



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II – CAMPINA GRANDE

**ESTUDO DOS MATERIAIS DE SOLO-CIMENTO-CAL E SOLO-
CIMENTO-CAL POZOLÂNICA PARA USO EM HABITAÇÃO POPULAR**

JOZILENE DE SOUZA

CAMPINA GRANDE

DEZEMBRO / 94

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

**Estudo dos Materiais de Solo-Cimento-Cal e
Solo-Cimento-Cal Pozolânica para Uso em
Habitação Popular**

Jozilene de Souza

Dissertação de Mestrado

Campina Grande - Paraíba

Dezembro - 1994

**Estudo dos Materiais de Solo-Cimento-Cal e Solo-
Cimento-Cal Pozolânica para Uso em
Habitação Popular**

Jozilene de Souza

Estudo dos Materiais de Solo-Cimento-Cal e Solo-Cimento-Cal Pozolânica para Uso em Habitação Popular

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**

Orientadores: Prof. Dr. **Heber Carlos Ferreira**

Prof^a. M. Sc. **Edna Celie da Cunha Machado**

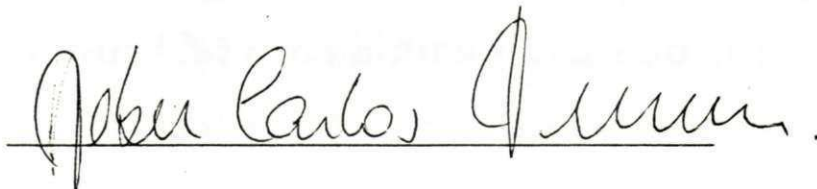
Campina Grande - Paraíba

Dezembro - 1994

**Estudo dos Materiais de Solo-Cimento-Cal e Solo-Cimento-Cal
Pozolânica para Uso em Habitação Popular.**

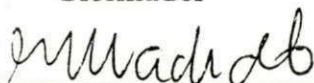
Jozilene de Souza

Dissertação de Mestrado



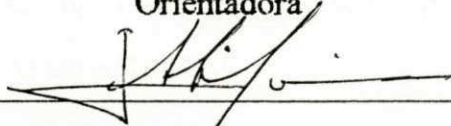
Prof. Heber Carlos Ferreira - Dr.

Orientador



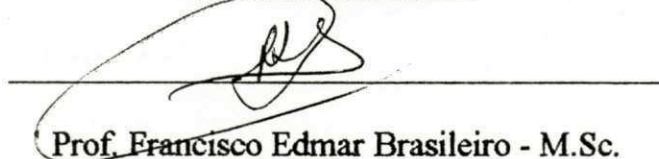
Prof^ª. Edna Celie da Cunha Machado - M.Sc.

Orientadora



Prof. Luiz Carlos Sampaio da Silveira - M.Sc.

Examinador Interno



Prof. Francisco Edmar Brasileiro - M.Sc.

Examinador Interno

Campina Grande - PB

Dezembro - 1994

Aos meus pais:

Jorge e Marli

AGRADECIMENTOS

A uma força superior, que nos ilumina, nos enche de energia, não nos deixa fraquejar: **DEUS**.

Ao orientador **Heber Carlos Ferreira** e a orientadora **Edna Celie da Cunha Machado**, pela transmissão de conhecimentos, pelos conselhos, incentivo e paciência.

Aos professores **João Batista Q. de Carvalho** e em especial ao professor **Edson da Costa Pereira**.

Ao professor **Francisco Edmar Brasileiro**, pela paciência e apoio em todos os sentidos.

Aos engenheiros, **Solange, Jeconias, Vanildo**, os técnicos **Sobreira e Rui**, os auxiliares **Geraldo e Francisco Santana(Lelé)** e os demais funcionários dos laboratórios de solos pelo auxílio nos ensaios realizados.

À **ATECEL**, pelo auxílio financeiro e a todos seus membros que direta ou indiretamente colaboraram com esta pesquisa.

A minhas amigas **Cláudia e Conceição** que, de uma forma ou de outra, contribuíram comigo, numa palavra de incentivo ou num ombro amigo nas horas difíceis.

"Mais vale o fim de uma coisa do que o seu começo, e a paciência é melhor do que a pretensão".

(Ecl. 7,8)

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
ABREVIACÕES	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1. Evolução e Estabilização do Solo-Cimento	03
2.2. Fatores que Influenciam nas Propriedades do Solo-Cimento.....	04
2.3. Estabilização Solo-Cal	09
2.4. Cais Pozolânicas.....	12
2.4.1. Definições de Pozolana.....	13
2.4.2. Atividade Pozolânica.....	14
2.5. Tijolos.....	16
2.6. Métodos de Dosagens.....	17
2.6.1. Dosagem Experimental.....	17
2.6.2. Dosagem Físico-Química.....	17
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1. Introdução.....	19

	<i>ix</i>
	Página
3.2. Materiais.....	19
3.2.1. Solos.....	19
3.2.2. Cimento Portland.....	20
3.2.3. Cal.....	20
3.2.4. Pozolana.....	21
3.2.5. Cais Pozolânicas.....	21
3.2.6. Água.....	21
3.3. Métodos.....	21
3.3.1. Ensaio de Caracterização.....	21
3.3.1.1. Nos Solos.....	21
3.3.1.2. Nos Aglomerantes.....	23
3.3.2. Dosagens.....	24
3.3.2.1. Dosagem Experimental.....	24
3.3.2.2. Dosagem Físico-Química.....	25
3.3.3. Ensaio Tecnológico nos Corpos de Prova Cilíndricos.....	25
3.3.3.1. Resistência à Compressão Simples.....	26
3.3.3.2. Resistência à Tração Indireta.....	27
3.3.3.3. Módulo de Elasticidade.....	28
3.3.4. Fabricação dos Tijolos.....	29
3.3.4.1. Ensaio Tecnológico nos Tijolos.....	30

	x
	Página
3.3.4.1.1. Resistência à Compressão Simples.....	31
3.3.4.1.2. Absorção.....	32
3.3.4.1.3. Massa Específica Aparente.....	33
3.4. Análise Estatística.....	34

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Introdução.....	35
4.2. Ensaio de Caracterização dos Solos.....	35
4.2.1. Análise Granulométrica.....	35
4.2.2. Limites de Atterberg.....	36
4.2.3. Massa Específica Real e Massa Específica Aparente.....	36
4.2.4. Densidade Máxima e Umidade Ótima.....	37
4.2.5. Salinidade.....	37
4.3. Ensaio de Caracterização dos Aglomerantes.....	37
4.3.1. Massa Específica Real.....	38
4.3.2. Massa Específica Aparente.....	38
4.3.3. Área Específica.....	38
4.3.4. Finura.....	38
4.3.5. Análise Química.....	39
4.3.6. Resistência à Compressão Simples do Cimento.....	39
4.4. Dosagens.....	40

	xi
	Página
4.4.1. Dosagem Experimental	40
4.4.2. Dosagem Físico-Química.....	40
4.5. Ensaio Tecnológicos.....	41
4.5.1. Resistência à Compressão Simples.....	41
4.5.2. Resistência à Tração Indireta.....	44
4.5.3. Módulo de Elasticidade.....	45
4.6. Ensaio nos Tijolos.....	47
4.7. Análise Estatística.....	50
4.7.1. Correlações Estatísticas entre o Tempo (t) e a Resistência à Compressão Simples.....	50
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	87
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
ANEXO 1.....	98
ANEXO 2.....	101
ANEXO 3.....	102
ANEXO 4.....	106

SOUZA, Jozilene de - *Estudo dos materiais de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica para uso em habitação popular*, Campina Grande, UFPB, 1994, (113 págs.).

RESUMO

Este trabalho propõe um estudo comparativo de misturas de solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica, tendo como objetivo a fabricação de tijolos em prensas manuais para serem usados em habitações de baixo custo. A porcentagem de cimento Portland é substituída por cal e cal pozolânica em várias proporções, a fim de verificar o desempenho mecânico dessas misturas.

Os dois solos foram selecionados de solos comumente usados em obras de engenharia local. Os resultados dos testes com essas misturas, mostram o melhoramento das propriedades após adição de cal e cal pozolânica, principalmente com relação à resistência à compressão simples dos tijolos, que apresentam um aumento significativo quando são comparados com os resultados obtidos nos corpos de prova cilíndricos.

Foi realizado um estudo estatístico através de regressão linear simples entre o tempo (t) lido no aparelho de ultra-som, denominando PUNDIT, e a resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos, onde observou-se um alto nível de correlação.

Verificou-se também que o emprego da cal e da cal pozolânica, em substituição parcial ao cimento Portland, melhora além da RCS, a superfície externa do tijolo, ficando este com melhor acabamento.

Os resultados permitem concluir que é possível a substituição de parte do cimento Portland por cal e cal pozolânica para fazer tijolos de boa qualidade e boa resistência para uso em habitações populares ou outras edificações.

ABSTRACT

This work proposes a comparative study of the mixtures of soil-cement, soil-cement-lime and soil-cement-lime pozzolana with the objective to make bricks at manual press for to be used at houses of low costs. The percentage of cement is replaced by lime and lime pozzolana cement at several proportions in order to verify the mechanical performance of these mixtures.

The two soils were selected from soils commonly used at local engineering works. The results of the tests with these mixtures show an improvement of the properties after addition of lime and lime pozzolana cement mainly the simple compression resistance of the bricks that exhibits an increase significant when compared with those obtained at cylindrical samples.

It was realized a statistical study through simple linear regression between the time (t), obtained from PUNDIT ultrasonic apparatus and simple compression resistance of the cylindrical samples and was attained a high level of correlation.

It was observed that the use of the lime and pozzolana lime cement in partial substitution of Portland cement improve beyond the simple compression resistance the external surface of the bricks given a better appearance.

The results permit to conclude that it is possible the substitution of part of the Portland cement by lime and lime pozzolana cement and to make bricks of very good quality at lower price.

ABREVIACÕES

- A** - Área
- ABCP** - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABPC** - Associação Brasileira de Produtores de Cal
- Abs** - Absorção
- AE** - Área Específica
- b** - Base do Tijolo
- CP** - Cimento Portland
- CPIIF** - Cimento Portland Composto com Filler
- D** - Diâmetro do Corpo de Prova Cilíndrico
- DM** - Densidade Máxima
- E** - Módulo de Elasticidade
- F** - Força de Ruptura
- h** - Altura do Tijolo
- HO** - Umidade Ótima
- Ins** - Valor Insignificante
- IP** - Índice de Plasticidade
- IPT** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- LL** - Limite de Liquidez
- LP** - Limite de Plasticidade
- MEA** - Massa Específica Aparente
- MER** - Massa Específica Real
- M₁** - Peso Seco

- M₂** - Peso Saturado
- M₃** - Peso Imerso
- NL** - Não líquido
- NP** - Não Plástico
- PCA** - Portland Cement Association
- RCS** - Resistência à Compressão Simples
- RTI** - Resistência à Tração Indireta
- SC** - Solo-Cimento
- SCC** - Solo-Cimento-Cal
- SCCP** - Solo-Cimento-Cal Pozolânica
- t** - Tempo
- V** - Volume

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Caracterização Física dos Solos A e B	51
TABELA 2 - Caracterização Física das Amostras de Cal, Pozolana e e Cimento.....	52
TABELA 3 - Composição Química da Cal, Pozolana e Cimento.....	52
TABELA 4 - Dosagem Físico-Química do Solo A.....	53
TABELA 5 - Dosagem Físico-Química do Solo B.....	54
TABELA 6 - Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B no Estado Natural - Cura Aérea, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	55
TABELA 7 - Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B Aditivados com Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	55
TABELA 8- Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B Aditivados com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal e 90%, 80%, 70% e 60% de Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	56
TABELA 9- Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B Aditivados com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica e 90%, 80%, 70% e 60% de Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	57
TABELA 10- Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B	

Aditivados com Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	58
TABELA 11- Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B Aditivados com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal e 90%, 80%, 70% e 60% Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	59
TABELA 12- Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B Aditivados com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica e 90%, 80%, 70% e 60% Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	60
TABELA 13- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento, Traço 1:13, Solo A.....	61
TABELA 14- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento, Traço 1:13, Solo B	61
TABELA 15- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de cal, para o Solo A.....	62
TABELA 16- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal Pozolânica, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de cal, para o Solo A	63

TABELA 17- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal, nos Traços com 10%, 20%, 30 e 40% de cal, para o Solo B.....	64
TABELA 18- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal Pozolânica, nos Traços com 10%, 20%, 30 e 40% de cal, para o Solo B.....	65
TABELA 19- Resistência à Compressão Simples (RCS) para os Tijolos dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 dias.....	66
TABELA 20- Resistência à Compressão Simples (RCS) para os Tijolos dos Solos A e B, Aditivados com 10% de Cal e 40% de Cal, respectivamente, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.....	66
TABELA 21- Resistência à Compressão Simples (RCS) para os Tijolos do Solo A, Aditivados com 10% de Cal Pozolânica, e do Solo B, Aditivado com 40% de Cal Pozolânica, para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias	67
TABELA 22- Absorção e Massa Específica Aparente dos Tijolos para o Solo A, Aditivado com Cimento Portland, 10% de Cal e 10% de Cal Pozolânica, para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	67
TABELA 23- Absorção e Massa Específica Aparente dos Tijolos	

para o Solo B, Aditivado com Cimento Portland, 40% de Cal e 40% de Cal Pozolânica, para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	68
TABELA 24- Correlações Estatística entre as Variáveis Tempo e Resistência à Compressão Simples, para os Corpos de Prova Cilíndricos do Solo A, nos Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias para o Solo-Cimento no Traço 1:13.....	68
TABELA 25- Correlações Estatística entre as Variáveis Tempo e Resistência à Compressão Simples, para os Corpos de Prova Cilíndricos do Solo B, nos Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias para o Solo-Cimento no Traço 1:13.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1- Fluxograma do Desenvolvimento da Dissertação.....	22
FIGURA 2- Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:13, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	70
FIGURA 3- Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:15, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	71
FIGURA 4- Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:17, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	72
FIGURA 5- Resistência à Compressão Simples do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de cal, para os períodos de cura de 07, 28 e 60 Dias.....	73
FIGURA 6- Resistência à Compressão Simples do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	74
FIGURA 7- Resistência à Compressão Simples do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	75
FIGURA 8- Resistência à Compressão Simples do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	76

FIGURA 9- Resistência à Tração Indireta dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:13, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	77
FIGURA 10- Resistência à Tração Indireta dos Solos A, B, Aditivados com com Cimento Portland, no Traço 1:15, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	78
FIGURA 11- Resistência à Tração Indireta dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:17, nos Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	79
FIGURA 12- Resistência à Tração Indireta do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	80
FIGURA 13- Resistência à Tração Indireta do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	81
FIGURA 14- Resistência à Tração Indireta do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	82
FIGURA 15- Resistência à Tração Indireta do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.....	83
FIGURA 16- Resistência à Compressão Simples dos Tijolos do Solo A, nas composições SC, SCC e SCCP, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.....	84

FIGURA 17- Resistência à Compressão Simples dos Tijolos do Solo B, nas composições SC, SCC e SCCP, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.....	85
FIGURA 18 - Curves Relating Pulse Velocity with Static and Dinamic Elastic Modulus.....	86

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Entre as muitas diretrizes que se pode seguir, objetivando o barateamento da construção, encontra-se a pesquisa de materiais alternativos aos utilizados tradicionalmente. Sendo o consumo de combustível, quer na produção, quer no transporte, um parâmetro que tem peso considerável no preço do material de construção, depreende-se que a pesquisa de materiais alternativos deve-se basear na redução desse consumo (Agopyan, 1988).

A abordagem do problema pode ser múltipla. Primeiro, buscando-se alteração em processos de fabricação, de modo a reduzir o consumo de combustível; segundo, reduzindo-se o consumo do aglomerante (no caso do cimento) e terceiro, desenvolvendo-se a utilização de materiais regionais de modo a dispensar o transporte a longa distância (Cincotto, 1988).

O custo dos materiais de construção tradicionais é alto para poderem ser utilizados por parcela considerável da população, sendo que uma parte apreciável de seu custo é devido ao preço da energia consumida para a sua fabricação e transporte. Por esta razão, o desenvolvimento de materiais que têm um consumo global de pouca energia e que podem ser obtidos no local, é bastante importante para a redução do custo da edificação. Logicamente, o custo dos materiais é apenas uma fração do custo global das construções e sem a otimização dos demais custos incidentes, o esforço não será suficiente.

O estudo de tijolos, blocos e paredes monolíticas de solo-aglomerante foi retomado na década de 70 e, devido o preço atual do cimento, pretende-se

substituir o aglomerante por outros, num estudo conjunto com o desenvolvimento dos aglomerantes alternativos (Abiko, 1983).

A utilização de materiais de solo-cimento e solo-cimento-cal tem sido largamente utilizados devido a várias vantagens, dentre as quais um baixo custo, visto que pode-se aproveitar totalmente o próprio solo do local da construção, evitando assim o transporte do material.

O estudo de cais pozolânicas, mistura de cal com pozolana, retorna como uma nova alternativa de material de baixo custo, tendo em vista que, dentre outras propriedades, apresentam adequado desempenho mecânico, comprovado por pesquisas de Lima (1993).

Em conseqüência do grande déficit habitacional no país, o desenvolvimento de materiais alternativos é essencial, e mais essencial ainda é a aplicação destes métodos, senão não haveria sentido pesquisar tais tecnologias.

O objetivo desta pesquisa é utilizar materiais alternativos de baixo custo, como cal e cal pozolânica, na fabricação de tijolos e, através de ensaios tecnológicos, comparar o desempenho mecânico destes tijolos com os fabricados com apenas solo-cimento.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Evolução e Estabilização do Solo-Cimento

O estudo de solo-cimento, que é uma mistura constituída de solo, cimento e água e, eventualmente aditivos, submetidos a um esforço de compactação que resulta em um material mais resistente que o solo natural, surgiu na década de 20, com obras de pequena importância. Só em 1932 é que um pavimento de 17.000 m² na Carolina do Sul (EUA), teve uma base de solo-cimento controlada.

Segundo Bezerra et alli (1976), em 1935, a Portland Cement Association (PCA), intensificou um programa de ensaios destinados a verificar os efeitos do cimento Portland nas propriedades dos solos. A partir desta data, o solo-cimento passou a ter enorme aceitabilidade e emprego.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), em 1940, adotou para uso no Brasil a metodologia de ensaios para dosagem de solo-cimento da PCA, como tentativa para normalização e, em 1941, publicou métodos de ensaios análogos aos mesmos.

Em 1952, na tentativa de reduzir o tempo de dosagem, a ABCP divulgou resultados que deram origem à Norma Simplificada de Dosagem, reduzindo o trabalho pela metade.

As principais características exigidas na utilização do solo-cimento em edificações são: resistência, durabilidade, impermeabilidade e baixa condutibilidade térmica.

A estabilização dos solos com cimento é uma das formas existentes de melhorá-lo, podendo servir também como uma alternativa tecnológica para habitação popular, dentro de certos limites, estes limites referem-se, principalmente, ao custo do cimento (CEPED, 1978).

Tem-se estabilizado os solos, ao longo da história com palha, óleos vegetais e animais, asfalto natural, cal, cimento, usados isoladamente ou combinados, a fim de melhorar suas características de resistência aos esforços externos e à absorção, impermeabilidade, ou incrementar uma com prejuízo da outra (Guimarães, 1981).

Segundo Bezerra (1983), estabilização de um solo é um termo genérico para qualquer método físico, químico ou biológico, ou qualquer combinação de tais métodos que se emprega para melhorar certas propriedades de um solo natural, fazendo com que este sirva adequadamente para os interesses da engenharia.

A estabilização de solos com aditivos, tem-se tornado, algumas vezes, a solução técnica econômica para os solos que nem sempre atendem às especificações de serviços quando utilizados in natura ou mesmo misturados com outros materiais inertes (Neves, 1989).

2.2. Fatores que Influenciam nas Propriedades do Solo-Cimento

Segundo De Graft-Johnson (1969), Katti et alli (1959), Medina

(1968), Sherwood (1962), citadas por Braga (1979), as principais variáveis que interferem nas propriedades do solo estabilizado com cimento, são:

1) Natureza do Solo

A natureza do solo é um dos mais importantes fatores que controlam a qualidade das misturas estabilizadas com cimento. Isto se refere à distribuição do tamanho das partículas, propriedades físico-químicas e à composição mineralógica do solo (Sherwood & Sullivan, 1960). Por esta razão, é de grande importância que, em todo e qualquer estudo desenvolvido em termos de estabilização fiquem perfeitamente determinadas as composições granulométricas dos solos submetidos a estudo.

2) Densidade

Quando em 1935, iniciou-se o estudo do solo-cimento, já R.R. Proctor havia demonstrado que, para determinada energia de compactação, há uma umidade em que se consegue máxima densidade, e que, com esta densidade, o solo apresenta maior resistência do que com as inferiores. Isto orientou as pesquisas iniciais de solo-cimento, tendo-se verificado ser a afirmativa igualmente válida para o novo material (Felt, 1955).

3) Umidade

A presença da água nos materiais estabilizados é essencial à compactação e à hidratação do cimento. O conteúdo ótimo de umidade, para o

máximo peso específico seco, não é, necessariamente, o conteúdo de umidade que corresponderá à máxima resistência (Chaves, 1976).

4) Mistura

Para o cimento exibir o máximo efeito, no material estabilizado, é necessário ser uniformemente distribuído por todo material, para evitar segregação. A resistência à compressão aumenta com o incremento do tempo de mistura, até uma certa resistência limite ser alcançada (Sherwood, 1968).

Uma mistura efetuada por um período maior que o necessário para que se proceda a uma perfeita homogeneização, torna-se danosa, tendo em vista que o processo de hidratação do cimento começa tão logo a água é adicionada, e esta demora excessiva acarreta ruptura das ligações, o que implica em uma redução na resistência e na durabilidade (Chaves, 1976).

5) Compactação

Do estudo sobre o mecanismo de estabilização com o cimento, fica totalmente claro que a resistência desenvolvida de uma mistura de solo-cimento, depende diretamente da intimidade dos contatos, grão a grão. Esta orientação das partículas, para um contato mais íntimo, é promovida pela compactação.

Segundo Ingles & Metcalf (1973), não só o grau de compactação é importante, como também a ocasião em que esta é efetuada, ou seja, quando realizada após a hidratação do cimento, torna inefetiva a estabilização.

A tabela abaixo, sugerida por Ingles & Metcalf (1972), mostra a aplicação de diversos materiais usados na estabilização de solos com texturas diferentes, onde compara-se a eficiência da aplicação de vários métodos de estabilização.

APPLICABILITY OF STABILIZATION METHODS

	Designation	F. Clay	C. Clay	F. Silts	C. Silts	F. Sands	C. Sands
	Soil						
	P. Size (mm)	< .0006	.0006-.002	.002 - .01	.01 - .06	.06 - .4	.4 - 2.0
	Soil						
	V. Stability	V. Poor	Fair	Fair	Good	V. Good	V. Good
Type Of	Lime						
	Cement						
Stabilization	Bitumens						
	Polimeric						
Aplicable	Organic						
	Mechanical						
	Thermal						



Range of Maximum Efficiency.



Effective, but Quality Control May be Difficult.

6) Cura

Quando não se usa qualquer processo de cura que evite uma secagem rápida, a resistência à compressão simples cai em torno de 40% (ABCP, 1974).

7) Temperatura

O efeito da temperatura durante a cura do solo-cimento foi estudada por Clare (1954), do Road Research Laboratory. O retardamento da hidratação, em consequência da diminuição da temperatura, fato já constatado com o concreto, foi igualmente verificado com o solo-cimento. Para execução do solo-cimento, sugere-se que a temperatura seja superior a 5° C.

8) Idade

A resistência dos materiais estabilizados com cimento tende a aumentar com o tempo de cura, algumas vezes este aumento não ocorre, acredita-se que devido às imprecisões nos ensaios.

9) Quantidade e Qualidade do Cimento

A resistência à compressão cresce com a concentração de cimento, quanto maior a quantidade de cimento adicionada a um solo, mais resistente resultará o solo-cimento. Por outro lado, o cimento com grande resistência inicial é usualmente mais efetivo do que o cimento comum.

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.

10) Matéria Orgânica

A presença de matéria orgânica mostrou-se altamente prejudicial à hidratação do cimento em diversos casos.

Clare (1954) e Sherwood (1957), estudaram a fundo o problema e concluíram que o efeito dependia do tipo de matéria orgânica. Compostos orgânicos com elevados pesos moleculares, como a celulose, linhita e a gelatina, pouco afetam o solo-cimento, enquanto os compostos orgânicos de baixo peso molecular, como a glicose, os açúcares e ácido húmico, são altamente prejudiciais. Esta ação, para pequenos teores, se manifesta pelo retardamento do endurecimento do cimento, fato este já explicado pela adsorção de íons de cálcio libertados durante a hidratação.

Fatores como aditivos, minerais argilosos, óxidos de ferro e alumínio e sulfato também afetam as propriedades do solo-cimento.

2.3. Estabilização Solo-Cal

A fim de reduzir custos e também apresentar soluções alternativas para a construção de habitações populares, desenvolveram-se componentes de edificação com solo estabilizado com outros aditivos, que não o cimento (Picchi et alli, 1988), tais como a cal, o gesso, palhas de arroz e, ressurgindo, o uso da pozolana.

