimento Portland comum, aos 28 dias são próximas e a idades mais avançadas, são maiores (Kihara, 1982).

Segundo Kovacs (1974), as resistências mais altas, nas idades mais avançadas dos cimentos com adição de cinzas, são devidas à formação de fases microcristalinas do tipo tobermorita, desenvolvidas entre 1 e 3 meses. É a corrosão e o crescimento cristalino dos produtos de hidratação nas superfícies dos grãos de cinza que asseguram a ligação entre o clínquer e a cinza, responsável pelas resistências mais altas em idades mais avançadas.

## 2.5 - As Cais Pozolânicas

As cais pozolânicas, de conceito pouco divulgado, são objeto de trabalhos recentes, exploratórios de sua viabilidade (Lima et alii, 1992).

As cais pozolânicas são ligantes obtidos pela calcinação, em temperatura da ordem de 1000 °C, de calcários, com certo teor de impurezas (argilas), posteriormente apagadas, moídas e ensacadas. As cais pozolânicas podem também ser obtidas através de misturas adequadas de cais hidratadas e pozolanas (Silva, 1992 e Lima et alii, 1992).

São misturas compostas por um aglomerante simples, a cal, com certo produto que recebe o nome de hidraulite, que é uma pozolana. Esta mistura é efetuada após o tratamento térmico do aglomerante simples, melhorando assim o valor hidráulico do produto pela formação de um silicato de cálcio insolúveis (Petrucci, 1979).

Muito embora tenham sido usadas em construções romanas e mais recentemente em construções alemães, após a 2<sup>a</sup> Guerra Mundial, as cais pozolânicas são ligantes intermediários entre os cimentos do tipo Portland e as cais aéreas.

Essas cais Pozolânicas têm preços, da ordem de US\$ 80,00 a US\$ 100,00/t. Sua resistência à compressão simples em argamassas de 1:3, em idades de 28 dias, varia de 2,4 MPa a 16,5 MPa (Lima et alii, 1992). Silva e Ferreira (1992) encontraram valores de resistência à compressão simples, entre 3,6 MPa a 4,8 MPa em composição de apenas 14,5% a 21% de pozolana obtida a 800 °C. As argamassas de cais pozolânicas obtêm grau de resistência, quando curadas na água do que no ar, através do efeito inicial e normalmente reversível (Lea, 1970).

O mecanismo da reação no sistema cal-pozolana-água tem sido estudado por alguns autores. Segundo Ramezaniianpour e Cabrera (1981), a atividade da cal é diretamente relacionada com o grau de reação da pozolana.

Comparando-se o desempenho de várias pozolanas, constata-se que aquelas de maior reatividade caracterizaram-se por valores de resistências à compressão mais expressivos. Uma vez que as reações pozolânicas evoluem ao longo do tempo, acredita-se que a posição desses "ótimos de resistências" deva também se alterar em função do tempo de reação considerado (Zampieri, 1989).

Segundo esse mesmo autor, o quartzo associado às pozolanas de argilas calcinadas se constitui de fato uma fase indesejável, não somente por sua elevada dureza, mas principalmente por limitar sensivelmente a atividade pozolânica desses materiais.

Na atualidade, as cais pozolânicas (lime-pozzolana cements) eram produzidas comercialmente na ex-URSS (Vorobyev, 1965). Trata-se de uma mistura de pozolana finamente dividida com cal hidratada seca na proporção de dez por cento a trinta por cento em peso, sendo o tempo de pega ajustado pela adição de até cinco por cento de gesso durante a mistura ou moagem final da composição. As pozolanas utilizadas podem ser de diversas fontes, tais como tripoli, diatomito e argilas queimadas. Os cimentos obtidos com pozolanas, obtidos de argilas caulínicas calcinadas, são denominados de cimento de cal e argila queimada (Schwarzkopf, 1974).

Acreditamos que as cais pozolânicas são promissoras, tendo em vista que há maior possibilidade de controle das matérias primas envolvidas, bem como as temperaturas mais baixas de processamento conduzirão a aglomerantes de menor custo do que as cais hidráulicas.

Uma listagem das principais pesquisas nacionais e estrangeiros acerca do estudo de aglomerantes e argamassas poderá ser encontrada em Agopyan (1988) e Silva (1985).

# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 - Introdução

Neste capítulo, são apresentados os materiais escolhidos e os métodos de ensaios mais utilizados na viabilização do projeto de pesquisa. Os materiais serão a seguir relacionados, identificando-se suas proveniências e condições físicas. As normas da ABNT serão apenas citadas, enquanto os métodos que não constam desta normalização serão descritos.

### 3.2 - Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais:

#### 3.2.1 - Cais

**Carbomil**

A amostra de cal Carbomil é proveniente de Fortaleza, fabricada no município de Limoeiro do Norte-CE. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "Kraft", 3 camadas, de 20kg, tendo sido retirada da embalagem original e a seguir colocada em sacos plásticos, lacrados de forma que não se modificassem suas propriedades.

### **Megaó**

A amostra de cal Megaó é proveniente de Recife, fabricada pela Indústria Fazenda Megaó de Cima – Indústria e Comércio Megaó LTDA. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos plásticos de 10kg, tendo sido retirada da embalagem original e, a seguir, colocada em sacos plásticos, lacrados de forma que não se modificassem suas propriedades.

### **Cimencal**

A amostra de cal Cimencal é proveniente de João Pessoa, fabricada pela Companhia Industrial Gramame – CIGRA, localizada na BR-101, sul, km 13, Alhandra - PB. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "Kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e a seguir colocada em sacos plásticos lacrados de forma que não se modificassem as suas propriedades.

### **Calcimento**

A amostra de Calcimento é proveniente de Campina Grande-PB, fabricada, pela Dolomil Dolomita Minérios LTDA, localizada na Av. Senador Argemiro de Figueredo, s/n, no Distrito Industrial. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel

"Kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e a seguir colocada em sacos plásticos lacrados de forma que não se modificassem suas propriedades.

### **3.2.2 - Pozolana**

Foi utilizada uma pozolana artificial produzida pela Cia. Paraibana de Cimento Portland CIMEPAR, localizada no município de João Pessoa. Esta pozolana é obtida por tratamento térmico de argilas cauliniticas, sendo normalmente utilizada para fabricação de cimentos Portland pozolânicos. A pozolana chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "Kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e a seguir colocada em sacos plásticos de forma que não modificassem suas propriedades.

### **3.2.3 - Cimento Portland**

Foi utilizada uma amostra de cimento Portland composto, CPII-F de 32POZ conhecido comercialmente como cimento ZEBÚ, existente no comércio local em Campina Grande-PB. O cimento chegou ao laboratório em sacos de papel "Kraft", 3 camadas, tendo sido retirado da embalagem original e a seguir colocado em sacos plásticos lacrados de forma que não se modificassem suas propriedades.

### **3.2.4 - Areia**

Foi utilizada uma areia normal obtida por peneiração, segundo norma NBR-7214 (1982), a partir de areias normalmente utilizadas em construção civil e provenientes do Rio Paraíba. A areia chegou ao laboratório em caminhão, doada pela ENARQ, situada

no bairro Santa Rosa em Campina Grande-PB.

### **3.2.5 - Água**

Foi utilizada água potável, fornecida pela CAGEPA para o sistema de abastecimento local da cidade de Campina Grande-PB.

## **3.3 - Métodos**

### **3.3.1 - Ensaio de Caracterização**

#### **3.3.1.1 - Massa Específica Real**

As amostras de cais e pozolana foram secas a 110 °C até massa constante e acondicionadas em vidros hermeticamente fechados até a realização dos ensaios. A determinação da massa específica real das amostras foi realizada segundo a norma NBR-6474 (1984). O método consiste em determinar o volume que a massa conhecida da amostra ocupa dentro do picnômetro com capacidade de 50 ml.

#### **3.3.1.2 - Área Específica**

As amostras de cais e pozolana foram secas a 110 °C até massa constante e, posteriormente, passadas em peneira ABNT N° 200 (0,074mm), acondicionadas em vidros hermeticamente fechados até a realização dos ensaios. As áreas específicas foram determinadas pelo método do permeâmetro de Blaine expressas em m<sup>2</sup>/g, segundo norma NBR-7224 (1984). Para aplicação do método, são necessários

permeâmetro ao ar, balança analítica, estufa e amostra padrão.

### **3.3.1.3 - Análise Química**

As amostras de cais e pozolana foram submetidas à análise química. Estas análises foram determinadas segundo método de análise química do laboratório de análise minerais do CCT/PRAI/UFPB, LAM - CG.

### **3.3.1.4 - Análise Térmica Diferencial - ATD**

As amostras foram passadas em peneiras ABNT n<sup>o</sup> 200 e acondicionadas em vidros hermeticamente fechados a fim de evitar a umidificação e carbonatação.

Foi utilizado um Deltathen III, com velocidade de aquecimento de 10 °C/min desde da temperatura ambiente até o limite de 1000 °C. O registrador gráfico operou com a sensibilidade de 10 x 2v e velocidade de registro de 120 mm/h.

Foram realizados os ensaios segundo método de Souza Santos (1975). As amostras analisadas foram as quatro amostras de cais e uma de pozolana.

### **3.3.1.5 - Análise Termogravimétrica - ATG**

As amostras foram passadas em peneiras ABNT n<sup>o</sup> 200 e acondicionadas em vidros hermeticamente fechados a fim de evitar a umidificação e carbonatação.

Foi utilizado um Deltathen III, com velocidade de aquecimento de 20 °C/min desde

da temperatura ambiente até o limite de 900 °C em temperatura ambiente. O registrador gráfico operou com a sensibilidade de 10 x 0,5v e velocidade de registro de 120 mm/h. Utilizou-se um peso de 20 mg para aferição do aparelho.

Foram realizados ensaios segundo Giolito (1974). As amostras analisadas foram as quatro amostras de cais estudadas.

### 3.3.2 - Ensaios Tecnológicos

#### 3.3.2.1 - Resistência à Compressão Simples - RCS

##### 3.3.2.1.1 - Confecção das Argamassas

Foram utilizadas argamassas com cem por cento de cal, cais pozolânicas e cais pozolânicas aditadas com cimento Portland composto - CPII-F-32.

Foi utilizado um traço 1:3 em peso com fator água/cimento de 0,48, NBR-7215 (1982).

As proporções das composições de cal e pozolana estudadas foram prefixados conforme indicadas abaixo:

Cal (%)	Pozolana (%)
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40

Todas as composições foram juntas em um misturador mecânico, marca "Blakeslee", com 3 velocidades de rotação. À medida que os componentes eram juntos no misturador mecânico, aumentava-se gradualmente a velocidade, tendo-se o cuidado de raspar a argamassa que adería nas paredes da cuba e da pá. Com auxílio de uma espátula, colocava-se novamente no interior da cuba.

### **3.3.2.1.2 - Moldagem dos Corpos de Prova**

Foram utilizados moldes cilíndricos com dimensões de 5x10cm. Para garantir a estanqueidade, passou-se óleo na superfície interna dos moldes e, em seguida, apertado o dispositivo de fechamento. Adotou-se uma medida padrão no enchimento dos moldes a fim de distribuir nas quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo trinta golpes uniformes cada camada, com soquete normal, distribuídos homogeneamente, NBR- 7215 (1982). A operação foi concluída com regularização da superfície do topo do corpo de prova por uma espátula num movimento de vaivém.

### **3.3.2.1.3 - Cura**

Os corpos de prova foram submetidos a um período de cura de 7, 28 e 60 dias a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Foram realizados dois tipos de cura:

a) cura aérea

b) cura imersa em água

a) A cura aérea foi realizada de maneira que os corpos de prova ficassem expostos ao ar, colocados dentro de uma tanque seco, até que se completassem os respectivos períodos de cura.

- b) A cura imersa em água foi realizada de maneira que os corpos de prova ficassem submersos em água, colocadas dentro de um tanque cheio de água até que o nível d'água cobrisse totalmente a parte superior dos corpos de prova. A operação termina quando se completam os respectivos períodos de cura.

Todos os corpos de prova das argamassas com cem por cento de cal foram curados sob forma aérea. Os demais corpos de prova das cals pozolânicas e cals pozolânicas aditados com cimento foram curados nos primeiros cinco dias, cura sob forma aérea e, umedecidos uma vez por dia, e, a partir daí, com cura imersa em água (Vorobyev, 1965). Os corpos de prova foram identificados com giz de cera, indicando-os as respectivas idades de cura.

#### **3.3.2.1.4 - Resistência à Compressão Simples**

Para cada composição das misturas, foram preparados doze corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para cada tempo de cura. Após os respectivos períodos de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e rompidos em uma prensa Losenhausen. A velocidade de carregamento obedeceu às normas da NBR-7215 (1991). A carga de ruptura foi a carga máxima em quilogramas indicada pelo ponteiro da máquina no instantes da ruptura.

A RCS é obtida pela divisão de carga máxima de ruptura pela área de secção transversal do corpo de prova:  $R = N/A$ . De todos os resultados foi tirada a média dos corpos de provas individuais, e calculado o desvio relativo máximo de  $\pm 10\%$  dos resultados dos quatro corpos de prova. Se um dos valores de resistência deferia da média de  $\pm 10\%$ , ele era eliminado e tornava-se a média dos três restantes. Se mais de dois valores se afastavam de  $\pm 10\%$  da média, abandonavam-se os três resultados, e procedia-se a novo ensaio.

### 3.3.2.2 - Resistência à Tração Indireta - RTI

Para cada composição das misturas, foram preparados doze corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para cada tempo de cura. Após os respectivos períodos de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e rompidos em uma prensa Losenhausen. Foram confeccionadas 100 taliscas de madeira isentas de defeito, de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova e secção transversal com dimensões iguais a  $b = 1 \text{ cm}$  e  $h = 1 \text{ cm}$ . O procedimento foi de acordo com o critério da norma NBR-7222 (1983).

A RTI é obtida pela fórmula:

$$F_{t,d} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l}$$

onde  $F_{t,d}$  é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;  $F$  é a força axial que atua no corpo de prova;  $d$  é o diâmetro do corpo de prova; e  $l$  é o comprimento do corpo de prova, NBR-7222 (1983). De todos os corpos de prova foi tirada a média dos resultados individuais, e calculados os desvios relativos máximos de  $\pm 10\%$  dos resultados dos quatro corpos de prova. Se um dos valores de resistência deferia da média de  $\pm 10\%$ , ele era eliminado e tomava-se a média dos três restantes. Se mais de dois valores se afastavam de  $\pm 10\%$  da média, abandonavam-se os três resultados, e precedia-se à nova moldagem.

### 3.3.3 - Análise Estatística

Com os resultados obtidos para a resistência à compressão simples e resistência à tração indireta, foram efetuadas análises estatísticas através de correlações lineares simples, verificando-se a interdependência entre a resistência à compressão simples e

a resistência à tração indireta. Essas análises foram processadas em computador IBM. Foi utilizado o programa SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versão H (Nie et alii, 1975).

A equação  $y = A + Bx$  relaciona o tipo de ajustamento, onde  $x$  e  $y$  são respectivamente as variáveis dependentes e independentes; "**B**" a inclinação da reta e "**A**" a interseção com o eixo  $y$ . A significância da correlação verifica-se através do coeficiente de correlação ( $R$ ) e do nível de significância ( $\alpha$ ). O coeficiente de correlação expressa o grau de relacionamento entre as duas variáveis. Se não existe correlação entre as duas variáveis, o coeficiente de correlação é zero. Por outro lado, se existe a correlação perfeita, o coeficiente de correlação é igual a  $\pm 1$ . O nível de significância é o valor que representa o nível para o qual a relação entre duas variáveis é significativo. Um resultado é significativo se a probabilidade calculada é menor do que 0,05, isto é, cinco por cento, e altamente significativa se a probabilidade calculada é menor do que 0,01, isto é, um por cento (Spiegel, 1980 e Neves, 1989).

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Introdução

São apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos dos ensaios de caracterização e tecnológicos das amostras das análises efetuadas no decorrer da pesquisa.

### 4.2 - Ensaio de Caracterização

#### 4.2.1 - Massa Específica Real

Na Tabela 1, são apresentados os valores obtidos das massas específicas reais das quatro amostras de cais e da pozolana.

Os resultados apresentaram uma variação de  $2,2420 \text{ g/cm}^3$  da cal Carbomil a  $2,5366 \text{ g/cm}^3$  de cal Megaó. A cal Calcimento apresentou massa específica real de  $2,3186 \text{ g/cm}^3$ , e a cal Cimencal de  $2,4530 \text{ g/cm}^3$ .

A massa específica real da Carbomil foi a que apresentou a menor massa específica real das amostras de cais, podendo indicar assim um processo de queima provavelmente mais adequado, enquanto que a Megaó possui a maior massa específica real.

#### 4.2.2 - Área Específica

Na Tabela 1, são apresentados os valores obtidos das áreas específicas das quatro amostras de cais e da pozolana.

Os resultados apresentaram os valores obtidos para áreas específicas pelo método de Blaine, NBR-7224 (1984), tendo variação de 0,3328 m<sup>2</sup>/g para a Calcimento a 1,7386 m<sup>2</sup>/g para a Megaó. A Carbomil apresentou área específica de 1,1461 m<sup>2</sup>/g e a Cimencal de 1,6120 m<sup>2</sup>/g.

Comparando esses resultados acima com os de Silva (1992), as cais, Cimencal e Calcimento, apresentaram maiores áreas específicas, possivelmente por serem amostras diferentes.

Uma análise conjunta dos resultados obtidos para área específica das amostras de cal, a Megaó é a cal com maior área específica, provavelmente mais reativa, por causa de sua maior superfície de área de contato (Cincotto, 1990). Já a Calcimento é a cal com menor área específica e provavelmente com menor reatividade.

#### 4.2.3 - Análise Química

Na Tabela 2, são apresentadas as composições químicas das quatro amostras de cais e da pozolana. Passamos a analisar cada uma das amostras.

### 4.2.3.1 - Cais

Dentre das quatro cais estudadas, observa-se que a cal Megaó está incluída entre as cais dolomíticas, tendo em vista que a relação CaO/MgO é igual a 1,60, portanto, próximo a de Cincotto (1990), NBR-6453 (1988). Segundo Cincotto (1990), o dolomito é tanto mais puro quanto mais próximo está essa relação do valor 1,39. Deste modo, a cal Megaó é uma cal dolomítica calcítica, enquanto as demais cais, Cabomil, Cimencal e Calcimento, são calcíticas, pois a relação CaO/MgO é superior a 1,39.

Através de difração de raios-X, é possível conseguir diferenciar um dolomito puro de um dolomito calcítico (Cincotto, 1990), NBR-6453 (1988).

Com relação a NBR-7175 (1992), observa-se que as cais atendem às exigências químicas das especificações, como o teor de óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO), que deve ser maior ou igual a 88%. Senão vejamos: a Carbomil apresentou 92,50%, a Megaó 94,42%, a Cimencal 88,50% e a Calcimento 61,04%. Verificando os resultados, a Carbomil, a Megaó e a Cimencal atendem aos limites estabelecidos pela norma NBR-7175 (1992), enquanto que a Calcimento ficou abaixo das exigências específicas.

O anidrido carbônico CO<sub>2</sub>, que é no máximo cinco por cento na fábrica e sete por cento no depósito da obra, NBR-6453 e NBR-9553 (1988), foi calculado a partir do percentual CaCO<sub>3</sub> determinado na análise termogravimétrica. De acordo com Cincotto (1990), na equação  $\%CO_2 \times 2,27 = \%CaCO_3$ , determinaram-se os teores de CO<sub>2</sub>; a Megaó obteve 7,61%, a Cimencal 15,08% e a Calcimento 20,59%. A Carbomil praticamente é isenta de carbonato de cálcio.

**Carbomil** – Trata-se de uma cal calcítica, com teor de CaO de 68,19%, MgO de 2,19%, PR de 23,91% e RI de 0,06%.

**Megaó** – Trata-se de uma cal dolomítica, visto que o teor de CaO é de 46,85%, MgO de 29,14%, PR de 19,52% e RI de 1,16%.

**Cimencal** – Trata-se de uma cal calcítica com teor de CaO de 57,37%, MgO de 5,95%, PR de 28,45% e RI de 1,10%.

**Calcimento** – Trata-se de uma cal calcítica, com teor de CaO de 40,82%, MgO de 2,18%, PR de 29,55% e RI de 8,58%.

#### 4.2.3.2 - Pozolana

A soma dos percentuais de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que é de 81,25%, superou o valor mínimo exigido de setenta por cento (Souza Santos, 1975).

Trata-se de uma pozolana típica oriunda de uma argila caulinitica provavelmente com impurezas de sílica.

#### 4.2.4 - Análise Térmica Diferencial - ATD

As curvas das análises térmicas diferenciais estão representadas na Figura 1. Será exibida cada uma das curvas, indicando seu comportamento térmico-quantitativo. Estas curvas representam as quatro amostras de cais estudadas e a pozolana.

#### 4.2.4.1 - ATD das Cais

##### Carbomil

Curva ATD nº 1 – Observa-se a presença de um grande pico endotérmico a 530 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Ca(OH)}_2$ ; pequeno pico endotérmico a 780 °C, característico da decomposição de  $\text{CaCO}_3$ .

##### Megaó

Curva ATD nº 2 – Observa-se a presença de uma pequena banda endotérmica a 380 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Mg(OH)}_2$ ; grande pico endotérmico a 530 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Ca(OH)}_2$ ; médio pico endotérmico a 830 °C, característico da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

##### Cimencal

Curva ATD nº 3 – Observa-se a presença de uma grande banda endotérmica a 380 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Mg(OH)}_2$ ; grande pico endotérmico a 530 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Ca(OH)}_2$ ; grande pico endotérmico a 870 °C, característico da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

##### Calcimento

Curva ATD nº 4 – Observa-se a presença de um pequeno pico endotérmico a 90 °C, característico da perda de água livre; grande pico endotérmico a 530 °C, característico da perda de hidroxilas do  $\text{Ca(OH)}_2$ ; grande pico endotérmico a 900 °C, característico da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

#### 4.2.4.2 - ATD da Pozolana

Curva ATD nº 5 – Observa-se a presença de um pequeno pico endotérmico a 100 °C, característico da perda de água livre; pequeno pico endotérmico a 570 °C, característico da transformação de quartzo em quartzo ; pequeno pico exotérmico a 930 °C, característico da nucleação da mulita.

#### 4.2.5 - Análise Termogravimétrica - ATG

As curvas das análises termogravimétricas das cais estão representadas na Figura 2. Estas curvas discriminadas representam as quatro amostras de cais estudadas.

##### 4.2.5.1 - ATG das Cais

###### Carbomil

Curva ATG nº 1 – Observa-se uma inflexão nítida entre 450 °C e 600 °C, correspondente a, aproximadamente, 82% de perda de massa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e dezoito por cento de outros componentes.

###### Megaó

Curva ATG nº 2 – Observa-se ligeira inflexão entre 400 °C e 450 °C, correspondente a, aproximadamente, dois por cento de perda de massa de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ; entre 450 ° e 550 °C, acentuada inflexão correspondente a, aproximadamente,

dezessete por cento de perda de massa de  $\text{CaCO}_3$ ; e aproximadamente 45% de outros componentes.

### **Cimencal**

Curva ATG n° 3 - Observa-se ligeira inflexão entre 380 °C e 500 °C, correspondente a, aproximadamente, cinco por cento de perda de massa de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ; entre 500 °C e 600 °C, acentuada inflexão correspondente a, aproximadamente, quarenta por cento de perda de massa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; entre 650 °C e 900 °C, inflexão correspondente a, aproximadamente, 35% de perda de massa de  $\text{CaCO}_3$ ; e vinte por cento de outros componentes.

### **Calcimento**

Curva ATG n° 4 - Observa-se ligeira inflexão entre 400 °C e 450 °C, correspondente a, aproximadamente, 0,20% de perda de massa do  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ; entre 450 °C e 730 °C, inflexão correspondente a, aproximadamente, 47% de perda de massa de  $\text{CaCO}_3$ , e 37,8% de outros componentes.

## **4.3 - Ensaios Tecnológicos**

### **4.3.1 - Resistência à Compressão Simples - RCS**

Nas Tabela 3, 4 e 5, estão representados os valores obtidos para RCS das argamassas com cem por cento de cal, das cais pozolânicas e das cais pozolânicas aditados com cinco, dez, quinze e vinte por cento de cimento Portland. Estes valores estão plotados nos gráficos nas Figuras 3 a 18.

#### **4.3.1.1 - RCS das Argamassas com Cem por Cento de Cal para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias**

Na Tabela 3, são apresentados os diversos resultados de RCS nas diferentes idades de cura.

##### **Carbomil**

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias, obteve 0,94 MPa; aos 28 dias, 1,00 MPa e aos 60 dias, 1,01 MPa. Nesta cal, os valores das RCS aumentaram gradativamente.

##### **Megaó**

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias, obteve-se 1,31 MPa; aos 28 dias, 1,92 MPa e aos 60 dias, 2,33 MPa. Nesta cal, os valores das RCS aumentaram substancialmente de um período de cura para um outro período.

##### **Cimencal**

Observa-se que os resultados das RCS também aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias, obteve 0,71 MPa; aos 28 dias, 1,19 MPa e aos 60 dias, 1,53 MPa. Nesta cal, os valores das RCS aumentaram consideravelmente.

### **Calcimento**

Observa-se que os resultados das RCS também aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias, obteve-se 0,38 MPa; aos 28 dias, 0,71 MPa e aos 60 dias, 0,94 MPa. Nesta cal, os valores das RCS aumentaram também progressivamente.

Numa análise conjunta dos resultados destas quatro cals, verificamos que a Megaó é a cal que apresentou maior RCS de 2,33 MPa, aos 60 dias de cura. Seu desempenho foi também maior em cada idade de cura estudado. A Calcimento apresentou o pior desempenho.

#### **4.3.1.2 - RCS das Cais Pozolânicas para Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias**

Na Tabela 4, são apresentados os diversos resultados de RCS nas diferentes composições.

### **Carbomil**

Observa-se que na proporção 30-70% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se maior valor de RCS, 12,91 MPa. Esta cal variou de 3,93 MPa na proporção de 20-80% de cal- pozolana aos 7 dias de cura a 12,91 MPa, na proporção de 30-70% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

### **Megaó**

Observa-se que na proporção de 40-60% de cal- pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor de RCS, 16,50 MPa. Esta cal variou de 5,33 MPa na

proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 16,50 MPa na proporção de 40-60% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

### **Cimencal**

Observa-se que na proporção de 40-60% de cal- pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se maior valor de RCS, 10,61 MPa. Esta cal variou de 2,12 MPa na proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 10,61 MPa na proporção de 40-60% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

### **Calcimento**

Observa-se que na proporção de 30-70% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor de RCS, 1,99 MPa. Esta cal variou de 0,26 MPa na proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 1,99 MPa na proporção de 30-70% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

Comparando esses resultados com os de Silva e Ferreira (1992), verificamos que com teores maiores do que vinte por cento de pozolana é possível obter resistências mecânicas superiores.

Numa análise conjunta dos resultados, a Carbomil e a Calcimento apresentaram maiores valores das RCS na proporção de 30-70% de cal-pozolana, sendo que a Carbomil apresentou elevada superioridade frente a Calcimento, em todas as idades de cura. As RCS, por exemplo, aos 28 dias da Carbomil foram de 10,66 MPa, enquanto que a Calcimento, no mesmo período de cura, foi de 1,71 MPa.

A Megaó e a Cimencal apresentaram maiores valores das RCS na proporção de 40-60% de cal-pozolana, sendo que a Megaó foi bem superior a Cimencal. Para os

demais percentuais das composições de cal- pozolana, os resultados evidenciaram comportamentos mecânicos inferiores aos das proporções acima indicadas.

Observa-se ainda que a Megaó é a cal com melhor RCS para qualquer período de cura e composições estudadas.

Em seguida, inferior à Megaó, vem a Carbomil, Cimencal e, por último, a Calcimento.

Dentre as quatro amostras de cais estudadas, a cal que apresentou melhor RCS foi a Megaó com 16,50 MPa na proporção de 40-60% de cal-pozolana curadas aos 60 dias.

Tendo em vista que todas as composições das cais pozolânicas apresentaram maiores RCS na proporção de 40-60% de cal-pozolana para o tempo de cura aos 7 dias, conforme Tabela 4, foi adotada esta proporção de 40-60% para as cais pozolânicas aditados com cimento Portland.

#### **4.3.1.3 - RCS das Cais Pozolânicas Aditados com Cimento Portland para Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias**

Na Tabela 5, são apresentados os diversos resultados de RCS na composição de 40-60% de cal-pozolana aditados com cinco, dez, quinze e vinte por cento de cimento.

##### **Carbomil**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Carbomil apresentou maior RCS aos 60 dias de cura, 14,41 MPa. Esta cal variou de 4,91 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento a 14,41 MPa.

### **Megaó**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Megaó apresentou maior RCS aos 60 dias de cura, 19,42 MPa. Esta cal variou de 7,04 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento a 19,42 MPa.

### **Cimencal**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Cimencal apresentou maior RCS aos 60 dias de cura, 17,41 MPa. Esta cal variou de 5,86 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento à 17,41 MPa.

### **Calcimento**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Calcimento apresentou maior RCS aos 60 dias de cura, 8,51 MPa. Esta cal variou de 1,79 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento à 8,51 MPa.

Numa análise conjunta dos resultados das cais pozolânicas aditados com cimento Portland, com teores de 5, 10, 15 e 20%, temos que a Carbomil passou a ter RCS menor do que a Cimencal. Exemplificamos um dado da Tabela 5, em que a Carbomil com vinte por cento de cimento obteve RCS aos 60 dias de cura 14,41 MPa, enquanto que a Cimencal, no mesmo período de cura e também com vinte por cento de cimento, obteve-se 17,41 MPa. Após adicionado o cimento nas cais pozolânicas, a ordem de maiores RCS das amostras de cais alteraram, sendo a Megaó continuando com maiores RCS, em seguida a Cimencal, Carbomil e Calcimento. Observa-se na Tabela 5, que quanto maiores teores de cimento aditados, maiores serão as RCS.

Por outro lado, observa-se também nas Tabelas 4 e 5 que as cais Carbomil e

Megaó mantiveram maiores RCS nas cais pozolânicas do que quando aditadas com cimento Portland, com teores de 5, 10 e 15%. Estas cais só foram superadas as RCS, quando aditadas com vinte por cento de cimento.

As cais Cimencal e Calcimento apresentaram RCS maiores em todos os teores estudados, de 5, 10, 15 e 20% de cimento, superiores às cais pozolânicas.

#### **4.3.2 - Resistência à Tração Indireta - RTI**

Nas Tabelas 6, 7 e 8, estão representados os valores obtidos para RTI das argamassas com cem por cento de cal, das cais pozolânicas e das cais pozolânicas aditadas com cinco, dez, quinze e vinte por cento de cimento Portland. Estes valores estão plotados nos gráficos nas Figuras 20 a 34.

##### **4.3.2.1 - RTI das Argamassas com Cem por Cento de Cal para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias**

Na Tabela 6, são apresentados os diversos resultados de RTI nas diferentes idades de cura.

#### **Carbomil**

Observa-se que os resultados das RTI aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias, obteve-se 0,12 MPa, aos 28 dias 0,14 MPa e aos 60 dias 0,15 MPa. Nesta cal os valores das RTI aumentaram gradativamente.

### **Megaó**

Observa-se que os resultados das RTI aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias obteve-se 0,32 MPa; aos 28 dias, 0,49 MPa e aos 60 dias, 0,63 MPa. Nesta cal os valores das RTI aumentaram substancialmente.

### **Cimencal**

Observa-se que os resultados das RTI aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias obteve-se 0,10 MPa; aos 28 dias, 0,14 MPa e aos 60 dias, 0,20 MPa. Nesta cal os valores das RTI aumentaram em proporções maiores do que a Carbomil.

### **Calcimento**

Observa-se que os resultados das RTI aumentaram à medida que o período de cura fosse maior. Aos 7 dias 0,04 MPa; aos 28 dias, 0,09 MPa e aos 60 dias, 0,13 MPa. Nesta cal os valores das RTI aumentaram proporcionalmente de um período de cura para um outro período.

Numa análise conjunta dos resultados, a argamassa que apresentou melhor RTI foi a Megaó, aos 60 dias de cura, 0,63 MPa. A menor RTI ficou com a Calcimento, aos 7 dias de cura, 0,04 MPa.

As RTI variaram de 0,04 MPa da Calcimento para 0,63 MPa da Megaó. Por ordem de RTI máximos, temos em primeiro lugar a Megaó, em seguida a Cimencal, Carbomil e Calcimento.

#### **4.3.2.2 - RTI das Cais Pozolânicas para Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias**

Na Tabela 7, são apresentados os diversos resultados de RTI nas diferentes composições.

##### **Carbomil**

Observa-se que na proporção 30-70% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor da RTI, 2,77 MPa. Esta cal variou de 0,77 MPa na proporção de 60-40% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 2,77 MPa na proporção de 30-70% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

##### **Megaó**

Observa-se que na proporção de 30-70% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor da RTI, 3,61 MPa. Esta cal variou de 1,46 MPa na proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 3,61 MPa na proporção de 30-70% de cal-pozolana, aos 60 dias de cura.

##### **Cimencal**

Observa-se que, na proporção de 40-60% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor da RTI, 2,83 MPa. Esta cal variou de 0,28 MPa na proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 2,83 MPa na proporção de 40-60% de cal-pozolana, aos 60 dias de cura.

## Calcimento

Observa-se que, na proporção de 30-70% de cal-pozolana para a idade de 60 dias, obteve-se o maior valor da RTI, 0,35 MPa. Esta cal variou de 0,04 MPa na proporção de 20-80% de cal-pozolana aos 7 dias de cura a 0,34 MPa na proporção de 30-70% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

Numa análise conjunta dos resultados, a Megaó foi também a cal com maior RTI de 3,61 MPa aos 60 dias de cura na proporção 30-70% de cal-pozolana. Verifica-se que a Megaó obteve sua máxima resistência a tração por compressão diametral, na proporção 30-70% aos 60 dias de cura de cal-pozolana, diferente da RCS no qual a proporção de maior resistência foi de 40-60% aos 60 dias de cura.

Pela ordem de melhores RTI, em primeiro lugar vem a Megaó; em seguida a Carbomil, Cimencal e Calcimento. Vide Tabela 7. Observamos também que a Cimencal passou a obter máxima RTI na proporção 40-60% de cal-pozolana aos 60 dias de cura, e a Calcimento por sua vez passou-se a obter máxima RTI na proporção de 30-70% de cal-pozolana aos 60 dias de cura.

Pode-se avaliar que tanto a Carbomil e como a Cimencal obtiveram RTI máximas idênticas, sendo que as proporções de cal-pozolana são diferenciadas. Mais uma vez, a Megaó é a melhor cal em todas as resistências a tração por compressão diametral, nas diversas proporções estudadas.

Pelo mesmo critério seguido nas RCS, adotou-se a proporção 40-60% de cal-pozolana, para as cais pozolânicas aditadas com cimento Portland, sabendo-se que a única cal com maior RTI nessa proporção de 40-60%, foi a Cimencal. Como os trabalhos foram realizados concomitantemente, eis a razão do critério adotado.

#### **4.3.3.3 - RTI das Cais Pozolânicas Aditadas com Cimento Portland para Tempos de Cura de 7, 28 e 60 dias**

Na Tabela 8, são apresentados os diversos resultados de RTI na composição de 40-60% de cal-pozolana aditados com cinco, dez, quinze e vinte por cento de cimento.

##### **Carbomil**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Carbomil apresentou maior RTI aos 60 dias de cura, 2,60 MPa. Esta cal variou de 1,13 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento a 2,60 MPa com vinte por cento de cimento.

##### **Megaó**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Megaó apresentou maior RTI aos 60 dias de cura, 3,43 MPa. Esta cal variou de 1,60 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento à 3,43 MPa com vinte por cento de cimento.

##### **Cimencal**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Cimencal apresentou maior RTI aos 60 dias de cura, 3,03 MPa. Esta cal variou de 1,51 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento a 3,03 MPa com vinte por cento de cimento.

##### **Calcimento**

Observa-se que com vinte por cento de cimento, a Calcimento apresentou maior

RTI aos 60 dias de cura, 1,82 MPa. Esta cal variou de 0,33 MPa aos 7 dias de cura com cinco por cento de cimento a 1,82 MPa com vinte por cento de cimento.

Numa análise conjunta dos resultados das cais pozolânicas aditadas com cimento Portland, com teores de cinco, dez, quinze e vinte por cento, temos que a Megaó continua tendo as melhores RTI, em seguida a Cimencal, Carbomil e Calcimento. Observa-se que à proporção que acrescentava maiores teores de cimento, as RTI aumentavam gradualmente, sendo que os intervalos foram bem próximos de um percentual para um outro. Vide Tabela 8.

### **Considerações Finais**

De um modo geral, as resistências mecânicas das RCS e RTI apresentaram desempenho satisfatório. Salienta-se que a amostra de cal Megaó destacou-se entre as demais, tendo em vista sua alta resistência à compressão simples nas cais pozolânicas com proporção de 40-60% de cal-pozolana. Esta cal apresentou comportamento mecânico superior quando adicionadas com teores de quinze por cento de cimento Portland composto CII-F-32 POZ.

Observou-se que as RCS e RTI assumiram valores diferenciados em cada amostra de cal. Os maiores valores de RCS das argamassas com cem por cento de cal são pela ordem:

- 1 – Megaó
- 2 – Cimencal
- 3 – Carbomil
- 4 – Calcimento

Em relação às cais pozolânicas, as maiores RCS são:

- 1 – Megaó
- 2 – Carbomil
- 3 – Cimencal
- 4 – Calcimento

Em relação às cais pozolânicas aditadas com cimento Portland composto, as maiores RCS são:

- 1 – Megaó
- 2 – Cimencal
- 3 – Carbomil
- 4 – Calcimento

Nota-se que baseada nessas ordens de classificação de resistências máximas, a RCS alterou de ordem entre as cais Carbomil e Cimencal, quando aditados com teores de cinco, dez, quinze e vinte por cento.

Os maiores valores de RTI das argamassas com cem por cento de cal são pela ordem:

- 1 – Megaó
- 2 – Cimencal
- 3 – Carbomil
- 4 – Calcimento

Em relação às cais pozolânicas, as maiores RTI são:

- 1 – Megaó

- 2 – Cimencal
- 3 – Carbomil
- 4 – Calcimento

Em relação às cãs pozolânicas aditadas com cimento Portland composto, as maiores RTI são:

- 1 – Megaó
- 2 – Cimencal
- 3 – Carbomil
- 4 – Calcimento

A partir dessas ordens de classificação de resistências máximas, a RTI permaneceu inalterada nas quatro argamassas estudadas.

#### **4.4 - Análise Estatística**

Os resultados obtidos pelas análises estatísticas através de correlações lineares simples, entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração indireta por compressão diametral, curados por períodos de 7, 28 e 60 dias em câmara úmida, estão representados na Tabela 9. A relação RCS x RTI estão plotados nos gráficos nas Figuras 35 a 42.

A seguir, serão discutidos os resultados obtidos pelas análises de regressão, de acordo com as correlações lineares simples, em cada caso.

#### 4.4.1 - Correlações Estatísticas entre a Resistência à Compressão Simples - RCS e a Resistência à Tração Indireta - RTI

Os resultados obtidos pelas análises de regressões lineares simples em termos de coeficiente de correlação, nível de significância, constantes "A" e "B" e as equações entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração indireta estão contidos na Tabela 9.

A Tabela 9 mostra as correlações lineares simples entre a RCS x RTI, curados por períodos de 7, 28 e 60 dias em câmara úmida. Observa-se que das dez correlações simples lineares estudadas, oito são significativas ( $NS < 0,05$ ) e ( $NS = 0,05$ ), e duas obtiveram ( $NS > 0,05$ ). Serão listadas as oito melhores equações que obtiveram maiores níveis de significância com os respectivos coeficientes de correlação e nível de significância.

$$1) y = -24921 + 4,5668x$$

$$r = 0,99$$

$$\alpha = 0,178$$

$$2) y = 1,7030 + 5,1292x$$

$$r = 0,99$$

$$\alpha = 0,213$$

$$3) y = 1,6577 + 4,9623x$$

$$r = 0,97$$

$$\alpha = 0,524$$

$$4) y = 13,3289 + 3,5123x$$

$$r = 0,95$$

$$\alpha = 1,216$$

$$5) y = -9,5392 + 4,3979x$$

$$r = 0,95$$

$$\alpha = 1,238$$

$$6) y = 0,77030 + 4,3979x$$

$$r = 0,95$$

$$\alpha = 1,466$$

$$7) y = 17,0736 + 3,1876x$$

$$r = 0,95$$

$$\alpha = 1,494$$

$$8) y = -18,5092 + 5,1164x$$

$$r = 0,94$$

$$\alpha = 1,625$$

onde:

y = Resistência à Compressão Simples – RCS

x = Resistência à Tração Indireta – RTI

R = Coeficiente de Correlação

$\alpha$  = Nível de Significância (%)

Em resumo, observa-se que das dez correlações lineares simples, as de números = 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, conforme indicado na Tabela 9, foram significativas, ( $NS < 0,05$ ). As correlações de números 4 e 6 ficaram abaixo do nível significativo; ( $N < 0,05$ ). Observa-se também que na equação n<sup>o</sup> 1 indicada na Tabela 9, a amostra de cal Carbomil fora aditada com cimento Portland.

Numa análise conjunta dos resultados das correlações estatísticas, realizadas entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração indireta por compressão diametral, mostra que a cal Calcimento, no período de cura de 28 dias, obteve-se entre as demais o melhor resultado de significância. Das quatro amostras de cais, a Megaó só obteve uma única vez uma correlação estatística acima de  $R = 0,90$ ; as outras amostras de cais, Carbomil, Cimencal e Calcimento, obtiveram três vezes cada uma delas, coeficientes de correlação acima de  $r = 0,90$ .

A relação RCS/RTI em média ficou em torno de 25%, isto é, a RTI representa num cômputo geral um quarto da RCS.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES

Dos estudos realizados nas diversas composições das argamassas com cem por cento de cal, cais pozolânicas e cais pozolânicas aditadas com cimento Portland, resultaram diferentes comportamentos caracterizantes e tecnológicos dentro da sistemática utilizada para períodos de cura de 7, 28 e 60 dias em câmara úmida.

As pozolanas têm proporcionado grandes vantagens no desempenho mecânico quando misturadas em proporções adequadas.

As diversas composições das argamassas de cais, de cais pozolânicas e das argamassas, aditadas com cimento, proporcionaram resistências mecânicas apreciáveis.

O estudo desenvolvido possibilitou o aprimoramento dos materiais alternativos denominados de cais pozolânicas, sendo portanto promissora a sua utilização em obras de construção civil. A seguir, são relacionadas as conclusões parciais de cada etapa estudada.

## 5.1 - Carbomil

É uma cal calcítica com baixo teor de MgO. Apresentou a menor massa específica real entre as cais estudadas,  $2,2420 \text{ g/cm}^3$ , provavelmente devido a seu alto grau de pureza. Obteve-se uma área específica de  $1,1461 \text{ m}^2/\text{g}$  indicando a aproximadamente 82% do  $\text{Ca(OH)}_2$ , e praticamente isenta de  $\text{CaCO}_3$ .

## 5.2 - Megaó

É uma cal dolomítica com alto teor de MgO. Apresentou a maior massa específica real entre as cais estudadas,  $2,5366 \text{ g/cm}^3$  e a maior área específica de  $1,7386 \text{ m}^2/\text{g}$ , indicando aproximadamente dezessete por cento de  $\text{CaCO}_3$ . Foi a cal com o melhor desempenho mecânico.

### 5.1.3 - Cimencal

É uma cal calcítica carbonatada, com massa específica real de  $2,4530 \text{ g/cm}^3$  e área específica de  $1,6120 \text{ m}^2/\text{g}$ , indicando aproximadamente 35% de  $\text{CaCO}_3$ .

## 5.4 - Calcimento

É uma cal calcítica carbonatada, com massa específica real de  $2,3186 \text{ g/cm}^3$  e menor área específica entre as cais,  $0,3328 \text{ m}^2/\text{g}$ , indicando aproximadamente 47% de  $\text{CaCO}_3$ .

## 5.5 - Pozolana

É uma pozolana artificial típica oriunda de uma argila caulínica provavelmente com impurezas de sílica na forma de quartzo. Indicando massa específica real de  $2,7005 \text{ g/cm}^3$  e área específica de  $1,1779 \text{ m}^2/\text{g}$ .

## 5.6 - Comportamento Mecânico das Cais

Nas argamassas de cal e areia, a Megaó foi a amostra de cal que obteve maior RCS e RTI nas três idades de cura, obtendo-se 23,33 MPa na RCS e 0,63 MPa na RTI aos 60 dias de cura.

## 5.7 - Comportamento Mecânico das Cais Pozolânicas

Dentro das quatro amostras de cais, a Megaó apresentou maior RCS (16,50 MPa) na composição de quarenta por cento de cal e sessenta por cento de pozolana aos 60 dias de cura, superando todas as outras cais pozolânicas. Na RTI, a Megaó também obteve a maior resistência (3,61 MPa) na composição de trinta por cento de cal e setenta por cento de pozolana aos 60 dias de cura.

## 5.8 - Comportamento das Cais Pozolânicas Aditadas com Cimento

Todos os percentuais pré-estabelecidos de cinco, dez, quinze e vinte por cento de cimento obtiveram comportamento variáveis nas RCS e RTI. Salienta-se que a Calcimento apresentou RCS e RTI maiores que as RCS e RTI das cais pozolânicas em

todos os períodos de cura. As demais variaram as RCS e RTI em relação às cais pozolânicas.

A RCS máxima obtida pela cal Megaó de 16,50 MPa na argamassa de cal pozolânica só foi superada quando adicionado vinte por cento de cimento.

### **5.9 - Conclusões Finais**

Comparando as argamassas com cais pozolânicas, verifica-se que a amostra de cal Megaó tem efetivamente comportamento mecânico bem superior que as demais cais. Esse desempenho satisfatório constatou-se praticamente em todas as composições estudadas.

Com base nestes resultados, verifica-se que as cais pozolânicas poderão ser alternativa de grande valia entre os materiais de construção na engenharia civil, tendo em vista que as resistências mecânicas alcançaram valores de até 16,50 MPa.

## **Capítulo 6**

# **SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Visando a aprimorar mais ainda os estudos sobre o comportamento das cais pozolânicas, sugerimos alguns pontos que julgamos importantes para dar continuidade a essa pesquisa.

- 1 – Estudo sobre o módulo de elasticidade até o fissuramento e trincamento.
- 2 – Dimensionamento de capacidade de carga e deformabilidade de alvenarias.
- 3 – Influência do fator água/cimento em argamassas com diversos traços.
- 4 – Estudos em outras composições de amostras de cais e pozolana.
- 5 – Influência de outros tipos de cimento Portland com aditivos às cais pozolânicas.
- 6 – Início e fim de pega das cais pozolânicas.
- 7 – Estudo do envelhecimento das cais pozolânicas.
- 8 – Cais pozolânicas: estudos óptico-eletrônicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Areia Normal para Ensaio de Cimento, NBR-7214, 1982.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cal Hidratada para Argamassa, NBR-7175, 1992.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cal Virgem para Construção, NBR-6453, 1988.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cimento Portland Comum - Especificação. NBR-5732, 1980.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Determinação da Finura de Cimento Portland Mediante Emprego do Aparelho de Permeabilidade do Ar, NBR-7224, 1984.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Determinação de Massa Específica Real, NBR-6474, 1984.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Ensaio de Cimento Portland, NBR-7215, 1982.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cimento Portland Pozolânico, Determinação da Pozolanicidade, NBR- 9553, 1991.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cimento Portland, Determinação da Resistência à Compressão, NBR- 7215, 1991.

A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas, Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral, NBR-7222, 1983.

Abiko, A. K., Solo-cimento: Tijolos, Blocos e Paredes Monolíticas, Tecnologia de Edificações, 1988.

Agopyan, V., Estudo dos Materiais de Construção Civil, Materiais Alternativos, Tecnologia de Edificações, Editora Pini, São Paulo, 1988.

Andriolo, F. R., A Utilização de Pozolana na Construção do Conjunto Hidroelétrica de Urubupungá, São Paulo, 1975.

Bauer, F. L. A., Materiais de Construção, Editora Livros Técnicos e Científicos, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1985.

Bogue, R. H., The Chemistry of Portland Cement, New York, 1947.

Bogue, R. H., The Chemistry of Portland Cement. 2nd. Edition, New York, 1955.

Cabrera, J. G. e Nwaknama, C. A., Pozzolanic Activity and Mechanism of Reaction of Red Tropical Soil-Lime Systems, 2nd International Conference on Low Volume Roads, Transportation Research Board, Iowa, USA, 1979.

Calleja, Carrete J., Las Puzolanas, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1958.

Castro Sobrinho, J. F., Pozolana como Material de Construção: Sua Fabricação Artificial em Urubupungá, Centrais Elétricas de São Paulo, São Paulo, 1970.

Cincotto, M. A., Estudo da Composição Química da Cal Hidratada Produzida no Estado de São Paulo, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1977.

Cincotto, M. A., Marques, J.C., Helene, P.R.L., Selection of Suitable Lime-Waste Material Proportion for Masonry Cement Production, Proc. of 10th Friend Conf. of the Int. Counc. for Build. Res. Studies and Documentation, USA, 1986a.

Cincotto, M. A., Características da Cal para Argamassas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A (IPT), A Construção, Editora Pini, São Paulo, 1990.

Cincotto, M. A., Utilização de Subprodutos na Indústria da Construção Civil, Anais do II Simpósio do Departamento de Materiais e Componentes de Construção Civil, UFSC, Florianópolis, 1988.

Cincotto, M.A., Seleção de Materiais Quanto à Atividade Pozolânica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A (IPT), Tecnologia de Edificações, A Construção, Editora Pini, São Paulo, 1984.

Cincotto, M. A., Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil, Tecnologia das Edificações, Editora Pini, São Paulo, 1983.

- Cincotto, M. A., Marques, J.C., Helene, P.R.L., Propriedades das Argamassas Cimento: Cal: Areia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A (IPT), 1985a.
- Cincotto, M. A., Marques, J.C., Helene, P.R.L., Aproveitamento de Materiais Residuais na Produção de Cimentos de Alvenarias - Metodologia, Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 1985b.
- Cincotto, M. A., Estudo das Cales Hidratadas Comercializadas em Diversos Estados Brasileiros, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo, 1986b.
- Davis, A. C., Portland Cement, Concrete Pub., London, 1934.
- Davis, R. E., A Review of Pozzolanic material and their use in concrete, USA, 1949.
- Dron, R., Brivot, F., Bases Minéralogiques de Sélection des Pouzzolanes, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1977.
- Dron, R., L'activité Pouzzolanique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1978.
- Eades, J. L. Grim, R. E., Reaction of Hidrated Lime With Pure Clay Minerals in Soil Stabilization, Res. Bulletin 262, 51 (1960).
- Ferreira, H.C., Neves, G. A., e Kapel, I. B., Previsão da Atividade Pozolânica Através do Uso da Análise Térmica Diferencial, Cerâmica, 35 (238), 1989.
- Ferret, R.; Rev. Mat. Const. Trav. Pub, 281(41), 282(85) (1933).
- Florindo, M. C., Dantas, F. A. S., Campiteli, V. C., O cimento no Brasil, Tecnologia de Construção Civil, IPT, São Paulo, 1991.
- Fournier, M., and Geoffray, J. M., Le Liant Pouzzolanes - Chaux, Laboratoire Régional de Clermont - Feerand, Paris, 1978.
- Ghorab, H., Rogai, J. Antar, A., Surface and Bulk Properties of Aucient Egyption Mortars. Part 1: X - Ray Diffraction Studies, Cement and Concret Research, 16 (6); 813-22, Elmsford, 1986.
- Giolito, I., Métodos Termoanalíticos de Investigação I, Análise Térmica Diferencial, Departamento de Engenharia Química Fundamental, Instituto de Química, USP, 1974.
- Gitahy, H. S., O Problema dos Agregados para os Concretos da Barragem de Tupiá, IPT, São Paulo, 1963.

- Gonnerman, H. F., Lerch, W., Changes in Characteristics of Portland Cement as Exhibited by Laboratory Tests Over the Period 1904 to 1950, ASTM, SP Publics, (1951).
- Guimarães, J.E.P., A Cal: Sua Origem, Seus Tipos, Sua Aplicação e Importância Econômica e Social, Sua Participação nas Obras e nas Argamassas da Engenharia Civil, *Cerâmica* 30 (196), 1984.
- Guimarães, J.E.P., A Indústria da Cal no Brasil, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo, 1986.
- Huan Shiyuan, S., and Cheng Jiping, W., the Evaluation of Pozzolanic Reactivity of Fly Ashes, Congresso Internacional de Química do Cimento, 8<sup>a</sup>, Rio de Janeiro, 1986.
- Jambor, V.J., Hydratationsprodukte der Kalk-Puzzolan-Bindemittel, Institut für Bauwesen und Architektur der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Bratislava, 1963.
- Kihara, Y., Características Físico-Químicas de Cinzas Volantes Nacionais, In: Reunião de Técnicas da Indústria do Cimento, 27<sup>a</sup>, ABCP, São Paulo, 1978.
- Kihara, Y., Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil, *Cerâmica* 28 (145), 15 (1982).
- Kihara, Y., O Estudo das Cinzas Volantes Brasileiras, *Cerâmica* 32 (193), 31 (1986).
- Kokubu, M. and Yamada, J., Fly-Ash Cements, in Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974.
- Kovacs, R., Hydration Process and Durability of Fly-Ash Cement, International Symposium on the Chemistry of Cement, 6th, Moscou, 1974.
- Laboratório de Análises Minerais, Métodos de Análise Química, CCT/PRAI/UFPB, Campina Grande, Paraíba, 1992.
- Largent, R., Estimation de L'activité Pouzzolanique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Recherche d'un Essai, Paris, 1978.
- Lea, F. M., The Chemistry of Pozzolans, In: Symposium on the Chemistry of Cement, Stochln, 1938.
- Lea, F. M., The Chemistry of Cement and Concrete, 3 ed., Edward Arnold, London, 1970.
- Leprevost, A., Cal Hidraulica, Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, Curitiba, 1953.