A aplicação da cal, como material estabilizador, tem crescido bastante nos últimos anos, primeiro observou-se seu desempenho na pavimentação, depois como aditivo na fabricação de materiais alternativos.

O seu uso vem desde os antigos povos da Babilônia, de Nínive, do Egito, da Grécia e de Roma, que já utilizavam a cal como um aglomerante eficiente; e hoje, mesmo com o advento do cimento Portland, a cal hidratada tem importância destacada entre os diversos aglomerantes utilizados no emprego de estabilização dos solos, na confecção de materiais alternativos (como paredes monolíticas, tijolos e blocos, etc.), bem como na aplicação em argamassas (Mota, 1994).

É necessário observar que as características do solo para mistura com cimento ou com cal são diferentes, devendo seu emprego ser estudado em cada caso, pois nem todo solo estabilizado com cimento pode também ser estabilizado com cal (Pinto, 1985).

Freqüentemente a cal é utilizada na estabilização de solos lateríticos, sendo diversas as publicações sobre o assunto (Ferro, 1976).

A cal, quando é adicionada aos solos, provoca reações que se traduzem por modificações, freqüentemente muito importantes e benéficas às propriedades mecânicas, tais como: plasticidade, expansão, retração, resistência à compressão simples e aumento de suporte (Neves, 1989).

Segundo Diamond & Kinter (1968) e Queiroz de Carvalho (1992), os principais mecanismos nas interações solo-cal são:

- a) troca de cátion e floculação;
- b) carbonatação;
- c) reação pozolânica.

Esta abordagem, freqüentemente encontrada na literatura, será feita de forma simplificada.

- a) Troca de cátions

Ao entrar em contato com o sistema solo-água, os elementos da cal dissociam-se em cátions cálcio e ânions hidroxila, iniciando-se um processo de troca de cátions, onde os íons cálcio substituem os íons mais fracos existentes, ocorrendo ainda aglomeração adicional de cátions em torno das partículas do argilomineral, resultando um balanceamento das cargas negativas das argilas. O resultado é a floculação e agregação das partículas do argilomineral.

b) Reação carbonatação

A reação de carbonatação da cal ocorre com o gás carbônico do ar, e nas minúsculas bolhas gasosas absorvidas pela mistura, refazendo o carbonato primitivo, do que resulta a expansão do volume e maior compactação da mistura solo-cal. O produto obtido, além de não ser considerado um forte agente cimentício quando comparado com silicatos e aluminatos, tem sua formação dificultada em face da baixa porosidade apresentada por grande parte dos solos, o que dificulta a penetração do gás carbônico, no processo de carbonatação.

c) Reação pozolânica

No processo de reações secundárias, o ganho de resistência do solo aumenta principalmente devido às reações químicas entre a cal e os minerais argilosos. São ainda bastante discutidas as características, natureza e mecanismo de formação desse gel, entretanto, diversos autores concordam em afirmar que os produtos resultantes destas reações são basicamente silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, similares em natureza aos componentes cimentícios encontrados no cimento hidratado Portland. Neste sistema, as hidroxilas dissociadas contribuem para elevar o Ph do solo, o que resulta em uma maior facilidade para reação do cátion cálcio, com a sílica e a alumina, em face da dissociação destes, no meio alcalino formado.

2.4. Cais Pozolânicas

Na área restrita aos materiais de construção, apresenta interesse a redução no consumo de cimento Portland e da cal, produtos de elevado consumo energético. A utilização de resíduos industriais potencialmente aglomerantes, como a escória de alto-forno e a cinza volante, já é consagrada. Um estudo amplo de outros resíduos disponíveis, não explorados até a presente data, com este enfoque, poderá indicar as possibilidades de utilização (Cincotto & Kaupatez, 1988).

As cais pozolânicas artificiais, misturas de cais e pozolanas, são materiais alternativos que surgem de maneira promissora, devido ao seu adequado desempenho mecânico e baixo custo. A mais antiga argamassa hidráulica que se conhece, é a obtida pela combinação de cinzas vulcânicas com cal hidratada e areia. Foi, essa argamassa, usada longamente pelos romanos e gregos, chegando suas obras até os nossos dias, chamando-nos a atenção, às vezes, pelo notável estado de conservação que apresentam (Pereira, 1957).

Segundo Lima (1993a), as misturas de cais mais pozolanas, são aglomerantes que apresentam baixo custo, preços da ordem de US\$ 80,00/t a US\$ 100,00/t, sendo possível uma boa redução no orçamento global da obra.

Devido seu bom desempenho mecânico e redução nos custos é que, as cais pozolânicas, utilizadas primeiramente pelos gregos e romanos, desde os primórdios da nossa civilização, ressurgem hoje como uma alternativa viável a ser usada em diversos ramos da construção civil, como em argamassas de revestimentos e alvenarias e na fabricação de tijolos manuais para habitação popular.

2.4.1. Definições de Pozolana

Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, não possui apreciável poder aglomerante hidráulico, mas que, em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio, em temperaturas próximas à ambiente, formando assim, compostos de poder aglomerante. As pozolanas também são materiais naturais ou artificiais que, sendo adicionados à argamassa ou concreto, produzem um produto de baixo custo com características tecnológicas superiores aos desses produtos, sem a adição (Souza Santos, 1975).

O termo pozolana, inicialmente usado para designar uma cinza vulcânica de Puzzuolli, próximo de Nápoles, estendeu-se a outros materiais naturais ou artificiais, com as mesmas características.

Estudos feitos por Massazza (1974), mostram uma das mais completas e detalhadas classificações dos materiais pozolânicos de que se tem conhecimento. Além de ordenar esses materiais de forma bastante lógica, ele teve a preocupação de enquadrar dentro de cada subdivisão proposta, alguns dos mais famosos materiais pozolânicos de que se tem referência na literatura especializada. Já Zampieri (1989), apresentou, em essência, a proposição original de Massazza, acrescida de alguns novos materiais, que só recentemente tiveram comprovada sua atividade pozolânica, os quais são a microssílica, as cinzas de resíduos vegetais e as escórias siderúrgicas ácidas.

As obras antigas, realizadas com pozolanas, existem até hoje como inestimáveis relíquias. Citam-se por exemplo: o Panteão (Templo dos Deuses) e o

Coliseu, além de obras como estádios, basílicas, arquedutos, cisternas, pontes, portos e as mais diversas estruturas que ainda perduram até hoje (Calleja, 1958).

2.4.2. Atividade Pozolânica

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, os quais exibiam adicionalmente a propriedade de endurecer, mesmo quando submerso em água (Lima 1993).

Segundo Bauer(1993), os materiais pozolânicos desenvolvem suas propriedades aglomerantes potenciais em presença do cimento e da água.

Acreditava-se também que a atividade pozolânica era devido a uma atividade zeolítica, uma vez que vários pesquisadores tinham encontrado materiais zeolíticos em pozolanas, os quais eram conhecidos por serem capazes de absorver cal no contato com soluções, através de um mecanismo de troca de bases. Mas segundo estudos feitos por Silva (1992), concluiu que, a atividade pozolânica define aqueles fenômenos que, à temperatura ambiente transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante.

São considerados materiais pozolânicos, aqueles que reagem quimicamente com o Ca(OH)_2 em condições normais de pressão e temperatura, formando compostos cimentantes hidráulicos de boa resistência mecânica.

Tendo em vista, o comprovado desempenho mecânico da pozolana em pesquisas de Silva (1992), Lima(1993) e Mota (1994), acredita-se também na possibilidade de seu uso na fabricação de materiais alternativos, como tijolos,

paredes monolíticas, entre outros, visto que pode-se reduzir consideravelmente o uso do cimento, podendo também reduzir os custos, desde que a pozolana seja industrializada.

2.5. Tijolos

Há uma tendência a não se dar aos materiais para fechamento e acabamento a mesma importância técnica conferida aos utilizados para estruturas. Apesar das falhas destes conduzirem a maiores riscos de vida humana, o comportamento inadequado dos primeiros provoca a ocorrência das manifestações patológicas mais comuns nas edificações, com transtornos aos usuários e altas despesas de manutenção.

Os tijolos de solo-cimento foram estudados principalmente pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) a partir de 1977 (IPT, 1977).

Os materiais utilizados empregam sempre que possível, matérias-primas locais, e são produzidos no canteiro ou em indústrias implantadas com baixo custo de capital, com pequeno consumo de energia e com uma tecnologia simples, geralmente utilizando muita mão de obra.

Os tijolos podem ser fabricados em prensas manuais ou em prensas automáticas que diferem entre si pelo custo, capacidade, características de operação e pela energia de capacitação empregada.

A prensa manual fabricada no Brasil é de aço e tem a capacidade de produzir em média 1.500 tijolos/dia. Esta prensa é de fácil operação, necessitando de dois operários não especializados.

As prensas automáticas ou hidráulicas têm capacidade de produzir em média de 15 mil a 20 mil tijolos/dia, necessitando-se de um investimento elevado quer na prensa quer em outros equipamentos como destorroador, misturador e peneira rotativa (Abiko, 1988).

O processo de fabricação em ambos os casos é o mesmo:

- destorroamento, peneiramento e secagem do solo;
- mistura homogênea do solo com cimento;
- adição de água;
- confecção do tijolo;
- cura à sombra, devendo os tijolos ser regados por sete dias, duas a quatro vezes ao dia, dependendo das condições climáticas (CEPED BA, 1978).

Podem ser mencionados as seguintes principais vantagens do tijolo de solo-cimento, segundo o DEPEA (1985) - (Departamento de Estudos e Pesquisas Aplicadas ao BNH):

- a) pode, em geral, ser produzido com o próprio solo do local e no canteiro de obras, reduzindo ou eliminando o custo de transporte;
- b) a regularidade de suas formas, planeza e a lisura de suas faces requerem argamassas de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme;
- c) pode dispensar o uso de revestimento, desde que protegido da ação direta da água, sendo, portanto, recomendável para paredes com tijolos à vista;
- d) não consome combustível na fabricação, por dispensar a queima, e
- e) utiliza basicamente mão de obra não especializada.

2.6. Métodos de Dosagens

2.6.1. Dosagem Experimental

Publicações do DEPEA(1985) mostram que a dosagem experimental é feita por tentativa e baseada na prática. Geralmente, parte-se do traço 1:15 (em volume), que corresponde a 6,30% de cimento em massa e estima-se traços com dois percentuais acima e abaixo do traço base, ou seja, 1:13 e 1:17 (em volume), que correspondem a 7,10% e 5,50% de cimento em massa respectivamente.

O teor recomendado é o menor dentre os testados, que apresente resistência à compressão simples superior a 1,0MPa (10kgf/cm²).

A transformação do traço em volume para o traço em porcentagem é calculado com a seguinte fórmula:

$$C = [1/(1 + s)] \cdot 100, \text{ onde: } C - \text{ consumo de cimento;} \\ s - \text{ volume de solo.}$$

2.6.2. Dosagem Físico - Química

Este método, proposto por Chadda (1971), baseia-se na interação físico-química das partículas dos argilominerais com as do cimento em hidratação, o qual verificou que esta interação podia ser utilizada para a dosagem do teor de cimento requerido pela argila ou pelo solo, para sua estabilização.

Princípio do Método: a interação elétrica do cimento com as partículas argilosas, contribui para mudanças físico-químicas complexas na mistura solo-cimento. As partículas de cimento se comportam na mistura como carregadas

elétricamente e sua presença no solo aumenta a condutividade elétrica da massa solo-cimento compactada. Essa interação em colóides negativamente carregados, juntamente com a hidratação do cimento, produz mudanças físico-químicas rápidas no sistema. Consequentemente, há produção de variações volumétricas substanciais quando a mistura é suspensa em água. E são essas variações volumétricas, durante o processo de interação do solo com o cimento, que proporcionam a determinação do teor de cimento que produz a mistura estável (Rodrigues, 1992).

Várias pesquisas têm sido realizadas no Brasil utilizando este novo método, com o intuito de reduzir o trabalho e o tempo gasto, fatores presentes nas demais dosagens convencionalmente empregadas. Casanova e Ceratti (1985), analisaram 30 solos, os quais confirmaram as observações feitas por Chadda, obtendo-se uma correlação significativa entre os resultados da dosagem físico-química e os obtidos pelas normas da ABCP. Enamorado (1990), comparou o método mecânico simplificado com métodos utilizando a dosagem físico-química, além de Rodrigues (1992) que avaliou a precisão do método através de índices de repetibilidade e reprodutibilidade.

O entusiasmo por este método vem da perspectiva de ser uma alternativa rápida e simples, tendo como principais vantagens, requerer pouca quantidade de amostra, equipamento simples, pessoal tecnicamente não especializado e rapidez de execução.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Neste Capítulo, são apresentados os materiais usados no desenvolvimento da pesquisa, segundo a origem, bem como os métodos.

As normas da ABNT são apenas citadas, enquanto os métodos que não constam desta normalização são descritos e anexados.

3.2. Materiais

3.2.1. Solos

Foram utilizados dois solos de uso comum em obras de engenharia locais, cuja localização é descrita a seguir.

Todos os solos são do tipo "top-soil" que, ao chegarem ao laboratório, foram secos ao ar, destorroados, passados na peneira ABNT nº 4 (de abertura de 4,8 mm) e acondicionados em sacos plásticos para os futuros ensaios

- Solo A - solo proveniente da região denominada "Mutirão", bairro ao sudoeste da cidade de Campina Grande - PB.
- Solo B - solo proveniente da região de construção do "Shopping Center" de Campina Grande, localizado na Av. Manoel Tavares, Campina Grande - PB.

Todos os solos foram classificados segundo a norma simplificada (Vargas, 1977).

3.2.2. Cimento Portland

Foi utilizada uma amostra de cimento Portland composto, CPIIF-32, da marca Zebú, existente no comércio local de Campina Grande - PB. O cimento chegou ao laboratório em sacos de papel "kraft", tendo sido retirado da embalagem original e a seguir colocado em sacos plásticos, lacrados de forma que suas propriedades não fossem alteradas.

3.2.3. Cal

A cal utilizada foi a CARBOMIL que é proveniente de Fortaleza, fabricada no município de Limoeiro do Norte - CE, escolhida por apresentar melhor RCS, de acordo com dados observados na dissertação de mestrado de Lima (1993), que estudou o desempenho mecânico de vários tipos de cais, indicando as proporções adequadas das cais pozolânicas, para quatro tipos de cais, comumente encontradas no comércio local, dentre estas, a CARBOMIL.

A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "kraft", sendo cada saco com 20 kg em massa, tendo sido retirada da embalagem original e, a seguir, colocadas em sacos plásticos resistentes, lacrados de forma que não se modificassem suas propriedades originais.

3.2.4. Pozolana

Foi utilizada uma Pozolana artificial, produzida pela Cia. Paraibana de Cimento Portland (CIMEPAR), localizada na cidade de João Pessoa - PB.

3.2.5. Cais Pozolânicas

Foi utilizada uma cal pozolânica composta por 30% de cal CARBOMIL e 70% de pozolana.

3.2.6. Água

Foi utilizada a água do abastecimento local, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), não nociva à hidratação do cimento, cal e cal pozolânica, visto que é potável.

3.3. Métodos

Os ensaios de caracterização e tecnológicos foram executados de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1, e são descritos a seguir.

3.3.1. Ensaios de Caracterização

3.3.1.1. Nos Solos

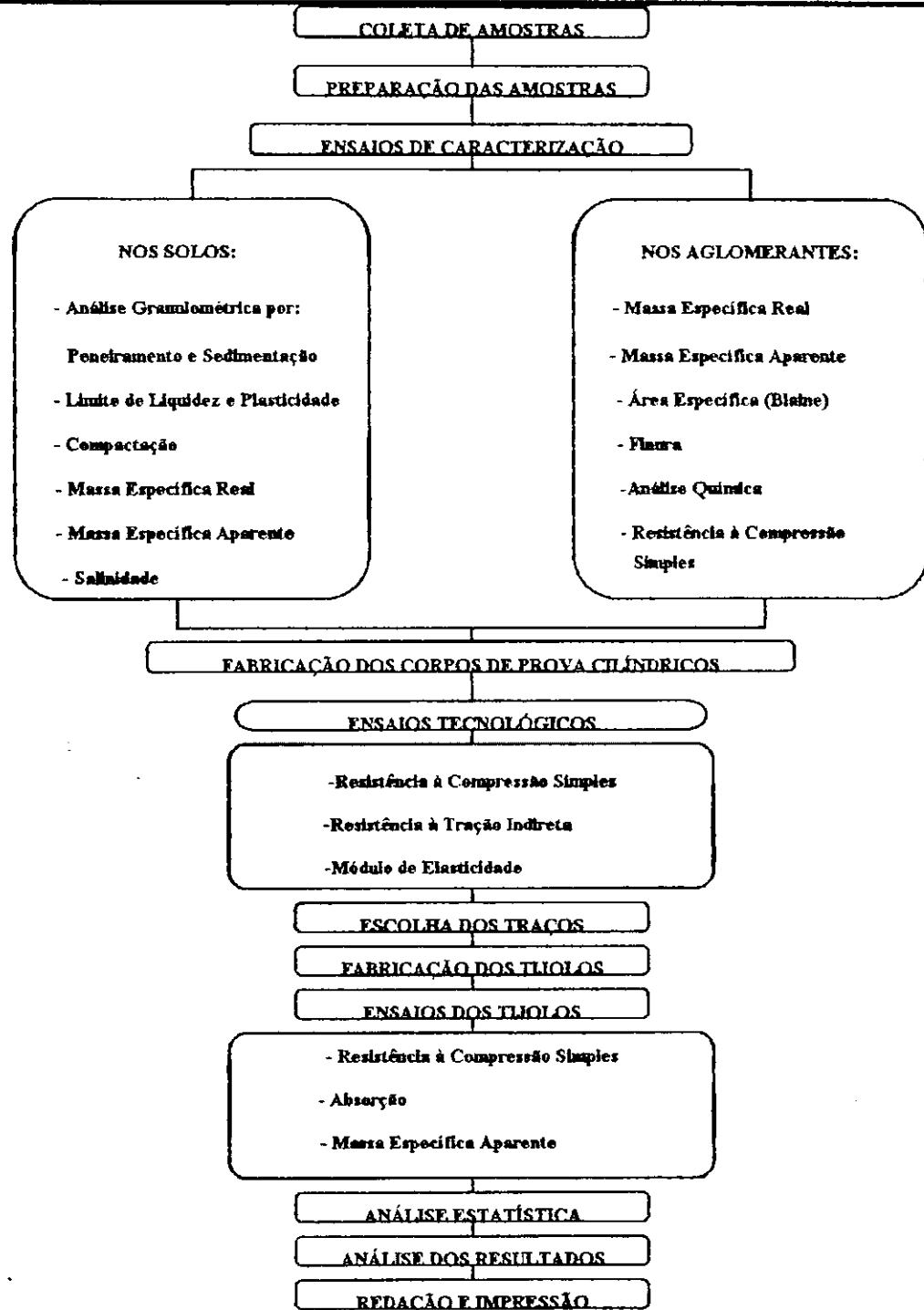


Figura 1 - Fluxograma do Desenvolvimento da Dissertação - "Estudo dos Materiais de Solo-Cimento-Cal e Solo-Cimento-Cal Pozolânica para uso em Habitação Popular".

1. Preparação dos solos - as amostras chegaram ao laboratório em sacos de nylon, secas ao ar, totalmente destorroadas e passadas na peneira ABNT n° 4 (de abertura 4,8 mm). Em seguida foram embaladas em sacos plásticos e guardadas até os eventuais ensaios.
2. Análise Granulométrica - em todos os solos foram realizados o ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação. Este ensaio foi realizado segundo a norma da ABNT, NBR - 7181 (1984).
3. Limites de Atterberg - os Limites de Liquidez (LL) e plasticidade (LP), seguiram, respectivamente, às normas da ABNT, NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984).
4. Compactação - este ensaio seguiu à norma da ABNT, NBR 6457 (1986), resultando nos valores da umidade ótima (HO) e densidade máxima (DM).
5. Massa Específica Real (MER) - seguiu-se neste ensaio à norma da ABNT, NBR 6508 (1984).
6. Massa Específica Aparente (MEA) - realizou-se este ensaio segundo a norma da ABNT, NBR 10838 (1988).
7. Salinidade - realizou-se o ensaio de salinidade através do extrato de saturação. Este ensaio foi realizado pelo método da EMBRAPA (1979), o qual é baseado na condutividade elétrica (CE) (Anexo 1).

3.3.1.2. Nos Aglomerantes

Com os materiais estabilizadores, cal, cimento e pozolana, realizou-se os seguintes ensaios:

1. Massa Específica Real (MER) - ABNT, NBR 6474 (1984)
2. Massa Específica Aparente (MEA) - ABNT, NBR 10838 (1988)

3. Área Específica (Blaine) (AE) - ABNT, NBR 7224 (1984)
4. Finura - ABNT, NBR 11579(1991)
5. Análise Química - LAM - UFPB, Campina Grande - PB e
6. Resistência à Compressão Simples (RCS) - ABNT, NBR 7215 (1991).

3.3.2. Dosagens

3.3.2.1. Dosagem Experimental

Neste método, a determinação do teor de cimento adequado é feita por tentativa, cada solo é ensaiado com vários teores de cimento. A fixação de cimento a ser incorporada a um solo, depende fundamentalmente de se estabelecer quais as características que se pretende do material (Pinto, 1980).

Observa-se que a densidade sob o aspecto prático, é o fator de maior importância (Felt, 1955), logo, através do ensaio de compactação obtém-se a umidade ótima e a densidade máxima, e, com estes parâmetros, moldou-se os corpos de prova.

Os corpos de prova foram moldados partindo-se do traço 1:15 em volume, que corresponde a 6,30% em massa, e com mais dois traços, sendo um com dois percentuais acima e outro com dois percentuais abaixo, ou seja, nos traços 1:13 e 1:17 que correspondem, respectivamente a 7,10% e 5,50% de cimento em massa (Anexo 2).

3.3.2.2. Dosagem Físico-Química

Para comprovar o método proposto por Chadda (1971) e estudado também por Casanova e Cerratti (1985), Enamorado (1990) e Rodrigues (1992), fez-se dosagens físico-químicas em todos os solos, método que baseia-se na interação físico-química das partículas dos argilominerais com as do cimento (Anexo 3).

3.3.3. Ensaio Tecnológico nos Corpos de Prova Cilíndricos

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 x 12,5 cm, no Proctor Normal, segundo a norma da ABNT, MB-3360 (1990), que tiveram um período de cura variando de sete a sessenta dias.

Inicialmente, fez-se um estudo de três traços com solo-cimento em volume, sendo 1:13, 1:15 e 1:17 que correspondem a 7,10%, 6,30% e 5,50% de cimento, em massa, dentre os quais foi escolhido aquele que apresentou melhor desempenho mecânico (1:13) e, neste traço, foi reduzido a quantidade de cimento para adicionar cal variando as porcentagens em 10%, 20%, 30% e 40% e cal pozolânica nas mesmas proporções, com o intuito de verificar o comportamento das propriedades mecânicas, como:

- resistência à compressão simples;
- resistência à tração indireta;
- módulo de elasticidade.

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 cinco corpos de prova. Se um dos valores de resistência diferia da média de $\pm 10\%$, ele era

eliminado e tomava-se a média dos quatro restantes. Se mais de três valores se afastavam de $\pm 10\%$ da média, abandonavam-se os cinco resultados e procedia-se um novo ensaio.

3.3.3.1. Resistência à Compressão Simples (RCS)

O fck, que é a resistência à compressão simples, será denominado aqui por RCS.

Este ensaio foi realizado pelo método norma da ABNT, MB-3361 (1990) com os solos no estado natural e com os traços de solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal-pozolânica.

Com o traço de solo-cimento (SC) escolhido, moldou-se corpos de prova de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica nos seguintes traços:

- 0,1 : 0,9 : 13

- 0,2 : 0,8 : 13

- 0,3 : 0,7 : 13

- 0,4 : 0,6 : 13

onde 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4, corresponde a percentagem de cal ou cal-pozolânica, 0,9; 0,8; 0,7 e 0,6 a percentagem de cimento e 13, a quantidade de solo.

Para cada traço, de cada solo e de cada composição, foram moldados quinze corpos de prova, sendo distribuídos da seguinte forma:

- Cura de 07 dias - cinco corpos de prova;

- Cura de 28 dias - cinco corpos de prova;

- Cura de 60 dias - cinco corpos de prova.

Os corpos de prova foram colocados em sacos e submetidos à cura em uma câmara de areia saturada.

Após cada período de cura, os corpos de prova foram rompidos numa prensa, de marca Lorenhausen que determina em kgf a carga de ruptura (Fotos 1, 2 e 3 - Anexo 4).

Calculou-se a RCS, pela fórmula:

$$RCS = F / A,$$

$$A = \pi D^2 / 4 ,$$

sendo: RCS - resistência à compressão simples, MPa;

F - força de ruptura, kgf;

A - área do corpo de prova, cm²;

D - diâmetro do corpo de prova, cm.

3.3.3.2. Resistência à Tração Indireta (RTI)

A resistência à tração indireta (RTI), conhecida como f_{tk} , seguiu a ABNT, NBR 7222 (1983), cuja fórmula é dada por:

$$RTI = 2.F / \pi.D.l ,$$

sendo RTI - resistência à tração indireta, MPa;

F - força de ruptura, kgf;

D - diâmetro do corpo de prova, cm;

l - comprimento do corpo de prova, cm.