- Lima, J. B. M., et alii, Cais Pozolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico, X Congresso Brasileiro de Ciências Materiais, CBECIMAT, São Paulo, 1992.
- Mattias, P., et alii, Investigation of Reactions in High- Alumina Fly Ash and Line Partes, Roma, Italy, 1989.
- Massazza, F., Chímica Delle Aggiunte Pozzolâniche e Dei Cementi di Miscela, Il Cement, 73 (1) 3 - 38, Roma, 1974.
- Massazza, F., Struture of Pozzolanic and Fly-Ash and the Hydration of Pozzolanic and Fly-Ash Cements. In: International Congress on, the Chemistry of cement, 7th, Paris, 1980.
- Mateos, M., Physical and Mineralogica Factors in Stabilization of Iowa Soils, Ph.D. Thesis, Iowa State University, 1961.
- Mitidieri Filho, C. V., e Cavalheiro, W., Desenvolvimento de Sistema Construtivo em Painéis Cerâmicos, Tecnologia de Edificações, 1988.
- Mortureux, B., et alii, Comparasion de la Réactivité de Différentes Pouzzolanes, 7th, International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980.
- Murat, M. Ambroise, J., Péra, J., Les Différents Procédés l'Activatiôn des Minéraux Argileux Permettant d'Elaborer des Liants Pouzzolaniques à Résistances Optimales, Congresso Internacional de Química do Cimento, 8<sup>a</sup>, Rio de Janeiro, 1986.
- Nardi, J. V., Estabilização de Areia com Cinza Volante e Cal: Efeito do Cimento como Aditivo e de Brita na Mistura, Dissertação de Mestrado, COPPE, Rio de Janeiro, 1975.
- Nardi, J. V., Influência da Variação do Teor de Cal em Misturas Pozolânicas, 21<sup>a</sup>, Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 1986.
- Neves, G. A., Influência da Área Específica na Atividade Pozolânica do Sistema Solo Laterítico-Cal, Dissertação de Mestrado, UFPB, 1989.
- Neville, A. M., Cimento Portland, In: Propriedades do Concreto, São Paulo, 1982.
- Nie, N. H., Hull, C. H., Jenkins, J. G., Staingrenner, K., Bent, D. H., SPSS - Statistical Package for the Social Science, Editora McGraw-Hill Book Company, USA, 1975.
- Petrucci, E. G. R., Concreto de Cimento Portland, Editora Globo, Porto Alegre, 1979.
- Pinto, S., Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinza Volante, Dissertação de Mestrado, COPPE, Rio de Janeiro, 1971.

- Queiroz de Carvalho, J. B., Amorphous Materials and Lime Stabilized Soils, Proceedings X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3 p.p. 761-764, 1981.
- Ramezaniapour, A. A., Cabrera, J. G., The Measurement of Lime Activity of Natural and Artificial Pozzolans, the University of Leeds, Leeds, 1981.
- Raverdy, M., et alli, Appréciation de l'Activité Pouzzolanique des Constituants Secondaires, 7th International Congress, on the Chemistry of Cements, Paris, 1983.
- Ruas, A.P.L., Produção de Pozolanas Artificiais, 25a. reunião de Técnicas da Indústria do Cimento, ABCP, São Paulo, 1977.
- Schwarzkopf, F., Lime Burning Technology, A Manual For Lime Plant Operators, 1974.
- Sersale, R. and Giordano Orsini, P., Hydrated Phases After Reaction of Lime with Pozzolanic Materials, In Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, 1968.
- Sersale, R., Structure and Characterisation of Pozzolanas and of Fly-Ashes. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7th, Paris, 1980.
- Silva, C. R., Cais Aditivadas com Pozolanas e Cimento Portland, Dissertação de Mestrado, UFPB, 1992.
- Silva, C. R., Ferreira, H. C., Estudo Comparativo entre Aglomerantes Pozolânicos, 36<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Cerâmica, Caxambú, 1992.
- Silva, M. R., Materiais de Construção, Ed. Pini, São Paulo, 1985.
- Soares, A. K., Cimento Portland Pozolânico, ABCP, São Paulo, 1978.
- Souza Santos, P., Tecnologia de Argilas, Vol II, Edgard Blucher, São Paulo, 1975.
- Spiegel, M. R., Estatísticas - Tradução de Pedro Consentino, Editora McGraw-Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1980.
- Taylor, H.F.W., The Chemistry of Cements, Academic Press, New York, 1964.
- Thober, C.W.A., et alli, Obtenção de Aglomerante Hidráulico em Reator de Leito Fluidizado Multi-Estágio-Parte I, In: III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1984a.

- 
- Thober, C. W. A., Northfleet, I. M. L., Obtenção do Aglomerante Hidráulico em Reator de Leito Fluidizado Multi-Estágio-Parte II, In: III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1984b.
- Verçosa, E. J., Materiais de Construção, Editora Sagra S/A, 1975.
- Verhasselt, A., Caractérisation de la Pouzzolanicité de Cendres Volantes, 7th, International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980.
- Vorobyev, V. A., Building Materials, Higher School Publis. House, Moscow, 1965.
- Zampieri, V.A., Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcínadas, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geo-ciências da USP, São Paulo, 1989.
-

Amostras	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Área Específica (m <sup>2</sup> /g)
Carbomil	2,2420	1,1461
Megaó	2,5366	1,7386
Cimencal	2,4530	1,6120
Calcimento	2,3186	0,3328
Pozolana	2,7005	1,1779

**Tabela 1** - Caracterização Física das Amostras Massa Específica Real e Área Específica das Amostras de Cal e Pozolana.

Amostras	PR	RI	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Carbomil	23,91	0,06	0,70	0,11	4,69	68,19	2,19	Nihil	Nihil
Megaó	19,52	1,16	2,80	0,31	0,18	46,85	29,14	Nihil	Nihil
Cimencal	28,45	1,10	4,40	0,30	2,09	57,37	5,95	0,13	0,33
Calcimento	29,55	8,58	15,32	0,46	3,04	40,82	2,18	0,14	0,15
Pozolana	1,55	16,94	66,26	2,32	12,67	traços	traços	0,08	traços

**Tabela 2** - Composição Química das Cais e Pozolana.

Tempos de Cura	RCS de Argamassas com 100% de Cal (MPa)			
	Carbomil	Megaó	Cimencal	Calcimento
7	0,94	1,31	0,71	0,38
28	1,00	1,92	1,19	0,71
60	1,01	2,33	1,53	0,94

**Tabela 3** - Resistência à Compressão Simples (RCS) das Argamassas com 100% de Cal para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Amostras	Tempo de Cura	RCS das Composições Cal - Pozolanas (MPa)				
		20 - 80 (%)	30 - 70 (%)	40 - 60 (%)	50 - 50 (%)	60 - 40 (%)
Carbomil	7	3,93	5,93	6,50	3,99	4,36
	28	8,85	10,66	9,55	6,09	4,98
	60	8,95	12,91	9,78	6,36	5,09
Megaó	7	5,33	7,84	9,17	8,17	6,00
	28	8,64	13,50	16,21	10,79	8,52
	60	9,15	13,63	16,50	11,65	9,18
Cimencal	7	2,12	5,97	6,60	6,14	5,73
	28	2,37	6,18	10,55	9,83	6,54
	60	2,73	6,52	10,61	10,48	6,62
Calcimento	7	0,26	1,65	0,29	1,01	1,40
	28	0,47	1,71	0,36	1,10	1,62
	60	0,58	1,99	0,38	1,13	1,68

**Tabela 4** - Resistência à Compressão Simples (RCS) das Cais Pozolânicas para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Amostras	Tempo de Cura	RCS das Composições 40-60 (%) de Cal - Pozolana (MPa)			
		5% de C.P. Composto	10% de C.P. Composto	15% de C.P. Composto	20% de C.P. Composto
Carbomil	7	4,91	5,58	5,73	6,78
	28	9,32	9,99	11,32	13,00
	60	10,59	10,78	11,39	14,41
Megaó	7	7,04	7,13	7,31	8,81
	28	11,06	12,02	13,27	14,64
	60	13,15	13,27	14,48	19,42
Cimencal	7	5,86	6,57	7,13	9,31
	28	9,32	9,92	11,22	16,39
	60	10,94	11,16	12,27	17,41
Calcimento	7	1,79	4,31	4,52	5,91
	28	2,30	5,39	6,65	7,58
	60	3,00	5,45	7,12	8,51

**Tabela 5** - Resistência à Compressão Simples (RCS) das Cais Pozolânicas Aditados com Cimento Portland Composto de 5%, 10%, 15% e 20%, para Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Tempos de Cura	RTI de Argamassas com 100% de Cal (MPa)			
	Carbomil	Megaó	Cimencal	Calcimento
7	0,12	0,32	0,10	0,04
28	0,14	0,49	0,14	0,09
60	0,15	0,63	0,20	0,13

**Tabela 6** - Resistência à Tração Indireta (RTI) das Argamassas com 100% de Cal para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Amostras	Tempo de Cura	RTI Por Compressão Diametral das Composições Cal-Pozolana (MPa)				
		20 - 80 (%)	30 - 70 (%)	40 - 60 (%)	50 - 50 (%)	60 - 40 (%)
Carbomil	7	1,10	1,54	1,50	0,98	0,77
	28	1,96	2,55	1,86	1,46	1,20
	60	2,23	2,77	1,88	1,51	1,29
Megaó	7	1,46	2,05	2,04	1,89	1,50
	28	2,14	3,43	2,63	2,39	1,80
	60	3,08	3,61	2,69	2,45	1,84
Cimencal	7	0,28	1,07	1,71	1,44	1,16
	28	0,49	1,20	2,29	1,71	1,73
	60	0,56	1,21	2,83	2,27	1,76
Calcimento	7	0,04	0,32	0,05	0,12	0,24
	28	0,05	0,34	0,06	0,16	0,30
	60	0,06	0,35	0,07	0,18	0,31

**Tabela 7** - Resistência à Tração Indireta (RTI) por Compressão Diametral das Cais Pozolânicas para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Amostras	Tempo de Cura	RTI Por Compressão das Compos. 40-60(%) de Cal-Pozolana (MPa)			
		5% de C.P. Composto	10% de C.P. Composto	15% de C.P. Composto	20% de C.P. Composto
Carbomil	7	1,13	1,20	1,43	1,47
	28	2,19	2,34	2,49	2,57
	60	2,24	2,36	2,51	2,60
Megaó	7	1,60	1,88	1,94	1,98
	28	2,44	2,66	2,81	2,84
	60	3,24	3,39	3,41	3,43
Cimencal	7	1,51	1,82	2,09	2,15
	28	2,30	2,33	2,65	2,99
	60	2,61	2,66	2,67	3,03
Calcimento	7	0,33	0,718	1,01	1,20
	28	0,44	1,09	1,47	1,66
	60	0,45	1,20	1,51	1,82

**Tabela 8** - Resistência à Tração Indireta (RTI) por Compressão Diametral das Cais Pozolânicas Aditados com Cimento Portland Composto de 5%, 10%, 15% e 20%, para os Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

Números	Variáveis (y, x)	Tipo de Cal	Coefficiente de Correlação (R)	Nível de Significância $\alpha$ (%)	Equação $y = A + Bx$
1	RCS <sub>28</sub> x RTI <sub>28</sub>	Carbomil + Cimento	0,95	5,006	$y = -111,6829 + 9,1968x$
2	RCS <sub>28</sub> + RTI <sub>28</sub>	Carbomil	0,95	1,466	$y = 0,77030 + 4,3979x$
3	RCS <sub>60</sub> + RTI <sub>60</sub>	Carbomil	0,95	1,238	$y = -9,5392 + 4,9441x$
4	RCS <sub>7</sub> + RTI <sub>7</sub>	Megaó	0,94	1,625	$y = -18,5092 + 5,1164x$
5	RCS <sub>60</sub> + RTI <sub>60</sub>	Cimencal	0,95	1,216	$y = 13,3289 + 3,5123x$
6	RCS <sub>28</sub> + RTI <sub>28</sub>	Cimencal	0,93	2,236	$y = 4,0080 + 4,5099x$
7	RCS <sub>7</sub> + RTI <sub>7</sub>	Cimencal	0,95	1,494	$y = 17,0736 + 3,1876x$
8	RCS <sub>60</sub> + RTI <sub>60</sub>	Calcimento	0,99	0,213	$y = 1,7030 + 5,1292x$
9	RCS <sub>28</sub> + RTI <sub>28</sub>	Calcimento	0,99	0,178	$y = -2,4921 + 4,5668x$
10	RCS <sub>7</sub> + RTI <sub>7</sub>	Calcimento	0,97	0,524	$y = 1,6574 + 4,9623x$

**Tabela 9** - Correlação Estatística entre a Resistência à Compressão Simples - RCS e a Resistência a Tração Indireta - RTI, Curados por Períodos de 7, 28, 60 dias em Câmara Úmida.

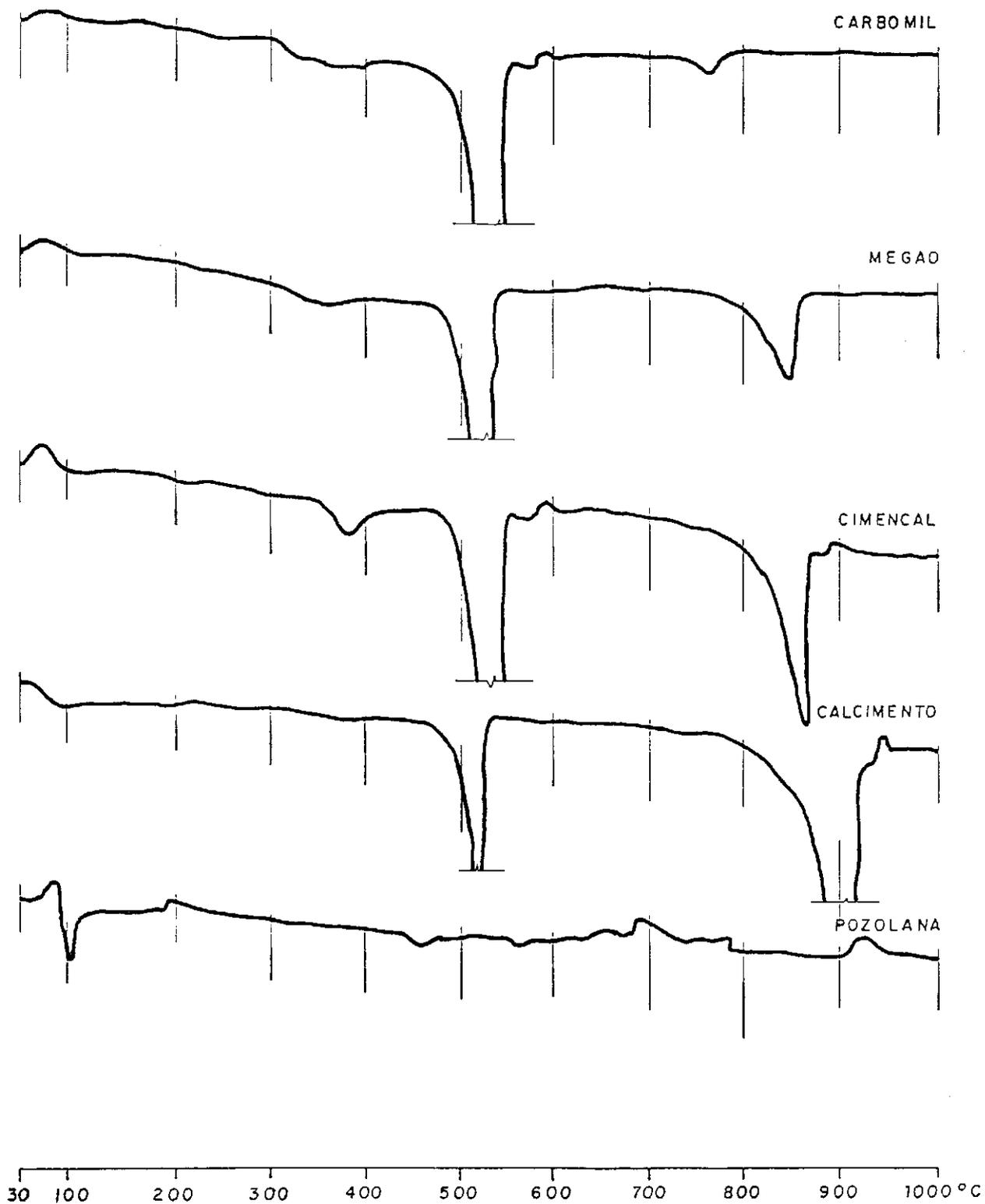


FIGURA 1 - Curvas de Análise Térmica Diferencial das Amostras de Cais e Pozolana.

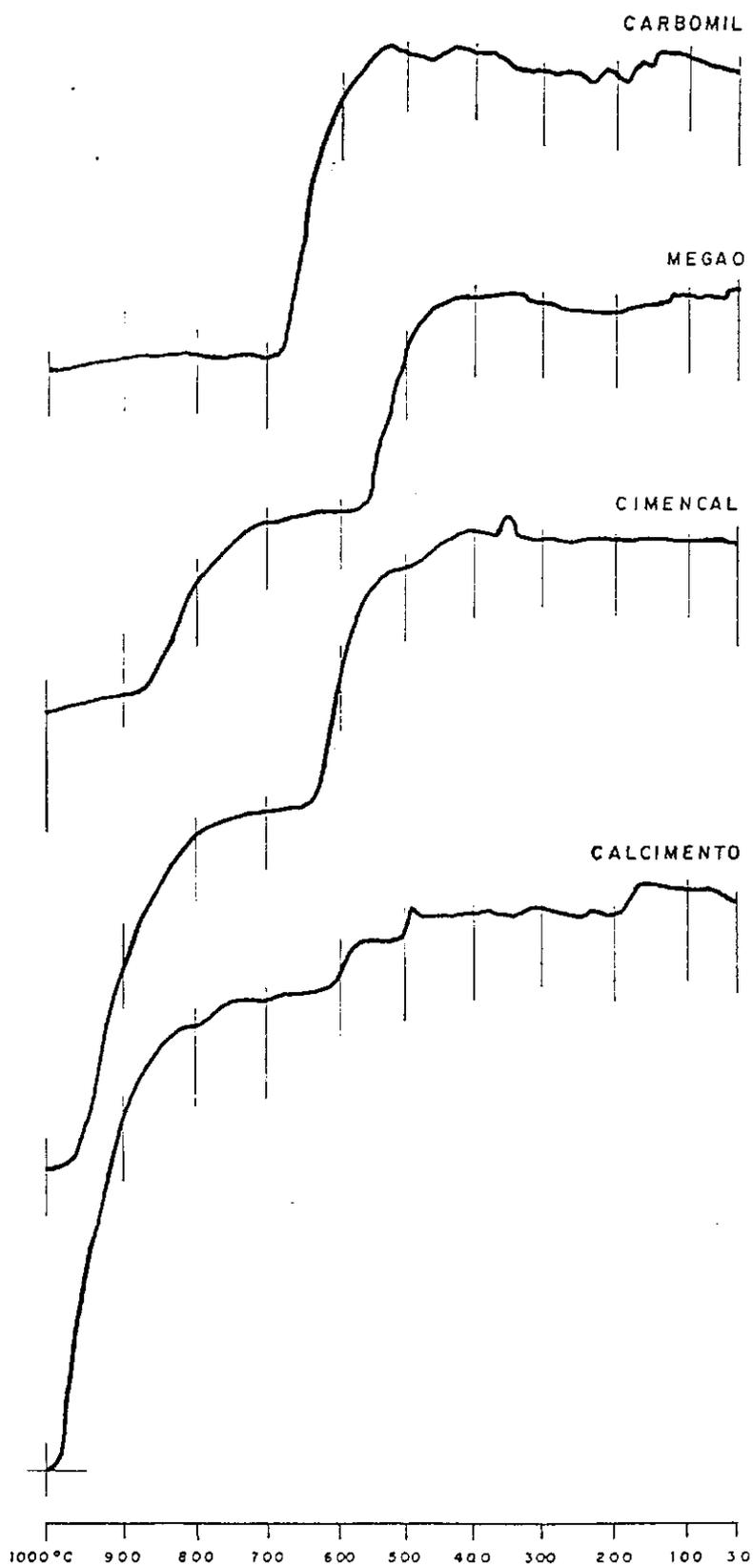
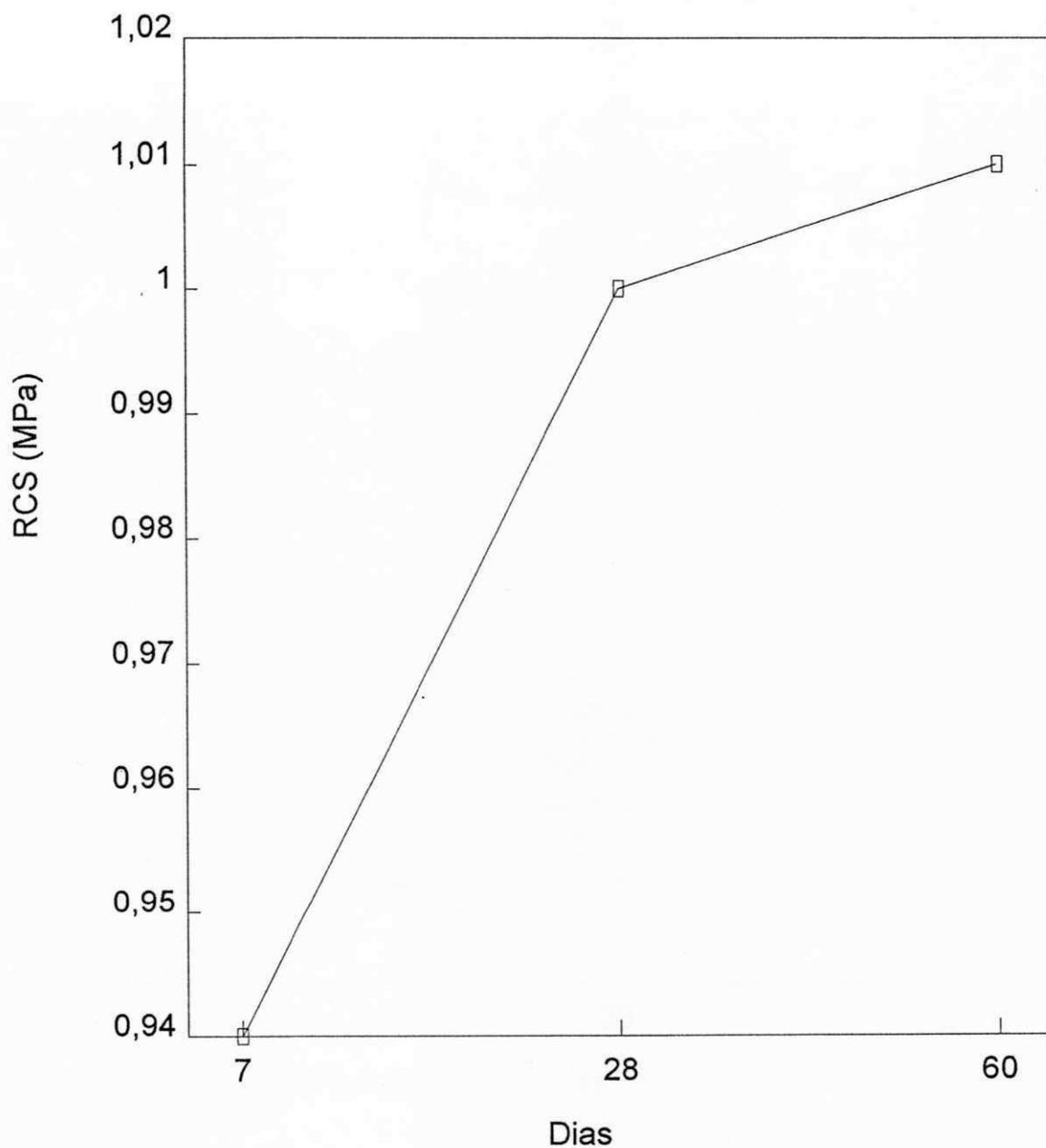
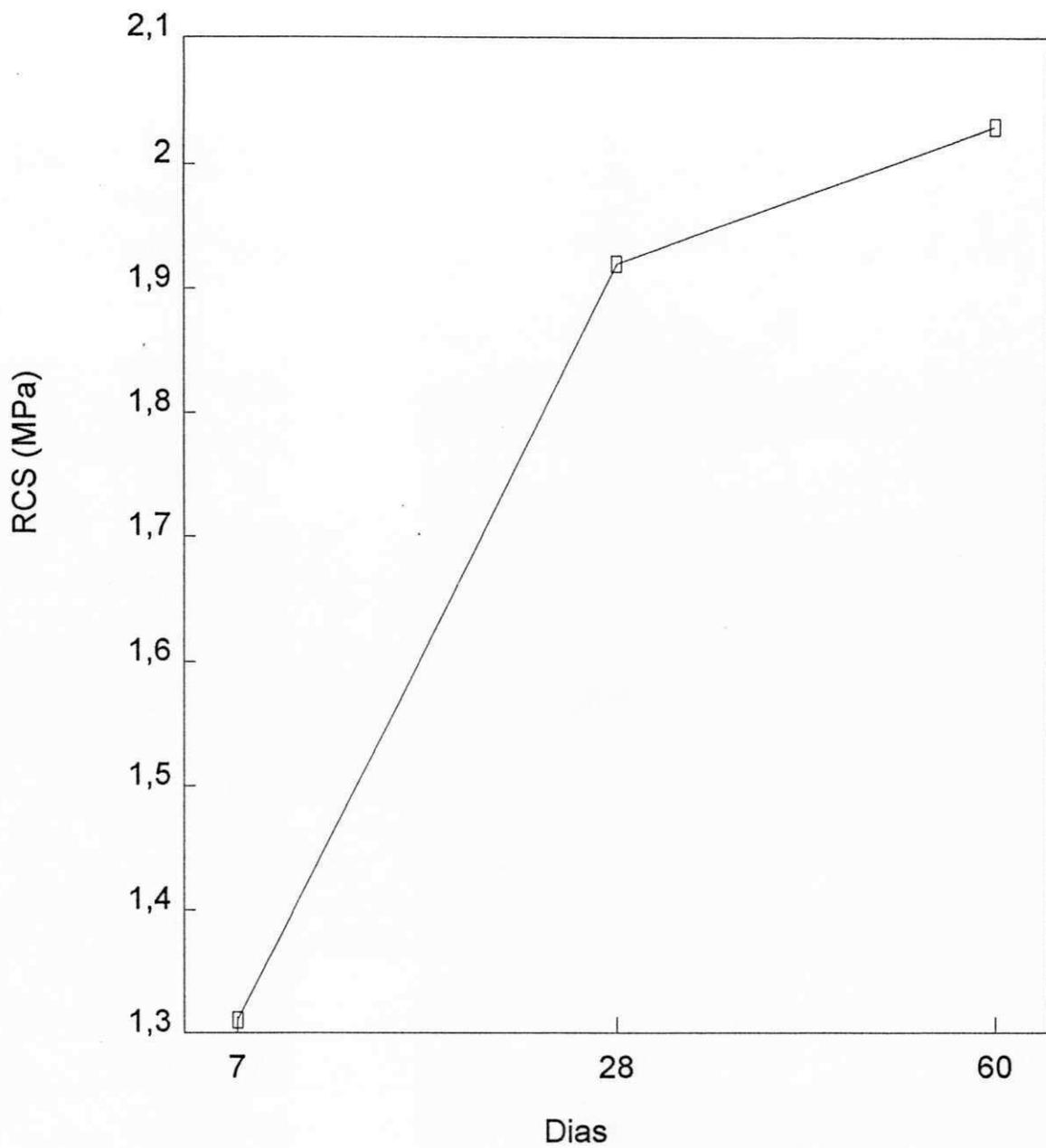


FIGURA 2 - Curvas de Análise Termo-Gravimétrica das Amostras de Cais.



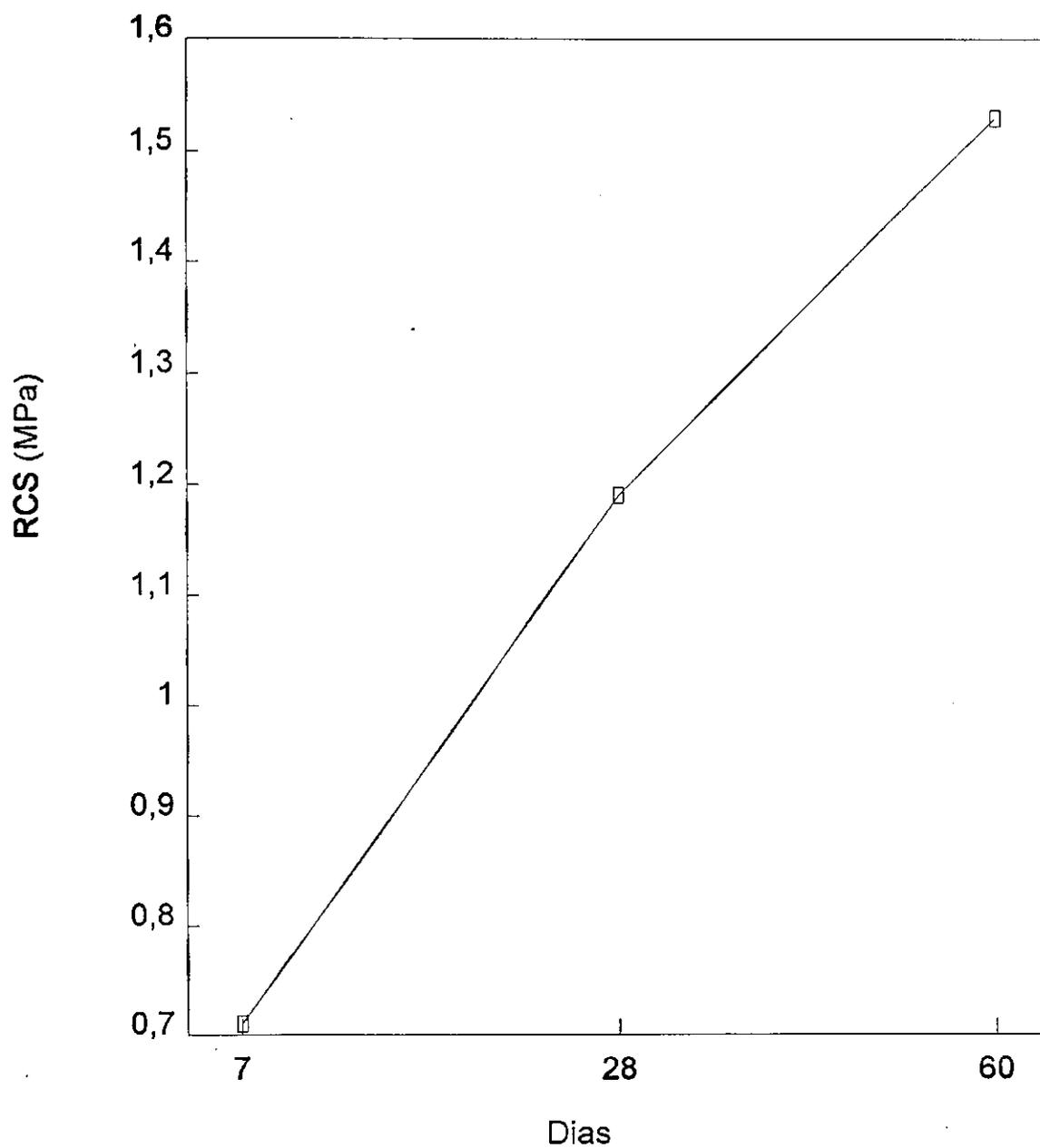
**CARBOMIL**  
**100% Cal**

**FIGURA 3** – Resistência à Compressão Simples das Cais para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



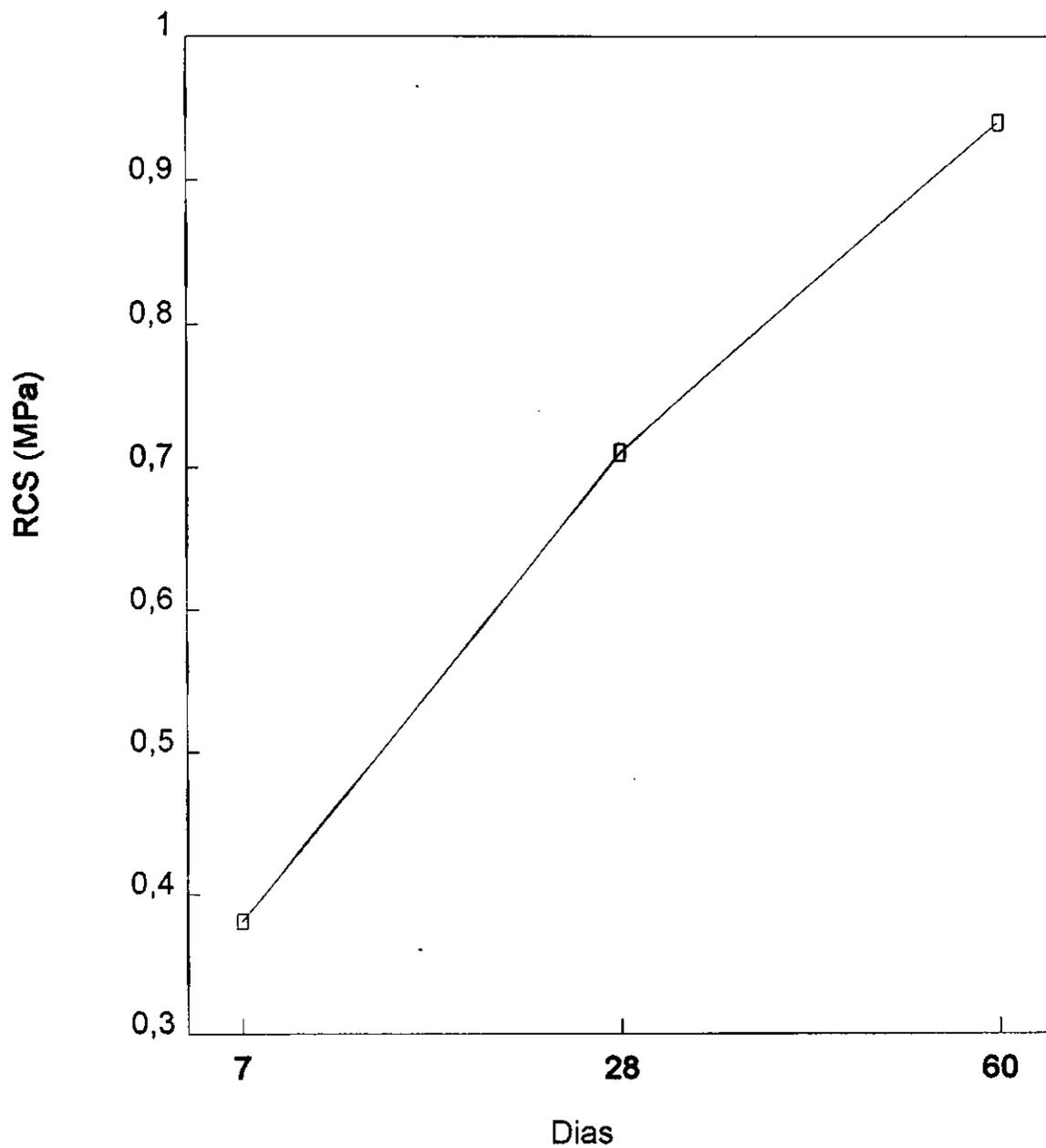
**MEGAÓ**  
**100% Cal**

**FIGURA 4** – Resistência à Compressão Simples das Cais para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



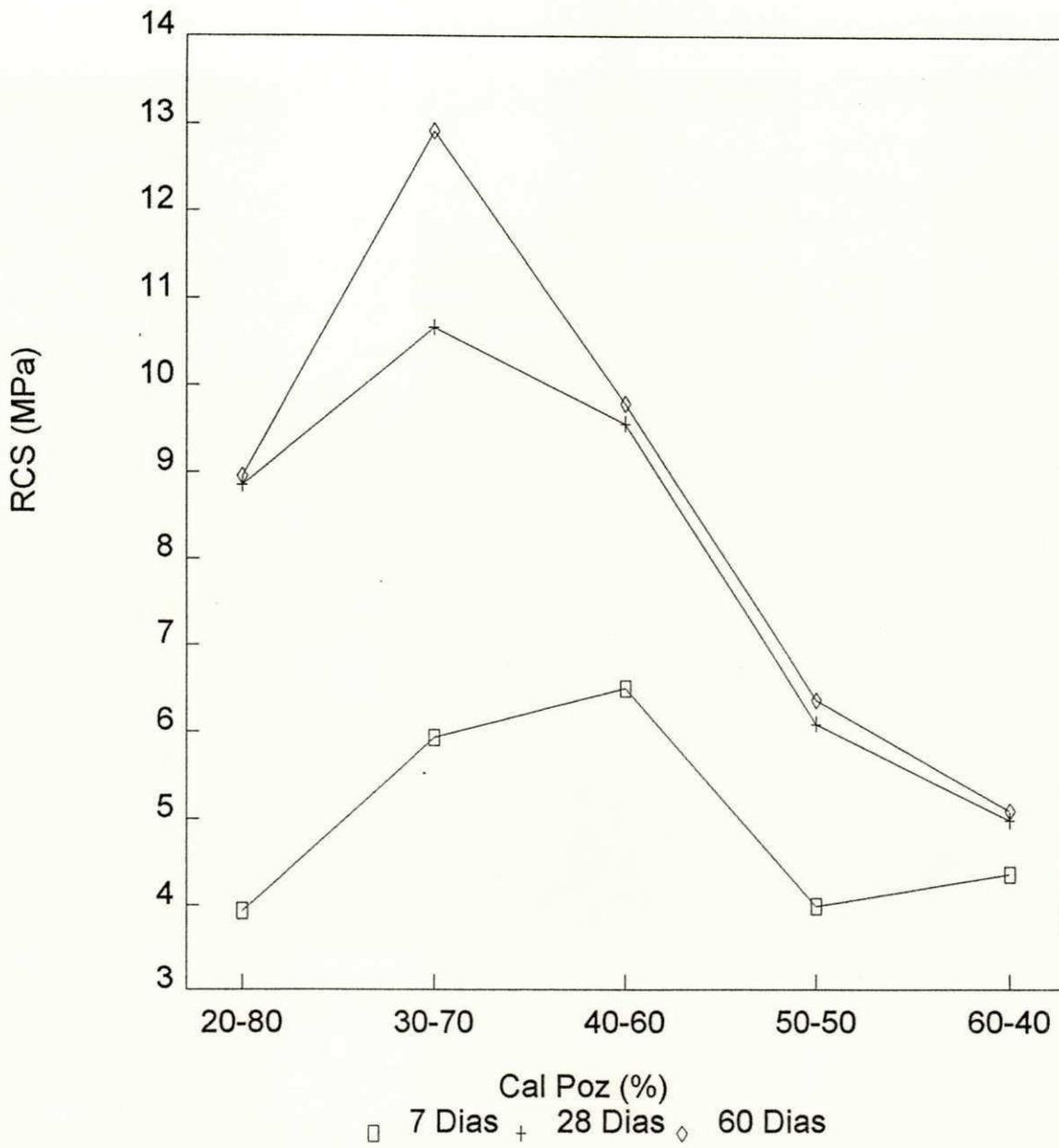
**CIMENCAL**  
**100% Cal**

**FIGURA 5** – Resistência à Compressão Simples das Cais para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



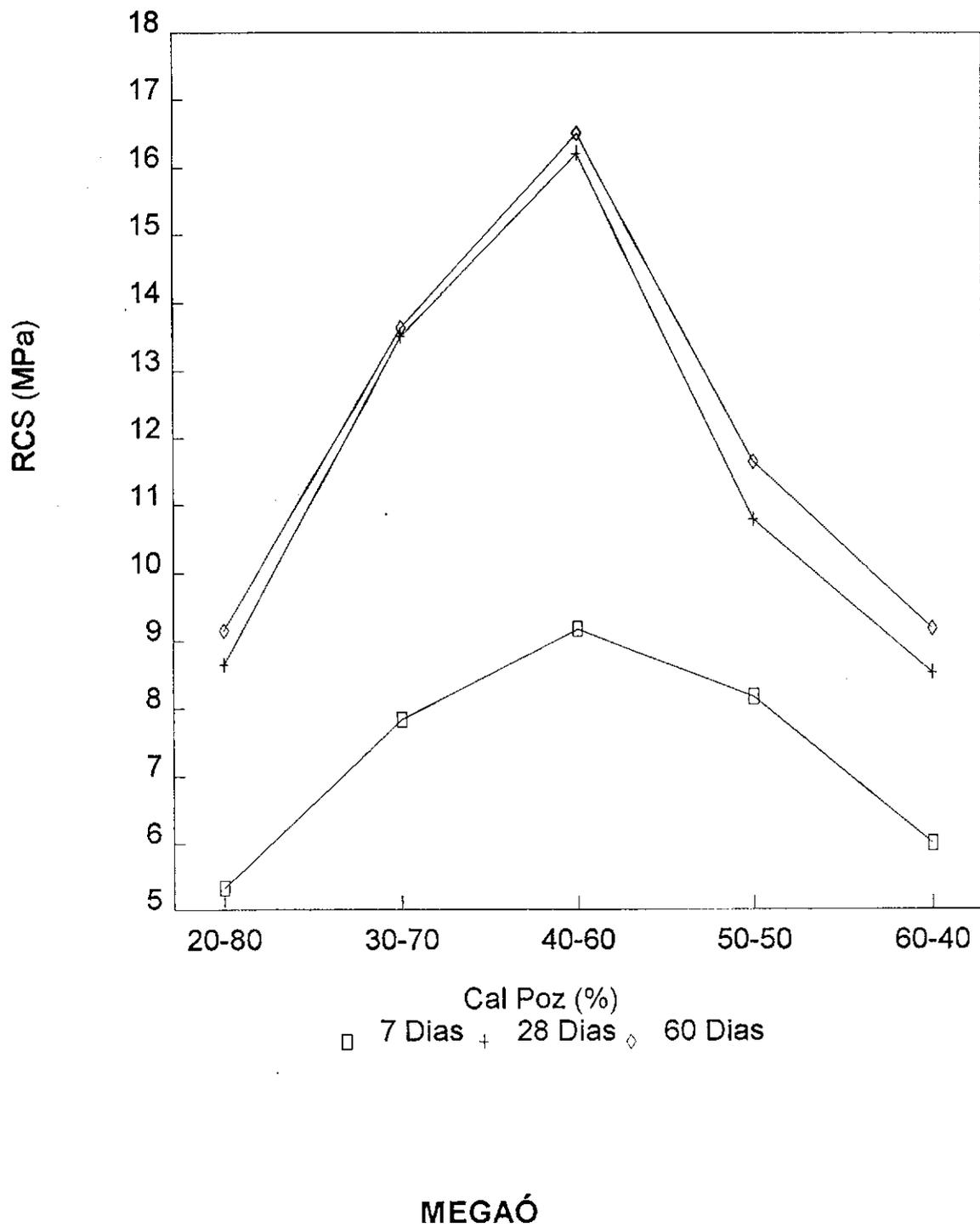
**CALCIMENTO  
100% Cal**

**FIGURA 6** – Resistência à Compressão Simples das Cais para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

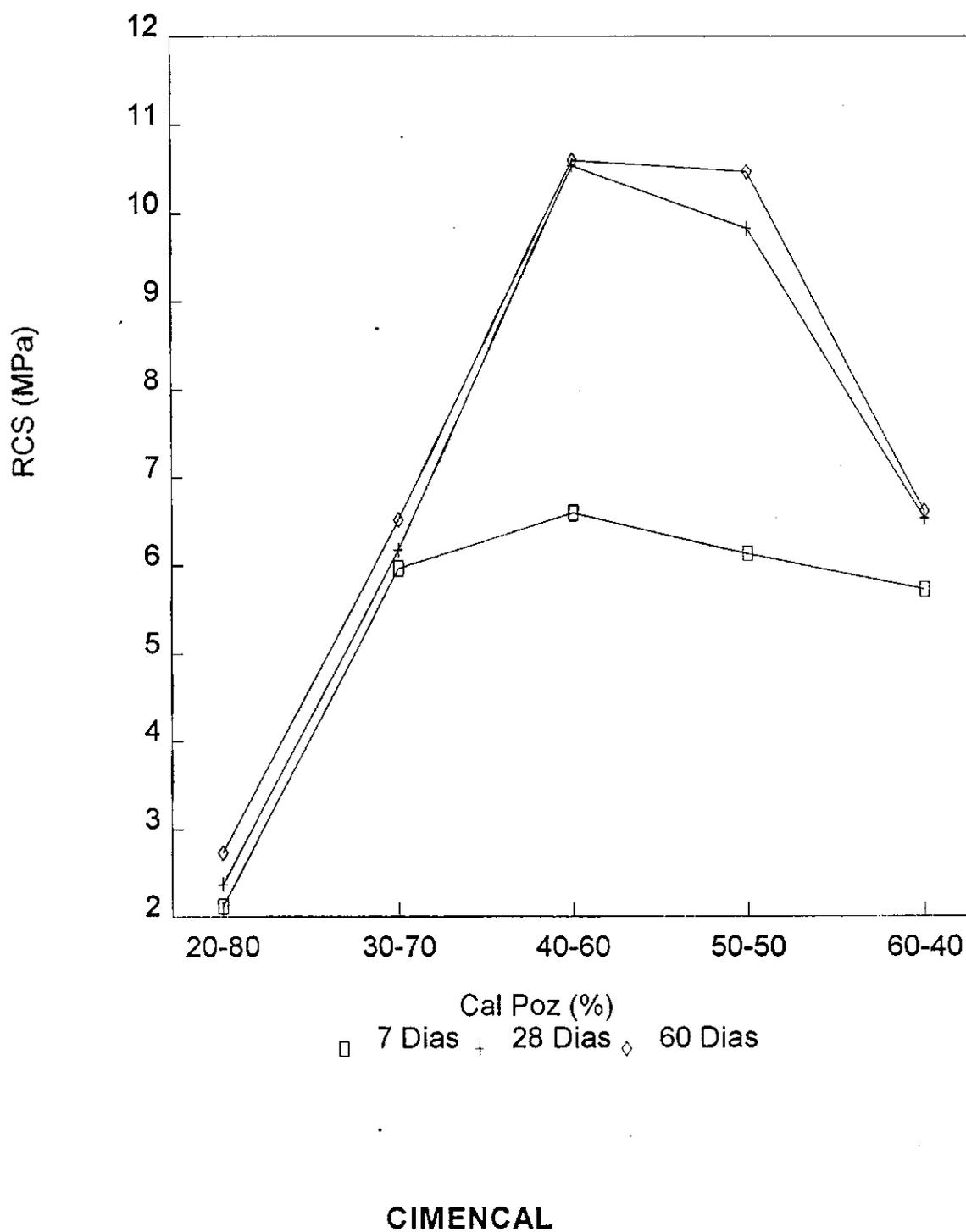


**CARBOMIL**

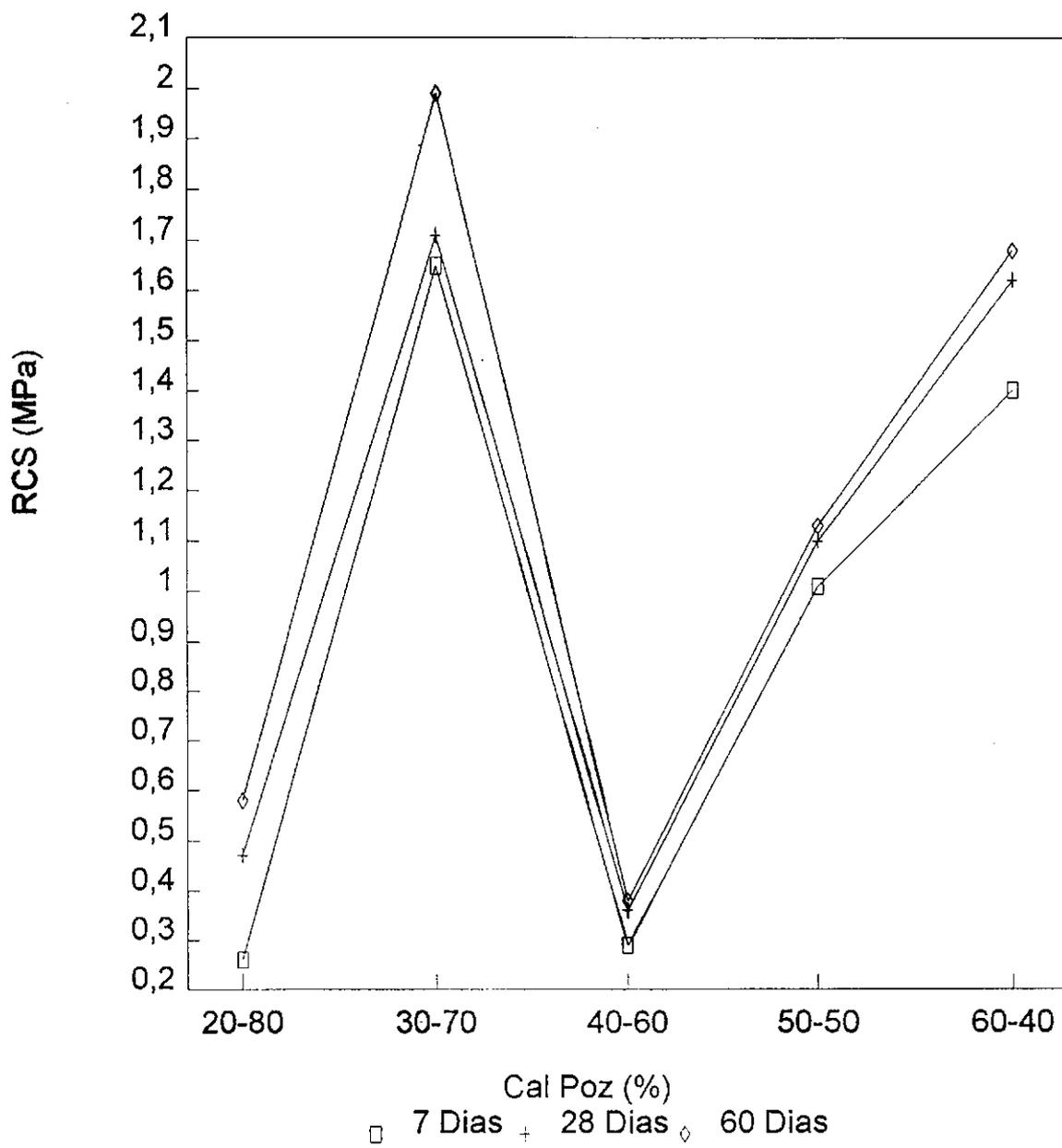
**FIGURA 7** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



**FIGURA 8** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozzolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