Neste ensaio, adotou-se os mesmos procedimentos de moldagem e cura para a confecção dos corpos de prova, que os adotados para a resistência à compressão simples (Foto 4 - Anexo 4).

3.3.3.3. - Módulo de Elasticidade (E)

O estudo do módulo de elasticidade foi realizado nos materiais em estudo, na tentativa de determinar uma correlação estatística entre os parâmetros de resistência à compressão simples e o tempo medido entre um extremo e outro do corpo de prova cilíndrico.

Para os corpos de prova de solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica, foram realizadas leituras mínimas de tempo, no aparelho denominado **PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)**, o qual consiste em emitir um pulso de onda sobre a amostra a ser testada e medir com exatidão o tempo de sua transmissão através da mesma. Este ensaio é normalizado segundo a ABNT, NBR 8802 (1985). Com este tempo, calculou-se a velocidade de pulso de onda, pela fórmula:

$V = L / t$ onde: V - velocidade de propagação, km/s;

L - maior dimensão do corpo de prova, m;

t - tempo efetivo de propagação, μ s.

Foram confeccionados, para cada traço, dez corpos de prova, sendo que, cinco foram rompidos à compressão simples e cinco à tração indireta, após realizadas as leituras (Foto 5 - Anexo 4).

Com os resultados plotou-se gráficos $V \times RCS$ e, por intermédio destes, calculou-se o módulo de elasticidade, onde entra-se no gráfico, já existente, com a velocidade em km/s.

Para fins de comparação, adotou-se as expressões recomendadas pela ABNT, NB-1 (1978) e CEB (Comité Euro-Internacional do Béton), a saber:

$$E = 660000 \sqrt{f_{cj}} \text{ - N / cm}^2 \text{ - NB-1}$$

$$E = 18000 \sqrt{\gamma^3 f_{cj}} \text{ - N / cm}^2 \text{ - CEB}$$

onde: f_{cj} - resistência à compressão simples aos j dias de idade,

em MPa na expressão da NB-1 (1978) e N/cm^2 na

expressão do CEB;

γ - peso específico do concreto, tf / m^3 .

As fórmulas, tanto da NB-1 como do CEB, são empíricas, e os valores 660.000 e 18000, multiplicativos das mesmas, já dão os resultados em N/cm^2 , entrando com os valores nas unidades descritas acima.

3.3.4. Fabricação dos Tijolos

Os tijolos foram fabricados em prensas manuais padronizadas, segundo a norma ABNT - NBR 10832 (1989), onde moldava-se três tijolos ao mesmo tempo, com dimensões de 23 x 11 x 5 cm, (que segundo ABNT são designados como tipo II) sendo preparada uma mistura que correspondia a uma moldagem de 6 tijolos, levando um tempo inferior a uma hora. Segundo o DEPEA (Departamento de Estudos e Pesquisas Aplicadas ao BNH) (1985), a quantidade de cimento e solo a

ser misturada deverá ter um volume suficiente para fabricar tijolos durante uma hora de funcionamento da prensa.

De cada mistura deverão ser moldados, no mínimo, 10 tijolos na prensa manual, com os quais serão realizados os ensaios, (Anexo 4).

A verificação da umidade de moldagem da mistura é feita com razoável precisão, da seguinte forma:

a) toma-se um punhado da mistura e aperta-se energicamente entre os dedos e a palma da mão, ao abrir a mão, o bolo deverá ter a marca deixada pelos dedos;

b) deixando-se cair o bolo de uma altura aproximada de 1m, sobre uma superfície dura, ele deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície, se isto não ocorrer, a mistura está muito úmida.

3.3.4.1. Ensaios Tecnológicos nos Tijolos

Para os ensaios tecnológicos nos tijolos, escolheu-se traços de acordo com os resultados de RCS obtidos nos corpos de prova cilíndricos, tendo-se como base o traço que apresentou uma resistência mínima de 1,0 MPa aos 28 dias de cura.

Para a composição solo-cimento-cal, tem-se os traços:

0,1 : 0,9 : 13, com 10% de cal, para o solo A e

0,4 : 0,6 : 13, com 10% de cal, para o solo B.

Para a composição solo-cimento-cal pozolânica, tem-se os traços:

0,1 : 0,9 : 13, com 10% de cal pozolânica, para o solo A, e

0,4 : 0,6 : 13, com 49% de cal pozolânica, para o solo B.

Após a fabricação dos tijolos, colocou-os à sombra, empilhados dois a dois e, passado um período de 6 hs, estes foram aguados com regador tipo chuveiro, com molhagens sucessivas durante um período de 7 dias, a fim de garantir a cura adequada.

A seguir, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples, absorção e massa específica aparente.

3.3.4.1.1. Resistência à Compressão Simples

Este ensaio foi realizado pelo método da ABNT, NBR 8492 (1984).

Para cada traço de cada solo moldou-se trinta tijolos, distribuídos da seguinte forma:

- cura de 07 dias - 10 tijolos;
- cura de 28 dias - 10 tijolos;
- cura de 60 dias - 10 tijolos.

Ao completar cada tempo de cura, os tijolos foram saturados, partidos ao meio e capeados com uma nata de cimento. Depois de um certo período, eram colocados na câmara úmida por 24 hs, para ruptura.

Após a ruptura dos tijolos e de posse da força em kgf, calculou-se a RCS, pela fórmula:

$$RCS = \frac{F}{A}, \quad \text{onde } A = \frac{b}{2} \times h$$

sendo, RCS - resistência à compressão simples, MPa;

F - força de ruptura, kgf;

b - base do tijolo, cm;

h - altura do tijolo, cm;

A - área do tijolo, cm².

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 dez corpos de prova. Se um dos valores de resistência diferia da média de $\pm 10\%$, ele era eliminado e tomava-se a média dos nove restantes. Se mais de sete valores se afastavam de $\pm 10\%$ da média, abandonavam-se os dez resultados e procedia-se um novo ensaio.

3.3.4.1.2. Absorção (Abs)

A realização deste ensaio, seguiu a norma da ABNT, NBR-8492 (1984).

Para cada traço de cada solo, moldou-se trinta corpos de prova, sendo dez para cada período de cura, a saber: 7, 28 e 60 dias.

O teor de absorção foi calculado pela fórmula:

$$\text{Abs} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100,$$

onde: Abs- absorção de água, %.

M_1 - massa do tijolo seco em estufa, g;

M_2 - massa do tijolo saturado, g;

3.3.4.1.3. Massa Específica Aparente (MEA)

A massa específica aparente seguiu o método da ABNT, NBR-10838 (1988) e foi calculada pela fórmula:

$$MEA = \frac{P}{V}$$

$$MEA = \frac{M_1}{M_1 - M_3}$$

onde: MEA - massa específica aparente, g/cm³;

M₁ - massa do tijolo seco em estufa, g;

M₃ - massa do tijolo imerso, g;

V = M₁ - M₃, cm³;

P = M₁, g.

Com estes ensaios, encerrou-se a parte prática e obteve-se os resultados que definiram as conclusões e recomendações desta pesquisa. Eles representam a etapa mais importante porque forneceram subsídios capazes de confirmar as premissas que justificassem a sua execução, além de determinarem as recomendações que deverão ser observadas na continuação deste estudo, em futuras investigações.

3.4. Análise Estatística

Com os resultados do tempo (t), obtidos no aparelho PUNDIT, através do ensaio de ultra-som, nos corpos de prova cilíndricos e a resistência à compressão simples (RCS), realizada após a leitura do tempo, nos mesmos corpos de prova, foram efetuadas análises estatísticas através de correlações lineares simples, processadas em computador IBM, utilizando-se o programa SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), versão H (Nie et alii, 1975).

A equação que relaciona este tipo de ajustamento é $Y = A + B X$, onde X e Y são, respectivamente, as variáveis dependentes e independentes; A a intersecção com o eixo y e B a inclinação da reta.

O coeficiente de correlação (R), expressa o grau de relacionamento entre as duas variáveis, quando esta correlação inexistente, R tem valor zero, por outro lado, se existe uma ótima correlação, R é igual a um.

O nível de significância (α) representa o nível no qual a relação entre duas variáveis é significativa. Quanto mais próximo de 0% este valor, mais significativa será a relação entre as duas variáveis. Porém, um resultado pode ser considerado significativo, quando a probabilidade calculada é menor que 5% e altamente significativa quando a probabilidade calculada é menor que 1% (Spiegel, 1980 e Neves, 1989).

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Introdução

Os resultados e discussões dos ensaios de caracterização e tecnológicos, realizados durante a pesquisa, são apresentados neste capítulo, separados de acordo com o tipo de ensaio.

4.2 - Ensaio de Caracterização dos Solos

A caracterização física dos solos A e B, é apresentada na Tabela 1, obtidos de acordo com a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg, massa específica real e aparente, compactação e ensaio de salinidade.

4.2.1 - Análise Granulométrica

De acordo com a classificação unificada (Vargas, 1977), os solos tiveram a seguinte denominação:

- **Solo A - SM**, areia siltosa, com 99% de material passando em peneira ABNT nº 4 (de abertura 4,8 mm) e 31% passando na peneira ABNT nº 200 (de abertura 0,074 mm), com relação à amostra total e amostra parcial, respectivamente, tendo 48% de areia fina.

- **Solo B - SM**, areia siltosa, com praticamente 100% de material passando na peneira ABNT nº 4 (de abertura 4,8 mm) e 19,3% passando na peneira ABNT nº 200 (de abertura 0,074 mm), com relação à amostra total e amostra parcial,

respectivamente, tendo um maior percentual de areia grossa, ou seja, 34% retido entre as malhas de 4,8 mm e 0,84 mm.

4.2.2 - Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg, que indentificam a plasticidade dos solos, de acordo com os limites de liquidez e plasticidade, resultando a diferença destes no índice de plasticidade, apresentaram os seguintes valores:

- solo A: $LL = NL$

$LP = NP$

$IP = 0$

- solo B: $LL = NL$

$LP = NP$

$IP = 0$

Os solos A e B, quanto aos limites de Atterberg, apresentaram-se com as mesmas características, no entanto, o solo A, por ter um maior percentual de areia fina (20% a mais), diferenciava-se do B, na trabalhabilidade.

4.2.3 - Massa Específica Real (MER) e Massa Específica Aparente (MEA)

Nos solos em análise, a massa específica real, expressa em g/cm^3 , foi de $2,63 g/cm^3$ para o solo A e de $2,67g/cm^3$ para o solo B .

A massa específica aparente, expressa na mesma unidade, foi de $1,40 g/cm^3$ para o solo A e $1,44 g/cm^3$ para o solo B..

Os maiores valores, tanto de MER como MEA, foram obtidos com o solo B.

4.2.4. Densidade Máxima (DM) e Umidade Ótima (HO)

Os valores de densidade máxima e umidade ótima, obtidos através dos ensaios de compactação do solo, tiveram os seguintes valores:

Densidade Máxima: solo A - 1,970 g/cm³

solo B - 1,990 g/cm³

Umidade Ótima: solo A - 10,00%

solo B - 6,20%

O ensaio de compactação apresentou maior densidade para o solo B e, em consequência uma menor umidade, dá-se esse fenômeno devido o solo B ser mais arenoso que o solo A, pois solos com estas características, são estabilizados mais facilmente, no entanto é necessário uma certa quantidade de partículas argilosas, para dar coesão ao material.

4.2.5. Salinidade

A quantidade de sais solúveis presente no solo, determinada através do extrato de saturação, ficou abaixo de 0,50%.

Considera-se que, um grau de salinidade é elevado, podendo ser prejudicial ao solo, quando este valor for acima de 4% (EMBRAPA, 1979). Neste caso, é necessário determinar-se as porcentagens de cátions (Ca, Mg, Na e K) e ânions (Cl, HCO₃, CO₃ e SO₄) presentes.

Nos solos em estudo, verificou-se que todos eles tiveram o teor de salinidade bem abaixo de 4%, sendo de 0,030 para os dois solos, não sendo necessário determinar a porcentagem de ânions e cátions.

4.3. Ensaio de Caracterização dos Aglomerantes

Na Tabela 2, são apresentados os valores obtidos para massa específica real (MER), massa específica aparente (MEA), área específica (AE) e finura da cal, pozolana e cimento.

4.3.1. Massa Específica Real

Os resultados apresentaram uma variação de 2,2420 g/cm³ para cal Carbomil a 2,7005 g/cm³ para a pozolana. O cimento, apresentou valor de 3,0654 g/cm³, sendo a massa específica do cimento a de maior valor.

4.3.2. Massa Específica Aparente

A massa específica aparente variou de 0,5000 g/cm³ para cal Carbomil a 0,8700 g/cm³ para a pozolana, enquanto o cimento ficou com um valor superior aos dois anteriores, sendo de 1,1500 g/cm³.

4.3.3. Área Específica

Os resultados obtidos para as áreas específicas determinadas pelo método de Blaine foram de 1,1500 g/cm³ para a cal Carbomil, 1,1780 g/cm³ para a pozolana e 0,5588 g/cm³ para o cimento. A cal Carbomil apresentou uma área específica um pouco superior ao valor encontrado para a mesma cal por Lima (1993) que foi de 1,1461 g/cm³.

4.3.4. Finura

Dentre os valores encontrados, a pozolana foi a que obteve maior grau de finura, 5,5400%, seguido do cimento com 1,7000% e da cal Carbomil com 1,5500%.

O cálculo do índice de finura é dado pela expressão:

$F = (R/P) \times 100$, onde: R - resíduo do cimento na peneira de nº 200 (abertura de 0,074mm);
P - amostra inicial (50g).

A norma ABNT - NBR 7224 (1984) limita a porcentagem de material retido na peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,074 mm), a um máximo de 15%, estando todos os aglomerantes, dentro das especificações.

Conclui-se que é de grande importância realizar o ensaio de finura nos aglomerantes. No cimento, esta característica influi diretamente em muitas de suas propriedades. Quanto mais fino for o cimento, mais rapidamente se dará o início da pega.

4.3.5. Análise Química

Na Tabela 3, são apresentadas as composições químicas das amostras de cal carbomil, pozolana e do cimento.

A cal Carbomil, trata-se de uma cal calcítica, com teor de CaO de 70,61% e a presença de MgO correspondente a 2,78%.

A pozolana, teve a soma de seus percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ igual a 81,25%, dentro dos limites estabelecidos por Souza Santos (1975) que é de no mínimo, 70%.

A análise química foi realizada no Laboratório de Análises Mineraiis (LAM) do CCT/PRAI/UFPB, Campina Grande - PB.

4.3.6. Resistência à Compressão Simples do Cimento

No ensaio para determinação da resistência à compressão simples do cimento, foi utilizado um traço 1:3, em peso, com fator água/cimento de 0,48. De acordo com este ensaio, o cimento apresentou resistência, aos 28 dias de cura,

superior a 32 MPa, resistência mínima exigida para este tipo de cimento conforme a especificação EB-2138 (1991).

4.4. Dosagens

Para a realização dos ensaios tecnológicos, adotou-se dois tipos de dosagens, a dosagem experimental usada em solo-cimento na fabricação de materiais alternativos e, a dosagem físico-química, caracterizada pela rapidez e facilidade de execução.

4.4.1. Dosagem Experimental

Partindo-se do traço 1 : 15, em volume, correspondente a 6,30% em massa (usualmente utilizado em solo-cimento), foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 x 12 x 5 cm, no Proctor Normal, com dois percentuais acima e abaixo, ou seja, 1 : 17 e 1 : 13, que correspondem a 5,50% e 7,10% em peso, resultados que serão discutidos nos ensaios tecnológicos.

4.4.2. Dosagem Físico-Química

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados do método proposto por Chadda (1971) efetuado nos solos em análise, a fim de comparar os resultados e comprovar a eficiência do método.

Para o solo A, os resultados da dosagem físico-química evidenciam uma variação volumétrica (ΔV) de 200%, que corresponde a uma porcentagem de cimento em massa de 7%, sendo a mesma porcentagem do traço de solo-cimento que ofereceu melhor resistência à compressão simples neste solo, na dosagem experimental.

No solo B, a variação volumétrica (ΔV) foi de 233% que corresponde a uma porcentagem de cimento em massa de 5%, quantidade também equivalente à dosagem experimental.

4.5. Ensaio Tecnológicos

Neste item, serão discutidos os valores de resistência à compressão simples, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade.

4.5.1. Resistência à Compressão Simples (RCS)

Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, são apresentados os valores obtidos para a RCS nos corpos de prova cilíndricos dos solos no estado natural e nas suas diversas composições com solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica. Estes valores estão plotados nas Figuras 2 a 8.

A Tabela 6, mostra os resultados da RCS dos corpos de prova cilíndricos dos solos no estado natural, expostos ao ar e sem sofrer qualquer processo de umedecimento, visto que eram amostras compactadas no seu estado original sem nenhum aditivo.

A Tabela 7, mostra os resultados da RCS da composição solo-cimento, nos traços 1:13, 1:15 e 1:17, em volume, dos solos A e B, verificando-se:

- 1) os solos A e B apresentaram valores de RCS, aos 7 dias de cura, nos traços 1:13 e 1:15 superiores a 1,00 MPa. No traço 1:17, apenas o solo A, aos 7 dias de cura, apresentou RCS um pouco inferior a 1,00 MPa, sendo 0,90 MPa para este e 1,40 MPa para o solo B;
- 2) aos 28 dias de cura, os solos A e B, apresentaram valores de RCS acima de 1,00 MPa, em todos os traços, sendo valores superiores aos obtidos com 7 dias de

cura, o que era esperado, pois, geralmente, a RCS no solo-cimento aumenta com o período de cura;

3) aos 60 dias de cura, os solos A e B, apresentaram valores de RCS, nos traços 1:13, 1:15 e 1:17, variando de 1,10 MPa a 2,00 MPa no solo A e de 1,90 MPa a 3,30 MPa no solo B;

4) os melhores resultados são verificados no solo B que, aos 60 dias de cura, no traço 1:13 de solo-cimento, apresentou uma RCS de 3,30 MPa;

5) há uma diminuição da RCS ao reduzir a porcentagem de cimento Portland, porém os solos A e B apresentaram valores de RCS, na sua maioria, acima de 1,00 MPa.

Para prosseguimento da pesquisa, adotou-se o traço 1 : 13 em volume nos dois solos A e B, visto que este traço apresentou melhor desempenho mecânico, como era esperado, uma vez que teve maior quantidade de cimento.

A Tabela 8 apresenta os resultados da composição solo-cimento-cal e, conforme aumentava-se as porcentagens de cal em 10%, 20%, 30% e 40%, a RCS diminuía, tanto para o solo A como para o solo B, porém aumentava com o tempo de cura, podendo-se concluir que:

1) o solo A apresentou valores de RCS, aos 7 dias de cura, abaixo de 1,00 MPa quando se substituiu, gradualmente, a quantidade de cimento por 10%, 20%, 30% e 40% de cal;

2) o solo B, aos 7 dias de cura, nos traços com 20% e 30% de cal, apresentou valores de RCS iguais de 1,35 MPa e, nos traços com 10% e 40%, valores de RCS de 0,95 MPa e 0,74 MPa, respectivamente;

3) aos 28 dias de cura, o solo A apresentou apenas um valor de RCS acima de 1,00 MPa, com a porcentagem de 10% de cal. O solo B, apresentou em todos os

traços, valores superiores a 1,00 MPa, variando de 1,06 MPa (com 40% de cal) a 2,04 MPa (com 10% de cal);

4) aos 60 dias de cura, nos traços com 10% e 20% de cal, o solo A apresentou valores de RCS acima de 1,00 MPa, sendo de 1,48 MPa e 1,06 MPa. Com 30% de cal a RCS caiu para 0,90 MPa e com 40% caiu ainda para 0,80 MPa. O solo B, neste mesmo tempo de cura, apresentou valores de RCS, variando de 1,20 MPa a 2,56 MPa;

5) o solo B, quando em substituição do cimento por cal, apresentou melhores resultados que o solo A;

6) na composição solo-cimento-cal, verificou-se também que a RCS aumentou com o tempo de cura, em todos os traços.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos solos A e B, aditivados com 10%, 20%, 30% e 40% de cal pozolânica. Com o aumento da porcentagem de cal pozolânica e conseqüente diminuição do teor de cimento, a RCS diminuía, mas aumentava com o tempo de cura, verificando-se que:

1) o solo A, com 10% de cal pozolânica, apresentou valores de RCS de 1,15 MPa aos 7 dias de cura, diminuindo para 1,10 MPa aos 28 dias de cura e, aumentando para 1,26 MPa aos 60 dias de cura. Esperava-se que a RCS aumentasse com o tempo de cura, visto que as reações pozolânicas tendem a aumentar com o passar do tempo;

2) nos traços com 20%, 30% e 40% de cal pozolânica, o solo A apresentou RCS abaixo de 1,00 MPa, mas todas amostras tiveram suas resistências aumentando com o período de cura;

3) o solo B, apresentou melhores valores de RCS que o solo A, em todos os traços e em todos os períodos de cura, variando de 1,13 MPa aos 7 dias de cura com 40% de cal pozolânica a 3,22 MPa aos 60 dias de cura, com 10% de cal pozolânica. Neste solo, a RCS aumentou com o período de cura;

- 4) comparando-se os resultados desta composição com a composição solo-cimento-cal, nota-se que tanto para o solo A como para o solo B, os traços da composição solo-cimento-cal pozolânica apresentaram melhor desempenho mecânico;
- 5) observa-se ainda que o solo B, desempenhou-se melhor que o solo A em todos os traços e composições.

4.5.2. Resistência a Tração Indireta (RTI)

Os resultados da resistência à tração indireta, estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12, que correspondem as Figuras de 9 a 15.

A Tabela 10 mostra os resultados da RTI para os solos A e B, nos traços 1:13, 1:15 e 1:17 de solo-cimento, em volume, onde observou-se um crescimento da RTI com o tempo de cura e uma diminuição da mesma com a redução da quantidade de cimento.

O solo A apresentou maior RTI aos 60 dias de cura, no traço 1:13 em volume de SC, que corresponde a 7,10% em massa de cimento, sendo este valor de 0,28MPa. O menor valor da RTI para o solo A, foi observado aos 7 dias de cura, no traço 1:17, traço com menor quantidade de cimento.

O solo B apresentou maior RTI aos 60 dias de cura, também no traço 1:13 em volume de SC, sendo este valor igual ao do solo A e de 0,28 MPa. Os demais valores de RTI, em todos os tempos de cura e em todos os traços, foram superiores aos do solo A.

A Tabela 11 mostra os resultados da RTI para os solos A e B com 10%, 20%, 30% e 40% de cal. Com o aumento da substituição das porcentagens de cal no traço de solo-cimento, a RTI diminuía ou não se modificava, sendo inversamente proporcional ao aumento da cal, mas aumentava com o tempo de cura, exceto nos traços com 30% e 40% de cal no solo B. Os dois solos apresentaram

maiores valores no traço com 10% de cal, no tempo de cura de 60 dias, sendo 0,16 MPa para o solo A e 0,37 MPa para o solo B. O solo A apresentou menor valor de RTI (0,03 MPa), aos 7 dias de cura, na composição com 40% de cal e, o solo B, aos 28 dias de cura, na composição com 30% de cal (0,07 MPa).

A Tabela 12 apresenta o comportamento dos solos A e B com 10%, 20%, 30% e 40% de cal pozolânica.

O solo A apresentou resultados confusos, nos traços com 10%, 20% e 30% de cal pozolânica, ou a RTI diminuía com o tempo de cura, ou simplesmente não se modificava, exceto no traço com 40% de cal pozolânica, onde a RTI aumentou de 0,05 MPa aos 7 dias de cura para 0,10 MPa aos 28 dias de cura e, chegando a 0,14 MPa, aos 60 dias de cura. O maior valor de RTI para este solo, ocorreu aos 7 dias de cura, no traço com 10% de cal (0,15 MPa), diferentemente do que ocorreu com o mesmo solo com adição de cal. Apenas com adição de 40% de cal, a RTI aumentou com o tempo de cura. Já o solo B, teve a RTI crescente com a variação do tempo, comportamento semelhante quando adicionou-se cal, porém com resultados superiores, quando adicionou-se cal pozolânica.

De uma maneira geral o solo B comportou-se melhor que o solo A, tanto com adição de cal, como com adição de cal pozolânica, apresentando maior RTI com a adição de cal pozolânica.

4.5.3. Módulo de Elasticidade (E)

As Tabelas 13 e 14 mostram os resultados do módulo de elasticidade para os corpos de prova cilíndricos de solo-cimento, no traço 1:13, nos tempos de 7, 28 e 60 dias de cura, calculados em função da velocidade e com as fórmulas empíricas da NB-1 e CEB, para o concreto.

As Tabelas 15, 16, 17 e 18, mostram os resultados do módulo de elasticidade para as composições de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica, em todos os períodos de cura.

Com os resultados de tempo obtidos no aparelho denominado "PUNDIT", calculou-se a velocidade em km/s (que é a relação entre a distância percorrida por uma vibração ou distúrbio durante um intervalo de tempo) e com esta entrou-se em gráficos (Figura 18), já existentes, para encontrar o módulo de elasticidade que, neste caso, é função da velocidade.