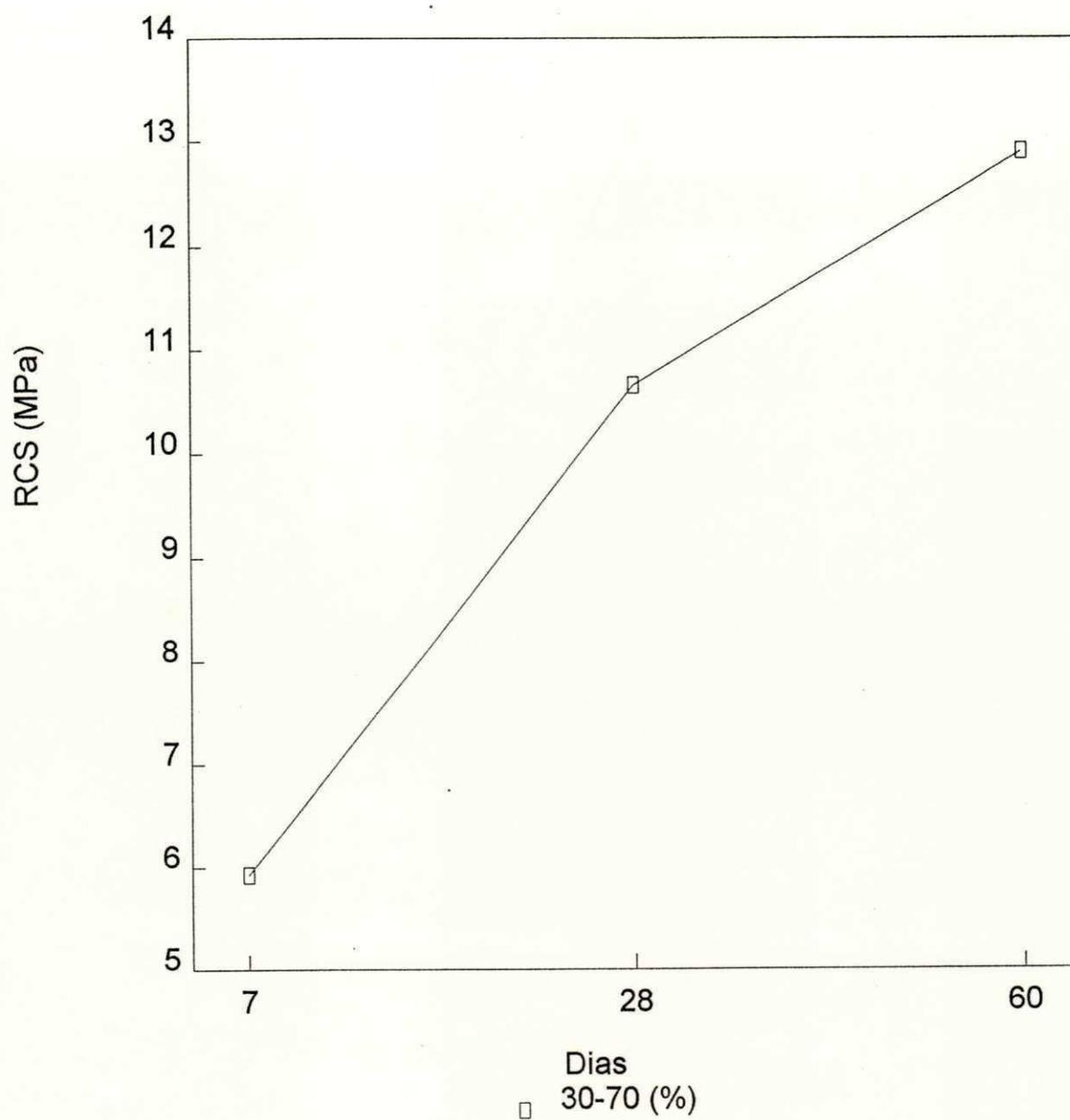


**FIGURA 9** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



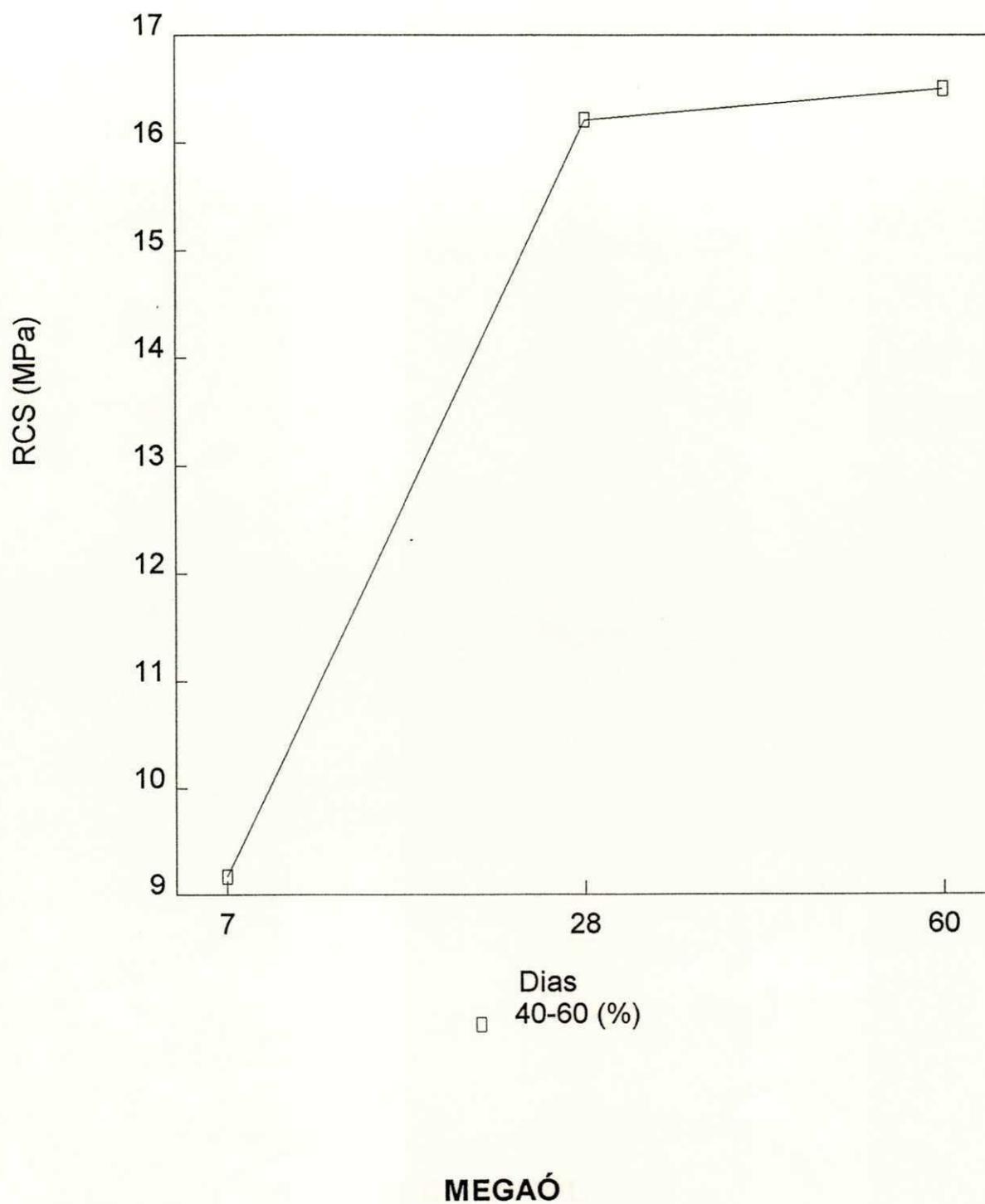
**CALCIMENTO**

**FIGURA 10** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

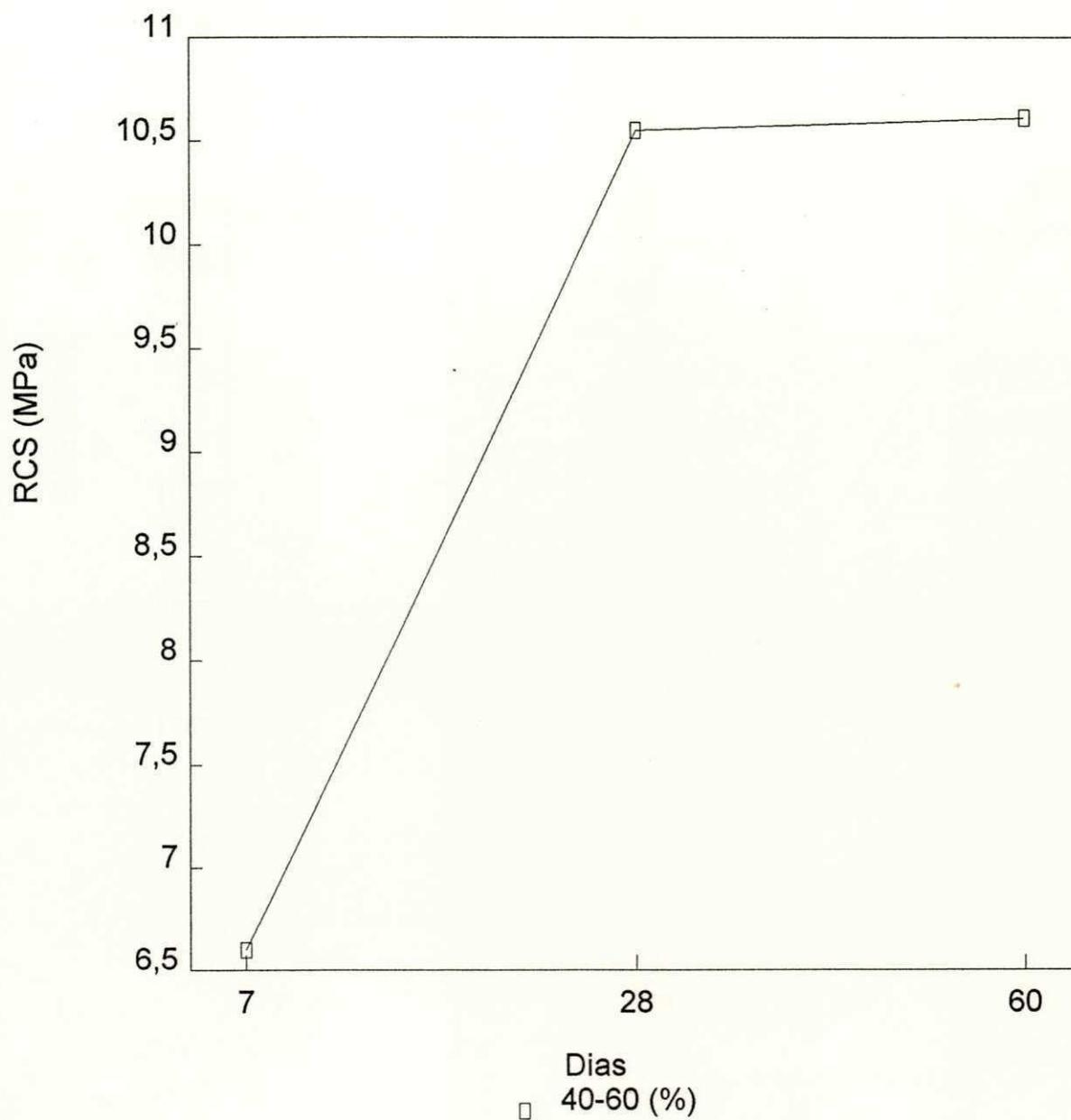


### CARBOMIL

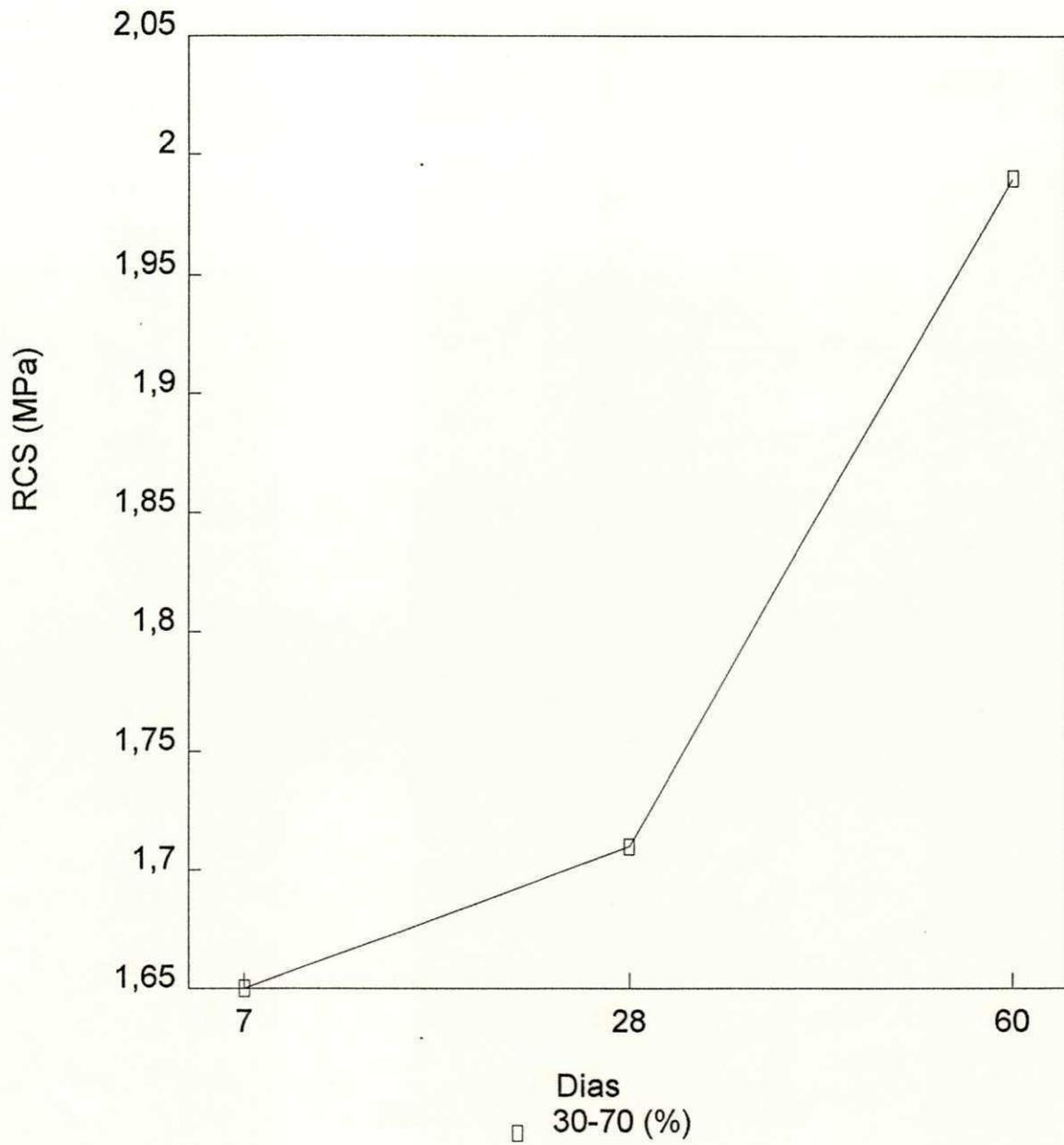
**FIGURA 11** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



**FIGURA 12** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

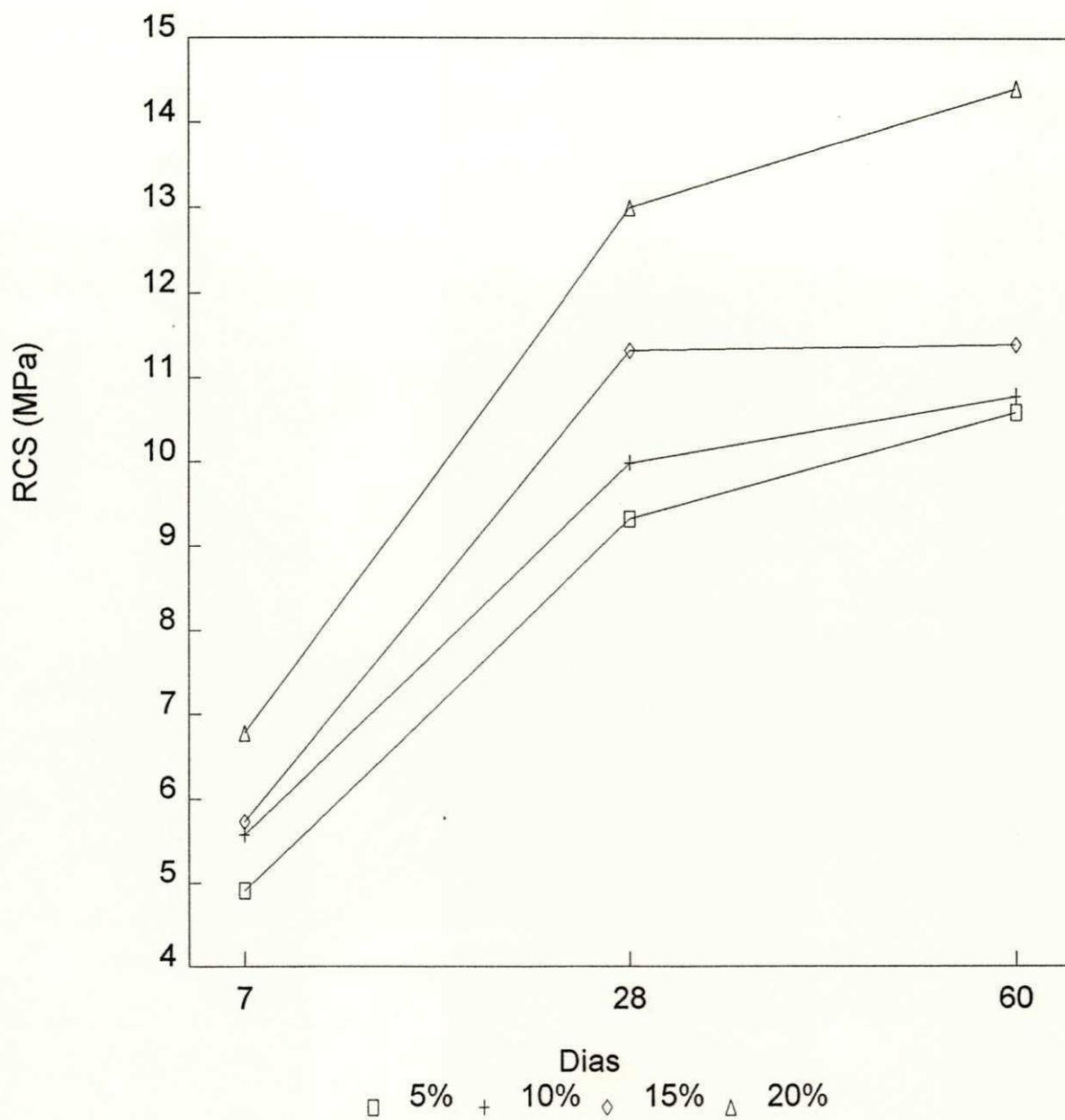
**CIMENCAL**

**FIGURA 13** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



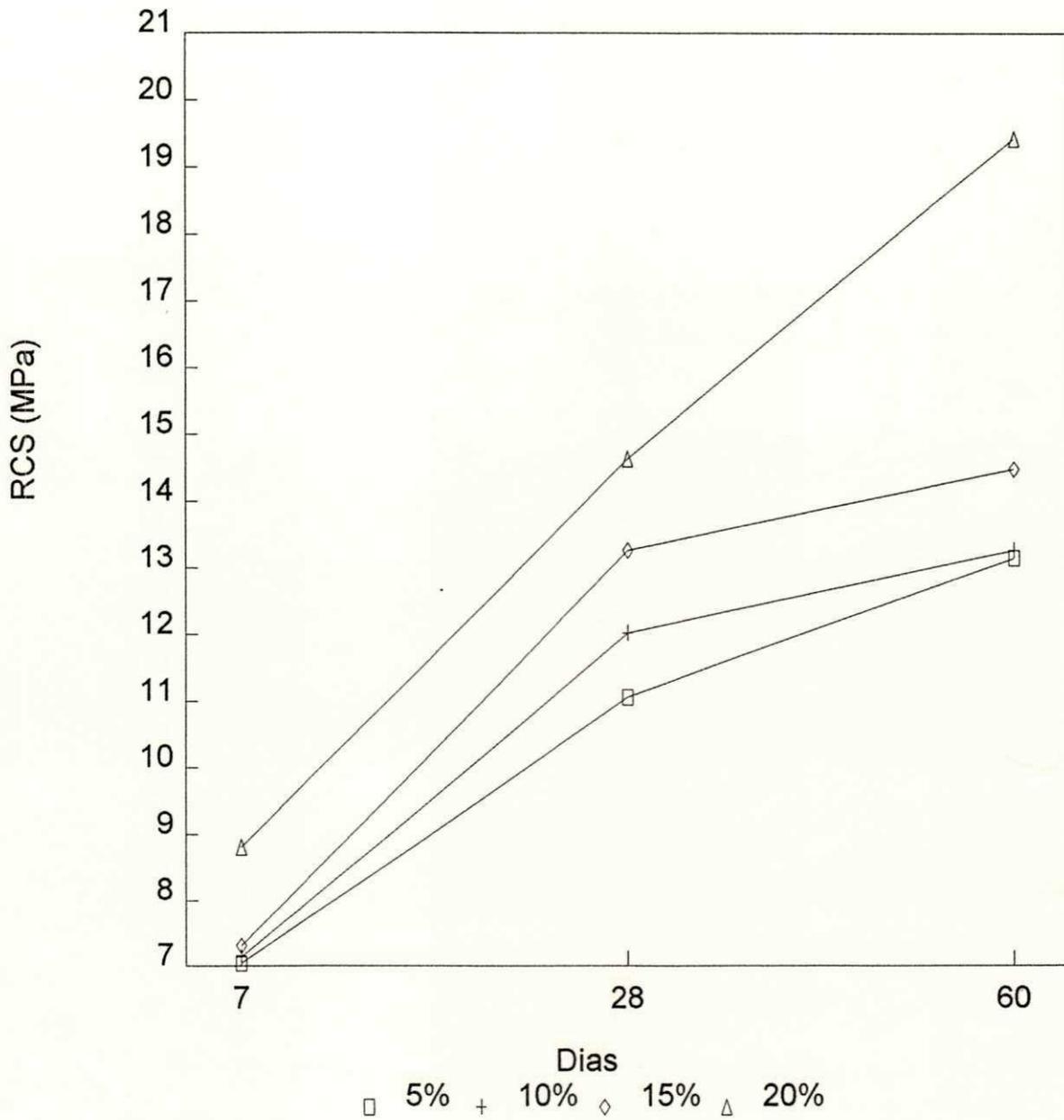
### CALCIMENTO

**FIGURA 14** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



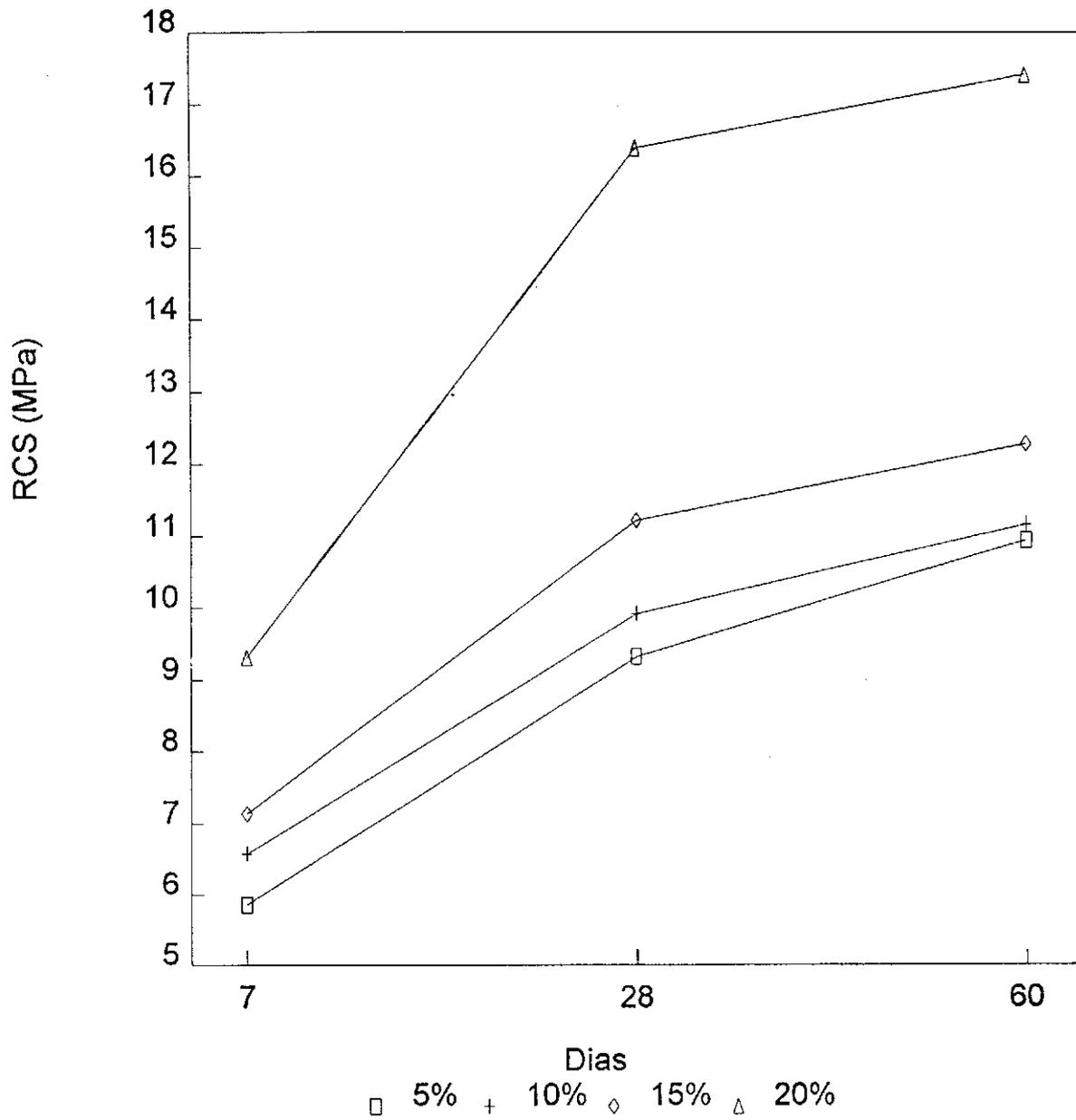
**CARBOMIL  
40-60% com Cimento**

**FIGURA 15** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



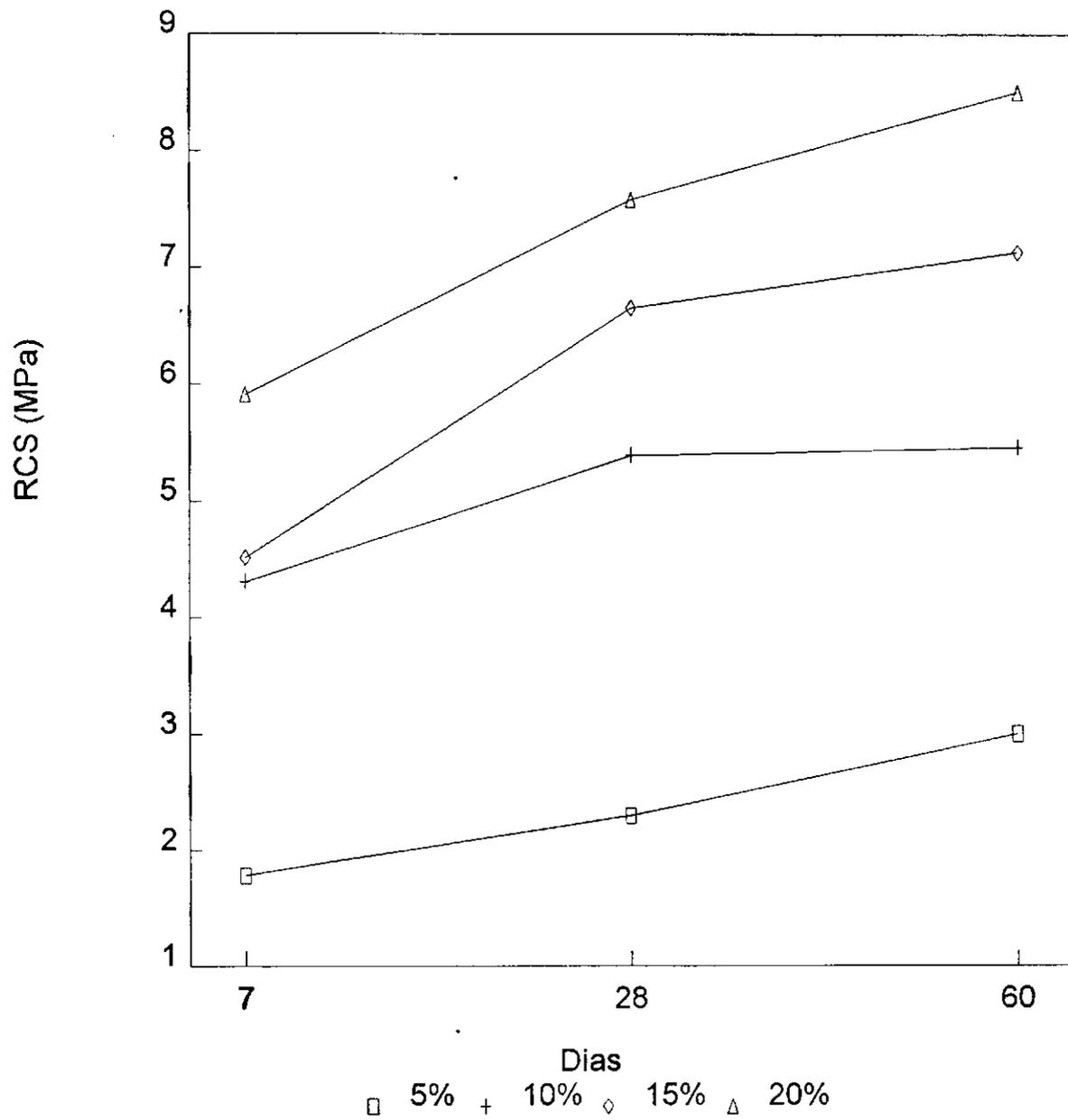
**MEGAÓ**  
**40-60% com Cimento**

**FIGURA 16** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozzolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