A curva que permite o cálculo de E parte de valores de velocidades de 3,6 km/s. Os valores encontrados nos corpos de prova cilíndricos em todas as composições, ou seja, SC, SCC e SCCP, de todos os traços, ficaram abaixo deste valor. No solo A o máximo valor da velocidade foi de 1,93 km/s no traço 0,1:0,9:13 de SCC, aos 60 dias de cura e 2,76 km/s no solo B, no traço 1:13 de SC, aos 28 dias de cura. Como estes valores foram inferiores ao valor inicial do gráfico, foi necessário fazer-se uma adaptação da curva. Observa-se que esta curva comporta-se como uma assíntota tendendo a ficar constante no valor de 10 KN/mm². Portanto, este valor foi o módulo de elasticidade adotado para o solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica, nos traços estudados, em todos os períodos de cura.

Observou-se também que, quanto maior a resistência menor o tempo que a onda levava para atravessar o corpo de prova, podendo-se concluir que quanto mais bem compactado o material, maior a velocidade de propagação da onda, excetuando-se o traço 1:13 de solo-cimento do solo A e do solo B, e traço 0,3:0,7:13 de solo-cimento-cal pozolânica do solo B.

As fórmulas da ABNT, NB-1 (1978) e CEB para cálculo do módulo de elasticidade do concreto, adotadas por Chagas Filho (1986), para fins de

comparação com o concreto laterítico, foram também adotados para fins de comparação com o solo-cimento, solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica.

O solo A, de acordo com a ABNT, NB-1 (1978) apresentou valores inferiores aos do "PUNDIT" e superiores aos do CEB. O solo B apresentou resultados superiores ao solo A tanto para o cálculo com a NB-1 como com o CEB, confirmando sua melhor resistência, pois quanto maior o módulo de elasticidade, maior a resistência e este aumenta com o tempo de cura, fato verificado nos dois solos.

4.6. Ensaio nos Tijolos (Anexo 4)

As Tabelas 19, 20 e 21 mostram os resultados de RCS, em todos os períodos de cura, para os solos A e B aditivados com cimento, cal e cal pozolânica, cujos gráficos estão plotados nas Figuras 17 e 18.

A escolha dos traços para os tijolos, teve como base estudos recentes publicados pelo IPT (1994), na revista *Téchne*, que admite uma RCS de, no mínimo, 1,00 MPa aos 28 dias de cura para blocos cerâmicos, segundo a ABNT - NBR 7171 (1992).

O solo A, nos corpos de prova cilíndricos, obteve RCS de 1,10 MPa, tanto para o aglomerante cal como para a cal pozolânica, no traço 0,1:0,9:13 com o qual foram confeccionados os tijolos.

O solo B, mostrou-se mais econômico, com a substituição tanto da cal como da cal pozolânica, permitiu-se uma redução de 40% no uso do cimento. Nos corpos de prova cilíndricos adquiriu-se valor acima de 1,00 MPa aos 28 dias de cura no traço 0,4:0,6:13, sendo este o traço usado na confecção dos tijolos deste solo.

Observando-se a Tabela 19, pode-se dizer que:

- 1) a RCS do solo A, na composição solo-cimento, foi de 1,35 MPa aos 7 dias de cura, aumentando para 1,75 MPa aos 28 dias de cura e 2,10 MPa aos 60 dias de cura, sendo superior aos resultados dos corpos de prova cilíndricos, nos períodos de 28 e 60 dias;
- 2) no solo B, a RCS também aumentou com o tempo de cura, variando de 1,88 MPa aos 7 dias de cura para 3,10 MPa aos 60 dias de cura, sendo nos três períodos de cura inferior aos resultados dos corpos de prova cilíndricos;
- 3) nota-se que, assim como nos corpos de prova cilíndricos, o solo B, nos tijolos apresentou valores de resistências superiores aos do solo A;
- 4) os resultados da RCS no traço de solo-cimento nos tijolos, foram próximos aos resultados obtidos nos corpos de prova cilíndricos no mesmo traço, variando, às vezes para mais ou para menos, mas com resultados bem próximos.

Na Tabela 20, tem-se valores de RCS, no traço de solo-cimento-cal, para os solos A e B, na qual podemos destacar:

- 1) a RCS, com a adição da cal, nos dois solos, aumentou consideravelmente em relação aos resultados dos corpos de prova cilíndricos, no mesmo traço;
- 2) o solo A apresentou resultados variando de 1,36 MPa a 2,30 MPa, no traço de SCC 0,1 : 0,9 : 13, enquanto nos corpos de prova cilíndricos o máximo valor obtido foi de 1,48 MPa, neste traço, aos 60 dias de cura;
- 3) o solo B apresentou resistências maiores que o solo A, fenômeno já observado nos outros traços, variando de 1,52 MPa a 2,85 MPa, sendo estes resultados maiores que os observados nos corpos de prova cilíndricos, cujo máximo foi de 1,20 MPa, neste traço, aos 60 dias de cura.

Na Tabela 21, tem-se a RCS dos tijolos, na mistura de solo-cimento-cal pozolânica, onde observa-se um aumento da mesma nos dois solos em estudo. Analisando a Tabela, destaca-se que:

- 1) o tijolo confeccionado com a mistura de solo-cimento-cal pozolânica foi o que apresentou maiores valores de RCS, tanto em relação aos corpos de prova cilíndricos, quanto em relação às outras composições;
- 2) a RCS, nos tijolos de SCCP, no traço 0,4 : 0,6 : 13, apresentou valores de 2,30 MPa aos 7 dias de cura, 3,25 MPa aos 28 dias de cura e, 4,15 MPa aos 60 dias de cura, quando o máximo obtido neste mesmo traço, nos corpos de prova cilíndricos, foi de 1,68 MPa aos 60 dias de cura;
- 3) o maior valor observado nesta composição, nos corpos de prova cilíndricos, foi de 3,22 MPa, no traço 0,1 : 0,9 : 13, onde substituiu-se 10% de cimento pela composição SCCP;
- 4) observa-se ainda o melhor acabamento do tijolo, quando adiciona-se cal pozolânica à mistura, ficando este com uma superfície mais lisa.

As Tabelas 22 e 23 mostram os resultados da absorção e massa específica aparente nos diversos traços do solo A e B, respectivamente, estando de acordo com valores prescritos por normas da ABNT.

O solo A apresentou um teor de absorção maior que o solo B, talvez por apresentar uma granulometria mais fina, sendo os maiores valores para a composição SCCP, nos dois solos.

A MEA, variou de 2,19 g/cm³ a 2,35 g/cm³ para o solo A e de 2,24 g/cm³ a 2,37 g/cm³ para o solo B, aos 7 dias de cura, sendo relativamente maior para o solo B. Aos 28 e 60 dias de cura, o valor de MEA, em todas as composições, baixou consideravelmente, chegando a um mínimo de 1,15 g/cm³, no traço 1:13 de solo-cimento, devendo-se observar que não foi utilizado nenhum método de proteção contra absorção, como por exemplo, parafina.

4.7. Análise Estatística

Os resultados obtidos pelas análises estatísticas através de correlações simples entre o tempo (t), medido no corpo de prova cilíndrico, e a resistência à compressão simples, no traço 1:13 de solo-cimento para o solo A e para o solo B, para os tempos de cura de 7, 28 e 60 dias, estão apresentados nas tabelas 24 e 25.

A seguir serão discutidos os resultados obtidos pela análise estatística por regressão linear.

4.7.1. Correlações Estatísticas entre o Tempo (t) e a Resistência à Compressão Simples (RCS)

As Tabelas 24 e 25, mostram os resultados obtidos pela análise estatística, através de correlações lineares simples, entre o tempo de propagação da onda ultrasônica e a resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos de solo-cimento no traço 1:13, curados por períodos de 7, 28 e 60 dias.

Os resultados obtidos pela análise de regressões lineares simples, em termos de coeficiente de correlação, nível de significância, constante A e B e as equações entre os parâmetros t x RCS, conduziram a bons resultados, tendo o coeficiente de correlação bem próximo de um, o que significa dizer que existe uma correlação linear entre estes parâmetros, tanto no solo A como no solo B.

O solo B, comportou-se semelhantemente ao solo A, com relação às correlações lineares entre t e RCS. Os valores do coeficiente de correlação para este solo, assim como para o solo A, mostraram correlações altamente significativas, pois, segundo Neves (1989) valores de α abaixo de 1% são considerados como altamente significativos.

CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS		
Ensaio	Solos	
Análise Granulométrica (% retida)	A	B
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	1,0	1,0
Areia Grossa (4,8 mm a 0,84 mm)	11,0	34,0
Areia Média (0,84 mm a 0,25 mm)	22,0	27,0
Areia Fina (0,25 mm a 0,05 mm)	48,0	28,0
Silte + Argila (abaixo de 0,05 mm)	18,0	10,0
TOTAL	100,0	100,0
Retido entre 2,0 mm e 0,074 mm	65,0	76,0
Argila (abaixo de 0,005 mm)	8,8	5,0
Limite de Liquidez (LL - %)	NL	NL
Limite de Plasticidade (LP - %)	NP	NP
Índice de Plasticidade (IP - %)	0	0
Massa Específica Real (MER - g/cm ³)	2,63	2,67
Massa Específica Aparente (MEA - g/cm ³)	1,40	1,44
Densidade Máxima (DM - g/cm ³)	1,970	1,990
Umidade Ótima (HO - %)	10,00	6,20
Sais (%)	0,030	0,030
Classificação dos Solos (segundo Vargas)	SM	SM

Tabela 1 - Caracterização física dos solos A e B

SM - Areias siltosas

Amostras	MER (g/m ³)	MEA (g/m ³)	AE (m ² /g)	Finura (%)
Cal	2,2420	0,5000	1,1500	1,5500
Pozolana	2,7005	0,8700	1,1780	5,5400
Cimento	3,0654	1,1500	0,5588	1,7000

Tabela 2 - Caracterização Física das Amostras de Cal, Pozolana e Cimento.

Amostras	PR	RI	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Cal	23,04	0,02	0,78	0,23	0,61	70,61	2,78	0,20	traços
Pozolana	1,55	16,94	66,26	2,32	12,67	traços	traços	0,08	traços
Cimento	8,22	0,80	17,48	2,31	6,89	56,55	7,44	0,06	0,24

Tabela 3 - Composição Química da Cal, Pozolana e Cimento

% de Cimento em peso	Leituras Diárias do Volume Sedimentado (cm ³) (Provetas de 250 ml)							Variação Volumétrica (ΔV) (%)
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	
0	20	21	19	21	20	20	20	0
3	35	45	50	50	49	48	47	138
5	39	54	60	60	60	58	57	185
7	41	59	63	61	63	60	59	200
9	40	51	54	54	55	54	53	162
11	36	46	49	49	49	49	49	133
13	36	45	46	46	46	46	45	119

Tabela 4 - Dosagem Físico-Química do Solo A.

Teor ideal de cimento - 7 % em peso.

ΔV - Maior leitura ocorrida na porcentagem de cimento em estudo menos a maior leitura ocorrida na porcentagem 0% de cimento, dividido pela maior leitura ocorrida em 0% vezes 100.

% de Cimento em peso	Leituras Diárias do Volume Sedimentado (cm ³) (Provetas de 250 ml)							Variação Volumétrica (ΔV) (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	
0	18	16	18	18	18	18	16	0
3	34	40	46	48	46	44	44	167
5	42	56	58	60	58	58	57	233
7	45	55	56	58	55	57	57	222
9	43	54	55	56	56	56	56	211
11	43	52	53	55	55	55	55	206
13	37	48	50	50	50	50	51	183

Tabela 5 - Dosagem Físico-Química do Solo B.

Teor ideal de cimento - 5 % em peso.

ΔV - Maior leitura ocorrida na porcentagem de cimento em estudo menos a maior leitura ocorrida na porcentagem 0% de cimento, dividido pela maior leitura ocorrida em 0% vezes 100.

Tempos de Cura (dias)	RCS dos solos no Estado Natural (MPa)	
	Solo A	Solo B
07	0,70	0,90
28	0,80	1,00
60	1,00	1,10

Tabela 6 - Resistência à Compressão Simples (RCS) dos solos A e B, no Estado Natural - Cura Aérea para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RCS da Composição Solo-Cimento (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (7,10 %)	07	1,50	2,00
	28	1,60	3,00
	60	2,00	3,30
1:15 (6,30 %)	07	1,30	1,60
	28	1,40	2,60
	60	1,50	2,70
1:17 (5,50 %)	07	0,90	1,40
	28	1,00	1,80
	60	1,10	1,90

Tabela 7- Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias, onde 7,10 %, 6,30% e 5,50 % Correspondem, respectivamente, as Porcentagens de Cimento em Peso.

Traços em volume e em Porcentagem.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RCS da Composição Solo-Cimento-Cal (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (0,1:0,9:13)	07	0,81	0,95
	28	1,10	2,04
	60	1,48	2,56
1:13 (0,2:0,8:13)	07	0,71	1,35
	28	0,91	1,74
	60	1,06	1,90
1:13 (0,3:0,7:13)	07	0,50	1,35
	28	0,89	1,12
	60	0,90	1,71
1:13 (0,4:0,6:13)	07	0,41	0,74
	28	0,70	1,06
	60	0,80	1,20

Tabela 08 - Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B, Aditivados com 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de Cal e, 90 %, 80 %, 70 % e 60 % de Cimento Portland para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.

Traços em volume e em Porcentagem.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RCS da Composição Solo-Cim.-Cal Poz (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (0,1:0,9:13)	07	1,15	2,12
	28	1,10	2,35
	60	1,26	3,22
1:13 (0,2:0,8:13)	07	0,70	1,66
	28	0,80	1,87
	60	0,93	2,09
1:13 (0,3:0,7:13)	07	0,70	1,45
	28	0,89	1,54
	60	0,95	1,77
1:13 (0,4:0,6:13)	07	0,50	1,13
	28	0,65	1,36
	60	1,52	1,68

Tabela 09 - Resistência à Compressão Simples (RCS) dos Solos A e B, Aditivados com 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de Cal-Pozolânica (na composição 30% - 70%) e 90 %, 80 %, 70 % e 60 % de Cimento Portland, respectivamente, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.
Traços em volume e em Porcentagem.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RTI da Composição Solo-Cimento (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (7,10 %)	07	0,13	0,15
	28	0,17	0,24
	60	0,28	0,28
1:15 (6,30 %)	07	0,10	0,13
	28	0,12	0,20
	60	0,19	0,23
1:17 (5,50 %)	07	0,08	0,10
	28	0,10	0,18
	60	0,15	0,20

Tabela 10 - Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias, onde 7,10 %, 6,30 % e 5,50 % Correspondem, respectivamente, as Porcentagens de Cimento em Peso.

Traços em volume e em Porcentagem.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RTI da Composição Solo-Cimento-Cal (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (0,1:0,9:13)	07	0,10	0,09
	28	0,11	0,15
	60	0,16	0,37
1:13 (0,2:0,8:13)	07	0,05	0,10
	28	0,10	0,10
	60	0,10	0,17
1:13 (0,3:0,7:13)	07	0,04	0,11
	28	0,05	0,07
	60	0,09	0,13
1:13 (0,4:0,6:13)	07	0,03	0,10
	28	0,10	0,08
	60	0,14	0,14

Tabela 11- Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B, Aditivados com 10%, 20 %, 30 % e 40 % de Cal e 90 %, 80 %, 70 % e 60 % de Cimento Portland, para os Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias. Traços em volume e em Porcentagem.

Traços	Tempos de Cura (dias)	RTI da Composição Solo-Cim.-Cal Poz. (MPa)	
		Solo A	Solo B
1:13 (0,1:0,9:13)	07	0,15	0,23
	28	0,05	0,25
	60	0,14	0,36
1:13 (0,2:0,8:13)	07	0,14	0,23
	28	0,13	0,27
	60	0,09	0,34
1:13 (0,3:0,7:13)	07	0,10	0,10
	28	0,10	0,15
	60	0,10	0,20
1:13 (0,4:0,6:13)	07	0,05	0,16
	28	0,10	0,20
	60	0,14	0,26

Tabela 12 - Resistência à Tração Indireta (RTI) dos Solos A e B, Aditivados com 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de Cal Pozolânica (na composição 30 % - 70 %) e 90 %, 80 %, 70 % e 60 % de Cimento Portland, respectivamente, para os Tempos de Cura 07, 28 e 60 Dias.
Traços em volume e em Porcentagem.

Solo-Cimento - Traço 1:13 - Solo A

t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,72	1,50	1.000.000	808.332	670.883
28	1,91	1,60	1.000.000	834.841	692.885
60	1,88	2,00	1.000.000	933.381	774.669

Tabela 13 - Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes

Métodos para o Solo-Cimento, Traço 1:13, Solo A.

1 N/cm² = 10⁻² MPa

Solo-Cimento - Traço 1:13 - Solo B

t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	2,63	2,00	1.000.000	933.381	774.669
28	2,76	3,00	1.000.000	1.143.153	948.772
60	2,58	3,30	1.000.000	1.198.949	995.081

Tabela 14 - Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes

Métodos para o Solo-Cimento, Traço 1:13, Solo B.

1 N/cm² = 10⁻² MPa

Solo-Cimento-Cal - Traço 0,1:0,9:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,71	0,81	1.000.000	594.000	492.997
28	1,85	1,10	1.000.000	692.214	574.510
60	1,93	1,48	1.000.000	802.925	666.396
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,2:0,8:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,41	0,71	1.000.000	556.126	461.563
28	1,65	0,91	1.000.000	629.600	522.543
60	1,71	1,06	1.000.000	679.512	563.968
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,3:0,7:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,33	0,50	1.000.000	466.690	387.335
28	1,43	0,89	1.000.000	622.643	516.769
60	1,43	0,90	1.000.000	626.131	519.664
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,4:0,6:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,14	0,41	1.000.000	422.606	350.747
28	1,34	0,70	1.000.000	522.196	458.301
60	1,28	0,80	1.000.000	590.322	489.944

Tabela 15- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para o Solo A.

$$1 \text{ N/cm}^2 = 10^{-2} \text{ MPa}$$

Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,1:0,9:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	0,90	1,15	1.000.000	707.771	587.422
28	1,05	1,10	1.000.000	692.214	574.510
60	1,10	1,26	1.000.000	740.848	614.875
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,2:0,8:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,60	0,70	1.000.000	552.196	458.301
28	1,80	0,80	1.000.000	590.332	489.944
60	1,80	0,93	1.000.000	636.481	528.254
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,3:0,7:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,60	0,70	1.000.000	552.196	458.301
28	1,61	0,89	1.000.000	622.643	516.769
60	1,94	0,95	1.000.000	643.288	533.904
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,4:0,6:13 - Solo A					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,10	0,50	1.000.000	466.690	387.335
28	1,41	0,65	1.000.000	532.109	441.630
60	1,67	1,52	1.000.000	813.703	675.341

Tabela 16- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal Pozolânica, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para o Solo A.

$$1 \text{ N/cm}^2 = 10^{-2} \text{ MPa}$$

Solo-Cimento-Cal - Traço 0,1:0,9:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,72	0,95	1.000.000	643.288	533.904
28	2,40	2,04	1.000.000	942.699	782.378
60	2,46	2,73	1.000.000	1.056.000	876.438
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,2:0,8:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	2,10	1,35	1.000.000	766.851	636.456
28	1,92	1,74	1.000.000	870.600	722.564
60	2,40	1,90	1.000.000	909.747	755.054
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,3:0,7:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1(N/cm ²)	CEB(N/cm ²)
07	1,86	1,35	1.000.000	766.851	636.456
28	1,77	1,12	1.000.000	698.478	579.710
60	2,14	1,71	1.000.000	863.062	716.308
Solo-Cimento-Cal - Traço 0,4:0,6:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,62	0,74	1.000.000	567.735	471.213
28	1,78	1,06	1.000.000	679.512	563.968
60	1,83	1,20	1.000.000	722.994	600.056

Tabela 17- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para o Solo B.

$$1 \text{ N/cm}^2 = 10^{-2} \text{ MPa}$$

Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,1:0,9:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	2,40	2,12	1.000.000	960.975	797.571
28	2,46	2,35	1.000.000	1.011.761	839.722
60	2,73	3,22	1.000.000	1.184.328	982.945
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,2:0,8:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	2,13	1,66	1.000.000	850.351	705.757
28	2,11	1,87	1.000.000	902.536	749.070
60	2,45	2,09	1.000.000	954.151	791.908
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,3:0,7:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,80	1,45	1.000.000	794.745	659.607
28	1,80	1,54	1.000.000	819.038	679.770
60	1,78	1,77	1.000.000	878.073	728.766
Solo-Cimento-Cal Pozolânica - Traço 0,4:0,6:13 - Solo B					
t (dias)	Veloc.(km/s)	RCS (MPa)	PUNDIT(N/cm ²)	NB-1 (N/cm ²)	CEB (N/cm ²)
07	1,76	1,13	1.000.000	701.590	582.292
28	2,12	1,36	1.000.000	769.686	638.809
60	2,42	1,68	1.000.000	855.458	709.996

Tabela 18- Comparação do Módulo de Elasticidade pelo Cálculo com Diferentes Métodos para o Solo-Cimento-Cal Pozolânica, nos Traços com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para o Solo B.

$$1 \text{ N/cm}^2 = 10^{-2} \text{ MPa}$$

RCS da Composição Solo-Cimento nos Tijolos (MPa)			
Traço em SC	Cura (dias)	Solo A	Solo B
		SC (1:13)	SC (1:13)
1:13 (7,10 %)	07	1,35	1,88
	28	1,75	2,30
	60	2,10	3,10

Tabela 19- Resistência à Compressão Simples para os Tijolos dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias, onde 7,10 % Corresponde a Porcentagem de Cimento em Peso.

RCS da Composição Solo-Cimento-Cal nos Tijolos (MPa)			
Traço em SC	Cura (dias)	Solo A	Solo B
		SCC (0,1:0,9:13)	SCC (0,4:0,6:13)
1:13 (7,10 %)	07	1,36	1,52
	28	1,80	2,10
	60	2,30	2,85

Tabela 20 - Resistência à Compressão Simples para os Tijolos dos Solos A e B, Aditivados com 10% de Cal e 40% de Cal, respectivamente, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias, onde 7,10 % Corresponde a Porcentagem de Cimento em Peso.

RCS da Composição Solo-Cimento-Cal Pozolânica nos Tijolos (MPa)			
Traço em SC	Cura (dias)	Solo A	Solo B
		SCCP (0,1:0,9:13)	SCCP (0,4:0,6:13)
1:13 (7,10 %)	07	1,96	2,30
	28	2,10	3,25
	60	2,80	4,15

Tabela 21 - Resistência à Compressão Simples para os tijolos do Solo A, Aditivado com 10% de Cal Pozolânica e do Solo B Aditivado com 40% de Cal Pozolânica, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias, onde 7,10 % Corresponde a Porcentagem de Cimento em Peso.
Traços em Volume e em Porcentagem.

Traço	Composi- ção	Absorção (%)			Massa Esp. Apar. (g/cm³)		
		07	28	60	07	28	60
1:13	SC	12,06	12,00	11,50	2,19	1,15	1,15
0,1:0,9:13	SCC	14,75	12,10	11,90	2,28	1,30	1,20
0,1:0,9:13	SCCP	15,65	12,70	12,30	2,35	1,42	1,38

Tabela 22 - Absorção e Massa Específica Aparente dos Tijolos para o Solo A, Aditivado com Cimento Portland, 10% de Cal e 10% de Cal Pozolânica, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.

Traço	Composição	Absorção (%)			Massa Esp. Apar. (g/cm ³)		
		07	28	60	07	28	60
1:13	SC	10,66	10,20	10,00	2,24	1,17	1,15
0,4:0,6:13	SCC	12,21	10,50	10,50	2,39	1,28	1,25
0,4:0,6:13	SCCP	12,94	11,80	11,00	2,37	1,23	1,20

Tabela 23 - Absorção e Massa Específica Aparente dos Tijolos para o Solo B, Aditivado com Cimento Portland, 40% de Cal e 40% de Cal Pozolânica, para Tempos de Cura de 07, 28 e 60 Dias.

Onde: SC : Composição Solo-Cimento
 SCC : Composição Solo-Cimento-Cal
 SCCP : Composição Solo-Cimento-Cal Pozolânica

Tempo (t) x Resistência à Compressão Simples(RCS) - Solo A				
Tempo de Cura (dias)	Tipos de Ajustamento	Coef. de Correlação(R)	Nível de Significância	Equações
7	$y = A + Bx$	- 0,93	0,00	$y = 147,11 - 50,48x$
28	$y = A + Bx$	- 0,98	0,00	$y = 164,74 - 64,15x$
60	$y = A + Bx$	- 0,97	0,00	$y = 331,72 - 131,48x$

Tabela 24- Correlações Estatísticas entre as Variáveis Tempo (t) e Resistência à Compressão Simples (RCS), para os Corpos de Prova Cilíndricos do Solo A, nos Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias, para o Solo-Cimento, no Traço 1:13.

Tempo (t) x Resistência à Compressão Simples(RCS) - Solo B				
Tempo de Cura (dias)	Tipos de Ajustamento	Coef. de Correlação(R)	Nível de Significância	Equações
7	$y = A + Bx$	- 0,84	0,00	$y = 97,20 - 32,35x$
28	$y = A + Bx$	- 0,96	0,00	$y = 60,36 - 4,99x$
60	$y = A + Bx$	- 0,82	0,00	$y = 69,30 - 6,61x$

Tabela 25- Correlações Estatísticas entre as Variáveis Tempo (t) e Resistência à Compressão Simples (RCS), para os Corpos de Prova Cilíndricos do Solo B, nos Tempos de Cura de 7, 28 e 60 Dias, para o Solo-Cimento, no Traço 1:13.