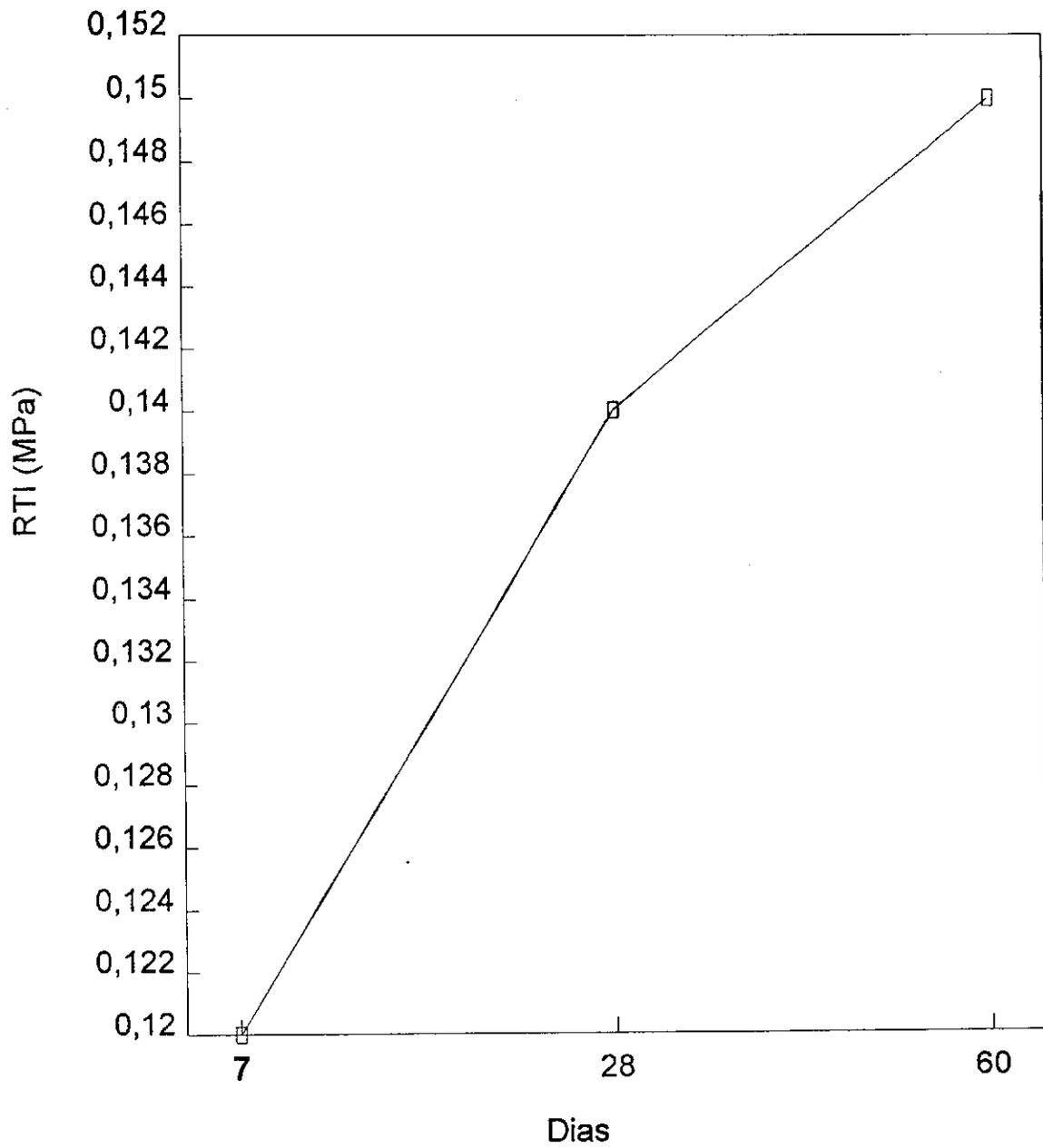
**CIMENCAL**  
**40-60% com Cimento**

**FIGURA 17** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozzolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



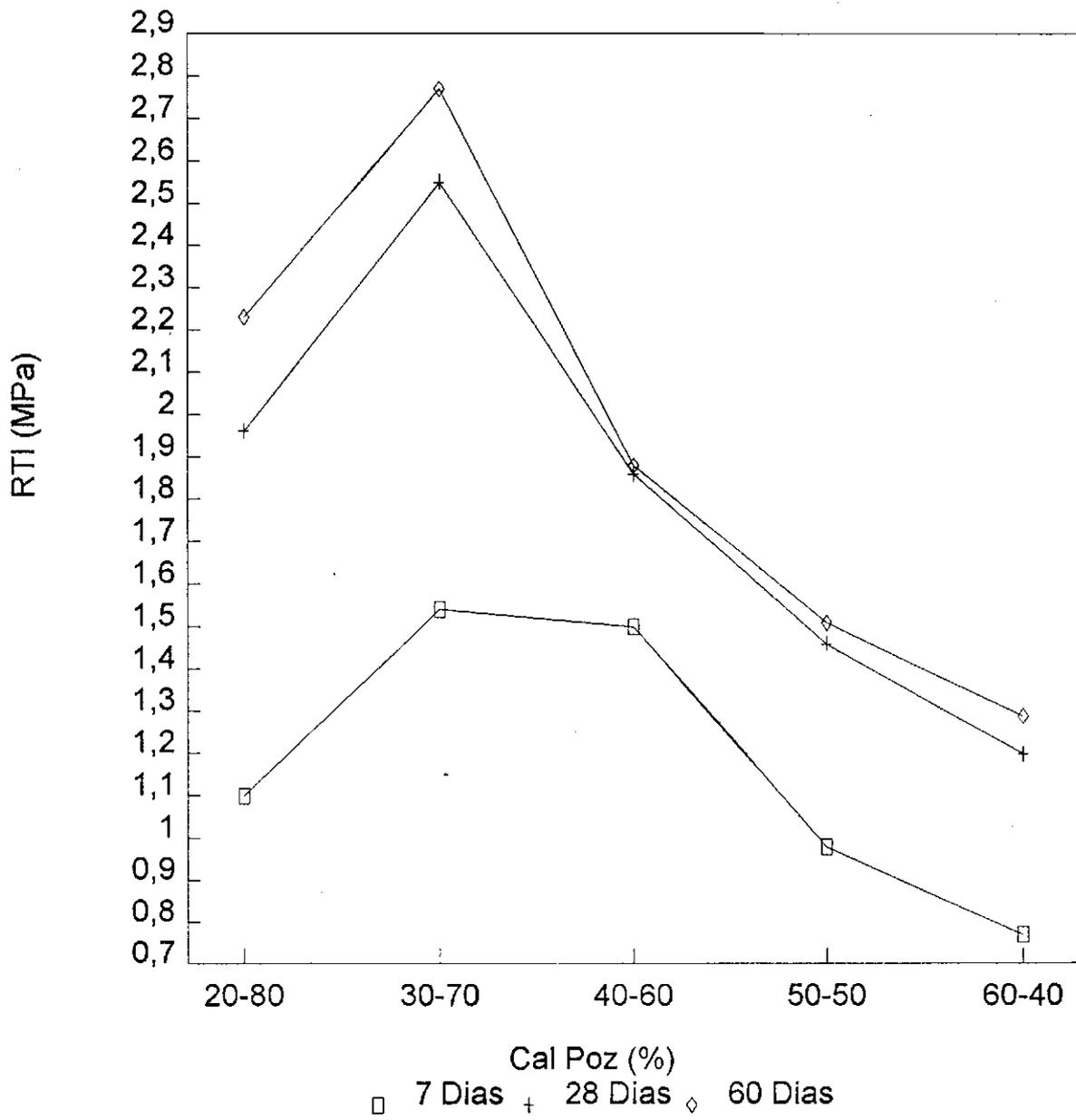
**CALCIMENTO  
40-60% com Cimento**

**FIGURA 18** – Resistência à Compressão Simples das Cais Pozzolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



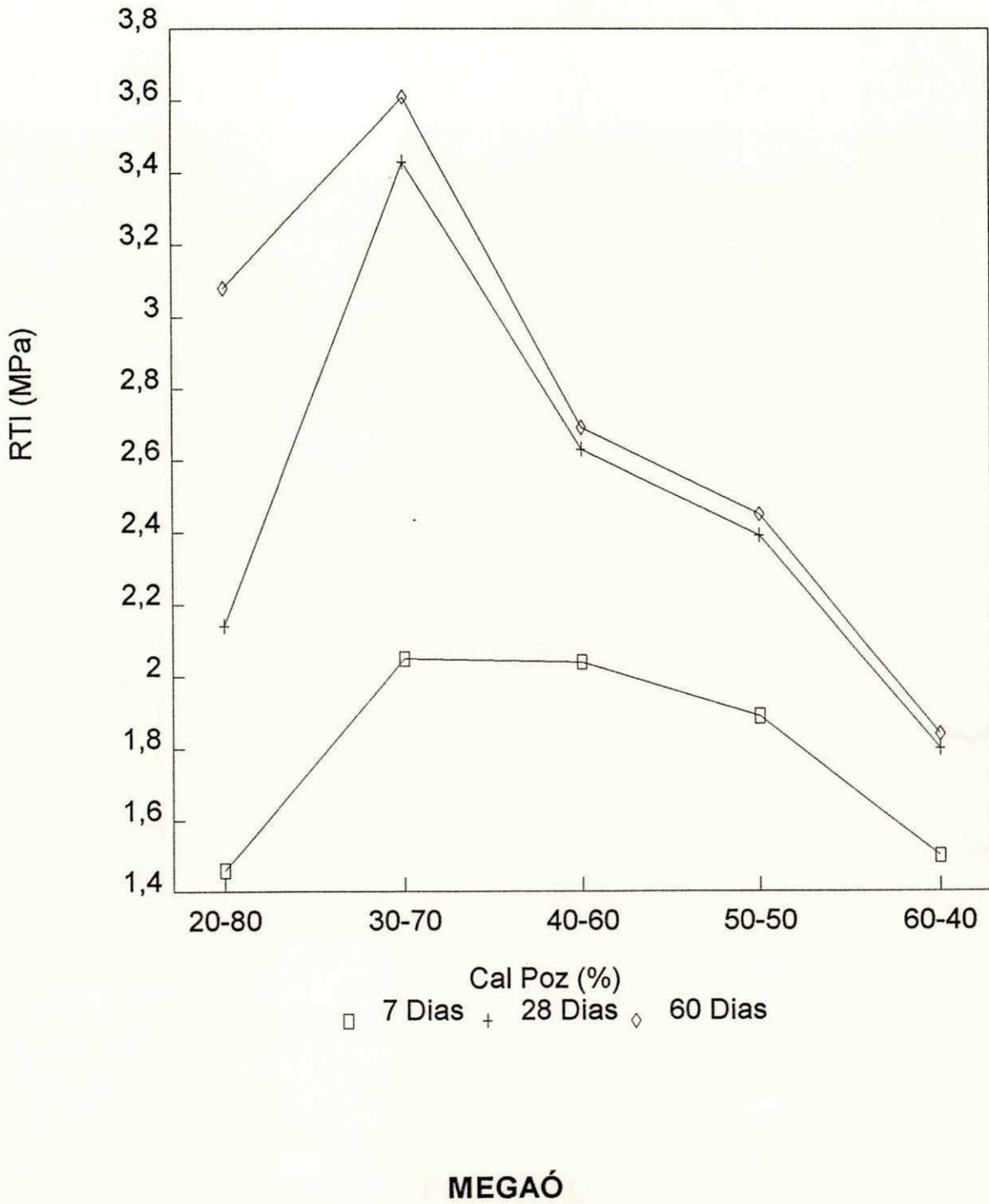
**CARBOMIL**  
**100% Cal**

**FIGURA 19** – Resistência à Tração Indireta das Cais para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

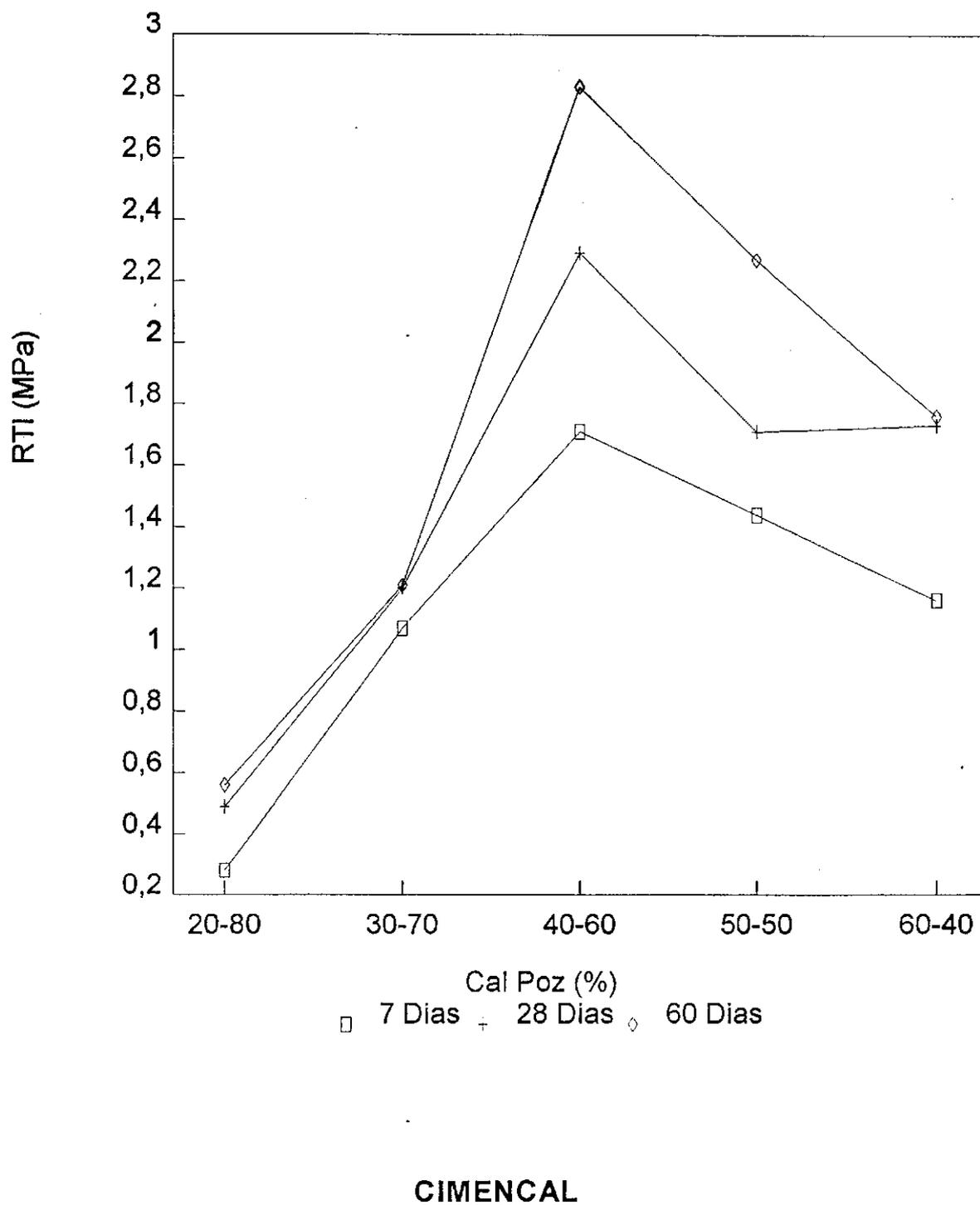


**CARBOMIL**

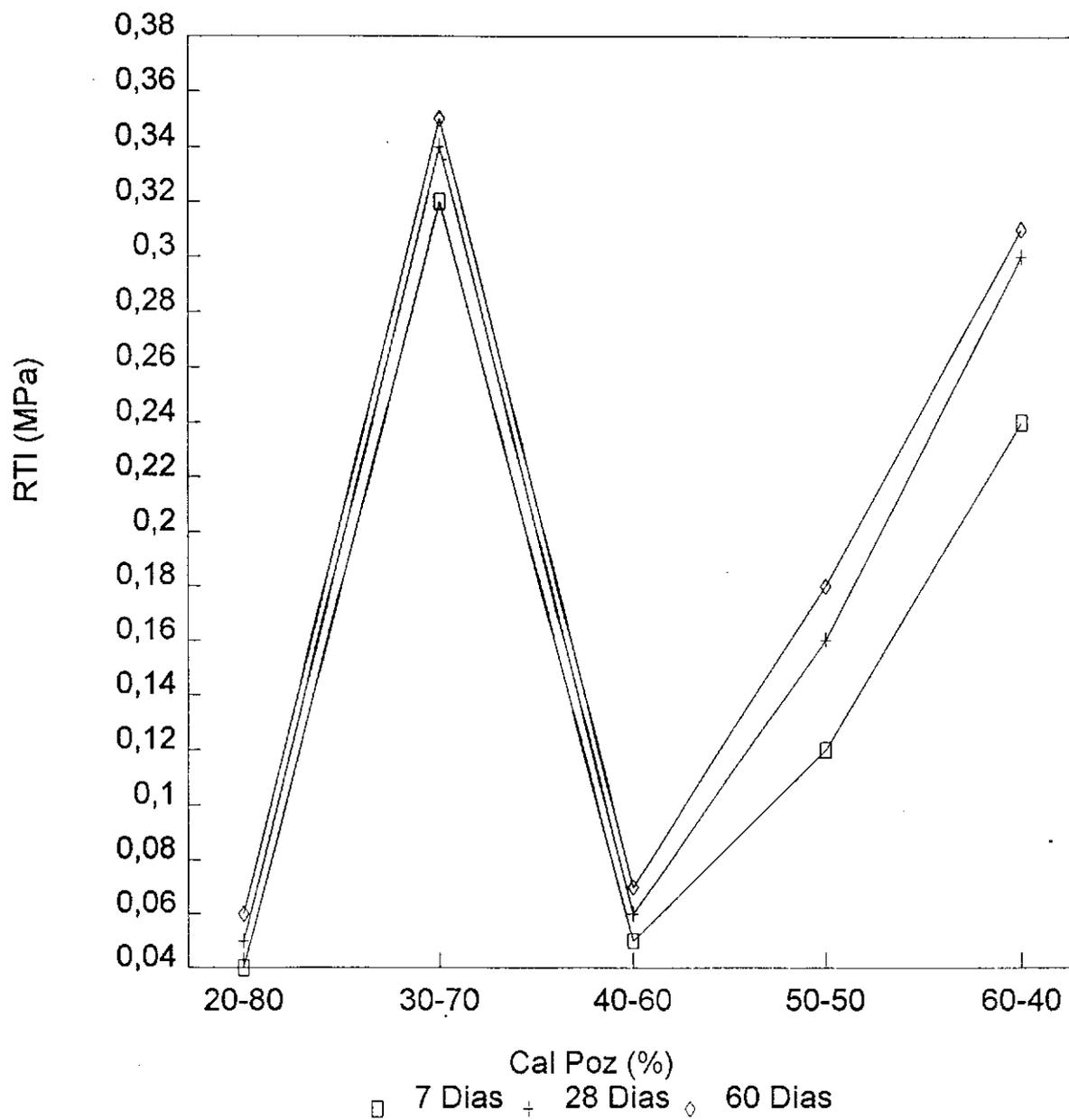
**FIGURA 23** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



**FIGURA 24** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozzolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

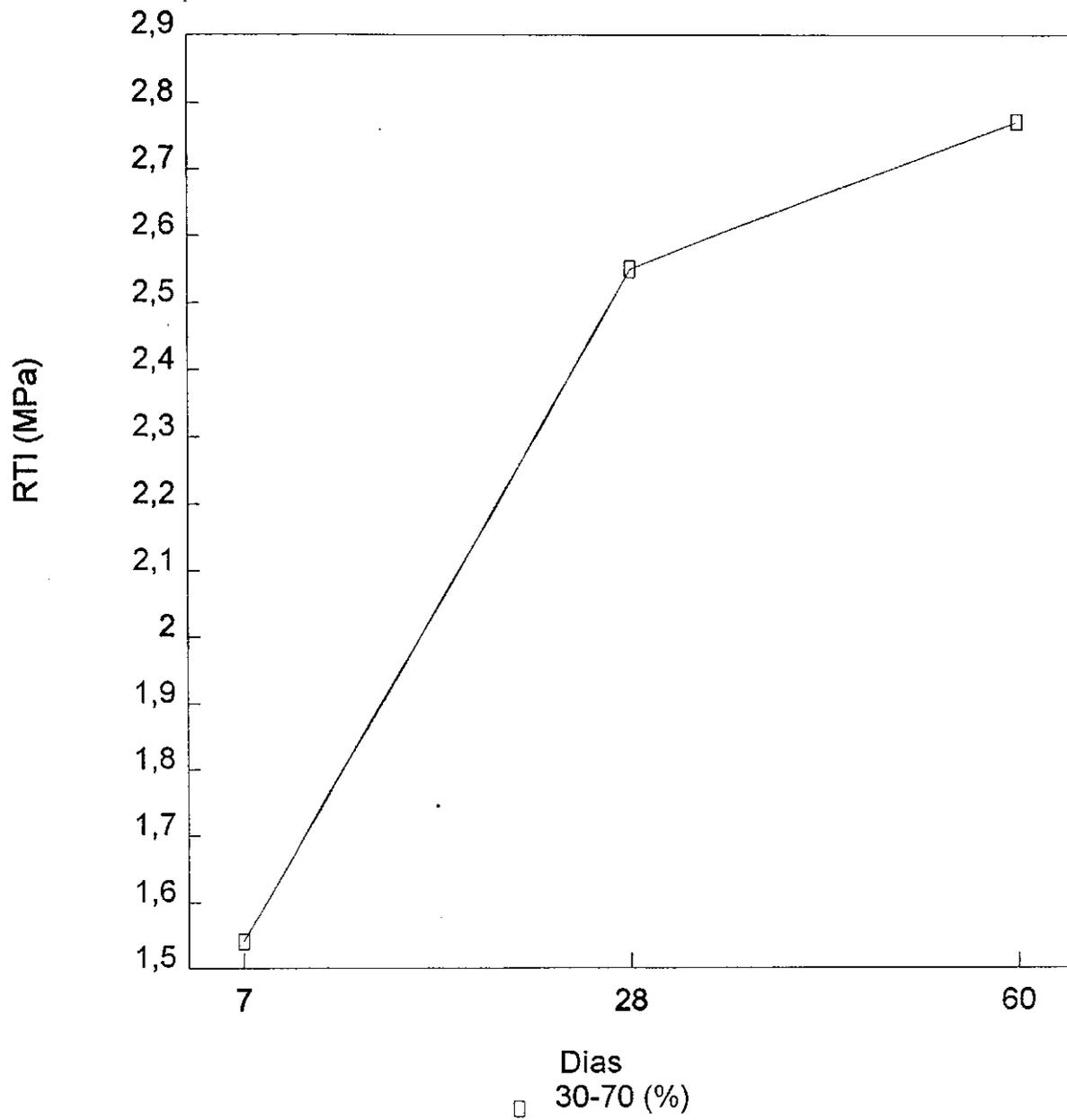


**FIGURA 25** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

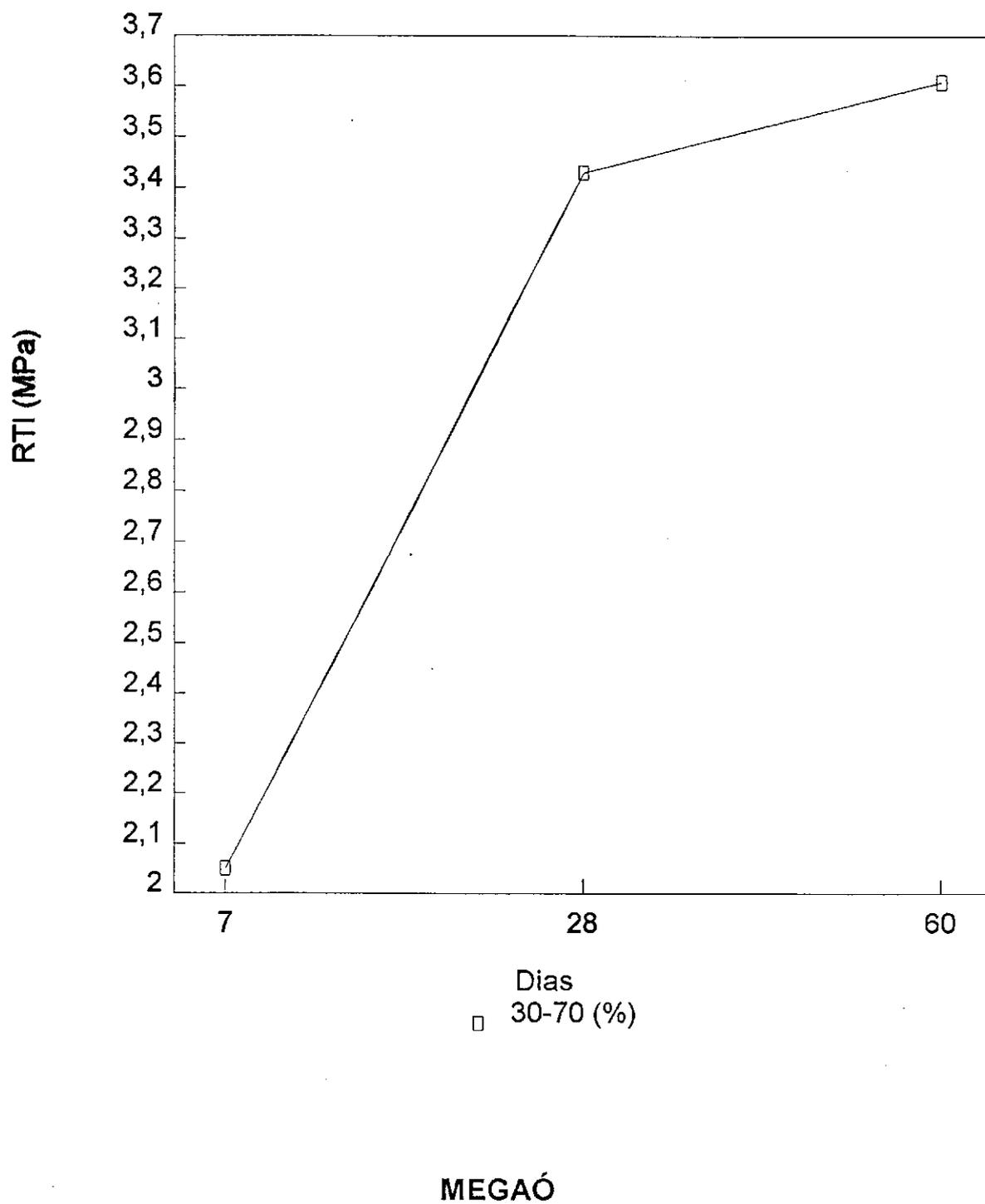


**CALCIMENTO**

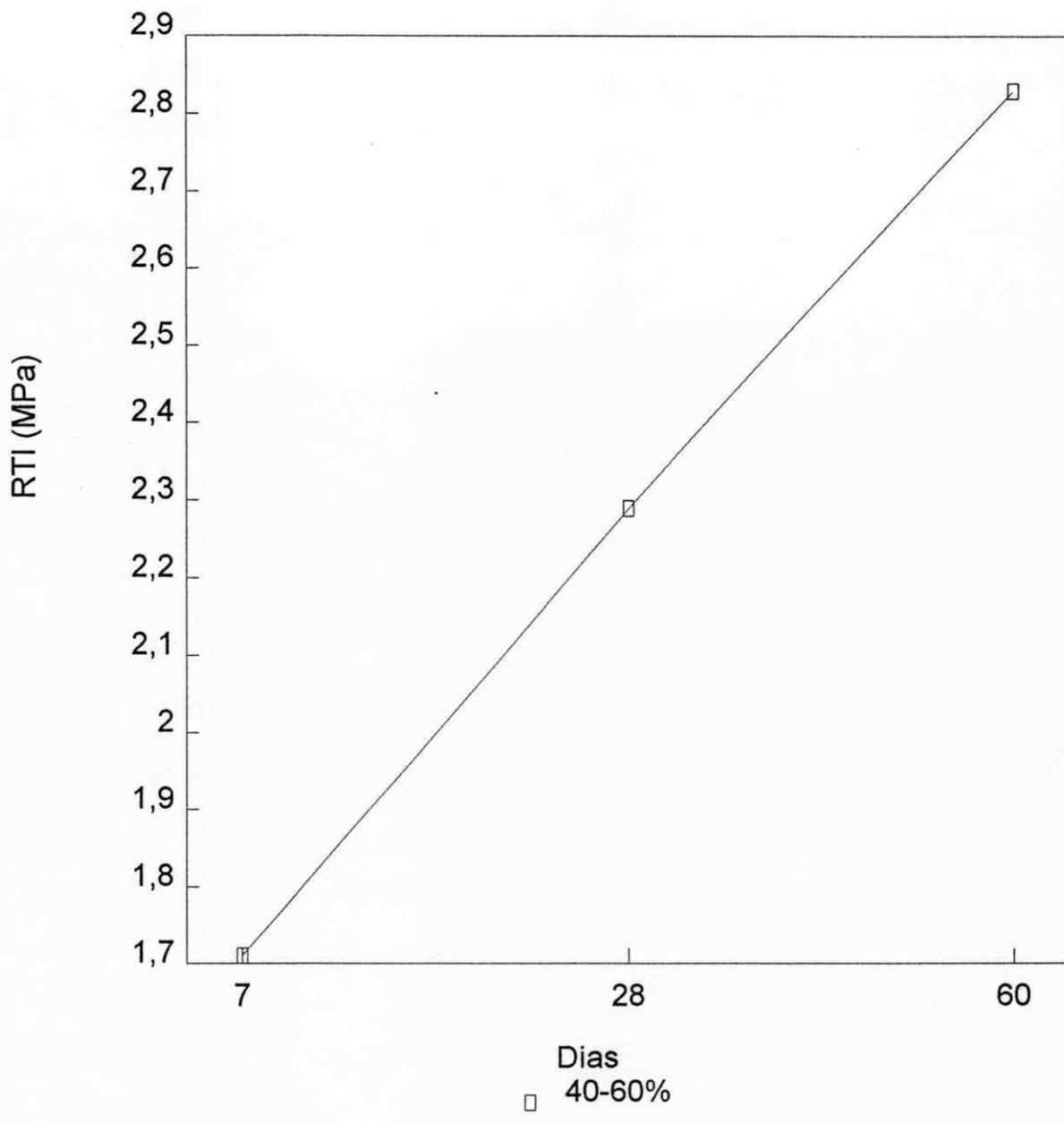
**FIGURA 26** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