Onde: Tempo (t) - é o tempo lido entre um extremo e outro do corpo de prova cilíndrico, no aparelho denominado PUNDIT.

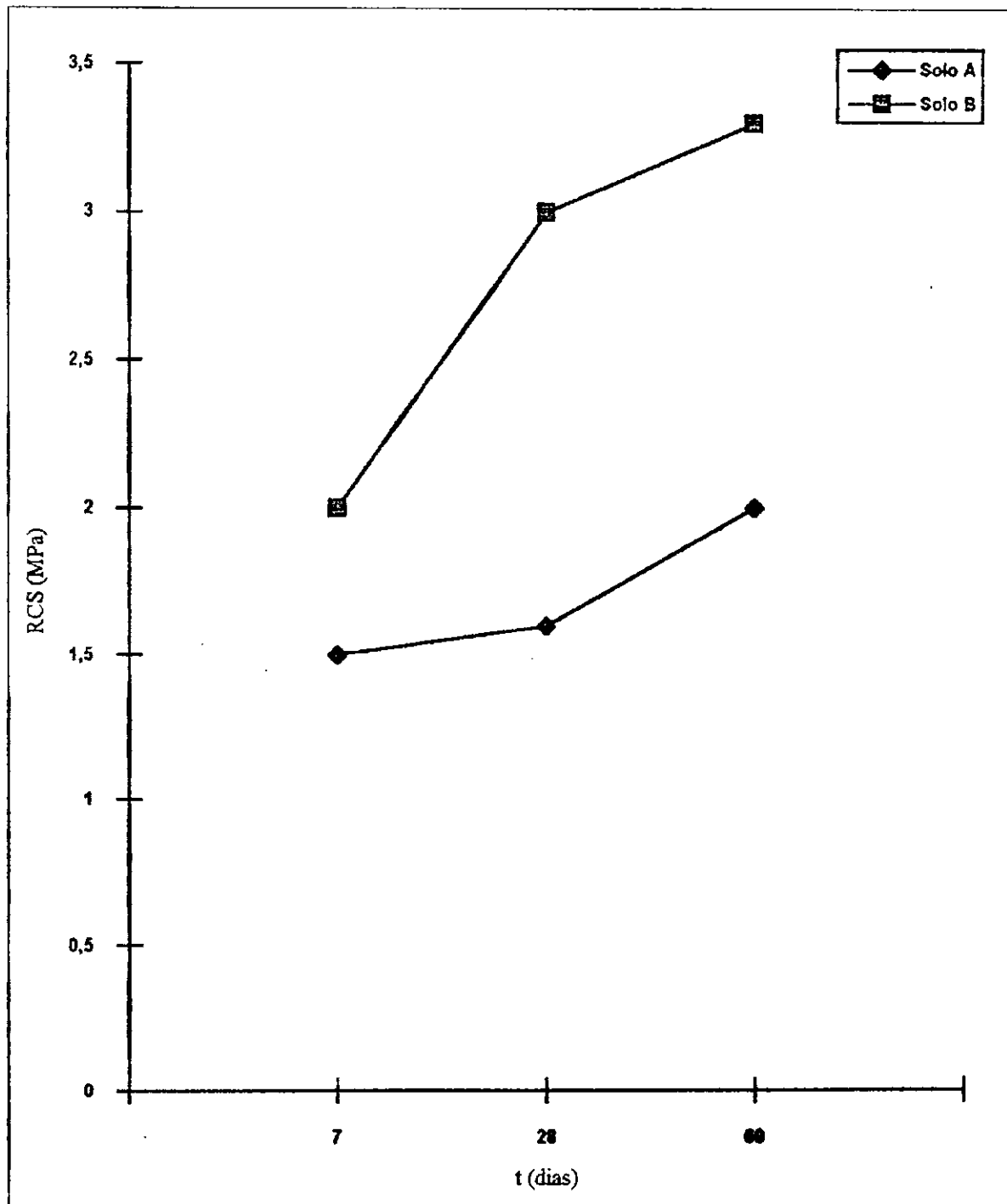


Figura 2 - Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland no Traço 1:13 para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

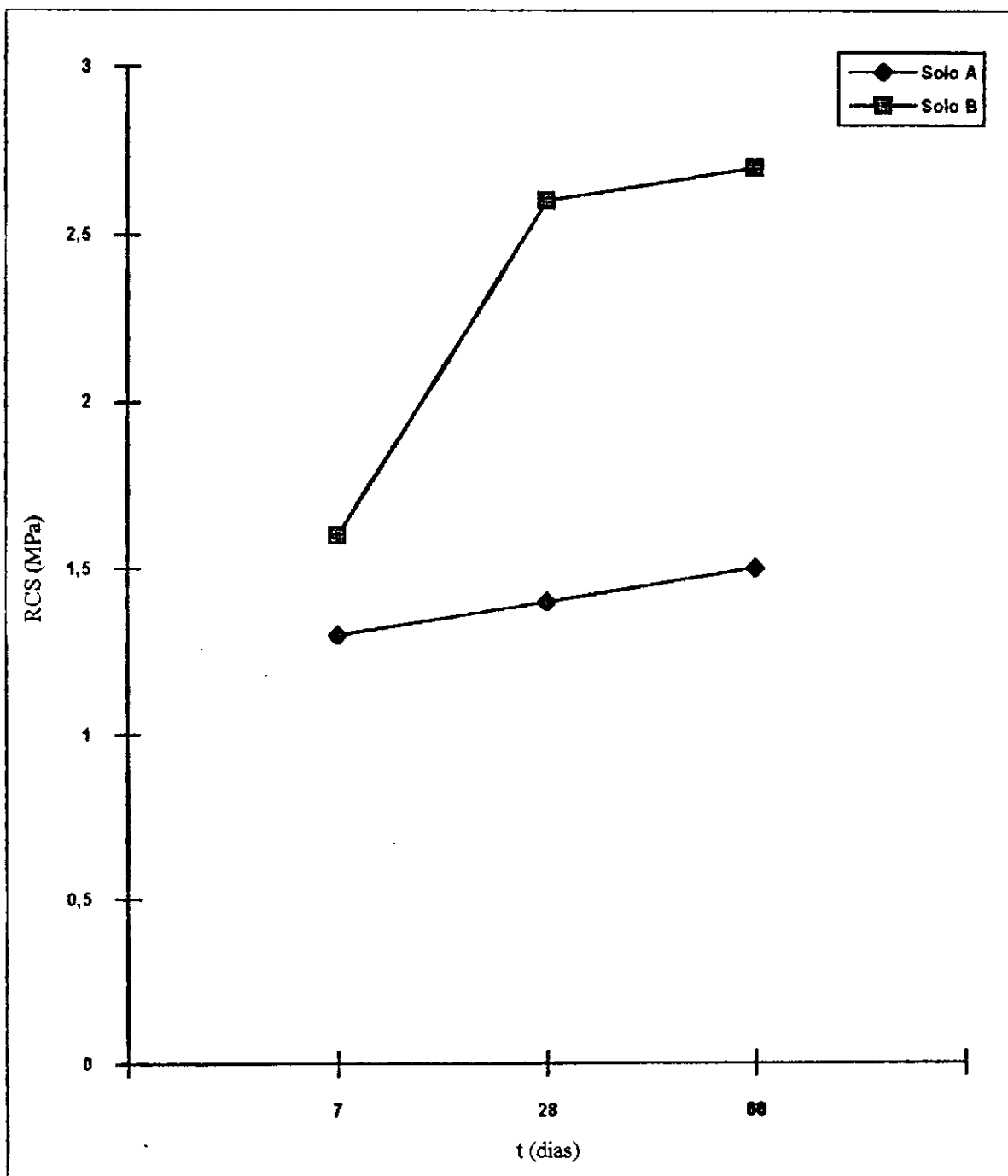


Figura 3 - Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland no Traço 1:15 para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

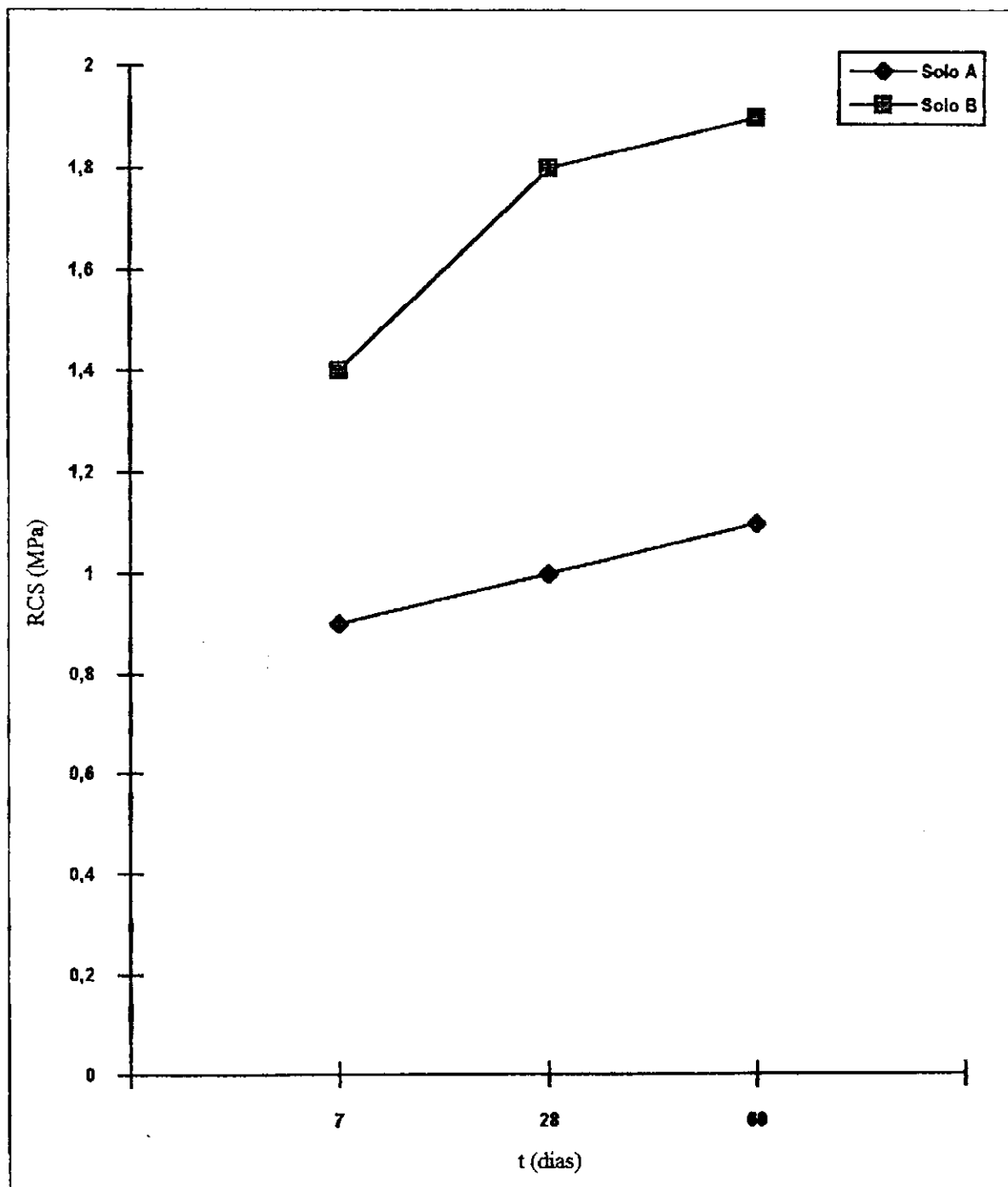


Figura 4 - Resistência à Compressão Simples dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland no Traço 1:17 para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

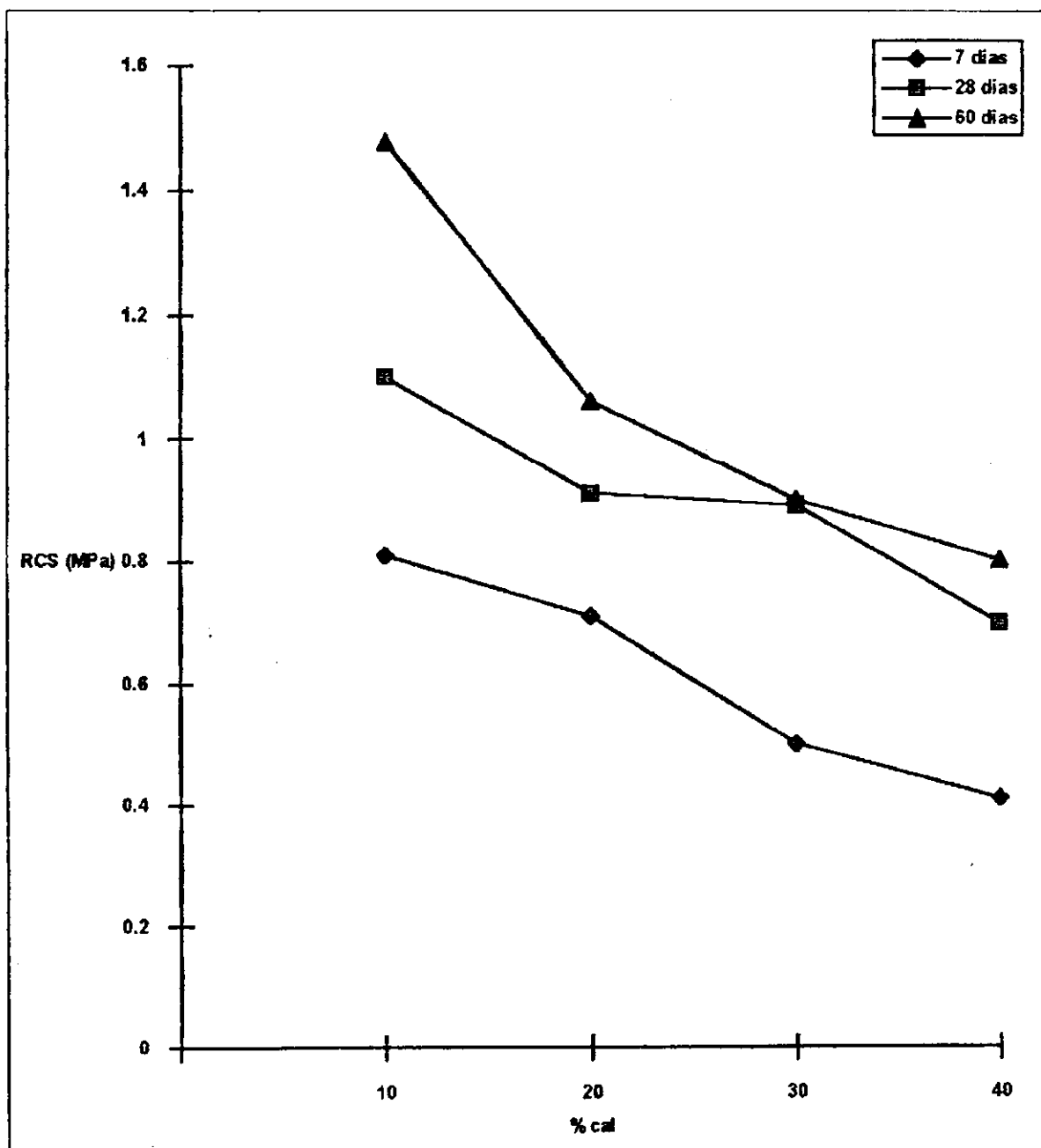


Figura 5 - Resistência à Compressão Simples do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

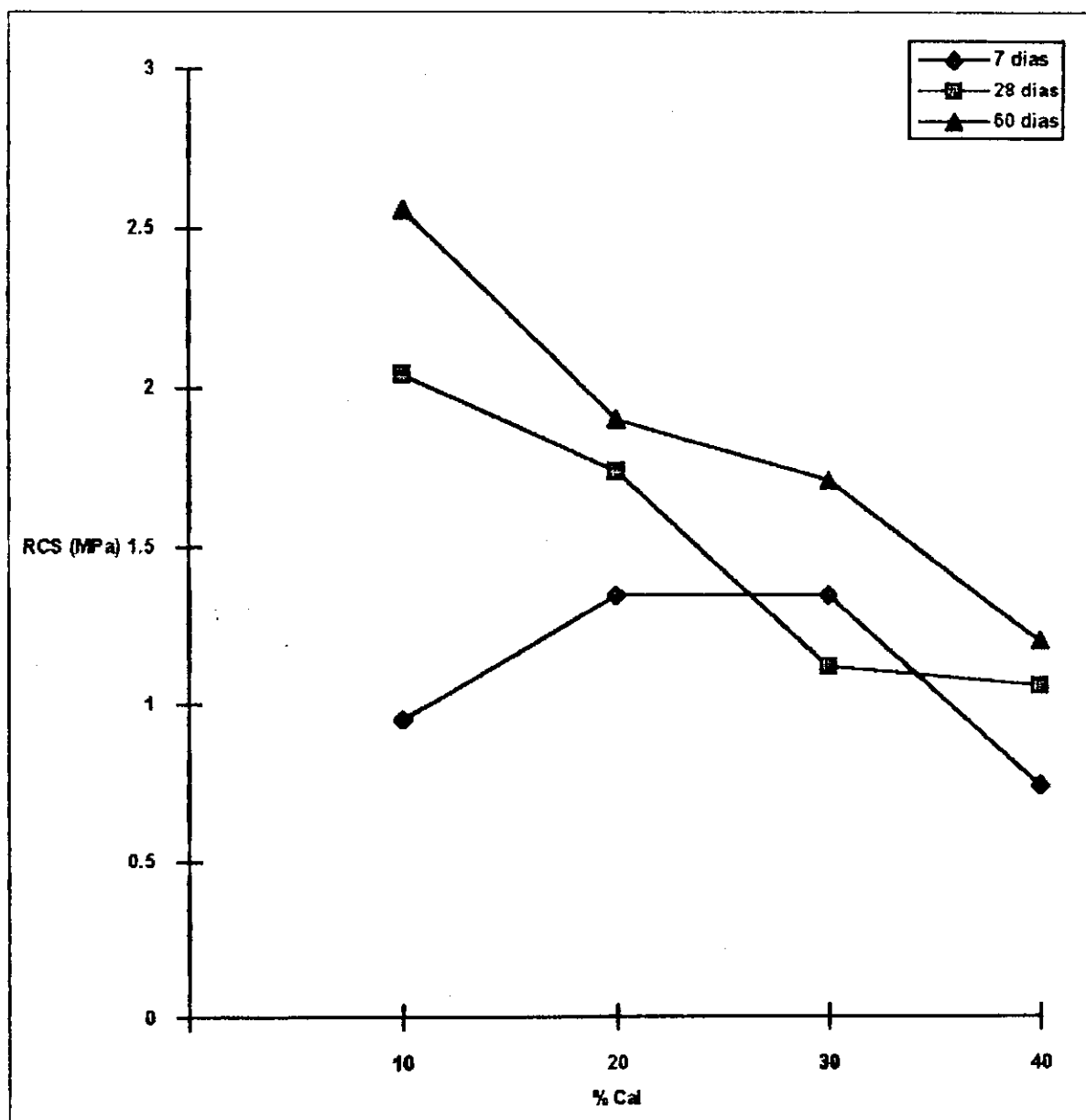


Figura 6 - Resistência à Compressão Simples do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

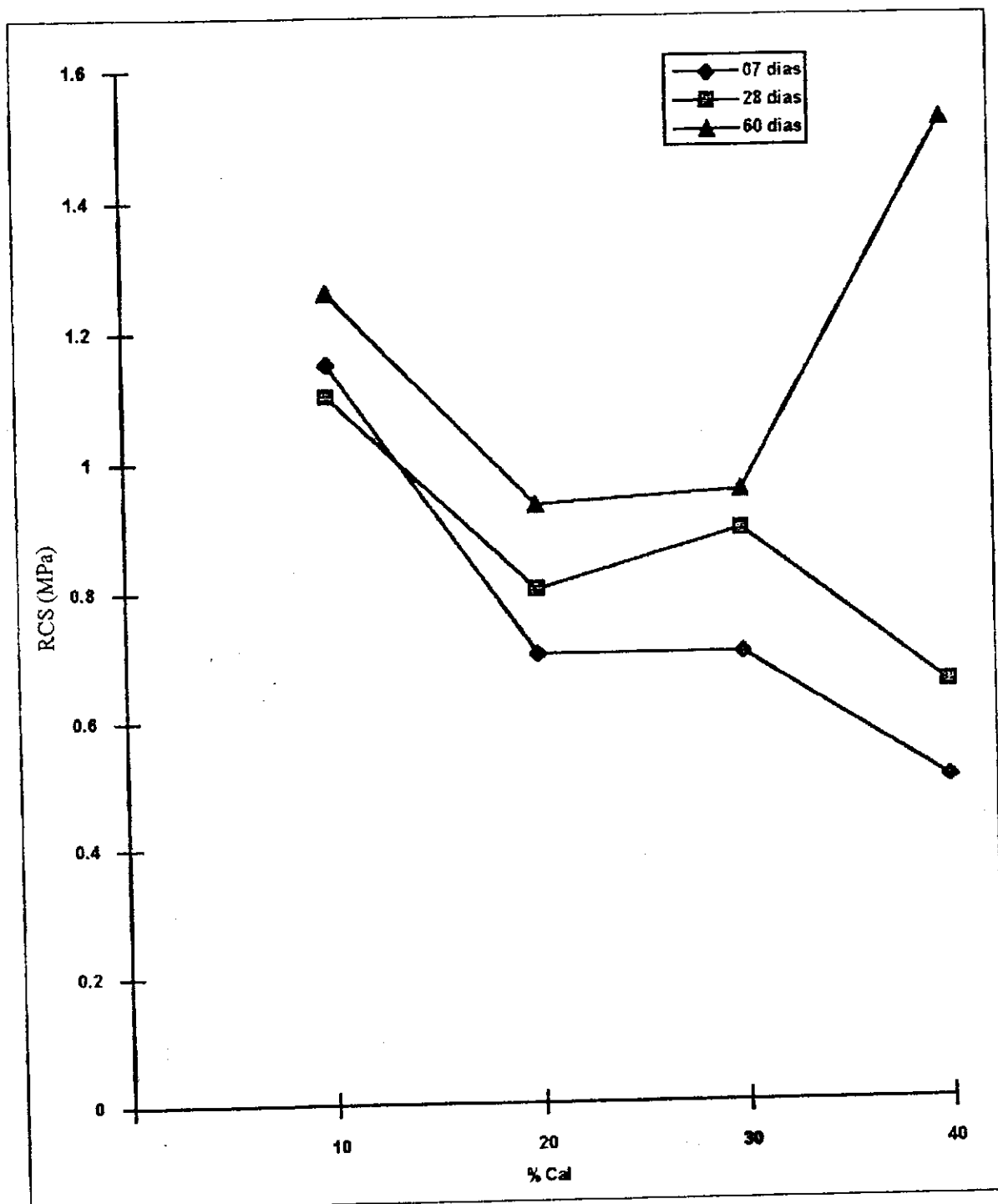


Figura 7 - Resistência à Compressão Simples do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

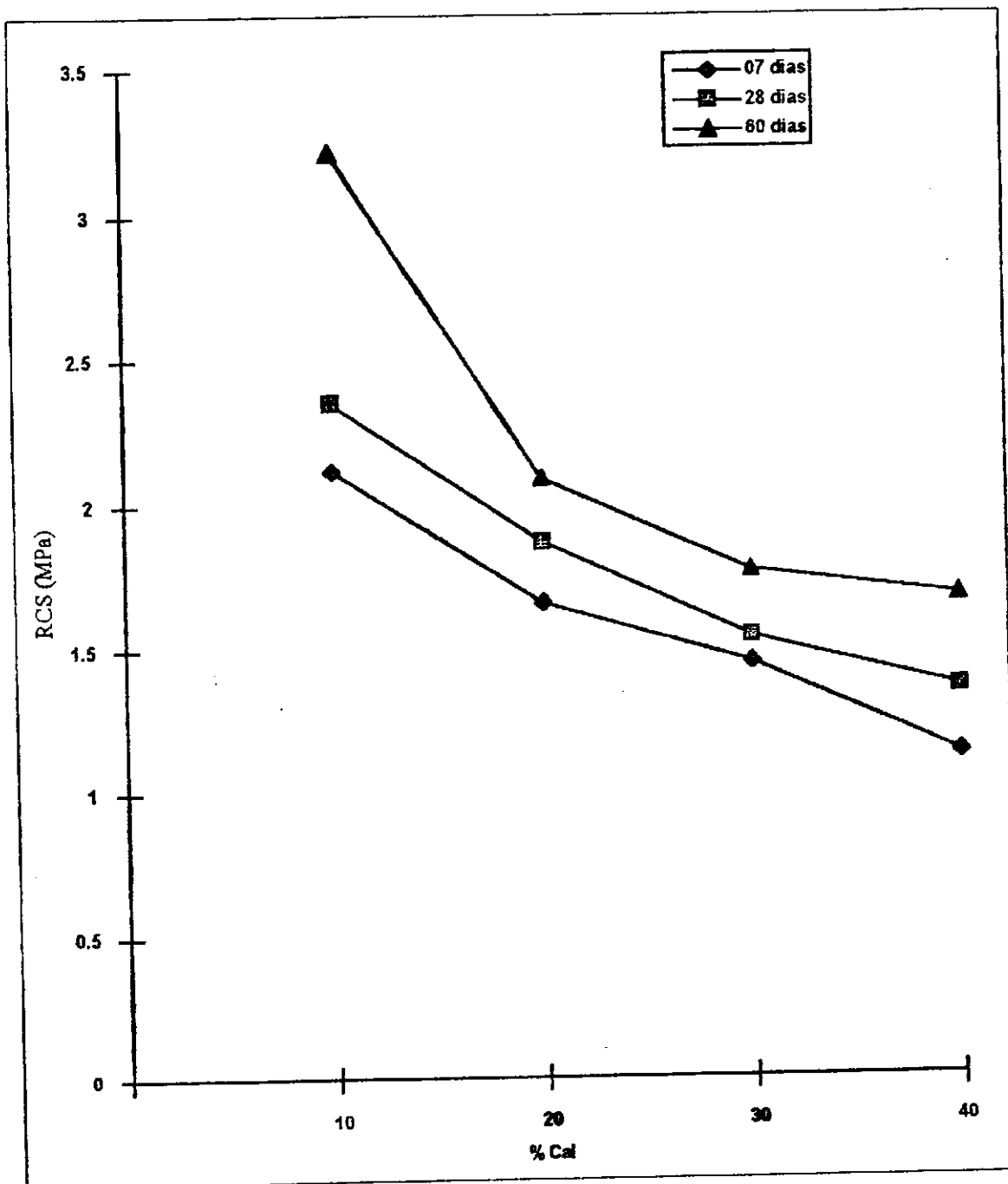


Figura 8 - Resistência à Compressão Simples do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

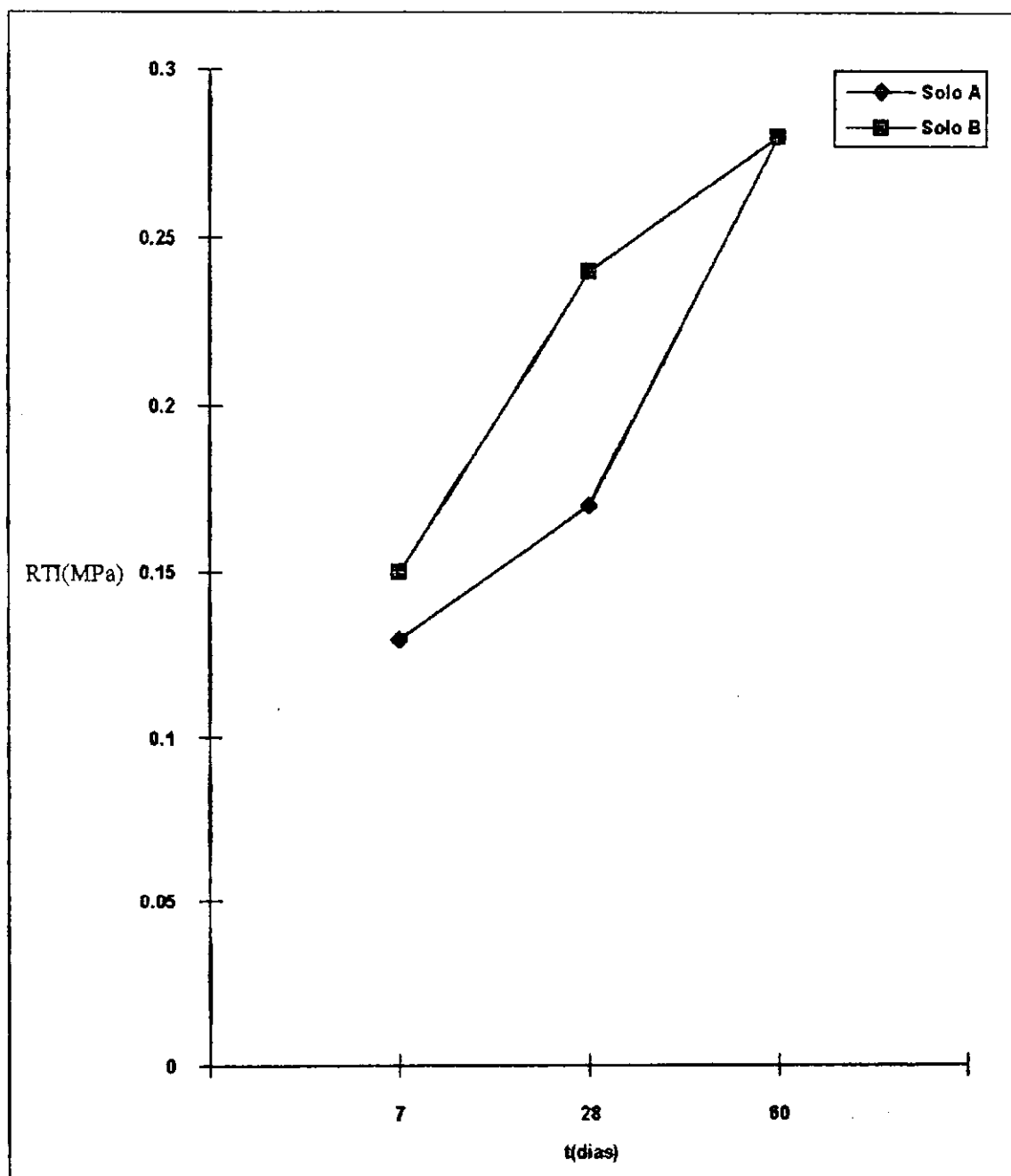


Figura 9 - Resistência à Tração Indireta dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:13, nos Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

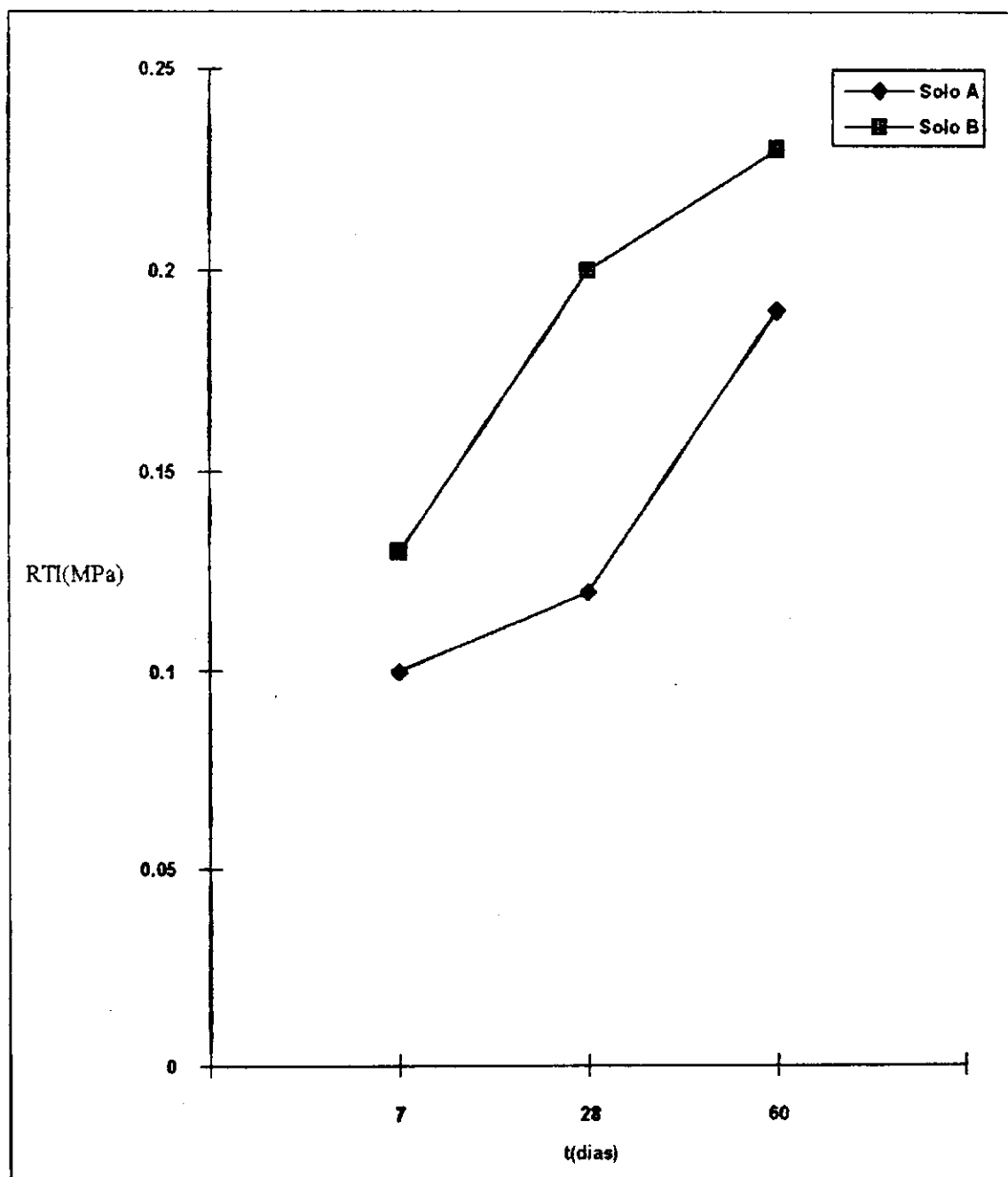


Figura 10 - Resistência à Tração Indireta dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:15, nos Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

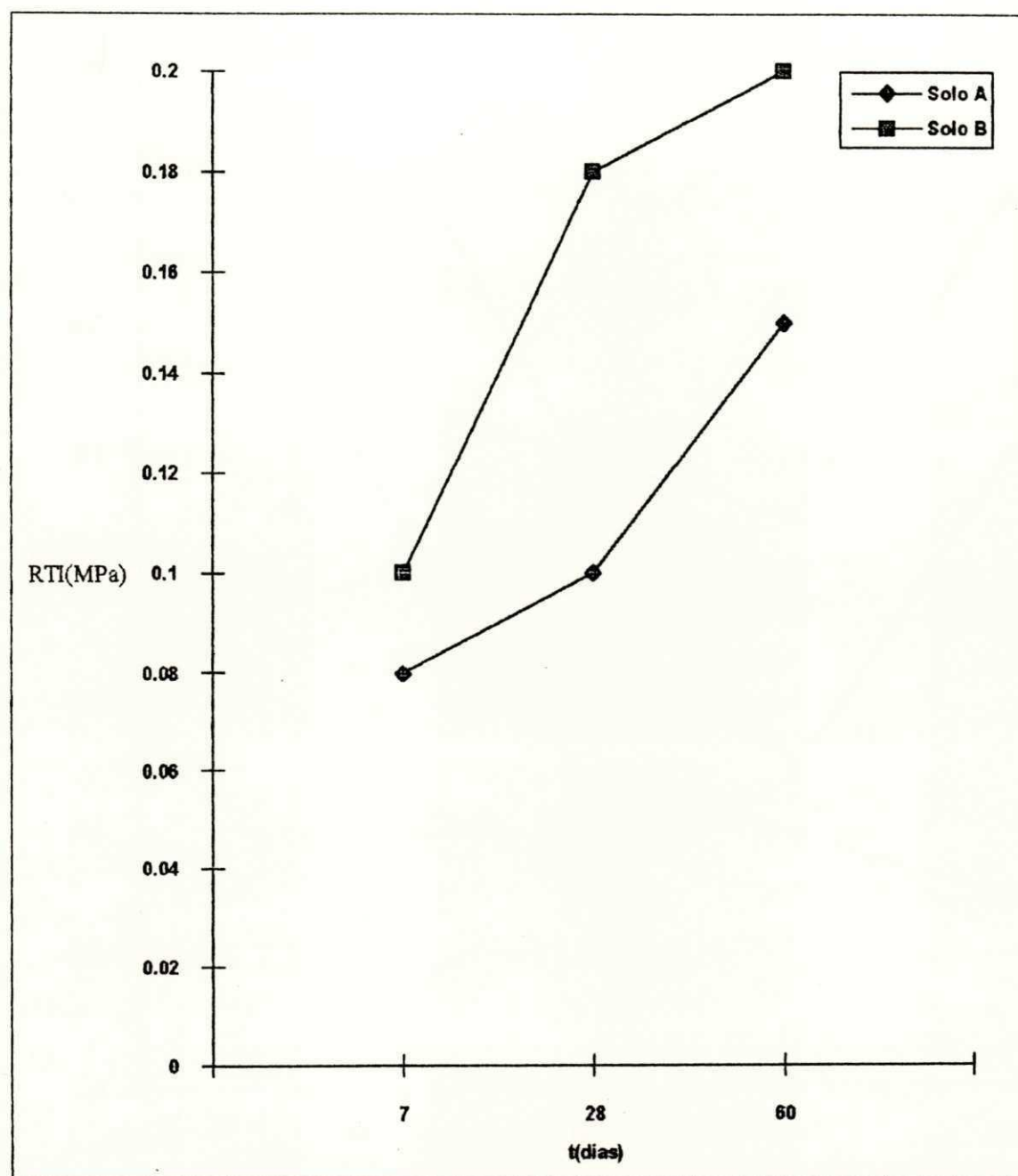


Figura 11 - Resistência à Tração Indireta dos Solos A e B, Aditivados com Cimento Portland, no Traço 1:17, nos Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

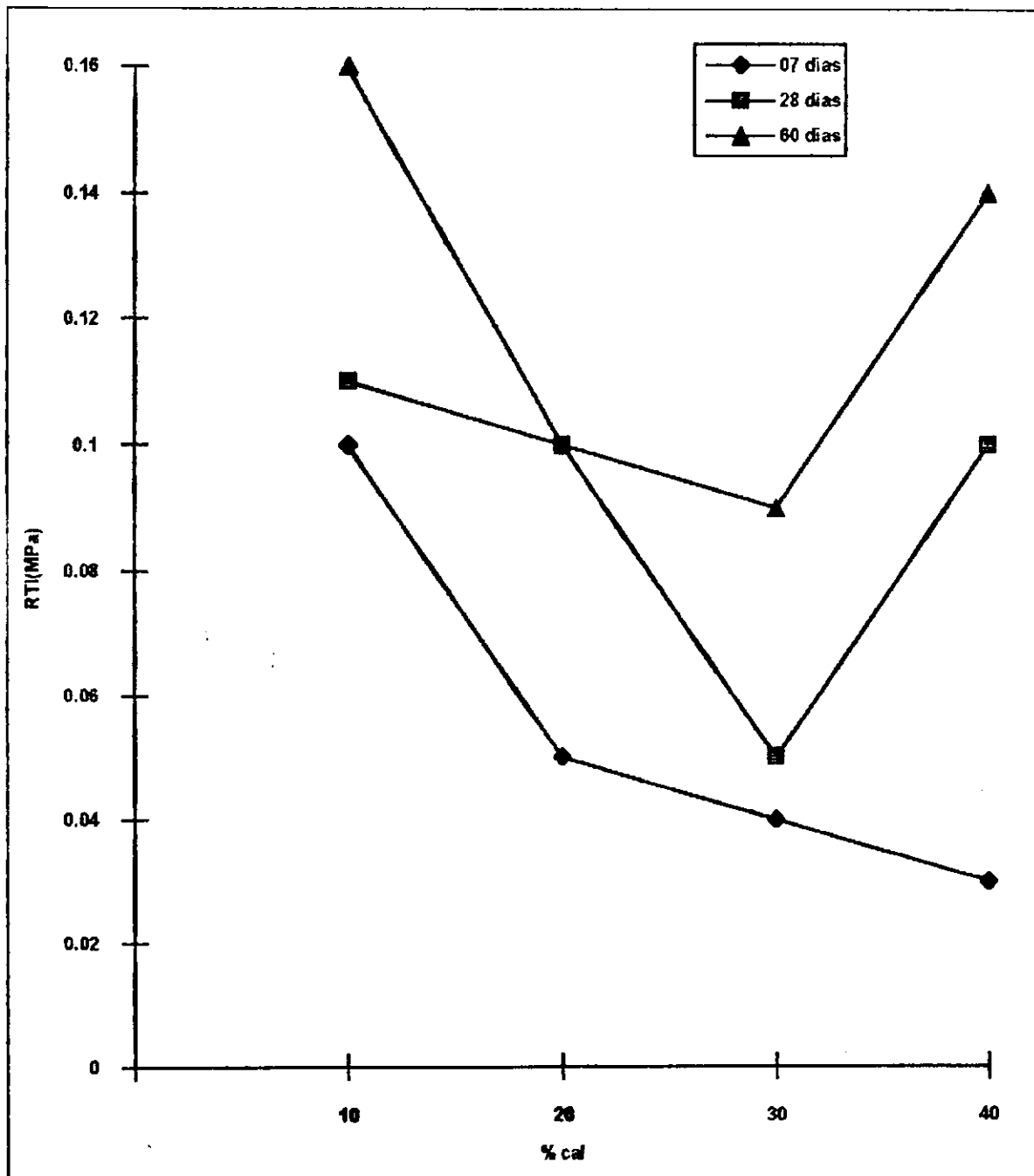


Figura 12 - Resistência à Tração Indireta do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

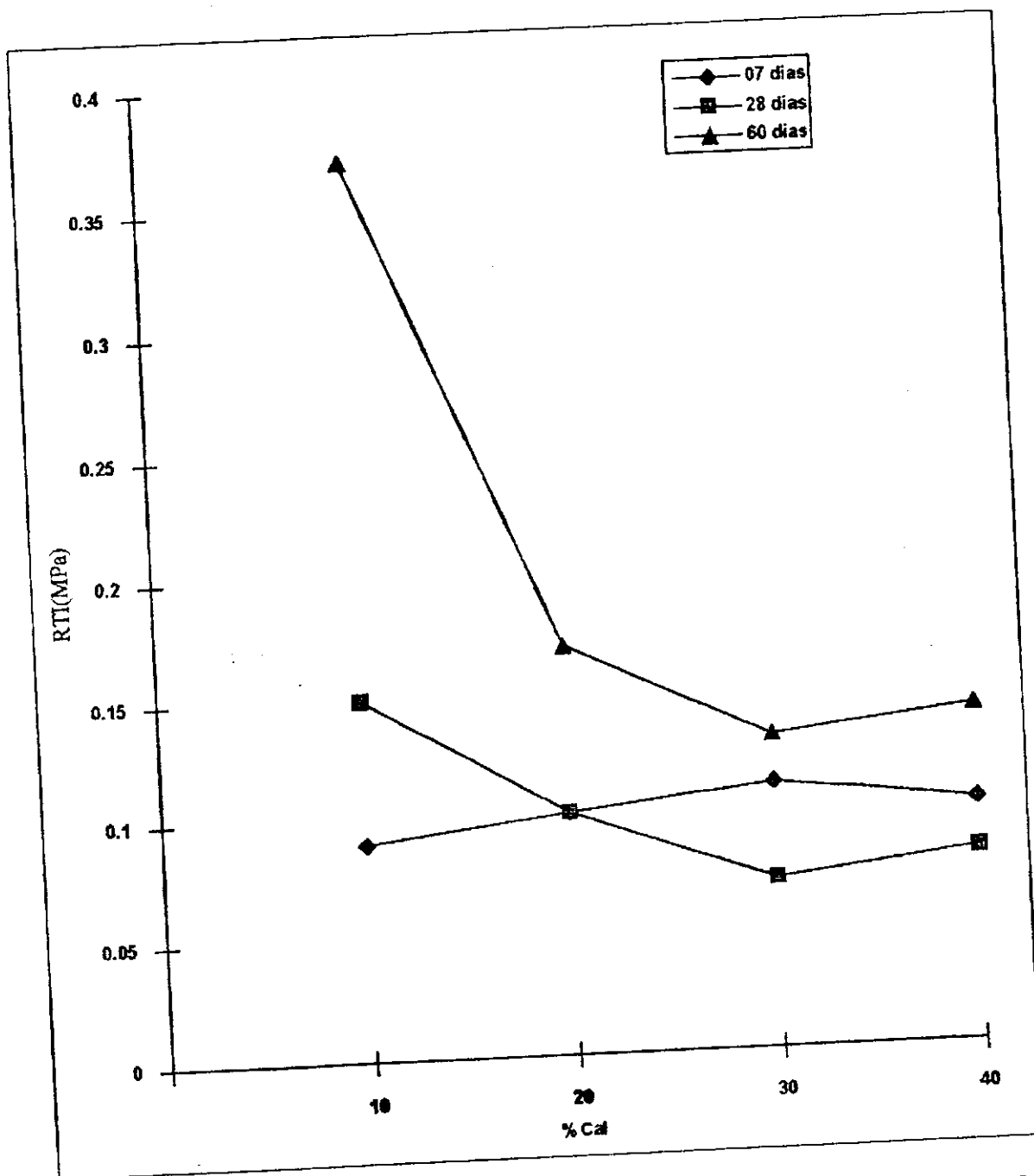


Figura 13- Resistência à Tração Indireta do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

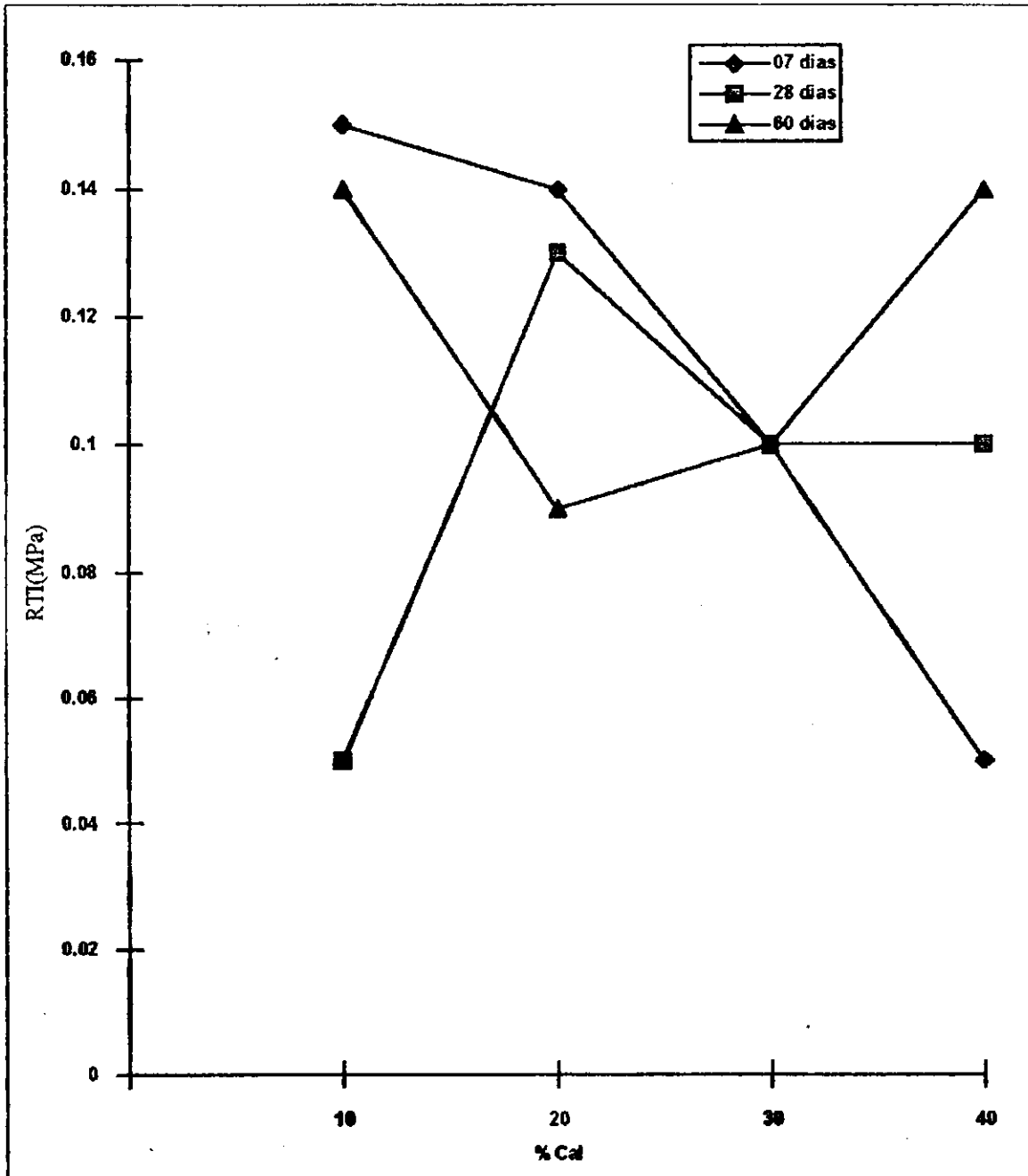


Figura 14 - Resistência à Tração Indireta do Solo A, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

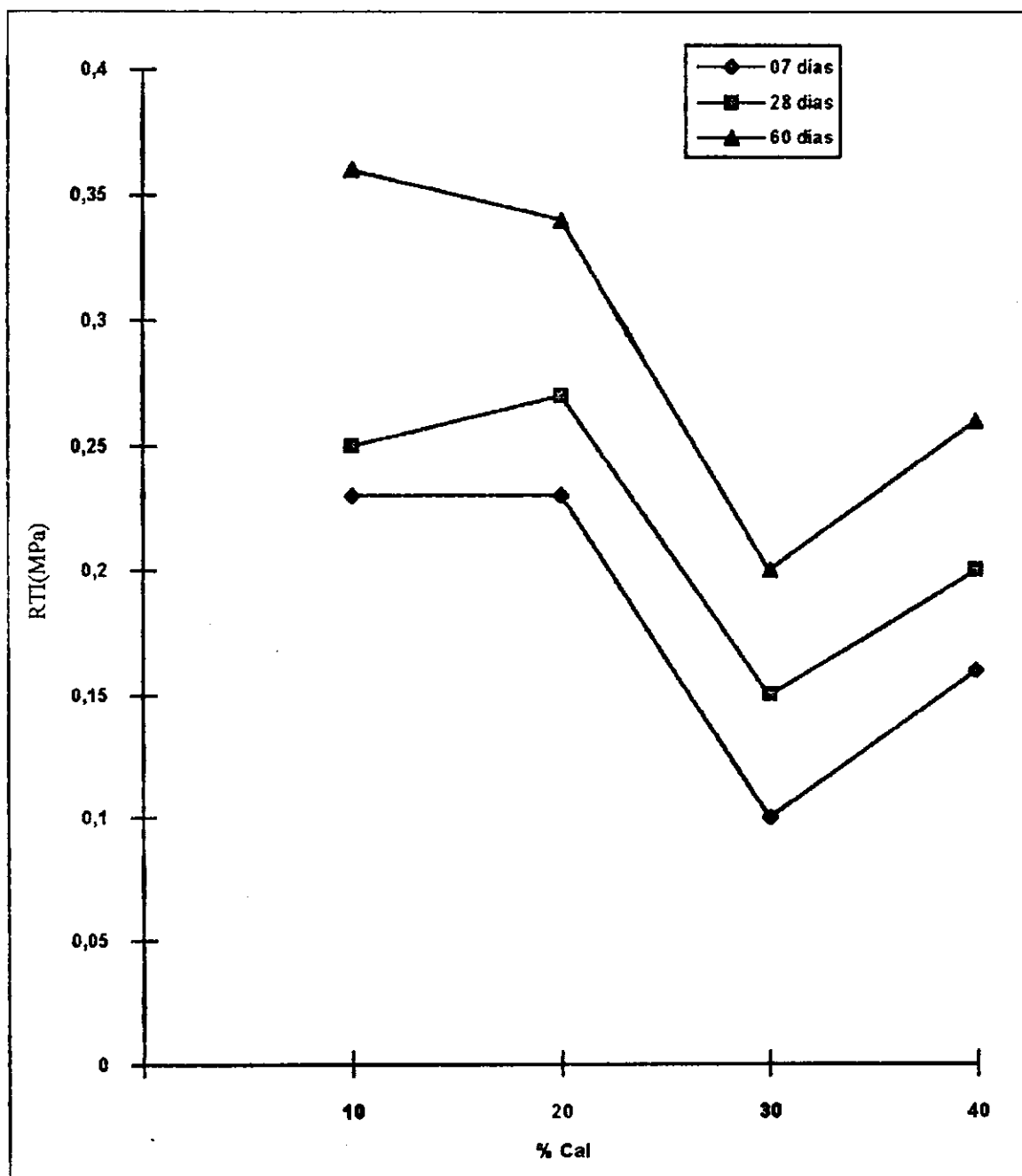


Figura 15 - Resistência à Tração Indireta do Solo B, Aditivado com 10%, 20%, 30% e 40% de Cal Pozolânica, para os Períodos de Cura de 7, 28 e 60 Dias.

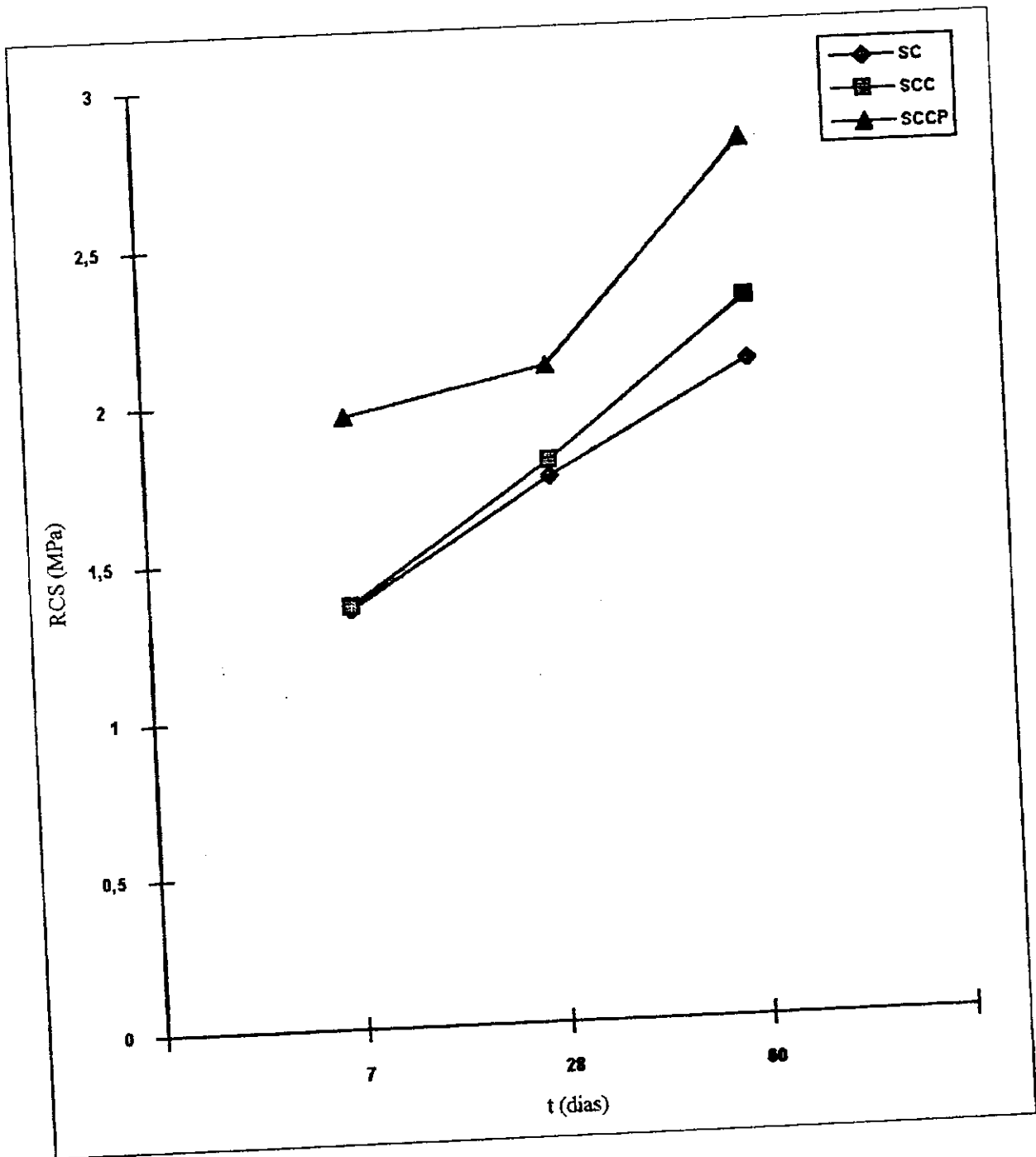


Figura 16- Resistência à Compressão Simples dos Tijolos do Solo A, nas Composições SC, SCC e SCCP, para os Períodos de Cura 7, 28 e 60 Dias.

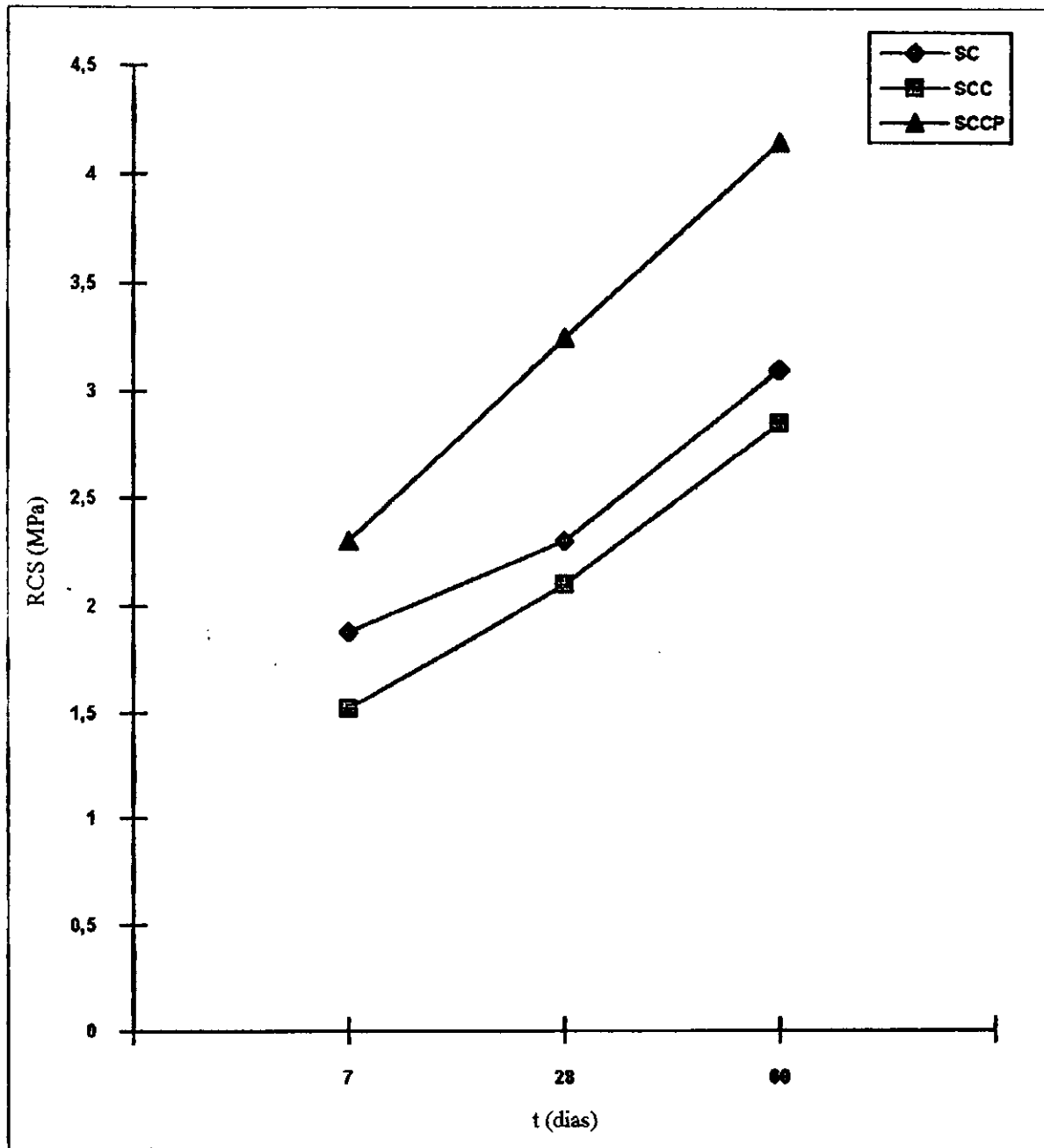


Figura 17- Resistência à Compressão Simples dos Tijolos do Solo B, nas Composições SC, SCC e SCCP, para os Períodos de Cura 7, 28 e 60 Dias.

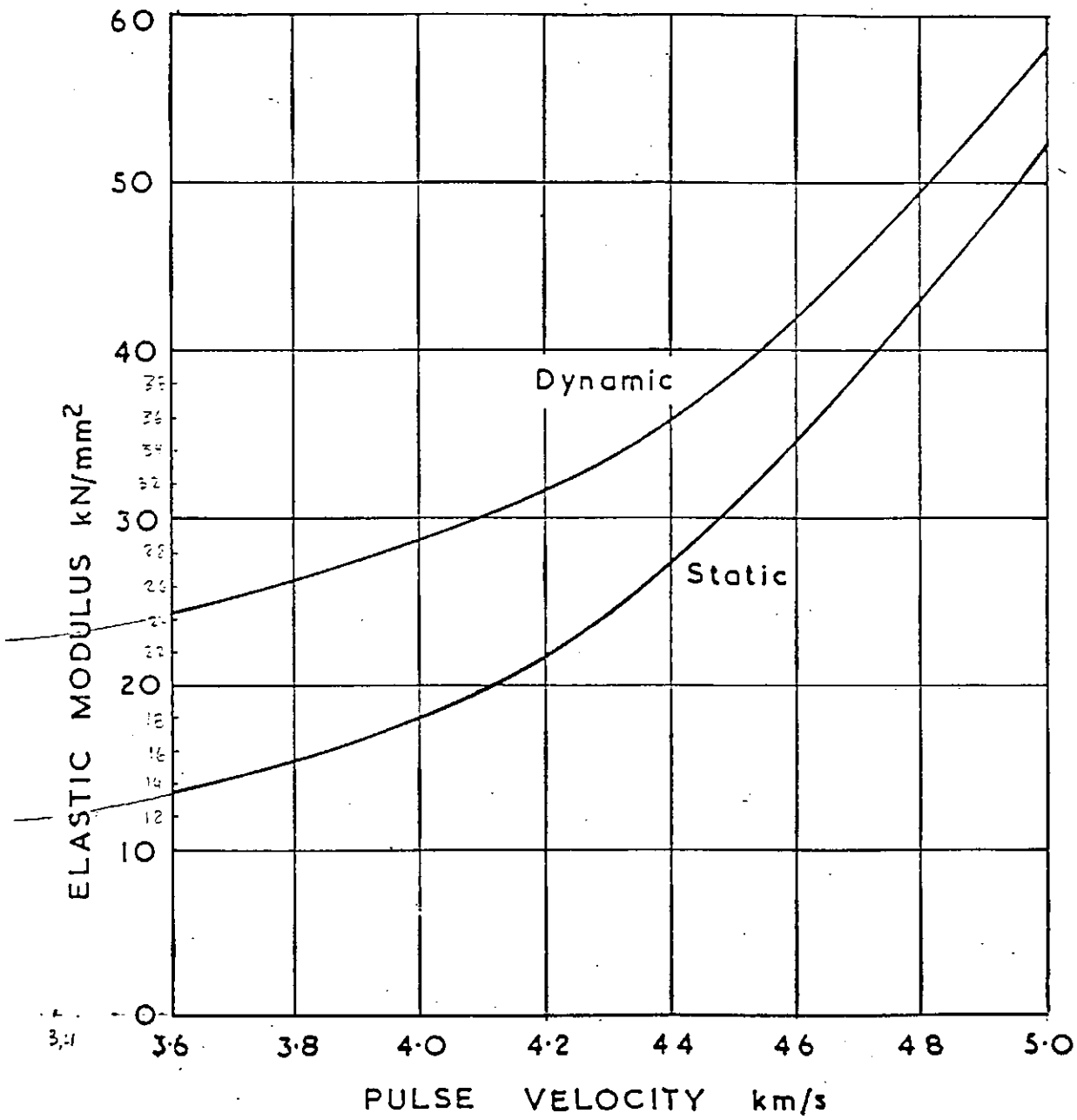


Figura 18 - Curves Relating Pulse Velocity with Static and Dinamic Elastic Modulus - In: PUNDIT Manual for Use with the Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa levou às seguintes conclusões:

1) A partir dos corpos de prova cilíndricos:

- No solo A, quando substituiu-se o cimento Portland por cal e cal pozolânica, verificou-se que a RCS apresentou valores acima de 1,00 MPa nos traços com 10 e 20% de cal e no traço com 10% de cal pozolânica.

- No solo B, quando adicionou-se cal e cal pozolânica, verificou-se que o consumo de cimento pode ser reduzido em até 40%.

- O módulo de elasticidade realizado através do aparelho de ultra-som PUNDIT, nos solos A e B, apresentou valor de 1.000.000,00 N/cm² em todos os traços, devido a velocidade obtida neste aparelho ter sido inferior a 3,6 km/s.

- O módulo de elasticidade para as composições de SCC e SCCP, nas fórmulas da NB-1 e CEB, apresentou maiores resultados com a presença da cal pozolânica, devido a estas fórmulas serem função direta da RCS e esta, na maioria dos traços, foi maior nas misturas com cal pozolânica.

- As correlações estatísticas realizadas entre o tempo e a resistência à compressão simples, apresentaram resultados altamente significativos, com níveis de significância abaixo de 1%.

2) A partir dos resultados com os tijolos:

- Os tijolos de solo-cimento, com substituição parcial do cimento Portland por cal e cal pozolânica, apresentaram bons resultados, com uma RCS satisfatória, ou seja, acima de 1,00 MPa.

- Nos tijolos fabricados com o solo A, houve uma redução de 10% no consumo de cimento, tanto com a presença da cal, como com a presença da cal pozolânica.

- Nos tijolos fabricados com o solo B, a redução no consumo de cimento chegou a 40%, com a adição de cal, bem como com a adição de cal pozolânica.

- Os resultados de RCS obtidos nos tijolos foram superiores aos resultados obtidos nos corpos de prova cilíndricos nos mesmos traços, acredita-se que este fato deva-se ao diferente modo de compactação na confecção dos mesmos.

Conclui-se então que, a aplicação de cal e cal pozolânica na fabricação de tijolos, para uso em habitações populares é viável, pois, além de obter-se uma RCS dentro dos limites normalizados pela ABNT, o custo para fabricação de 1.000 tijolos manuais de solo-cimento, fica em torno de US\$ 15,00, podendo-se reduzir o consumo de cimento quando substituído por cal ou cal pozolânica e este valor ser ainda menor, dependendo do preço da cal ou da cal pozolânica empregada (sendo a segunda ainda não industrializada), enquanto o preço do tijolo furado, com resistência semelhante, varia de US\$67,00 a US\$85,00; observando-se que no preço do tijolo de solo-cimento não levou-se em consideração o preço da mão-de-obra, uma vez que este pode ser fabricado pelo próprio usuário.

Capítulo 6

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Estudar uma maior quantidade de traços no tijolo, com a finalidade de verificar se, acrescentando cal e cal pozolânica, a RCS continua aumentando, nestes solos.
- Estudar o comportamento de outros solos na fabricação de tijolos com o uso destes aglomerantes.
- Verificar a influencia, nestes solos, de outras composições de cal pozolânica além da composição 30% - 70%.
- Estudar o comportamento de outros tipos de cais, até mesmo cal virgem, com intuito de tornar ainda mais econômica a aplicação deste aditivo.
- Estudar o módulo de elasticidade em um número maior de solos e traços, a fim de se determinar um coeficiente de correlação para as fórmulas empíricas da ABNT, NB-1 e CEB, usadas em concreto.
- Estudar o comportamento da redução do uso de cimento Portland, até 0%, em substituição à cal pozolânica nos solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.B.C.P. - Associação Brasileira de Cimento Portland, Rio de Janeiro, 1974.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Análise granulométrica dos solos*. NBR - 7181, 1984.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. NBR - 7222, 1983.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Blocos cerâmicos para alvenaria*. NBR - 7171, 1992.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira n° 200*. NBR - 11579, 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. *Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*. NBR - 8802, 1985.
- 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 da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática*. NBR - 10838, 1988.

- 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. *Determinação do limite de liquidez*. NBR - 6459, 1984.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Determinação do limite de plasticidade*. NBR - 7180, 1984.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual*. NBR 10832, 1989.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica*. NBR - 6508, 1984.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. NBR - 6457, 1986.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Solo-cimento-moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos*. MB - 3360, 1990.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Solo-cimento ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. MB - 3361, 1990.
- A.B.N.T., Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Tijolo maciço de solo-cimento - determinação da resistência à compressão e da absorção d'água*. NBR - 8492, 1984.
- Abiko, A. K. - *Solo-Cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticos*. A construção, São Paulo (1983): 15-18, (Eucarte TE nº 13), 1983.

- Abiko, A. K. - *Solo-Cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas*. Tecnologia de Edificações, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Edificações do IPT, Ed. Pini, São Paulo, 1988.
- ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal - *Aplicação da cal nas construções civis*, São Paulo, 1988.
- Agopyan, V. - *Estudo dos materiais de construção civil, materiais alternativos*. Tecnologia de Edificações, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Edificações do IPT. Ed. Pini, São Paulo, 1988.
- Bauer, R. J. F. - *Falhas em revestimentos*. Anais do Encontro "Argamassas Industrializadas-usos e desempenhos", São Paulo, 1993.
- Bezerra, M. A. - *Estudo preliminar comparativo entre misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revestimento de canais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1983 .
- Bezerra, R. L. & Cabrera, J. G. - *A durabilidade de solos lateríticos estabilizados com cimento e aditivos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, PB, 1976.
- Braga, C. C. A. - *Contribuição ao estudo da permeabilidade e das características mecânicas de um solo laterítico estabilizado com cimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1979.
- Calleja, C. J. - *Las puzolanas*. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Espanha, 1958.

- Casanova, F. J. & Ceratti, J. A. - *The assessment of cement requirement of oxisols by a physico-chemical method*. 8th International Soil Classification Workshop, part 1, p. 243, Brazil, 1985 .
- CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia. *Manual Prático de Construção com Solo-Cimento*. Camaçari, BA, 1978.
- Chadda, L. R. - *A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils*. Indian Concret Journal, 45 (7), p. 288-314, 1971.
- Chagas Filho, M. B. - *Concreções lateríticas: propriedades básicas e sua utilização em vigas isostáticas submetidas à flexão simples*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1986.
- Chaves, L. F. M. - *Estabilização de solos com cimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1976.
- Cincotto, M. A. & Kaupatez, R. M. Z. - *Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica, tecnologia de edificações*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Edificações do IPT, Ed. Pini, São Paulo, 1988.
- Clare, K. E. - *The effect of organic matter on the setting of the soil - cement mixtures*. Journal of Applied Chemistry, 25 (4): 625-660, 1954.
- De Graft-Johnson, J. W. S. and Bhatia, H. S. - *Engineering characteristics of lateritic soils*. - General Report. - Proceedings of Specialty Session on Engineering Properties of Lateritic Soils. - 7 Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, México, 1969 .

- DEPEA - Departamento de Estudos e Pesquisas Aplicadas do BNH. *Tijolos maciços de solo-cimento*. Rio de Janeiro, 1985.
- Diamond, S. & Kinter, E. B. - *Gravimetric determination of monolayer glycerol complexes of clay minerals*. N. A. S. NRC 5th Conference on Clays and Clay Minerals. Pub. 556, pp. 318-347, 1968.
- EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de Métodos e Análises de Solos*. Rio de Janeiro, n. p, 1979.
- Enamorado, M. A. - *Estudo comparativo entre o metodo mecanico e o metodo fisico-quimico para dosagem de solo-cimento*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- Felt, E. J. - *Factors influencing some of the physical properties of soil-cement mixtures*. Chicago, PCA, 1955.
- Ferro, J. G. O. - *A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1976.
- Guimarães, J. E. P. - *Tijolos de solo-cal*. V Reunião Aberta da Indústria da Cal - o uso da cal na construção civil. Anais... p. 57-80. São Paulo, 1985.
- Guimarães, S. S.- *Utilização de solo-cimento em habitações de baixo custo*. In: XXI Jornadas sul-americana de Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, 1981.
- Ingles, O. G. & Metcalf, J. B. - *Soil stabilization*. New York, Wiley e sons, 1973.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) - *Casa evolutiva em mutirão concentrado em blocos de solo-cimento: fase 1 - a aplicação do solo-cimento à habitação*. (Relatório n 9795), São Paulo, 1977.

- IPT, Teste a Teste - *Blocos cerâmicos: fora de forma*. In: Revista de Tecnologia da Construção, pp. 64-66. Editora Pini, São Paulo, 1994.
- Katti, R. K., et alli- *Water in cutback asphalt stabilization of soils*. - Highway Research Board; Bull - 241, 1959 .
- Kihara, Y. & Shukuzana, J. K. - *Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil*, Cerâmica, Abril, 1981.
- Lima, J. B. M. - *Cais pozolânicos, caracterização e desempenho mecânico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1993.
- Massazza, F. - *Chimica delle aggiunte pozzolaniche e dei cementi di miscella*. II Cement, 73 (1) 3-38, Roma, 1974.
- Medina, J. - *Estabilização do solo com cimento Portland*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRI, Rio de Janeiro, 1968.
- Mota, N. M. B. - *Cais pozolânicas para uso em argamassas de revestimento e alvenarias*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1994.
- Neves, G. A. - *Influência da área específica na atividade pozolânica do sistema solo latérico-cal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1989.
- 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.

- Pereira, A. J. R. - *Materiais de Construção*, UFPB - Campus II, Campina Grande, 1957.
- Petrucci, E. G. R. - *Concreto de cimento Portland*. Ed. Globo, Porto Alegre, 1979.
- Picchi, F. A., Cincotto, M. A. & C. Barros, J. M.- *Tijolos de solo-cal*. Tecnologia de Edificações, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Edificação do IPT, Ed. Pini, São Paulo, 1988.
- Pinto, C. S. - *Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento*. ABPC, São Paulo, 1980.
- Pinto, C. S.- *Estabilização de pavimentos com cal: o uso da cal na engenharia civil*. In: Reunião Aberta da Indústria da Cal. Anais... pp. 79-112, São Paulo, 1985.
- Queiroz de Carvalho, J. B. - Notas de aula - Pós graduação, Departamento de Engenharia Civil (DEC), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, 1992.
- Rodrigues, M. G. M. - *Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1992.
- Sherwood, P. T. - *The effect of organic matter on the setting of soil-cement mixture*. - Tech. Paper n 61; Road Research Laboratory, Londres, 1962.
- Sherwood, P. T. - *The properties of cement stabilized materials*. - Road Research Laboratory. - RRL Report LR 205, 1968.
- Sherwood, P. T. - *Stabilization of weathered and sulphate bearing clays*. Geotechnique, dec., 1957.

- Sherwood, P. T. and Sullivan, G. A. - *A study of the factors affecting the strength of cement - stabilized lateritic gravel* - Brit. Road Res. Laboratory, Note 3798,1960.
- Silva, C. R.- *Cais aditivados com pozolana e cimento Portland*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB,1992 .
- Spiegel, M. R. - *Estatísticas* - Tradução de Pedro Consentino, Editora McGraw - Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1980.
- Souza Santos, P. - *Tecnologia de argilas*. Vol 2, Ed. Edgard Bluger, São Paulo,1975.
- Vargas, M. - *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, MCgraw - Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.
- Zampieri, V. A. - *Mineralogia e mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. Dissertação de Mestrado, USP, Sao Paulo, 1989 .

ANEXO 1

Descrição do Ensaio de Salinidade dos Solos, Método Proposto pela EMBRAPA (1979)

- 1) Passa-se o solo na peneira ABNT n° 10 de abertura 2,0 mm.
- 2) Zera-se a balança com o recipiente onde o solo será colocado, para cada tipo, recipientes diferentes.
- 3) Coloca-se 300 g do solo no recipiente.
- 4) Adiciona-se água destilada, iniciando-se com 50 ml, até que o solo fique uma pasta soltando da espátula.
- 5) Deixa-se em repouso durante 1 hora, coberto com papel de filtro umedecido com água destilada.
- 6) Após este intervalo de tempo, coloca-se a amostra na bomba de vácuo para retirada do extrato de saturação.
- 7) Lê-se a condutividade elétrica (CE) - mS/cm.
- 8) Calcula-se o grau de salinidade

CE = valor lido x correção da escala x fator de correção com relação à temperatura

9) Caso o item 8 seja acima de 4%, determina-se a porcentagem de cátions (Ca, Mg, Na e K) e ânions (Cl, HCO₃, CO₃, SCO₄).

EXEMPLO

Supor que:

Valor lido = 2,22

correção da escala = 1,0

fator de correção (temperatura) = 0,96 p/ T = 27°C

Logo:

$$CE = 2,22 \times 1,0 \times 0,96 = 2,13 \text{ mS/cm}$$

Transformando-se para mg/l, tem-se:

$$\text{ppm} = CE \times 640$$

$$\text{mg/l} = 2,13 \times 640 \cong 1363,2 \text{ mg/l em 1000 ml}$$

Para 300 g de solo, usou-se 65 ml de H₂O

$$300 \text{ g solo} = 65 \text{ ml}$$

$$100 \text{ g solo} - x \Rightarrow 21,67 \text{ ml}$$

$$1000 \text{ ml} - 1363,2 \text{ mg}$$

21,67 - y => 29,54 mg (sais)

\cong 0,03 g

29,54 mg - 100 g de solo

0,02954 g - 100 g de solo ou 0,03% de sais.

Conclui-se que a porcentagem de sais não é prejudicial, neste solo.

ANEXO 2

Descrição da Dosagem de Solo-Cimento pelo Método Experimental

Segundo o DEPEA, 1985, para estudar a dosagem em laboratório é necessário dispor-se de cerca de 50 kg de solo e 40 kg de cimento. A seqüência de procedimentos é a que se descreve abaixo:

1) Ensaio de Caracterização do Solo:

- Preparação de Amostra de Solo para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, ABNT-NBR 6457 (1986).

- Determinação da Massa Específica Real de Solo, ABNT-NBR 6508 (1984).

- Determinação do Limite de Liquidez, ABNT-NBR 6459 (1984) e do Limite de Plasticidade, ABNT-NBR 7180 (1984).

- Análise Granulométrica de Solos, ABNT-NBR 7181 (1984).

2) Ensaio para Dosagem:

- Solo - Ensaio de Compactação, ABNT-NBR 7182 (1984).

- Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento (Método SC-2 - ABCP).

- Ensaio à Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento (Método SC-4 - ABCP).

ANEXO 3

Descrição do Método Físico-Químico de Dosagem do Solo-Cimento, proposto por Chadda (1971)

- 1) Utiliza-se em média sete provetas de 250 ml marcando-as com as porcentagens do cimento (0%, 3%, 5%,...).
- 2) Pesa-se 20g do solo, seco ao ar, destorroado e passado na peneira n° 10, para cada proveta.
- 3) Adiciona-se as quantidades de cimento em porcentagens por peso de solo, nas respectivas provetas.
- 4) Mistura-se o solo e o cimento ainda secos, agitando-se as provetas.
- 5) Coloca-se aproximadamente 50 ml de água destilada e agita-se as provetas até que ocorra a homogeneização completa da mistura.
- 6) Completa-se o volume para 100 ml, lavando as paredes das provetas, e coloca-se em repouso absoluto até o dia seguinte.
- 7) No dia seguinte, agita-se a mistura com o auxílio de um bastão de metal até ficar homogênea (cerca de 30 s).
- 8) Após no mínimo 2 hs, faz-se a leitura do volume ocupado pelo sedimento.
- 9) No terceiro dia, agita-se novamente e faz-se a leitura após no mínimo 2 horas.

10) Repete-se esta operação todos os dias até obter-se leituras constantes ou decrescentes.

11) Monta-se um tabela com as porcentagens de cimento e as leituras de cada dia.

12) Calcula-se a variação volumétrica percentual ($\% \Delta V$) do rendimento solo-cimento em relação àquela do solo puro (0%), para os diversos teores de cimento, escolhendo para o cálculo, o maior volume obtido para cada teor.

13) Faz-se um gráfico de $\Delta V (\%) \times \% c i$. O ponto máximo de variação volumétrica corresponde ao teor mínimo de cimento requerido para a "satisfação" físico-químico do solo.

EXEMPLO

% de Cimento em peso	Leituras Diárias do Volume Sedimentado (cm ³) (Provetas de 250 ml)							Variação Volumétrica (ΔV) (%)
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	
0	20	21	19	21	20	20	20	0
3	35	45	50	50	49	48	47	138
5	39	54	60	60	60	58	57	185
7	41	59	63	61	63	60	59	200
9	40	51	54	54	55	54	53	162
11	36	46	49	49	49	49	49	133
13	36	45	46	46	46	46	45	119

Dosagem Físico-Química.

Teor ideal de cimento - 7 % em peso.

ΔV - Maior leitura ocorrida na porcentagem de cimento em estudo menos a maior leitura ocorrida na porcentagem 0% de cimento, dividido pela maior leitura ocorrida em 0% vezes 100.

% ΔV - Variação volumétrica percentual do rendimento solo-cimento, em relação àquela do solo puro, ou seja, sem adição de cimento

$\Delta V = \frac{V(\% \text{ CI}) - V(0\%)}{V(0\%)}$, onde % CI - porcentagem de cimento adicionado ao solo.

$V(0\%)$

Cálculos

1 - Para $V = 0\%$ $\Rightarrow \Delta V = 0\%$

2 - Para $V = 3\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{50 - 21}{21} \times 100 = 138\%$

3 - Para $V = 5\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{60 - 21}{21} \times 100 = 185\%$

4 - Para $V = 7\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{63 - 21}{21} \times 100 = 200\%$

5 - Para $V = 9\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{55 - 21}{21} \times 100 = 162\%$

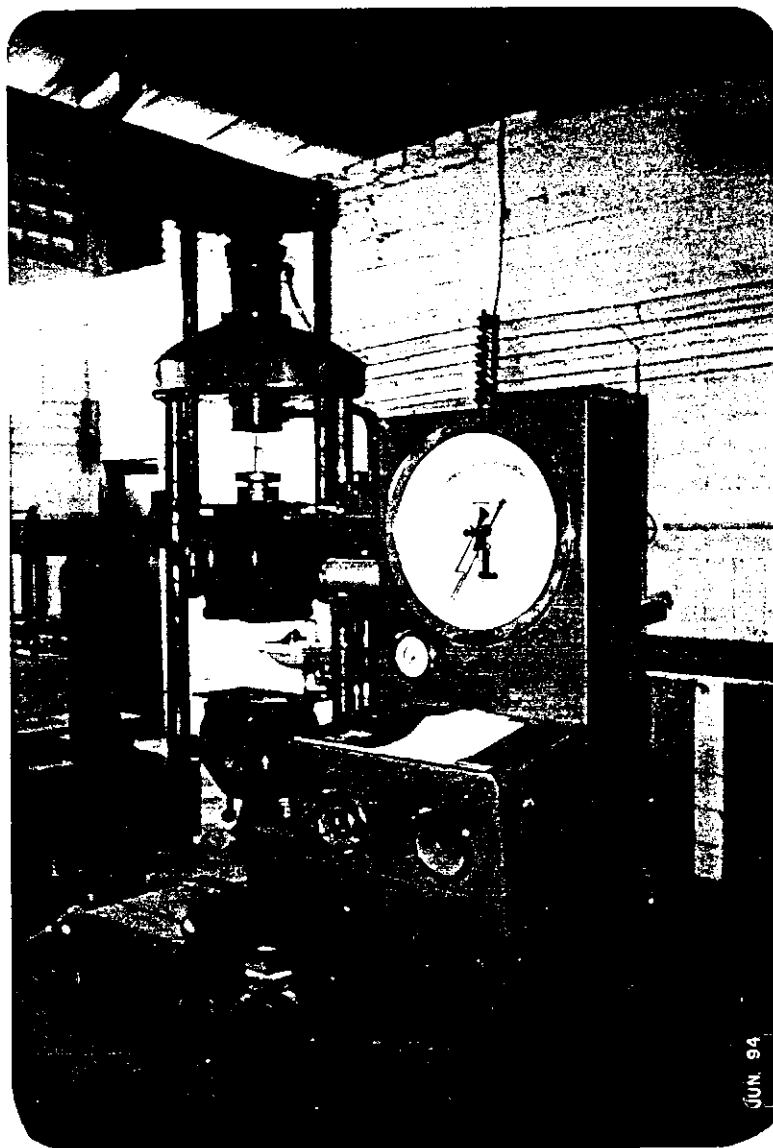
6 - Para $V = 11\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{49 - 21}{21} \times 100 = 133\%$

7 - Para $V = 13\%$ $\Rightarrow \Delta V = \frac{46 - 21}{21} \times 100 = 119\%$

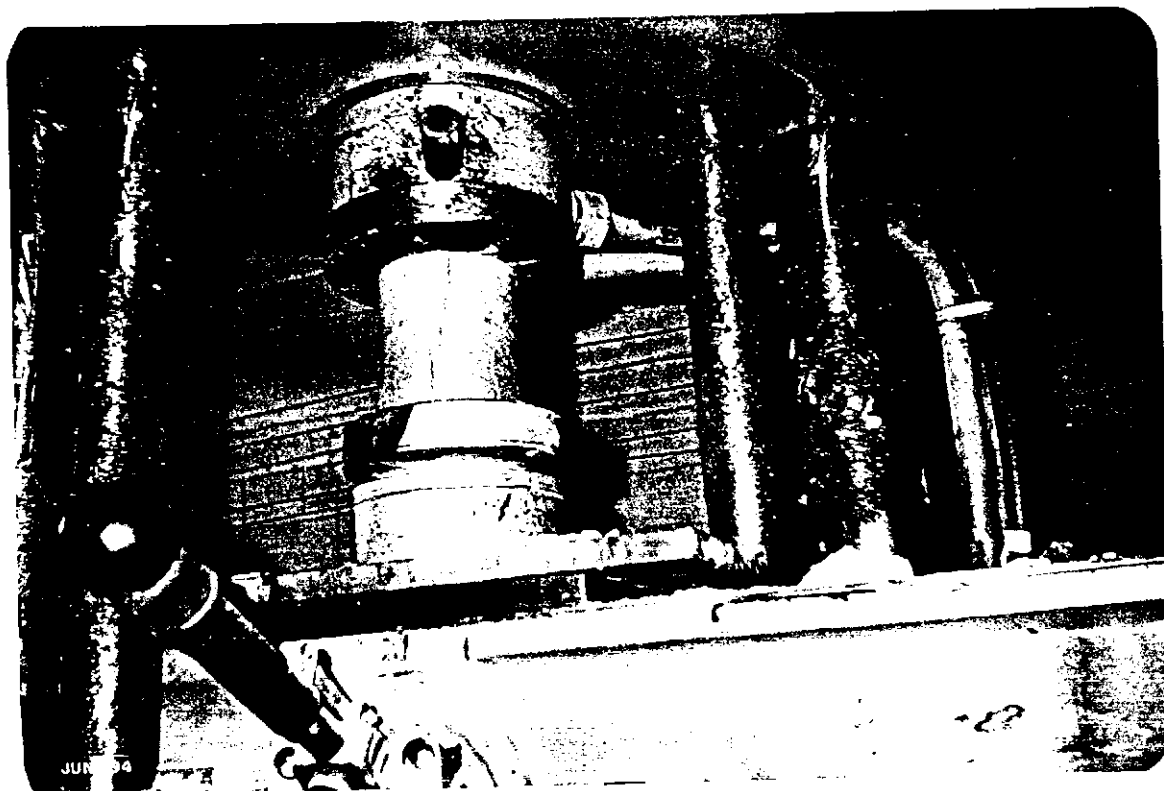
De acordo com os cálculos, o valor máximo de ΔV foi para um teor de cimento igual a 7%, logo esta é a quantidade de cimento mais econômica para estabilizar este solo.

ANEXO 4

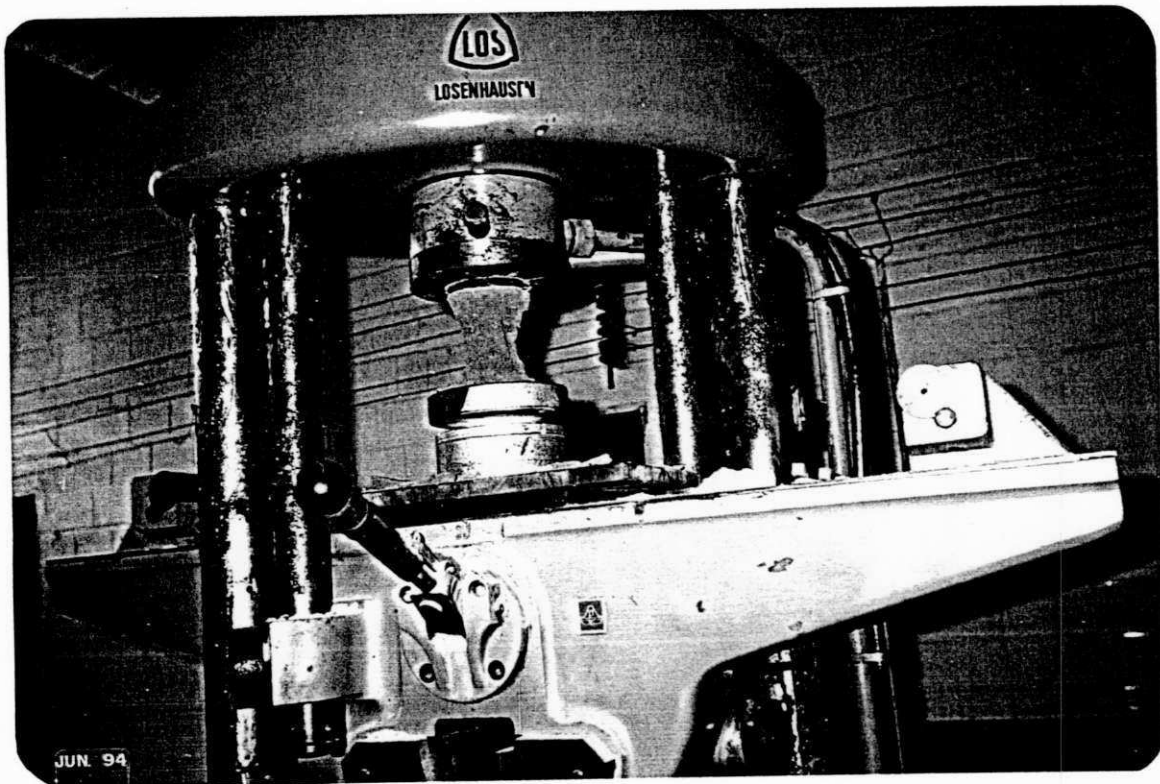
FOTOGRAFIAS



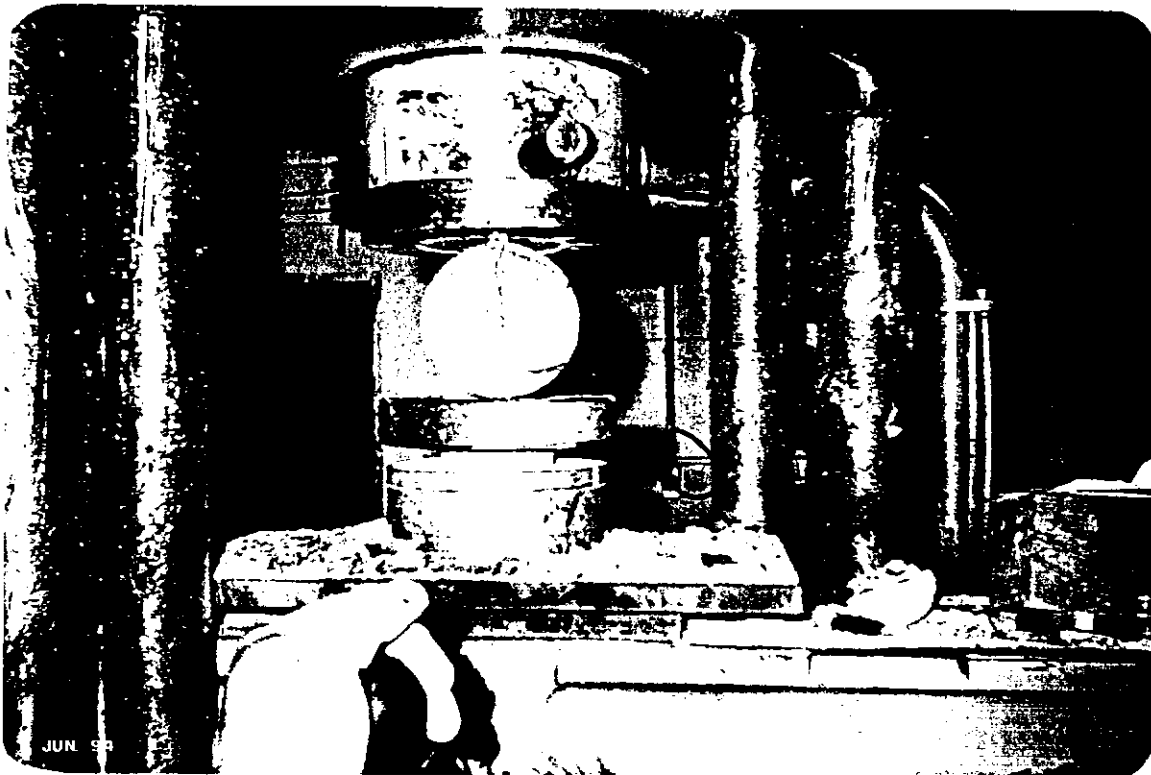
Fotografia 1 - Prensa Losenheim para Rompimento de Corpos de Prova



Fotografia 2 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples nos Corpos de Prova Cilíndricos



Fotografia 3 - Corpo de Prova após o Rompimento.



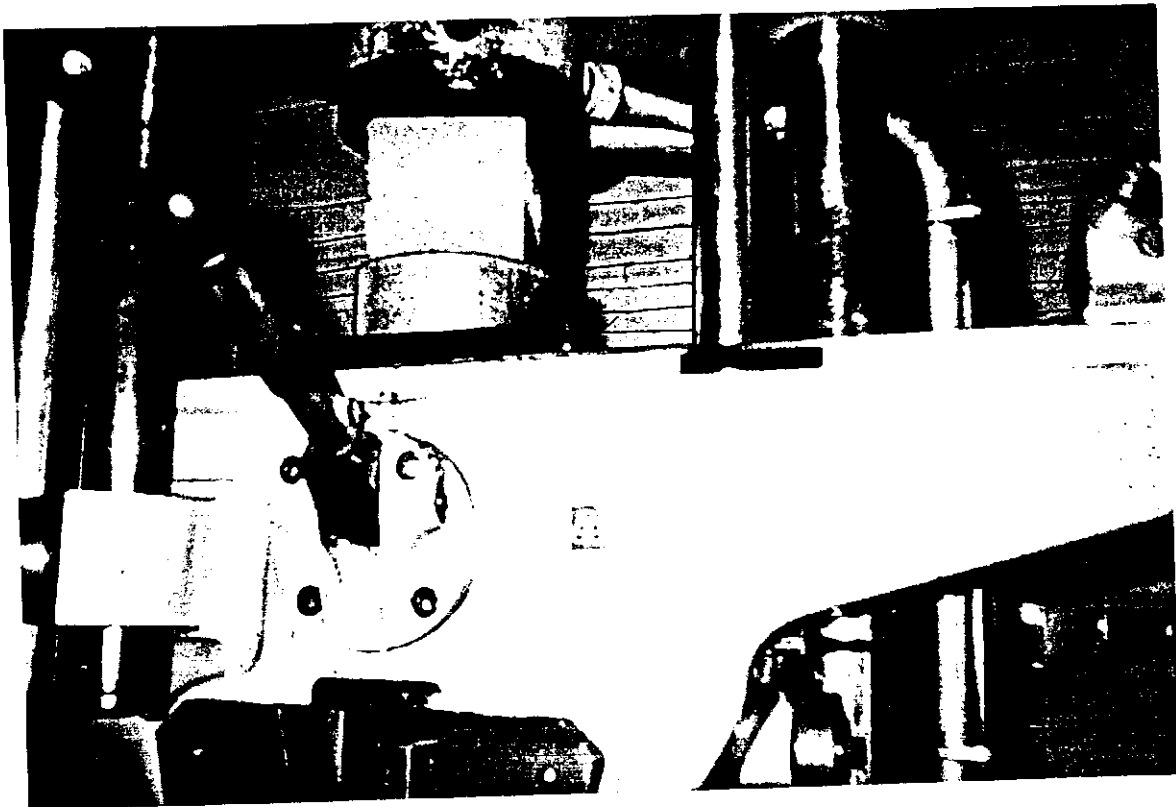
Fotografia 4 - Ensaio de Resistência à Tração Indireta nos Corpos de Prova
Cilíndricos.



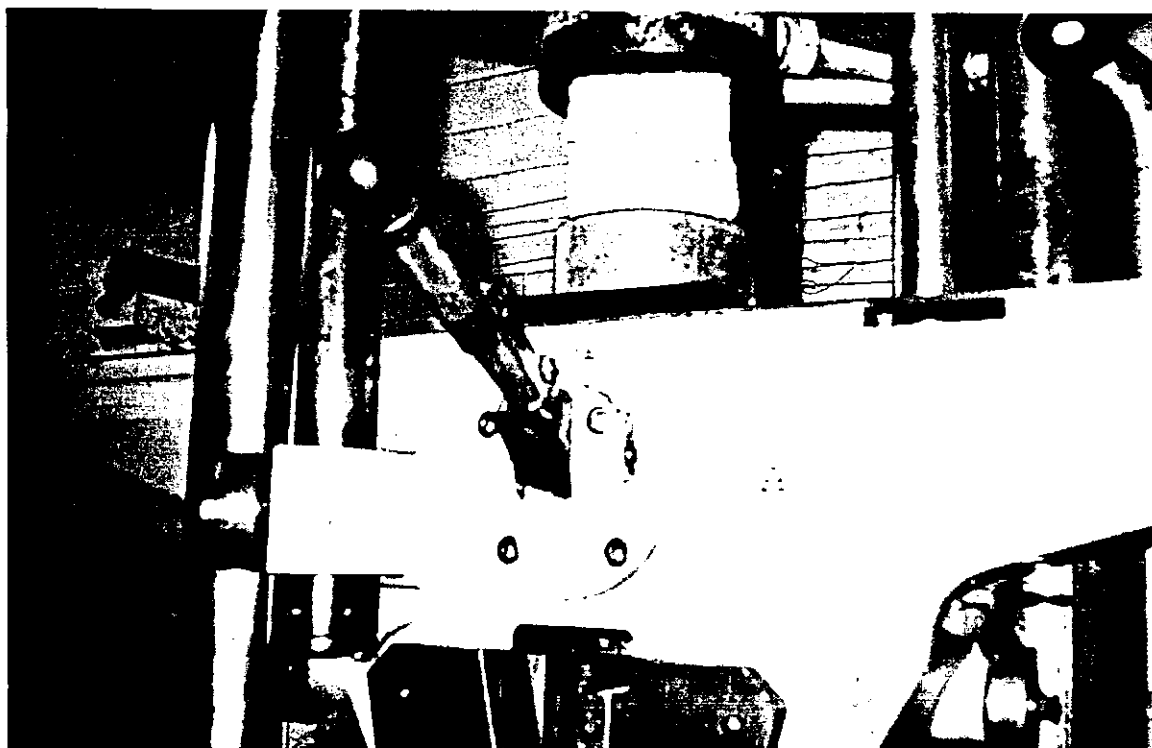
Fotografia 5 - Aparelho de Ultra-som - PUNDIT



Fotografia 6 - Misturador Mecânico do Solo



Fotografia 7 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples nos Tijolos



Fotografia 8 - Tijolos de Solo-Cimento, Solo-Cimento-Cal e Solo-Cimento-Cal Pozolânica, após Cura.