**CARBOMIL**

**FIGURA 27** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

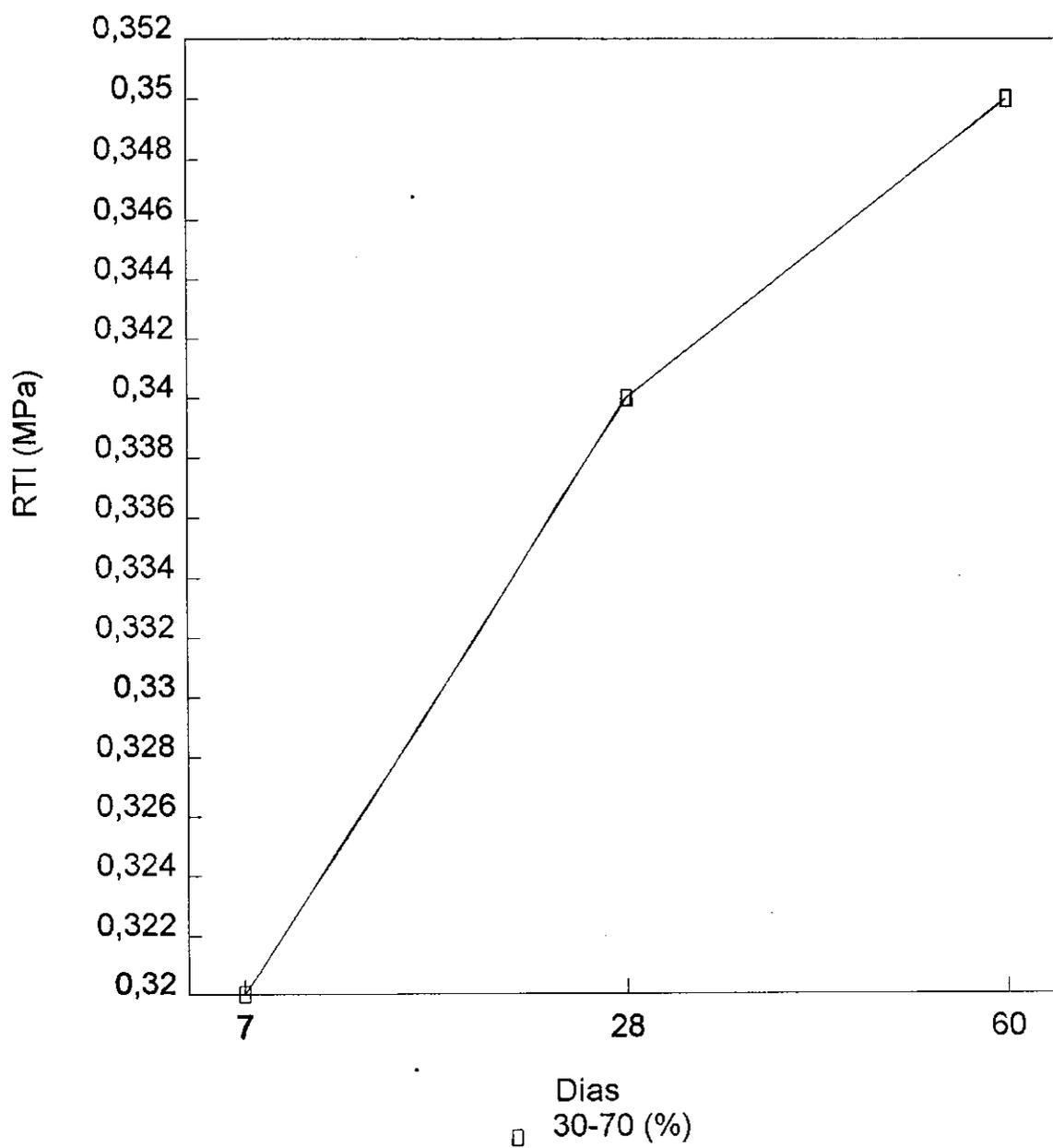


**FIGURA 28** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozzolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



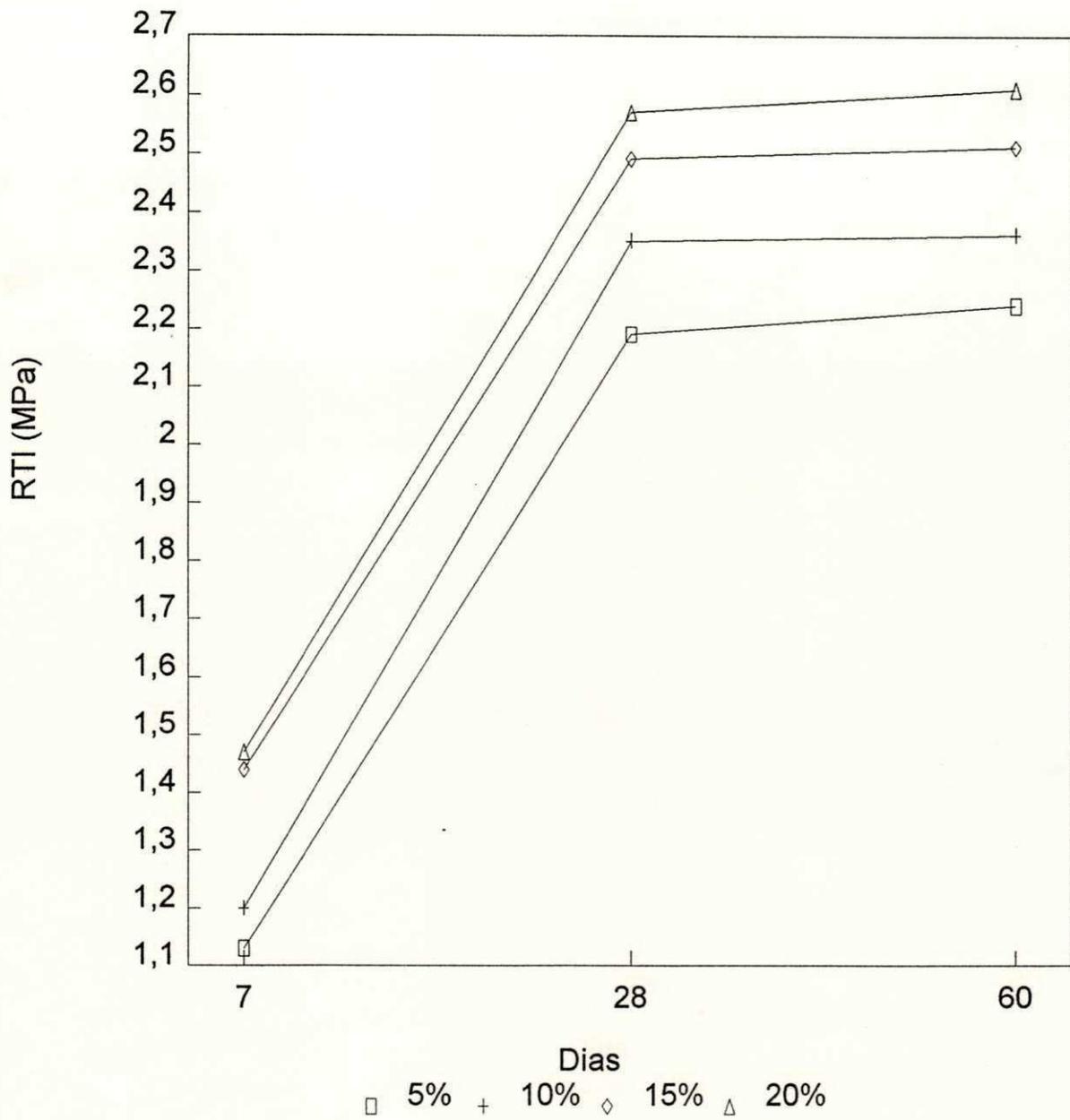
**CIMENCAL**

**FIGURA 29** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



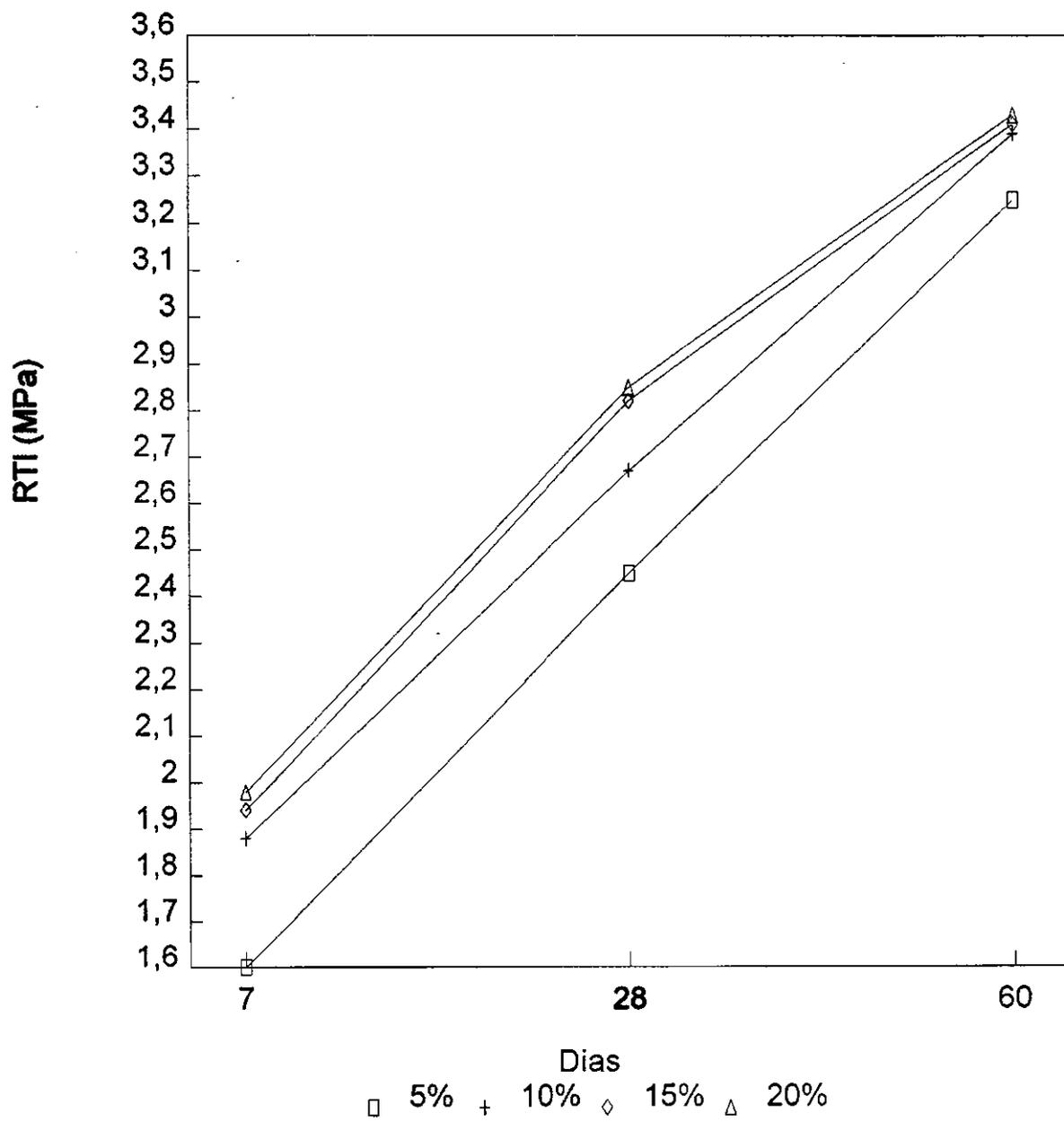
### CALCIMENTO

**FIGURA 30** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



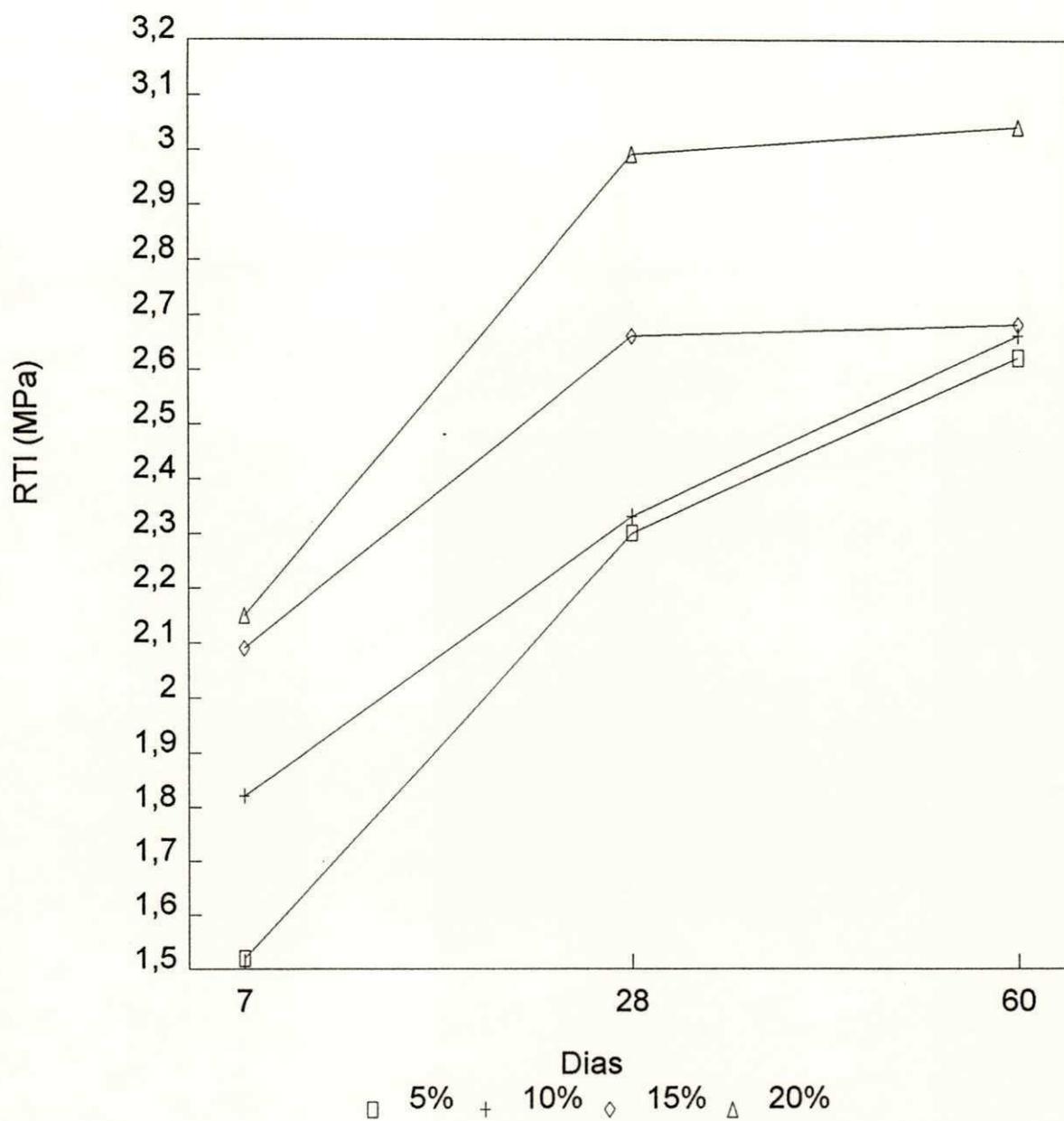
**CARBOMIL  
40-60% com Cimento**

**FIGURA 31** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



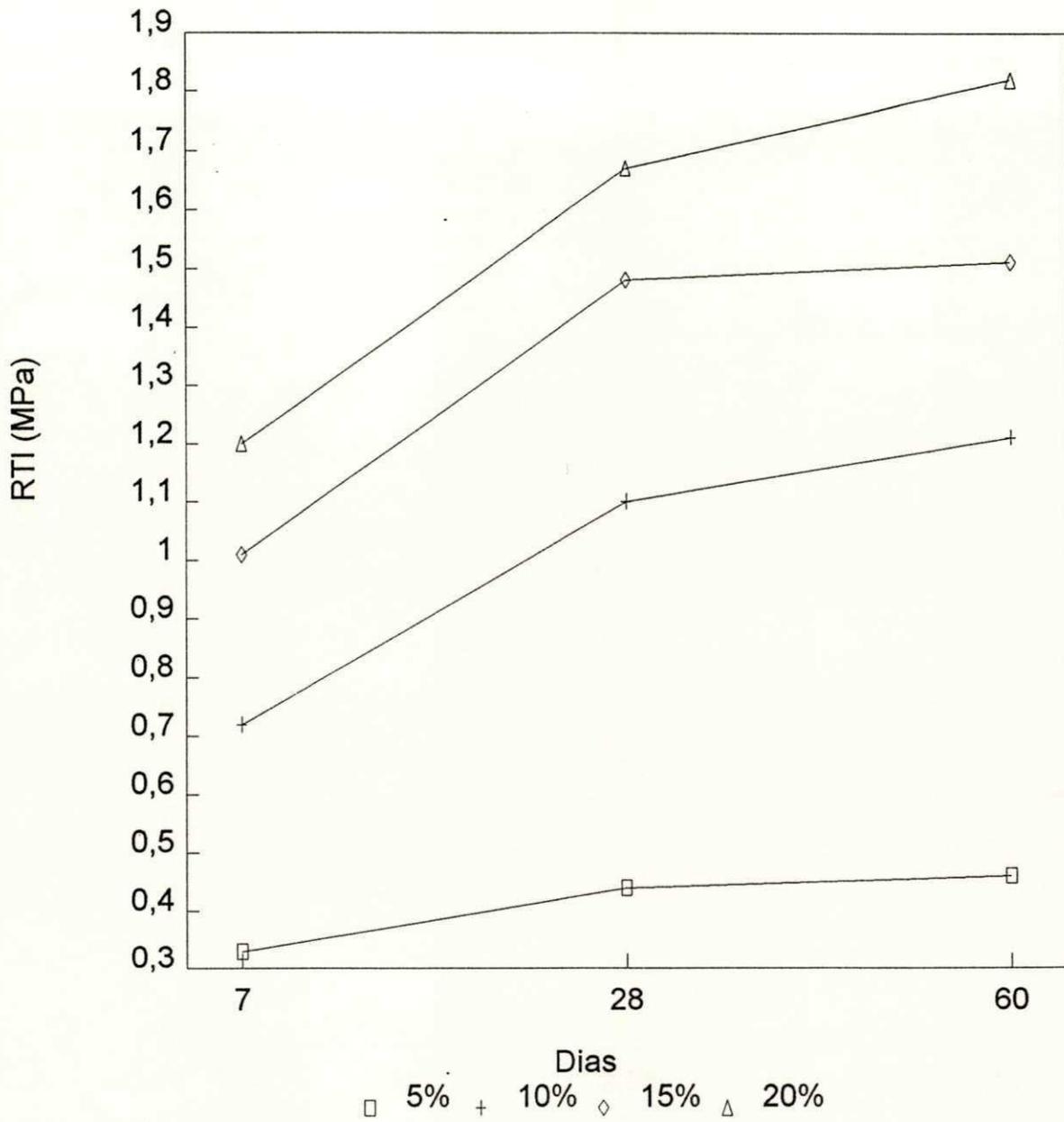
**MEGAÓ**  
**40-60% com Cimento**

**FIGURA 32** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



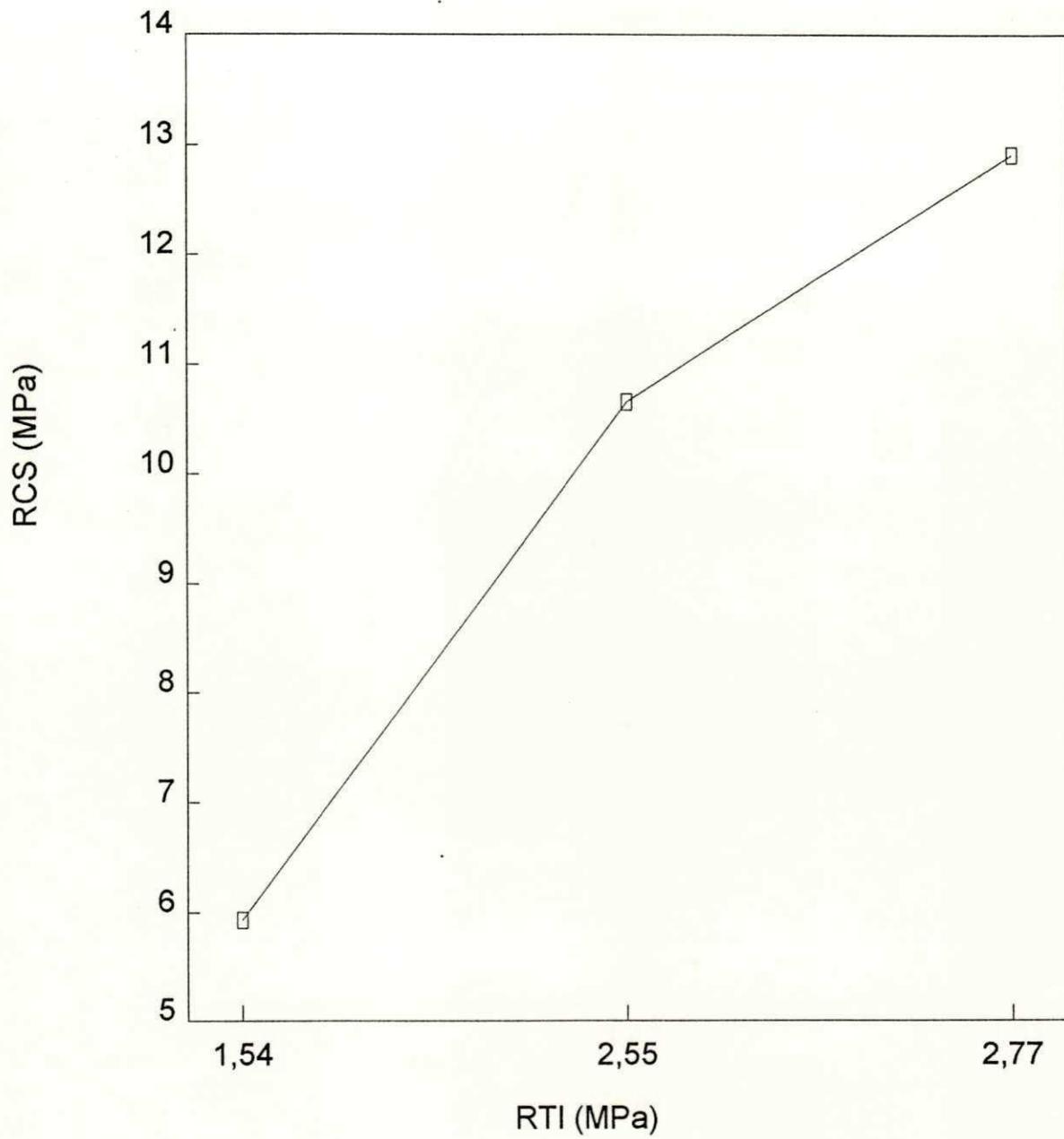
**CIMENCAL  
40-60% com Cimento**

**FIGURA 33** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



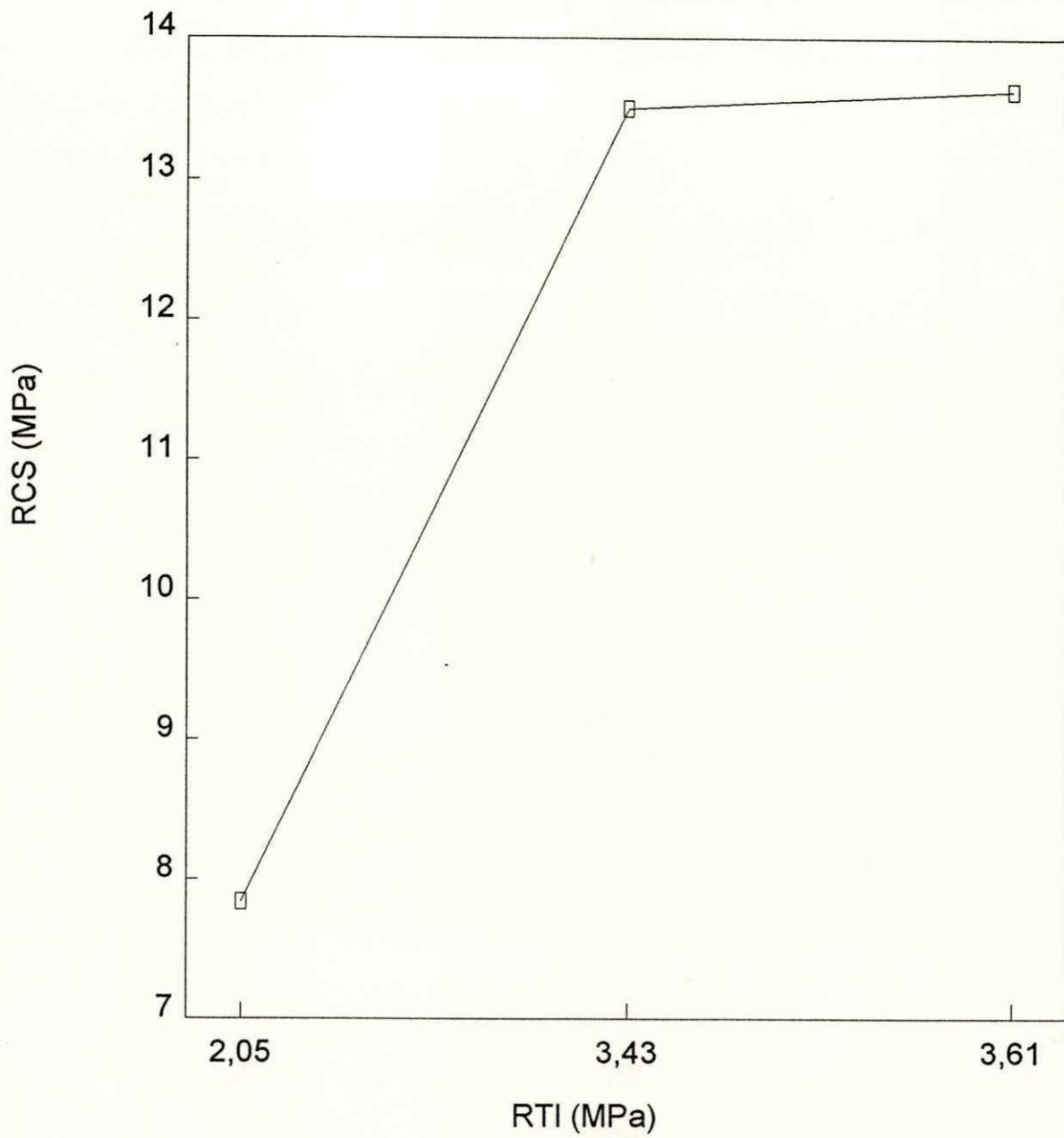
**CALCIMENTO  
40-60% com Cimento**

**FIGURA 34** – Resistência à Tração Indireta das Cais Pozolânicas com Cimento para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.



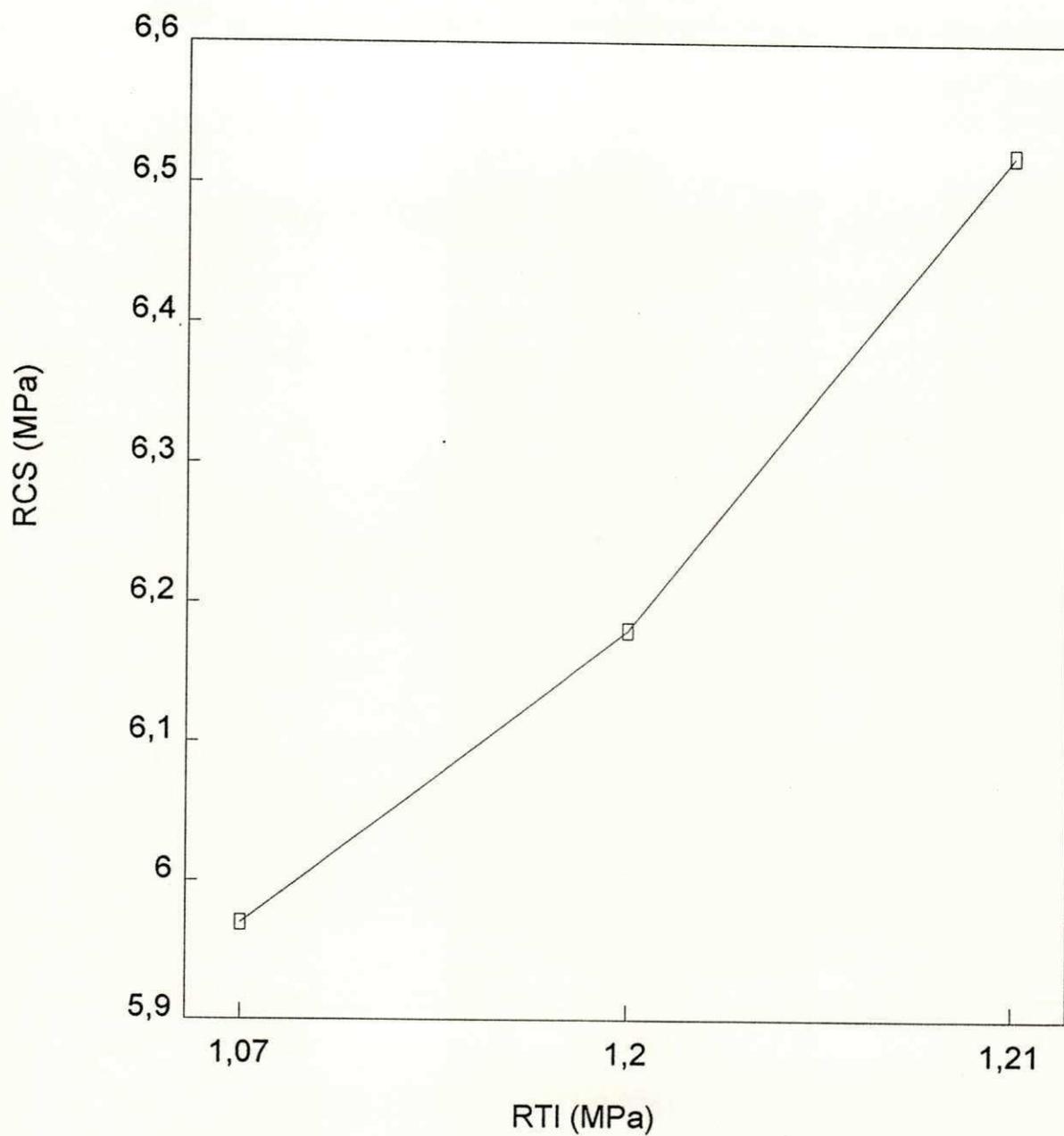
**CARBOMIL**  
**Composição 30-70%**

**FIGURA 35** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



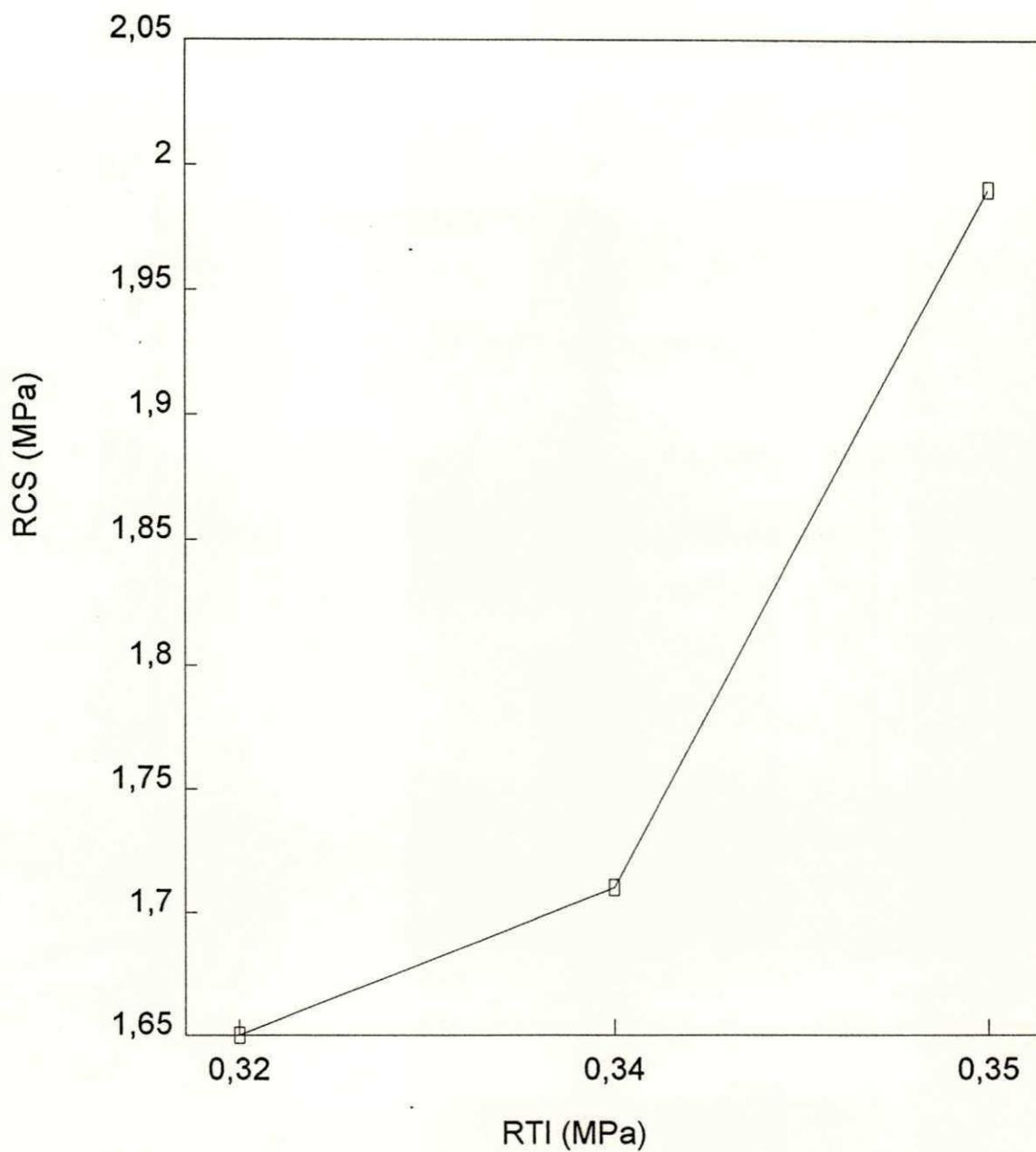
**MEGAÓ**  
**Composição 30-70%**

**FIGURA 36** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



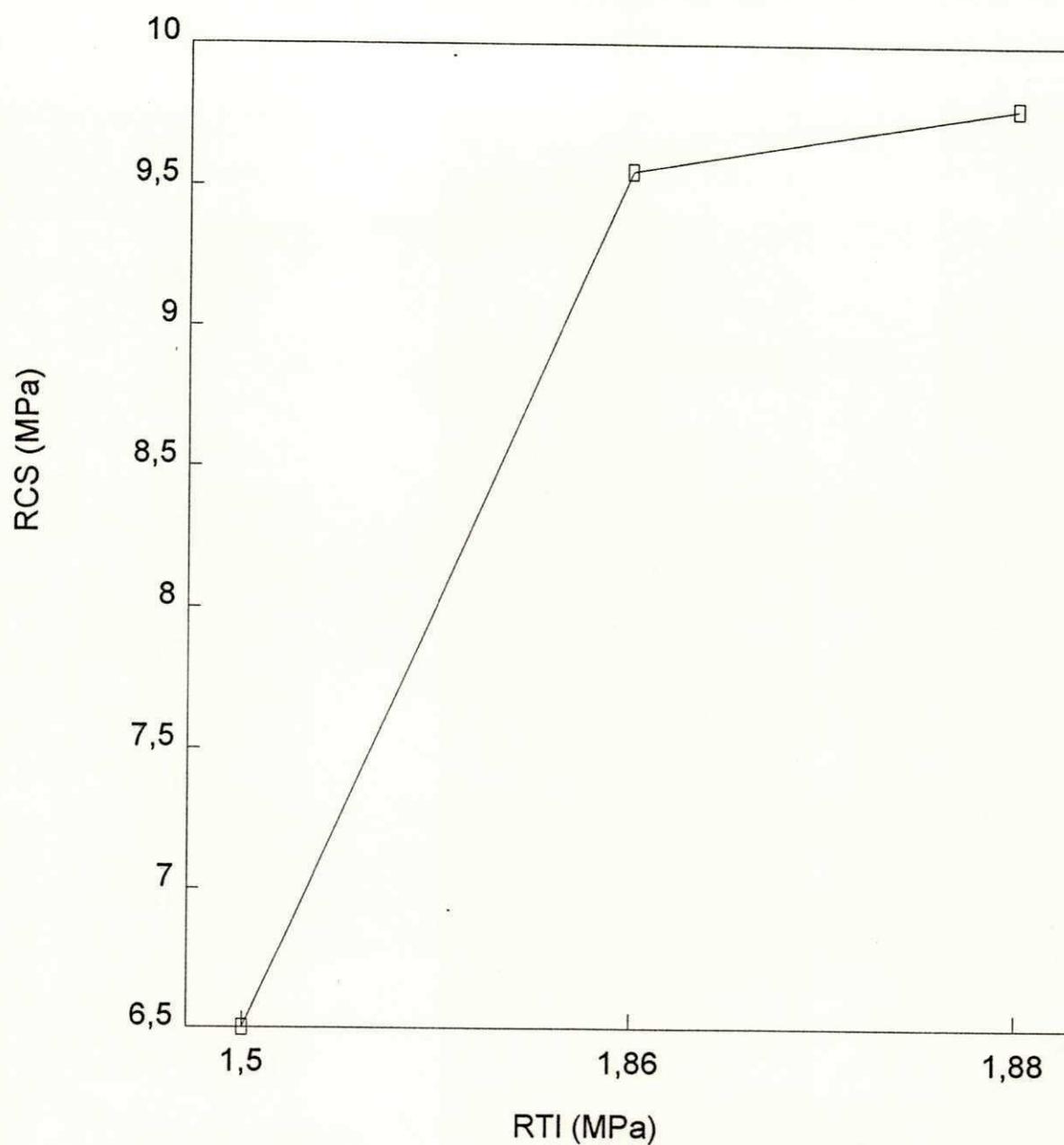
**CIMENTAL**  
**Composição 30-70%**

**FIGURA 37** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



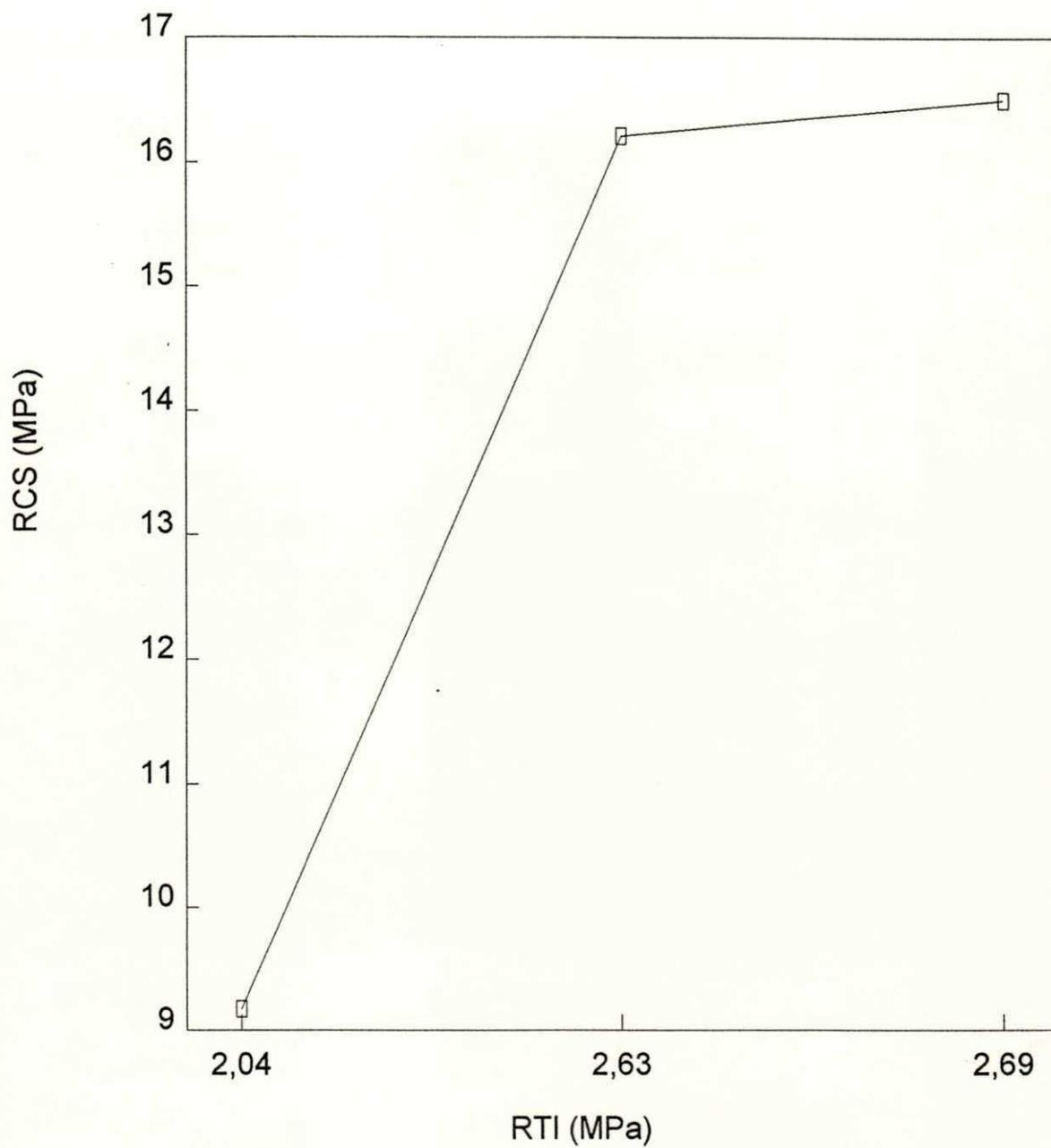
**CALCIMENTO**  
**Composição 30-70%**

**FIGURA 38** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



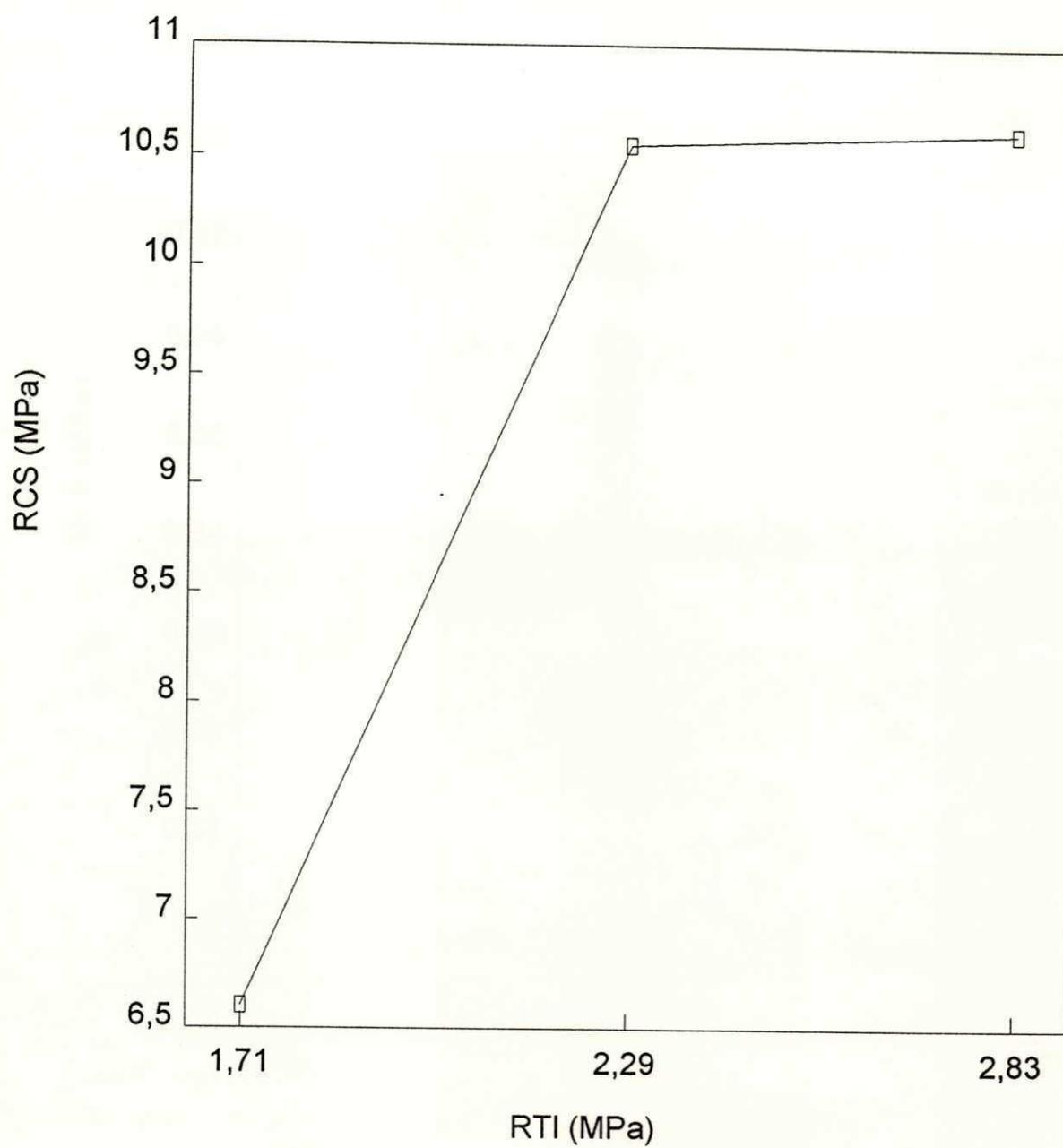
**CARBOMIL**  
**Composição 40-60%**

**FIGURA 39** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



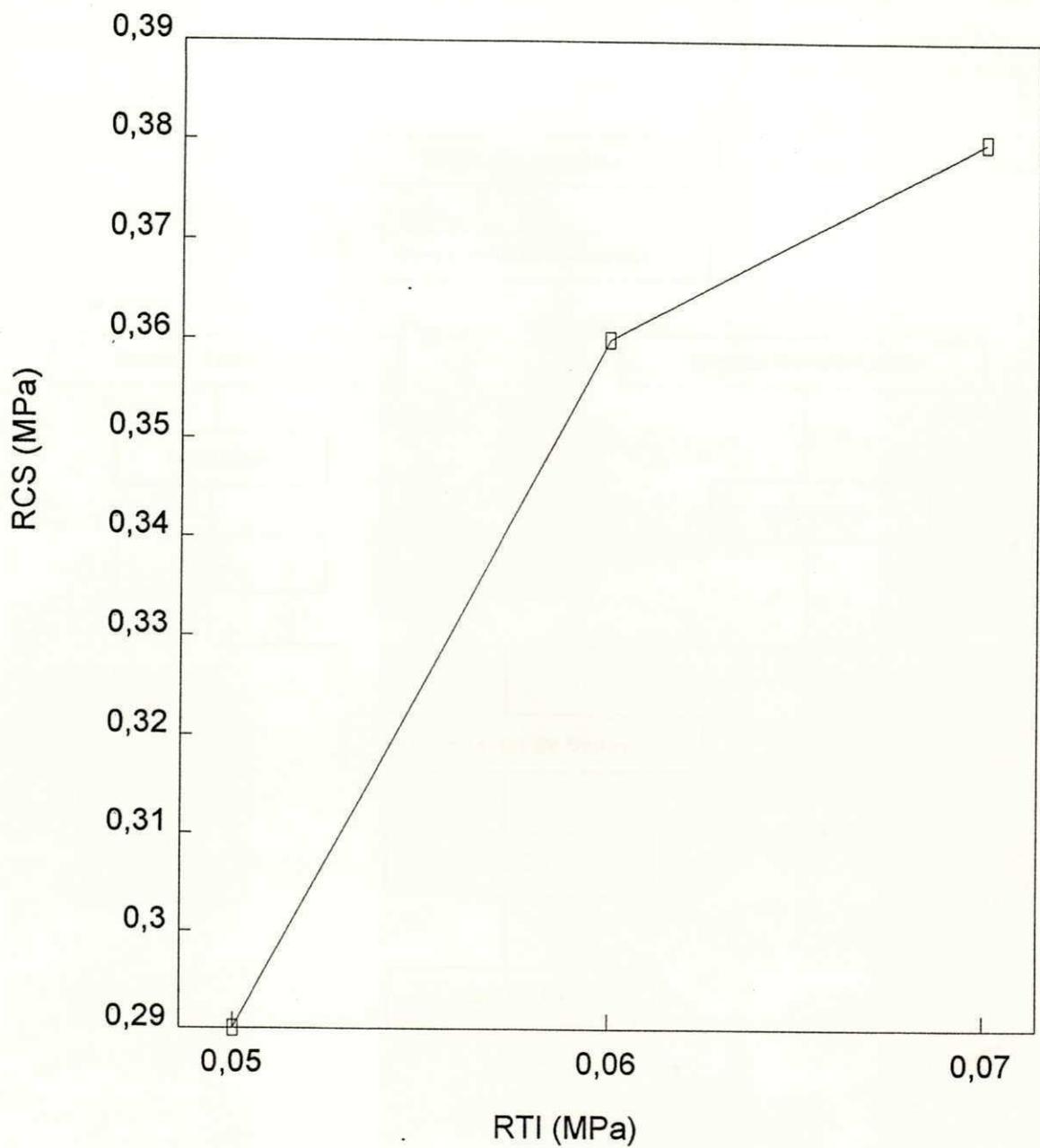
**MEGAÓ**  
**Composição 40-60%**

**FIGURA 40** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



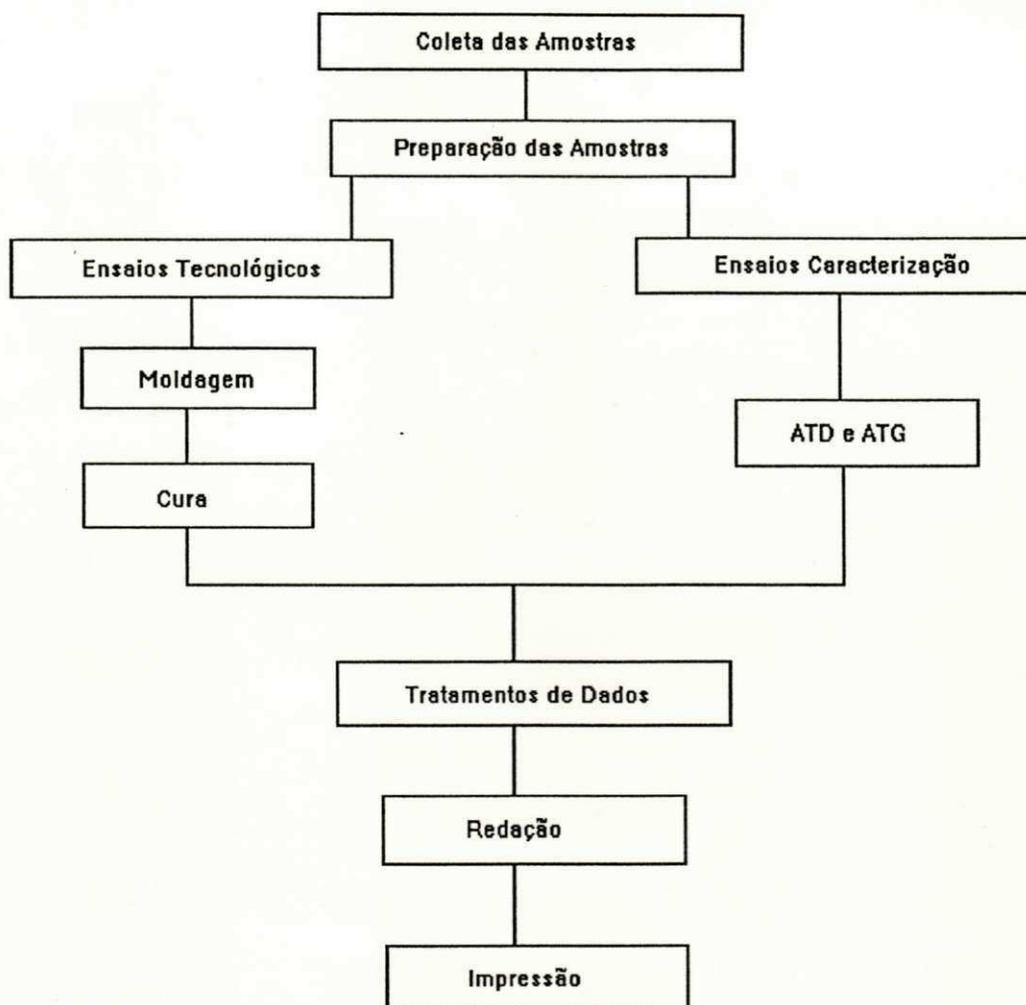
**CIMENCAL**  
**Composição 40-60%**

**FIGURA 41** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



**CALCIMENTO**  
**Composição 40-60%**

**FIGURA 42** – Resistência à Compressão Simples X Resistência à Tração Indireta.



**FIGURA 43** – Fluxograma para o desenvolvimento da Dissertação Cais Pozolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico.