

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

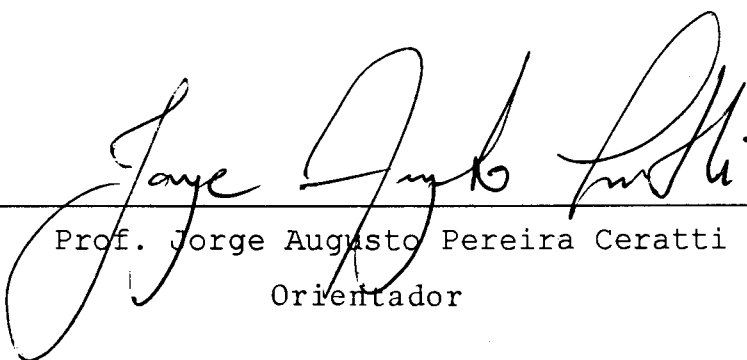
ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO
UTILIZANDO AREIA DO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESTABILIZADA COM CINZA VOLANTE E CAL

Bibiana Cardoso Fogaça

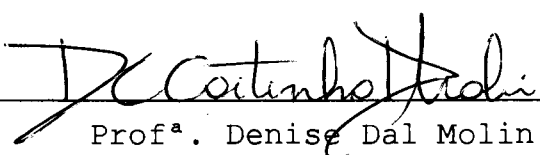
Dissertação apresentada ao corpo docente
do Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil- CPGEC, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Porto Alegre
Setembro de 1996

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



Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Orientador



Prof^a. Denise Dal Molin

Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

Prof. Glicério Trichês
D. Sc. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof. Jarbas Militistsky
P.hD. pela University of Surrey

Prof. Luis Antonio Bressani
P.hD. pela University of London

Dedico esta dissertação à minha
primeira professora, que me ensinou
a gostar de estudar, e sempre foi
um exemplo de vida para mim,
minha Mãe.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu sincero reconhecimento.

Ao professor orientador Jorge Augusto Pereira Ceratti, pelo interesse, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em engenharia Civil da área de Geotecnia pelos conhecimentos ministrados.

À professora Regina Davison Dias um agradecimento especial pelo incentivo prestado.

Aos colegas do CPGEC - UFRGS, em especial Dante René Bosch, Márcio Antônio Vendrusculo e Maria Regina Horn, pelas horas de estudo compartilhadas, pela amizade e companheirismo.

À Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC) por permitir a realização de ensaios laboratoriais no Departamento de Recursos Minerais (DRM).

Aos técnicos do Departamento de Recursos Minerais (DRM) da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC), pelo interesse e pela valiosa colaboração prestada.

Aos laboratoristas do Departamento de Recursos Minerais (DRM) da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC), pelo interesse e pelo grande auxílio na confecção dos corpos de prova.

Ao MSc. José Eduardo C. Mallmann, um agradecimento especial pelo incentivo, pela amizade e colaboração prestada.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

Aos bolsistas de iniciação científica, Carlos Eduardo e Sirlei Maribel, pela colaboração prestada e pela amizade.

Aos funcionários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da área de Geotecnia, João, Jair, Silvana e Ana Paula, pela colaboração e pela boa convivência.

Ao funcionário do Laboratório de Modelos Estruturais - LEME, Flávio, pelo grande auxílio prestado e pela amizade.

Ao Prof. Brito, e ao funcionário Nanni, do Laboratório de Instrumentação Eletro Eletrônica - DELET, pelo empenho demonstrado para o bom funcionamento dos equipamentos, meu reconhecimento.

À bibliotecária Juliana Bonilha pela dedicação na correção da bibliografia.

Ao MSc. Washington Nunez pelo interesse e colaboração.

À minha família que sempre me incentivou e me deu grande apoio.

À minha amiga Daniela Salvador pela boa convivência durante a realização deste trabalho, bem como pela execução das figuras.

Ao meu colega, amigo e noivo Luis Otávio B. Prates da Cunha, pela convivência, paciência, apoio e carinho, fundamentais para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XV
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
-------------------------	----------

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 A Estabilização de Solos com Cinza Volante e Cal	4
2.2 As Reações Químicas	6
2.3 Uso de Aditivos	8
2.4 Resistência à Compressão Simples	10
2.5 Ensaio de Compressão Diametral	12
2.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral	12
2.5.2 Módulo de Resiliência	16
2.6 Fadiga - Ensaio de Flexão	18
2.6.1 Introdução	18
2.6.2 Ensaio de Fadiga	19
2.6.3 Estudos de Fadiga Realizados	23
2.7 Análise Paramétrica	24
2.7.1 Introdução	24
2.7.2 Algumas Metodologias Propostas	25

CAPÍTULO 3

PROGRAMA DA PESQUISA	30
3.1 Introdução	30
3.2 Determinação das Misturas a Serem Estudadas	31
3.3 Ensaaios Laboratoriais	32
3.4 Análise Paramétrica	33

CAPÍTULO 4

MATERIAIS UTILIZADOS E MISTURAS ESTUDADAS	36
4.1 Materiais Utilizados	36
4.1.1 Solo	36
4.1.2 Cinza Volante	36
4.1.3 Cal	37
4.1.4 Aditivo	38
4.1.5 Água	38
4.2 Misturas Estudadas	38
4.2.1 Dosagem das Misturas	38
4.2.2 Métodos de Dosagem	40

CAPÍTULO 5

ENSAIOS REALIZADOS	45
5.1 Preparação do Solo e da Cinza Volante	45
5.2 Preparação da Mistura	45
5.3 Ensaio de Compactação	46
5.4 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	47
5.4.1 Para os Ensaios de Resistência à Compressão Simples e Compressão Diametral	47
5.4.2 Para o Ensaio de Fadiga à Flexão	48
5.5 Ensaios de Resistência	53
5.6 Ensaio de Tração Indireta Com Carregamento Repetido - Módulo de Resiliência	56
5.7 Ensaio de Fadiga à Flexão	58
5.7.1 Análise Teórica do Ensaio de Fadiga à Flexão	62

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
6.1 Resistência à Compressão Simples	64
6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	69
6.3 Comparações Entre Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração por Compressão Diametral	73
6.4 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral	76
6.5 Ensaio de Fadiga à Flexão	78

CAPÍTULO 7

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO
CONTENDO BASE DE SOLO ESTABILIZADO COM CINZA**

VOLANTE E CAL	83
7.1 Introdução	83
7.2 O Programa Computacional Utilizado	84
7.2.1 Introdução	84
7.2.2 O Programa ELSYM 5	85
7.3 As Estruturas e Parâmetros Analisados	87
7.4 Apresentação dos Resultados Obtidos com o ELSYM 5	90
7.5 Análise dos Parâmetros Estudados	90
7.5.1 Introdução	90
7.5.2 Deflexão Superficial (DEF_{SUP})	91
7.5.3 Tensão de Compressão no Revestimento (TC_{REV})	94
7.5.4 Deformação Específica de Compressão na Face Inferior do Revestimento (DC_{REV})	98
7.5.5 Tensão de Tração na Face Inferior da Base Cimentada (TT_{BAS})	102
7.5.6 Tensão Vertical de Compressão no Topo do Subleito ($TVC_{SUBLEITO}$)...	105
7.5.7 Deformação Específica de Tração na Face Inferior da Base Cimentada (DT_{BAS})	109
7.6 Proposta de Pré-Dimensionamento de Pavimentos com Camada de Base Cimentada	112
7.7 Fator Laboratório-Campo	115

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
8.1 Conclusões	117
8.2 Sugestões	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXO	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tensões no pavimento causadas por veículo em movimento	13
Figura 2.2 - Tensões na base de solo cimentado devido a uma carga móvel na superfície do pavimento (CERATTI, 1991).....	14
Figura 2.3 - Variação da deformação específica com o tempo na fibra inferior da base de solo-cimento, devido a uma carga móvel na superfície (CERATTI, 1991)	14
Figura 2.4 - Relação entre tensão, deformação e número de aplicações de carga sob tensão controlada (CERATTI, 1991)	22
Figura 2.5 - Distribuição de tensões e deformações ao longo da seção transversal de uma viga em flexão (CERATTI, 1991).....	22
Figura 3.1 - Esquema do programa de pesquisa	35
Figura 4.1 - Mapa de localização do trecho onde foi retirado o solo estudado.....	41
Figura 4.2 - Curva de distribuição granulométrica do solo.....	42
Figura 4.3 - Curva de distribuição granulométrica da cinza volante.....	43
Figura 4.4 - Distribuição granulométrica da mistura de 75% de solo com 25% de cinza volante	44
Figura 4.5 - Distribuição granulométrica da mistura de 65% de solo com 35% de cinza volante	44
Figura 5.1 - Curvas de compactação	46
Figura 5.2 - Forma especial de aço utilizada para moldagem das vigotas	49
Figura 5.3 - Detalhe das camadas durante a moldagem das vigotas.....	50
Figura 5.4 - Forma com a tampa colocada	50
Figura 5.5 - Forma com vigota moldada na fase de carregamento.....	51
Figura 5.6 - Vigota recém desmoldada.....	52
Figura 5.7 - Vigota sendo coberta com cera quente de abelha	52
Figura 5.8 - Vigota pronta para ser curada.....	53
Figura 5.9 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	54
Figura 5.10 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	55

Figura 5.11- Equipamento utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência	57
Figura 5.12- Vista frontal e lateral do pórtico de aplicação de cargas	59
Figura 5.13- Equipamento utilizado para ensaio de Fadiga à Flexão	60
Figura 5.14- Diagrama de momentos reais e forças cisalhantes reais.....	62
Figura 6.1 - Resultado do ensaio de RCS até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995).....	68
Figura 6.2 - Resultado do ensaio de RCS até 120 dias de cura	68
Figura 6.3 - Resultado do ensaio de RTCD até 90 dias de Cura (FOGAÇA e CERATTI,(1995).....	72
Figura 6.4 - Resultado do ensaio de RTCD até 120 dias de Cura	72
Figura 6.5 - Comparação entre RCS e RTCD	75
Figura 6.6 - Relação entre RTCD e RCS em função do período de cura.....	75
Figura 6.7 - Resultado do ensaio de MRCD até 120 dias de cura	78
Figura 6.8 - Relação entre a vida de fadiga e a tensão máxima de tração.....	80
Figura 6.9 - Forma de ruptura das vigas no ensaio de Fadiga à Flexão.....	81
Figura 7.1- Localização das cargas solicitantes	88
Figura 7.2- Estrutura de referência e carregamento utilizados na simulação com o ELSYM5.....	89
Figura 7.3 - Parâmetros estudados	89
Figura 7.4 - Variação da deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 6000 MPa.....	92
Figura 7.5 - Variação da deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 11000 MPa.....	92
Figura 7.6 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 17000 MPa.....	93
Figura 7.7 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 22000 MPa.....	93
Figura 7.8 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 28000 MPa.....	94
Figura 7.9 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.	95
Figura 7.10- Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.	96

Figura 7.11- Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.	96
Figura 7.12- Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.	97
Figura 7.13- Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.	97
Figura 7.14- Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.	99
Figura 7.15- Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.	100
Figura 7.16- Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.	100
Figura 7.17- Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.	101
Figura 7.18- Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.	101
Figura 7.19- Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.	103
Figura 7.20- Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.	103
Figura 7.21- Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.	104
Figura 7.22- Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.	104
Figura 7.23- Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.	105
Figura 7.24- Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 6000 MPa.	106
Figura 7.25- Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 11000 MPa.	107
Figura 7.26- Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 17000 MPa.	107
Figura 7.27- Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 22000 MPa.	108

Figura 7.28- Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 28000 MPa.....	108
Figura 7.29- Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.	110
Figura 7.30- Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.	110
Figura 7.31- Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.	111
Figura 7.32- Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.	111
Figura 7.33- Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.	112
Figura 7.34- Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa	113
Figura 7.35- Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa	113
Figura 7.36- Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa	114
Figura 7.37- Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa	114
Figura 7.38- Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultado do ensaio de Eades e Grim	39
Tabela 4.2 - Composição das misturas estudadas	40
Tabela 5.1 - Número de corpos de prova moldados para cada período de cura, para cada tipo de ensaio	48
Tabela 6.1 - Resultados de Resistência à Compressão Simples(MPa)	64
Tabela 6.2 - Modelos de regressão para o ensaio de RCS até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995).....	66
Tabela 6.3 - Modelos de regressão para o ensaio de RCS até 120 dias de cura	67
Tabela 6.4 - Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	69
Tabela 6.5 - Modelos de regressão para o ensaio de RTCD até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995).....	70
Tabela 6.6 - Modelos de regressão para o ensaio de RTCD até 20 dias de cura	71
Tabela 6.7 - Modelos regressão para RTCD em função da RCS.....	73
Tabela 6.8 - Análise de variância da relação RTCD/RCS.....	74
Tabela 6.9 - Resultados de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral(MPa).....	76
Tabela 6.10 - Modelos de regressão para o ensaio de MRCD.....	77
Tabela 6.11 - Resultados obtidos no ensaio de Fadiga à Flexão	79
Tabela 7.1 - Características dos programas computacionais utilizáveis em estudos de pavimentos (CERATTI, 1991)	85
Tabela 7.2 - Análise de variância para deflexão superficial.....	91
Tabela 7.3 - Análise de variância para TC_{REV} (sob a roda).....	94
Tabela 7.4 - Análise de variância para TC_{REV} (entre as rodas).....	95
Tabela 7.5 - Análise de variância para DC_{REV}	98
Tabela 7.6 - Análise de variância para TT_{BAS}	102
Tabela 7.7 - Análise de variância para $TVC_{SUBLEITO}$	105
Tabela 7.8 - Análise de variância para DT_{BAS}	109

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- M_R - módulo de deformação resiliente
- σ - tensão axial aplicada repetidamente
- ε - deformação específica resiliente para um determinado número de aplicação de tensão
- σ_t - tensão de tração na fibra inferior da base cimentada
- σ_v - tensão vertical no subleito
- H_R - espessura do revestimento
- H_B - espessura da base
- E_B - módulo de elasticidade da camada de base
- $\sigma_{t \max}$ - tensão de tração máxima admissível na fibra inferior da base cimentada
- $\sigma_{v \max}$ - tensão vertical máxima admissível no subleito
- σ_r - resistência à tração estática por compressão diametral, do material de base
- $\gamma_{s \max}$ - massa específica aparente seca máxima
- ω - umidade
- F - força máxima aplicada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral
- d - diâmetro do corpo de prova
- h - altura do corpo de prova
- F - carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova
- Δ - deformação elástica ou resiliente medida num ciclo particular de carga
- μ - coeficiente de Poisson
- P - carga aplicada no ensaio de fadiga à flexão
- L - distância entre os apoios
- RCS - Resistência à Compressão Simples
- RTCD - Resistência à Tração por Compressão Diametral
- MRCD - Módulo de Resiliência por Compressão Diametral
- t - período de cura

N - vida de fadiga

N_f - número de ciclos

$\sigma_{t \max}$ - tensão máxima de tração

R² - coeficiente de determinação

DEF_{SUP} - deflexão superficial

TC_{REV} - tensão de compressão na face inferior da camada asfáltica

DC_{REV} - deformação específica de compressão na face inferior da camada asfáltica

TT_{BAS} - tensão de tração na face inferior da base cimentada

TVC_{SUBLEITO} - tensão vertical de compressão no topo do subleito

DT_{BAS} - deformação específica de tração na face inferior da base cimentada

N_{c (TR)} - número real de operação do eixo padrão

TR - área trincada

f_o - fator laboratório-campo

N_{lab} - vida de fadiga determinada em laboratório

CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

TRB - Transportation Research Board

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ASTM - American Association for Testing and Materials

RESUMO

O presente trabalho trata da estabilização química de uma areia do litoral do Rio Grande do Sul com cinza volante e cal, e ainda cimento de alta resistência inicial como aditivo de cura rápida. Estudou-se quatro misturas compostas com estes materiais. Realizou-se ensaios de resistência à compressão simples, compressão diametral: módulo de resiliência e resistência à tração, com objetivo de verificar as características e o comportamento mecânico das misturas. Além desses ensaios, procedeu-se também, a realização do ensaio de fadiga à flexão, com uma das misturas estudadas. A partir da utilização do programa computacional ELSYM 5 realizou-se uma análise paramétrica, com os dados obtidos nos ensaios laboratoriais, variando-se a espessura da base e os módulos de resiliência da base e do subleito. Finalmente, apresenta-se uma metodologia de dimensionamento preliminar de pavimentos com camada de base de material cimentado, com uma camada de 5 cm de revestimento asfáltico, onde relaciona-se a vida de fadiga com a espessura da base, para diversos módulos de resiliência da base e do subleito.

ABSTRACT

This work presents the results of a research on the stabilization of sand with lime and fly ash. Four compacted mixtures were tested, two of them also including high initial strength cement. Besides unconfined compression strength tests, diametral compression tests (resilient modulus and tensile strength) were carried out, in order to characterize the mixtures and determine their mechanical behavior. Specimen of one of the mixtures were also submitted to flexural fatigue tests. A parametric analysis, where different base layer thickness and resilient modulus values were adopted, was performed with help of ELSYM 5 software, using laboratory test results. Finally, a preliminary method is presented with the purpose of designing pavements with stabilized base layers, considering a 5 cm asphalt concrete wearing course. Fatigue life is related to the base layer thickness for the several base layer and subgrade resilient modulus adopted.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em projetos de pavimentação, um dos aspectos de maior importância é o material disponível no local da construção, que freqüentemente, não satisfaz às especificações para utilização como camada de base e sub-base. Sendo assim, a alternativa para a melhoria das características do material "in situ" é a estabilização química do solo utilizado, o qual é bastante arenoso, com cinza volante e cal.

A escolha desses materiais estabilizantes deve-se, principalmente, a dois fatores: primeiro pelo fato do solo em estudo ser arenoso, e segundo pela disponibilidade de cinza volante, a qual reage quimicamente com a cal em presença de água, formando compostos cimentantes. Salienta-se que a cinza volante é um material abundante no Rio Grande do Sul, o que se torna economicamente viável.

Quando utiliza-se bases e/ou sub-bases estabilizadas quimicamente ocorre o problema do tempo necessário para a liberação do tráfego que pode ser de vários dias, devido ao fato das reações pozolânicas desenvolverem-se ao longo do tempo. Sendo assim, nesta pesquisa utilizou-se um cimento de alta resistência inicial, como aditivo acelerador de cura, objetivando a liberação do tráfego o mais cedo possível. Além disso, as características executivas locais são consideradas, elas impõem tráfego de obra sobre o pavimento em execução, o que requer alta resistência inicial do pavimento.

Sabe-se que os materiais cimentados quando empregados em camadas de pavimentos sofrem danos devido à fadiga. O termo fadiga está associado à deterioração sob carregamento repetido que leva ao fissuramento e, algumas vezes, ao colapso de componentes estruturais. A fadiga implica um processo de mudança estrutural progressiva, localizada no material sujeito a tensões cíclicas, as quais diminuem sua resistência às tensões aplicadas.

Os ensaios laboratoriais de fadiga de misturas cimentadas, considerando o modo de atuação das camadas destes materiais em estruturas de pavimentos, são realizados a tensão controlada. Um dos métodos de avaliar o comportamento à fadiga de materiais cimentados é o ensaio de fadiga à flexão alternada, o qual consiste em carregar dinamicamente uma vigota constituída do material desejado, com duas cargas concentradas, iguais, nos terços do vão, estando a vigota simplesmente apoiada.

Quanto ao dimensionamento do pavimento, pelo fato de conter camadas estabilizadas com cinza volante e cal, ele não se enquadra estritamente nem na categoria flexível, nem na rígida. Portanto, deve-se considerar as características e o comportamento elástico do material a ser utilizado no projeto, características estas que devem ser avaliadas em ensaios de laboratório, verificando-se também o tipo de comportamento que se esperava deste material quando em serviço.

Com os resultados obtidos em laboratório procedeu-se a análise paramétrica, a partir de simulações numéricas, utilizando-se o programa computacional ELSYM 5, variando-se a espessura da camada de base e os módulos de resiliência da base e do subleito.

A partir da análise paramétrica, e do resultado obtido no ensaio de fadiga, foi possível desenvolver um método

de dimensionamento preliminar de estruturas de pavimento
contendo base de solo cimentado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A Estabilização de Solos com Cinza Volante e Cal

A literatura existente sobre a estabilização de solos com cinza volante e cal é vastíssima. O primeiro trabalho realmente significativo sobre este tema foi realizado por MATEOS (1961).

MATEOS (1961) descreveu os fatores que afetam a estabilização dos solos com cinza volante e cal, segundo ele, estes fatores são: tipo de solo, tipo de cinza, tipo de cal, efeito de diferentes proporções de cal e cinza, período de cura, efeito da energia de compactação e efeito da temperatura de cura. O autor observou que os solos arenosos são os que mais se beneficiam com a adição de cal e cinza volante, e também que não existe uma única proporção ótima de cal e cinza volante para estabilizar todos os solos.

MATEOS e DAVIDSON (1962) ao estudarem misturas de solo, cinza volante e cal concluíram que a proporção de cal e cinza volante a ser adicionada ao solo para estabilização é aquela que apresenta maior resistência com menor custo. Para ser empregada a estabilização com cinza volante e cal, é necessário que ela seja economicamente vantajosa, em relação a outros métodos de estabilização química, que podem produzir resistência e durabilidade equivalentes.

No Brasil, a estabilização de solos arenosos com cinza volante e cal, para fins de pavimentação, tem sido estudada, inclusive em pistas experimentais, sendo estas monitoradas e avaliadas. Além disso, existem diversas publicações sobre o tema.

PINTO (1971) estudou a estabilização de areia com cal e cinza volante e verificou a possibilidade de se empregar este tipo de estabilização, confirmando estudos feitos no exterior (MATEOS, 1961). O autor constatou que as baixas temperaturas retardam a formação de compostos cimentantes.

NARDI (1979) estudou diversas propriedades das misturas pozolânicas tais como: resistência à compressão simples, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, CBR, durabilidade. Aanalizou também os fatores que influenciam a reação pozolânica, dentre eles: materiais, aditivos, proporções, processos de execução e cura.

CERATTI (1979) ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante, nas propriedades de um solo residual compactado, concluiu que é possível a utilização deste tipo de mistura em camada de base de pavimentos. Os valores de resistência à compressão simples obtidos excederam aqueles especificados na bibliografia. Segundo ele, este fato tornaria viável a utilização de um refugo industrial produzido em grandes quantidades em termoelétricas, para fins de pavimentação.

SILVA (1982) em seu estudo de utilização de cinza volante na estabilização de solo residual concluiu, também, pela utilização deste tipo de mistura em camada de base de pavimentos.

PINTO, PREUSSLER e GONÇALVES (1983) publicaram um método de projeto de pavimento semi-rígido para o dimensionamento de pavimentos que contenham camada de base

pozolânica. Os estudos realizados em um trecho experimental no estado de Santa Catarina, junto a rodovia BR-101/SC, município de Imbituba, permitiram concluir sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de cinza volante e cal na estabilização de areia de duna para fins de pavimentação.

No PROJETO CICASOL (1984) foram estudados pavimentos constituídos de solos estabilizados com cinza volante e cal, com a execução de uma pista experimental, comprovando-se a excelência do comportamento de pavimentos com bases pozolânicas e revestimento CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente), tanto funcional como estruturalmente. Ainda nesse trabalho, são apresentadas especificações de serviço para a construção de base com material pozolânico.

DIAS (1995) com a construção de trecho experimental urbano no Balneário Laranjal, em Pelotas-RS, demonstrou que o processo de estabilização de areia fina de duna, com cinza volante e cal, é competitivo se comparado com outros tipos de bases (brita graduada, saibro, solo-asfalto). Outra vantagem em utilizar a cinza volante na estabilização de solos arenosos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul reside na competitividade do custo do processo, em comparação com o uso de outros materiais nobres para pavimentação, que se encontram a grandes distâncias de transporte.

2.2 As Reações Químicas

As reações químicas entre a cal e a cinza volante são muito complexas, não somente pelo número de reações possíveis, mas também porque há uma grande variedade de produtos destas reações. Além disso, existem muitas reações que podem não ocorrer à temperatura ambiente (CERATTI, 1979).

Quando a cal e a cinza volante são adicionadas ao solo, ocorrem três tipos de reações: a cal se combina com as

partículas do solo, com o dióxido de carbono presente no ar e na água contidos no solo, e com a cinza volante numa reação pozolânica (MATEOS, 1961).

A cal se combina com o solo de duas maneiras. A primeira é através de trocas iônicas, pois os minerais argílicos quando em presença de certas soluções têm a propriedade de absorver ânions ou cátions e retê-los permanentemente ou trocá-los por outros. A segunda, que se dá quando o solo está no estado compactado, é de natureza pozolânica e semelhante à reação da cinza volante com a cal. Neste caso, os minerais de alumínio e sílica do solo reagem com a cal produzindo um gel de silicatos e aluminatos de cálcio, que provocam a cimentação das partículas do solo entre si (MATEOS, 1961).

A combinação da cal com o dióxido de carbono do solo forma carbonatos de cálcio e/ou magnésio, dependendo do tipo de solo (CERATTI, 1979).

A reação cimentante provocada pela cal e a cinza volante, ou seja, a reação pozolânica, é uma reação que se processa lentamente e a longo prazo. Convém ressaltar que as reações pozolânicas não se verificam, caso não haja quantidade de água suficiente na mistura. Estas reações são responsáveis pelo aumento da resistência e da durabilidade (NARDI, 1979).

O principal produto cimentante originado da reação pozolânica é um silicato hidratado de cálcio denominado tobermorita. Todavia, visto que grande parte das pozolanas contém quantidades variáveis de sílica, outros compostos, envolvendo ferro, alumina e álcalis também podem ser formados. Os silicatos e os aluminatos de cálcio têm sido identificados nas reações entre cal e cinza volante. Possivelmente, um outro composto cimentante formado seria a etringita (sulfato de cálcio e alumínio hidratado), (SILVA, 1982).

As pozolanas que contém sílica na forma amorfa reagem com a cal mais rapidamente do que aquelas que contém sílica na forma cristalina, devido a esta última apresentar ligações iônicas bastante mais fortes, e a velocidade de reação variar inversamente ao tamanho dos cristais (SILVA, 1982).

A reatividade das pozolanas está relacionada com a natureza alcalina das misturas entre a cal e as pozolanas. A ativação da sílica através dos íons-hidroxila desempenha um importante papel na formação dos silicatos de cálcio (SILVA, 1982).

Testes experimentais para a verificação das condições de acidez de misturas solo-cal e solo-cal-cinza volante, após 3 e 6 meses de cura em meio ambiente, mostraram pequenas reduções nos valores de pH em comparação com valores obtidos imediatamente após a mistura, indicando a manutenção do ambiente favorável à continuidade das reações (PROJETO CICASOL, 1984).

Uma característica importante das misturas de solo com cal e cinza volante é a auto-cimentação, fenômeno pelo qual a amostra sofre recimentação em suas fissuras, regenerando-se. Isso ocorre devido ao prosseguimento das reações entre a cal e a cinza volante ao longo do tempo, e é dependente de muitos fatores, dentre os quais: a idade em que ocorreu o fissuramento, o grau de contato das superfícies fissuradas, as condições de cura, a efetividade da cal e cinza volante na reação e as condições de umidade (CERATTI, 1979).

2.3 Uso de Aditivos

As bases de pavimentos estabilizadas com cinza volante e cal normalmente não apresentam, aos sete dias de cura, um ganho de resistência suficiente para permitir a liberação ao tráfego, mesmo o de obra. É pois vantajoso

acelerar as reações pozolânicas, permitindo, assim, liberar o tráfego em curto prazo (NARDI, 1979).

A hidratação do cimento Portland forma produtos cimentantes numa reação mais rápida do que a pozolânica propriamente dita, e assim acelera o ganho de resistência à compressão da mistura (NARDI, 1979).

Segundo MATEOS (1961) o cimento Portland comum (pozolânico) tem pouca influência no ganho de resistência imediata, embora se saiba ser diferente o comportamento com o cimento Portland de alta resistência inicial.

Pequenas quantidades de aditivo químico adicionadas à mistura de solo-cinza volante-cal proporcionam grande aumento de resistência. A quantidade adicionada varia de 0,5% a 1% em relação ao peso seco da mistura (MATEOS, 1961).

Segundo MATEOS (1961) os efeitos dos aditivos químicos nas misturas com cal e cinza volante podem ser devido a um ou mais dos três seguintes fatores: aumento da velocidade da reação pozolânica, produção de produtos cimentantes secundários e combinação com o produto cimentante ou pozolânico. No primeiro caso, deve ser, provavelmente, de natureza calcítica. No segundo, os aditivos químicos combinam ou reagem com cal para formar produtos cimentantes como CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, etc. No terceiro, estão incluídos todos os aditivos químicos que podem combinar ou reagir com o cimento pozolânico produzido, com os materiais pozolânicos da cinza ou do solo.

O cimento proporciona produtos cimentantes que se cristalizam rapidamente, ao passo que aqueles formados pela reação pozolânica levam um tempo relativamente longo para passarem do estado de gel ao estado cristalino, e aí então influir nas propriedades mecânicas da mistura.

2.4 Resistência à Compressão Simples

NARDI (1975) ao estudar a estabilização de areia com cinza volante e cal constatou um crescimento progressivo da resistência, aproximadamente linear com o tempo, que depende não somente do esforço de compactação, mas também das dosagens das misturas.

NARDI (1978) descreveu um método de ensaio para a determinação da resistência à compressão simples de misturas de solo estabilizado com cinza volante e cal e, comprovou a possibilidade de ensaiar, com satisfatória repetibilidade, as misturas compactadas de solos granulares, cinza volante e cal.

Segundo BAPTISTA (1976) a resistência à compressão simples mínima a ser alcançada, após 7 dias de cura, em misturas estabilizadas com cal, para seu emprego como base de pavimentos deve estar entre 7 e 10 kgf/cm².

De acordo com MATEOS (1961) as misturas pozolânicas, quando bem dosadas, compactadas e curadas em laboratório, podem atingir resistência à compressão simples acima de 100 kgf/cm² aos 28 dias de cura. Este autor verificou um aumento da resistência à compressão simples das misturas solo-cinza volante-cal com o aumento da energia de compactação. Afirmou que a resistência dessas misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas estabilizadas no início do verão.

Tem-se verificado, em pavimentos pozolânicos, um rápido desenvolvimento da resistência em seu primeiro ano, embora as reações pozolânicas permaneçam praticamente latentes no período de inverno rigoroso (temperatura abaixo de 7°C). Resistências de até 175 kgf/cm² poderão ser atingidas ao fim de um ano, embora valores entre 53 a 175 kgf/cm² sejam considerados os mais típicos. Foram encontrados valores de até

280 kgf/cm² (8 a 10 anos), mas estes resultados devem ser considerados excepcionais (BARENBERG apud NARDI (1979)).

CERATTI (1979) observou um aumento da resistência à compressão simples com o tempo em todas as misturas por ele estudadas, sendo que este aumento variou de mistura para mistura, de energia para energia e, numa mesma mistura, variou com o período de cura.

SILVA (1982) constatou que, em todas as misturas por ela estudadas, a resistência à compressão simples cresceu com os períodos de cura, sendo este crescimento variável em função da procedência da cinza volante e das quantidades de aditivos empregadas.

No relatório final do PROJETO CICASOL (1984) são apresentadas curvas que mostram a variação, para cada solo estudado, da resistência à compressão simples aos 28 dias de cura, em função dos teores de cal e de cinza volante utilizados nas misturas. Dessas curvas, conclui-se que a ação da cal e da cinza volante, de maneira geral, provoca um aumento nas resistências com a elevação do teor de cal e do tempo de cura. A ordem de grandeza dos aumentos observados está relacionada com o tipo de solo analisado.

NUNEZ (1991) estudou a variação da resistência à compressão simples de um solo arenoso quando adicionada cal, em função do tempo de espera para a compactação e do tempo de cura. Concluiu que o tempo de espera de uma hora entre a mistura e a compactação pode reduzir em 42% a resistência à compressão simples. Concluiu também que a resistência à compressão simples evolui linearmente com o teor de aditivo e com o logaritmo do tempo.

2.5 Ensaio de Compressão Diametral

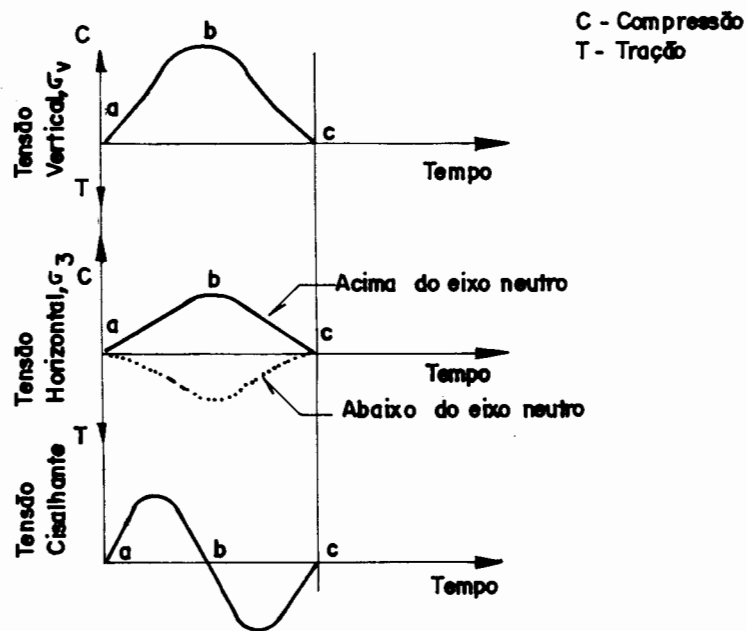
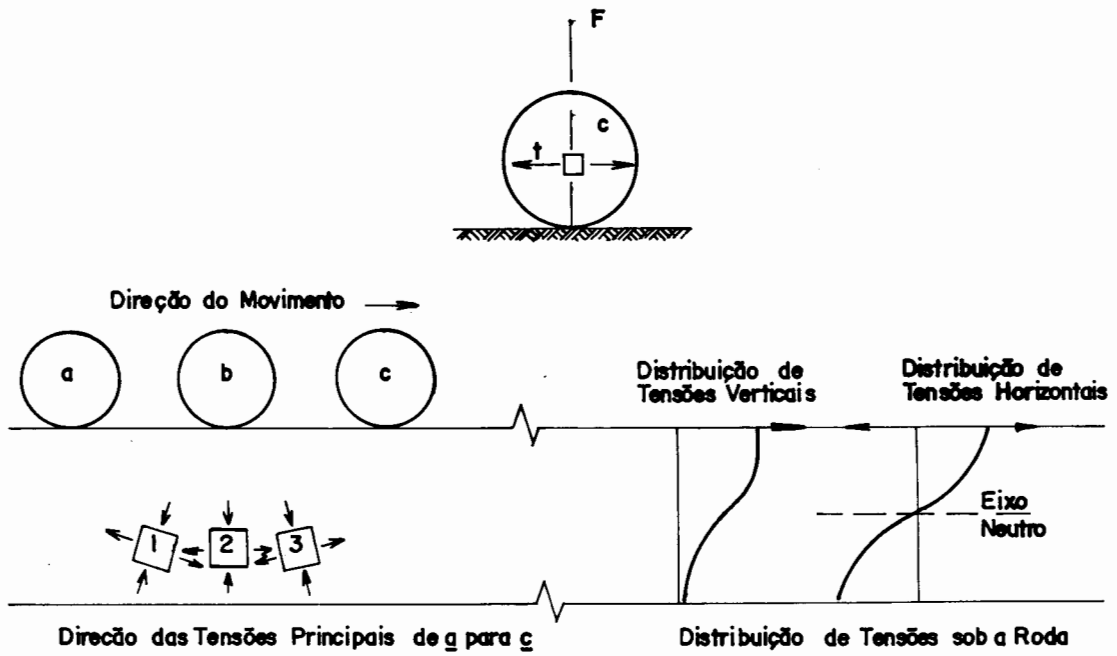
O ensaio de compressão diametral ou tração indireta, conhecido também como "Ensaio Brasileiro", foi desenvolvido inicialmente por Lobo Carneiro e Barcellos no Brasil e independentemente por Akazawa no Japão, para determinar a resistência à tração de corpos de prova de concreto através de solicitação estática. Nos últimos anos, um ensaio semelhante tem sido utilizado, tanto no Brasil como no exterior, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico de misturas betuminosas e materiais cimentados (PINTO e PREUSSLER, 1980).

2.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Em estruturas de pavimentos semi-rígidos as tensões de tração na camada de base são muito críticas e, portanto, essa camada deve possuir suficiente resistência à tração para suportar as tensões induzidas pelo tráfego e também por mudanças de temperatura e ou recalques.

Ao mover-se um veículo sobre um pavimento, as tensões horizontais impostas à estrutura, num ponto, mudam de tração para compressão, e então para tração novamente, (CERATTI, 1979). Na Figura 2.1 apresenta-se as tensões que ocorrem no pavimento devido à uma carga móvel, enquanto que nas Figuras 2.2 e 2.3 apresenta-se as tensões e deformações que se desenvolvem na base de solo-cimentado, também causadas por uma carga móvel na superfície do pavimento.

O desenvolvimento da resistência à tração é função das rupturas microscópicas no material e portanto é necessário obter-se um material que sofra poucas rupturas por contração (YANG apud CERATTI, 1979).



Varição de Tensões no Elemento 2 Quando a Roda se Move da Posição \underline{a} para \underline{c}

Figura 2.1 - Tensões no pavimento causadas por veículo em movimento (PINTO, 1991)

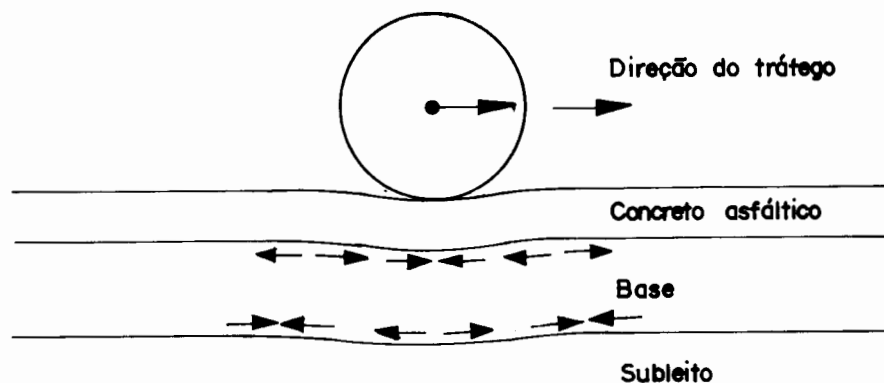


Figura 2.2 - Tensões na base de solo cimentado devido a uma carga móvel na superfície do pavimento (CERATTI, 1991)

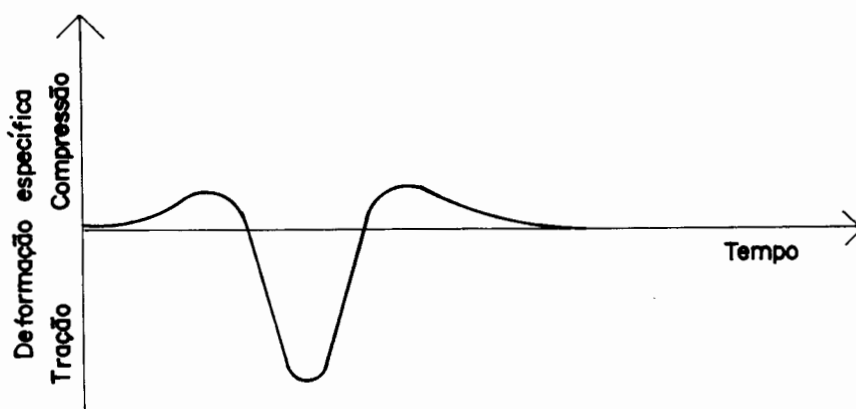


Figura 2.3 - Variação da deformação específica com o tempo na fibra inferior da base de solo-cimento, devido a uma carga móvel na superfície (CERATTI, 1991)

De acordo com PINTO e PREUSSLER (1980) o tipo de carregamento configurado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral produz níveis de tensões de tração relativamente uniformes ao longo do plano diametral vertical.

Alguns autores como NARDI (1975) têm verificado que para misturas de solo, cinza volante e cal a resistência à tração por compressão diametral chega a ser de 8 a 17 vezes menor que a resistência à compressão simples.

MACHADO (1978) verificou que a resistência à tração do solo-cimento é maior que a do solo-cal, para a mesma resistência à compressão. Segundo ele, isto é devido ao fato do cimento proporcionar maior coesão entre partículas do que a cal.

CERATTI (1979) verificou que a resistência à tração para misturas de solo, cinza volante e cal cresce, proporcionalmente, mais rápido que a resistência à compressão ao longo dos períodos de cura.

SILVA (1982) constatou que todas as misturas de solo, cinza volante e cal estudadas apresentaram crescimento da resistência à compressão diametral com o período de cura, sendo este crescimento mais acentuado nas misturas com teor de cal mais elevado. O ganho de resistência no período de 7 a 28 dias foi de no mínimo 55%, chegando até 86% no caso das misturas com 17% de cinza volante. No período entre 28 e 60 dias, verificaram-se nestas misturas pequenos ganhos de resistência, da ordem de 20%, em média.

CONCHA (1986) ao estudar misturas de solo laterítico-cimento e solo saprolítico-cimento mostrou que as repetições de carga, para as misturas estudadas, nos ensaios de compressão diametral dinâmicos, não afetam a resistência à tração dos corpos de prova.

NUNEZ (1991) verificou que de forma análoga à resistência à compressão simples, a resistência à compressão diametral das misturas compactadas de solo e com 9% de cal variou de forma linear com o logaritmo do tempo de cura. O autor constatou que o aumento expressivo da resistência à compressão diametral se dá somente após 28 dias de cura, apontando para a importância das reações pozolânicas.

2.5.2 Módulo de Resiliência

Os materiais que constituem a estrutura de um pavimento quando submetidos a carregamentos dinâmicos de curta duração e sob tensões muito abaixo de sua plastificação, apresentam comportamento aproximadamente elástico, mas não necessariamente linear. O tráfego condiciona o conjunto pavimento-fundação de modo semelhante. O módulo de elasticidade determinado através de ensaios laboratoriais, com equipamentos que simulem as condições de campo, denomina-se de módulo de resiliência (PINTO e PREUSSLER, 1980).

Em Mecânica dos Pavimentos convencionou-se chamar de deformação resiliente a deformação elástica ou recuperável dos solos e das misturas empregadas em camadas de base de pavimentos, sob a ação de cargas repetidas (PREUSSLER, 1986).

A resiliência excessiva faz-se notar mesmo em pavimentos bem dimensionados por critérios de resistência à ruptura plástica, sempre que as deflexões medidas "in situ" mostram-se grandes, ou quando o trincamento da superfície é prematuro (PINTO, 1988).

O módulo de resiliência é determinado em ensaios dinâmicos ou de carga repetida, triaxiais para solos e materiais granulares e, de compressão diametral para as misturas betuminosas e materiais estabilizados (PREUSSLER, 1986).

O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral procura simular o comportamento dos materiais em uma estrutura de pavimento, ou seja, o estado de tensões na parte inferior da camada de base (para o caso de pavimento semi-rígido), que é uma zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, que são responsáveis pela fadiga da camada e, conseqüentemente pela vida de serviço da estrutura (PINTO e PREUSSLER, 1980).

O módulo de resiliência é a resposta no ensaio dinâmico definida como a relação entre a tensão desvio axial aplicada repetidamente e a deformação específica recuperável axial (PREUSSLER, 1978). De forma analítica:

$$M_R = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

onde:

M_R - módulo de deformação resiliente

σ - tensão axial aplicada repetidamente

ε - deformação específica resiliente para um determinado número de aplicação de tensão

Esse parâmetro, ou seja, o módulo de resiliência, é utilizado na análise mecanística de pavimentos, através de técnicas computacionais, tais como o programa computacional ELSYM 5, o qual considera a estrutura como um sistema estratificado com comportamento elástico linear (PINTO e PREUSSLER, 1980).

Apesar do módulo de resiliência depender, inicialmente, do número de aplicações de carga, após um certo número de solicitações que varia entre 300 a 1000 repetições, pode-se considerar que ele tende a um valor constante, dependendo do material e das condições de carregamento (PREUSSLER, 1978).

NUNEZ (1991) constatou que o módulo de resiliência na compressão diametral das misturas cimentadas compactadas sofre significativo aumento com a evolução do tempo de cura. Para as misturas de solo e 9% de cal foram necessários 90 dias de cura para que o módulo resiliente na compressão alcançasse 14000 MPa. O desenvolvimento do módulo de resiliência, nestas misturas, se mostrou muito mais dependente do tempo de cura do que as misturas com cimento.

OBI (1972) ao estudar bases de solo-cimento sob fina camada betuminosa verificou que a máxima deformação resiliente do solo-cimento é controlada por limites toleráveis de fadiga.

2.6 Fadiga de Misturas Cimentadas

2.6.1 Introdução

A danificação de uma estrutura de pavimento é ocasionada por vários fatores associados ao tráfego ou não. São eles as tensões, condições ambientais, materiais utilizados e métodos de construção e manutenção. As duas principais manifestações da ruptura de pavimentos associadas ao tráfego são as trincas por fadiga, que têm início e se desenvolvem na camada de maior rigidez da estrutura, e a deformação permanente (CERATTI, 1991).

O processo de deterioração da estrutura de pavimento com base cimentada se reflete na natureza da solicitação do revestimento betuminoso. Enquanto a base está íntegra o revestimento é solicitado à compressão, mas a medida que a base sofre fissuramento aumenta sua solicitação à flexão. Ressalta-se, nesta interpretação, a importância que tem o estudo de fadiga das camadas asfálticas e cimentadas (PINTO et al, 1988).

Entende-se por fadiga a ruptura progressiva de um material produzida por tensões repetidas, as quais são menores que a resistência última do material (SWANSON e THOMPSON, 1967).

O termo fadiga está sempre associado à deterioração sob carregamento repetido que leva ao fissuramento e, algumas vezes, ao colapso de componentes estruturais. A fadiga implica um processo de mudança estrutural progressiva localizada no material sujeito à tensões cíclicas que diminuem a resistência do material às forças aplicadas.

O problema da fadiga é evidenciado pelo trincamento nas trilhas de roda após N repetições de cargas, mesmo sem afundamentos plásticos importantes (MONTESTRUQUE e RODRIGUES, 1995).

A resposta à fadiga é definida como a reação do material ao carregamento repetido em vários níveis de tensão e, indicada pelo número de aplicações de carga necessário para causar a ruptura (SWANSON e THOMPSON, 1967).

A resistência à fadiga também pode ser definida como sendo a maior tensão que pode ser mantida, por um dado número de ciclos de tensão, sem ocorrência de fratura. Isto porque num gráfico de ensaio de fadiga a resistência à fadiga de um material para um dado número de aplicações de carga é melhor representado por uma faixa de níveis de tensão. Esta faixa pode ser representada por diferentes curvas de resposta à fadiga para selecionar probabilidades de ruptura (SWANSON e THOMPSON, 1967).

2.6.2 Tipos de Ensaio para Estudo de Fadiga

Os ensaios de fadiga em laboratório de misturas cimentadas, devido ao modo de atuação das camadas destes materiais em estruturas de pavimentos, são realizados a tensões controladas. O carregamento é feito pela aplicação de uma tensão alternada de amplitude constante. O ensaio de fadiga de misturas cimentadas deve impor ao material tensões de tração cíclicas - causa principal da ruptura por fadiga. O modo de solicitação de fadiga à compressão deve ser descartado, já que configura um estado de ruptura inexistente em estruturas de pavimentos (CERATTI, 1991).

OTTE (1978) afirma que para propósitos de projeto estrutural de pavimentos o material tratado com cimento e outros materiais cimentados, devem ser testados por meio de

ensaio à flexão e não por compressão, tração direta, tração indireta, ou CBR.

Para a estimativa da vida de fadiga, dispõem-se de ensaios laboratoriais dinâmicos que são os que melhor reproduzem as condições de carregamento induzidas pelo tráfego. Estes ensaios distinguem-se quanto ao processo empregado para desenvolver tensões e deformações repetidas, ou seja, por flexão, tração direta e tração indireta e quanto à geometria das amostras (MONTESTRUQUE e RODRIGUES, 1995).

De acordo com CERATTI (1991) o modo de carregamento à flexão tem sido o mais utilizado, pois é o que pretende simular melhor o estado de tensões atuantes em uma camada cimentada de um pavimento.

A vida de fadiga também pode ser estimada por meio de ensaios de placa ou de pistas de simulações de tráfego que se aproximam bastante das condições de um pavimento real, tais como a pista circular do IPR e o simulador de tráfego da UFRGS-DAER/RS (PINTO e MOTTA, 1995).

O procedimento genérico, em qualquer dos ensaios laboratoriais, utilizado para a determinação da vida de fadiga, é a utilização de vários corpos de prova, reproduzindo igualmente, tanto quanto possível, na sua preparação e nos teores de materiais, submetendo-os a vários níveis de tensão até a ruptura. O final do ensaio é determinado pela ruptura completa do corpo de prova quando se trata do ensaio sob o regime de tensão controlada (PINTO e MOTTA, 1995).

Os equipamentos laboratoriais para ensaios dinâmicos permitem a aplicação de carregamentos cíclicos sob o regime de tensão constante (ou controlada) e de deformação constante (ou controlada). No ensaio de tensão controlada, a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio. Neste ensaio o critério de fadiga está

associado à fratura da amostra. A tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o colapso do corpo de prova. Portanto, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessário à fratura completa da amostra (PINTO, 1991).

Devido às várias simplificações necessárias para tornar o ensaio de fadiga à flexão sob o regime de tensão controlada factível em laboratório (carga uniforme, frequência determinada, tempo de carregamento, fatores ambientais que não são reproduzidos em seus ciclos, tipos de compactação dos corpos-de-prova, etc), é necessário calibrar as curvas de fadiga obtidas, através do fator laboratório-campo, pois caso contrário estaremos sendo conservativos (PINTO e MOTTA, 1995).

CERATTI (1991) apresenta a relação entre tensões e deformações e o número de aplicações de carga em tensão controlada, conforme mostra a Figura 2.4. À medida que aumenta o número de aplicações de carga, as tensões permanecem constantes e as deformações aumentam com a danificação do corpo de prova.

O ensaio de fadiga à flexão evidencia a relação direta entre vida de fadiga e tensão/deformação desenvolvida num corpo de prova de forma prismática (vigota), submetido a cargas pulsantes ou senoidais até a ruptura (MONTESTRUQUE e RODRIGUES, 1995).

CERATTI (1991) apresenta um modelo da distribuição de tensões e deformações num corpo de prova submetido ao ensaio de fadiga à flexão, conforme mostra a Figura 2.5.

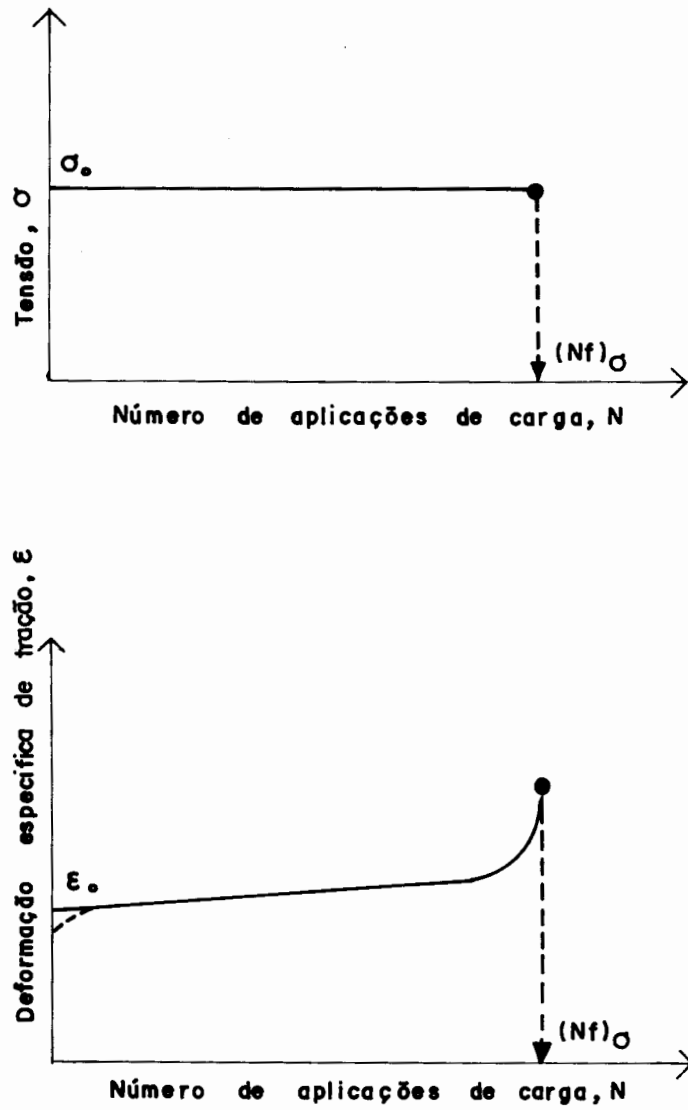


Figura 2.4 - Relação entre tensão, deformação e número de aplicações de carga sob tensão controlada (CERATTI, 1991)

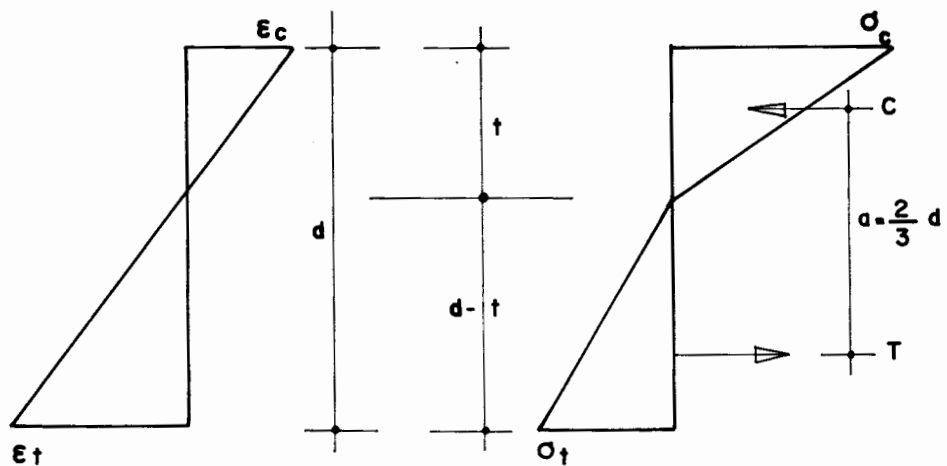


Figura 2.5 - Distribuição de tensões e deformações ao longo da seção transversal de uma viga em flexão (CERATTI, 1991)

2.6.3 Estudos de Fadiga Realizados

O ensaio de fadiga à flexão foi estudado por vários pesquisadores. SWANSON e THOMPSON (1967) realizaram este ensaio em solos estabilizados com cal, PRETORIUS (1970) em solo argiloso estabilizado com cimento. No Brasil este ensaio foi realizado em solos estabilizados com cimento por CONCHA (1986) e CERATTI (1991) , em misturas betuminosas por PINTO (1991), e em revestimentos asfálticos com geotêxtil por MONTESTRUQUE e RODRIGUES (1995), entre outros.

SWANSON e THOMPSON (1967) realizaram ensaios de fadiga na flexão em quatro misturas solo-cal selecionadas. Os resultados dos ensaios mostraram que a fadiga de misturas solo-cal é similar a de materiais como o concreto. Embora as curvas mostrem a mesma forma geral, ela não é a mesma para as quatro amostras estudadas.

PRETORIUS (1970) estudou o comportamento à fadiga sob flexão de uma mistura de solo argiloso-cimento e concluiu que o comportamento geral à fadiga deste material foi similar ao do concreto. O autor observou que ocorre um significativo aumento na resistência para períodos de cura maiores que 28 dias, mas a velocidade começa diminuir e o período de cura de oito semanas parece ser aceitável para o ensaio de fadiga. Para estar do lado conservativo, os ensaios de fadiga foram conduzidos em idade mínima de doze semanas.

SWANSON e THOMPSON (1967) mostraram que a resistência ao cisalhamento e à compressão de misturas solo-cal não é o fator limitante na sua aplicação como material de base ou sub-base. Para aplicações em estruturas de pavimentos estes materiais serão submetidos a tensões de flexão repetidas, e portanto, sua resistência à flexão e sua resposta à fadiga são condições importantes. Sendo assim, a fadiga à flexão deve ser considerada no projeto de pavimento quando misturas solo-cal

são utilizadas, mas isto não limita a efetiva utilização de misturas solo-cal para bases e sub-bases.

De acordo com CERATTI (1991) os ensaios de fadiga à flexão realizados com misturas de solo-cimento mostraram que, sob o ponto de vista de fadiga, misturas com solos finos são superiores às misturas com solos granulares.

PINTO e MOTTA (1995) publicaram um catálogo de curvas de fadiga apresentando de forma sucinta os resultados de ensaios de fadiga de materiais de pavimentação utilizados no Brasil.

2.7 Metodologias Propostas de Dimensionamento de Pavimento com Camadas Cimentadas

2.7.1 Introdução

OTTE, SAVAGE e MONISMITH (1982) afirmam que o objetivo de pavimento estrutural é produzir um pavimento com qualidade aceitável para alguma quantidade de tráfego prevista, ou período de tempo, ou ambos.

Uma estrutura de pavimento bem dimensionada deve apresentar camadas com espessuras que lhe permitam, concomitantemente, suportar os esforços de tração que lhe são impingidos pelas cargas do tráfego e diluir os esforços verticais de compressão de forma a garantir que cada parcela remanescente que atingir o solo de fundação seja compatível com as respectivas taxas de trabalho admissíveis (SUZUKI et al, 1991).

O progresso na área de Mecânica dos Pavimentos tem conduzido à certeza de que a utilização de ensaios dinâmicos na caracterização de materiais de pavimentação e a análise não linear de sistemas em camadas, proporcionam os melhores

parâmetros de projeto e a consideração mais racional do dimensionamento (MOTTA e MEDINA, 1991).

Existem vários programas de computador que utilizam técnicas diferentes para determinar as soluções analíticas de sistemas em camadas, cada um com suas vantagens, limitações e hipóteses próprias. Todos podem ser utilizados numa análise racional de estruturas de pavimentos. A teoria da elasticidade é largamente utilizada no dimensionamento racional de pavimentos. A possibilidade de dimensionamento usando as teorias elásticas é um avanço, por ser possível compatibilizar as condições geométricas de espessura com as características dos materiais, rearrumando a estrutura de forma a se obter a distribuição de tensões mais favorável para os materiais disponíveis (MOTTA e MEDINA, 1991).

A escolha da teoria, que modele matematicamente, a estrutura do pavimento e seja mais apropriada, segundo BARKSDALE e HICKS (1972) apud CERATTI (1991), depende da verificação dos benefícios que resultam de se empregar enfoques mais sofisticados. A teoria linear elástica pode ser utilizada com sucesso em pavimentos que contenham camadas de base estabilizadas e de subleitos que apresentam resposta relativamente linear. Em análises de casos gerais, deve-se empregar um enfoque mais amplo, que permita considerar o comportamento não linear dos materiais. Isto é importante quando apresentam-se camadas granulares na base e na sub-base.

2.7.2 Algumas Metodologias Propostas

THOMPSON e FIGUEROA (1980) apresentaram um procedimento de determinação da espessura de projeto para camadas de pavimento de solo-cal. O procedimento desenvolvido, baseado no modelo ILLI-PAVE, é limitado para pavimentos constituídos com camadas de solo-cal. Os dados de entrada são a resistência e o módulo de resiliência do solo-cal, o módulo de

resiliência do subleito e o tráfego estimado. O procedimento considera que a mistura solo-cal é capaz de desenvolver significativo acréscimo de resistência.

OTTE, SAVAGE e MONISMITH (1982) apresentaram um procedimento mecanístico estrutural para projeto de pavimentos contendo camadas cimentadas, o qual considera a teoria da elasticidade para calcular tensões e deformações em posições críticas no pavimento.

PINTO, PREUSSLER e GONÇALVES (1983) com a finalidade de desenvolver um procedimento de projeto de pavimento semi-rígido, analisaram 108 estruturas com a aplicação da teoria da elasticidade (módulo de resiliência) e do método de elementos finitos (FEPAVE 2). A técnica é fundamentada no cálculo das tensões de tração (σ_t), na fibra inferior da base cimentada, e das tensões verticais (σ_v), atuantes no subleito. Para o caso do solo do subleito ser granular as equações encontradas são as seguintes:

$$\sigma_t = -2,74 + 0,0529H_R + 0,0588H_B - 1,649 (E_B \times 10^{-6})^{1/2}$$

sendo:

$$E_B \geq 20000 \text{ kgf/cm}^2, (\sigma_t \text{ com sinal negativo})$$

$$H_R > 2,5 \text{ cm}$$

$$H_B > 15 \text{ cm}$$

$$\sigma_v = 0,364 - 0,0028H_R - 0,0052H_B - 0,422 (E_B \times 10^{-6})^{1/2}$$

Os valores admissíveis de tensões sugeridos são:

$$\sigma_{t \text{ max}} < 0,70\sigma_r$$

$$\sigma_{v \text{ max}} < 0,50 \text{ kgf/cm}^2$$

onde:

- $\sigma_{t \max}$ - tensão de tração máxima admissível na fibra inferior da base cimentada (kgf/cm^2);
- $\sigma_{v \max}$ - tensão vertical máxima admissível no solo de fundação ou subleito (kgf/cm^2);
- σ_r - resistência à tração estática por compressão diametral, do material de base (kgf/cm^2);
- H_B - espessura da base;
- E_B - módulo de elasticidade da base; e
- H_R - espessura do revestimento.

Convém ressaltar que o módulo de elasticidade (E_B) do material de base, no caso de solo-cal-cinza, e a resistência à tração estática por compressão diametral, foram obtidos após 28 dias de cura em câmara úmida, na temperatura de 20°C.

CONCHA (1986) utilizou o programa computacional FEPAVE para simular o comportamento de estrutura de pavimento com camadas de solo saprolítico-cimento e solo laterítico-cimento. O autor verificou que a deflexão em pavimento de base granular é muito superior às deflexões do pavimento com base de solo-cimento.

PINTO et al (1988) realizaram uma avaliação do desempenho de trechos experimentais constituídos de camadas de solo estabilizado com cinza volante e cal. Nesta avaliação consideraram as tensões de tração sob a base cimentada, produzidas pelas várias cargas de eixo atuantes no trecho. As seções da pista foram analisadas através do programa computacional ELSYM 5, a fim de acompanhar a evolução da condição estrutural das camadas cimentadas com o tempo.

NUNEZ (1991) com o objetivo de prever o desempenho de pavimentos, contendo camadas de misturas de solo estabilizado com cal ou cimento, determinou, com o emprego do programa computacional o ELSYM 5, as tensões, as deformações específicas e os deslocamentos causados pela passagem de cargas. Concluiu

que os parâmetros calculados foram inferiores aos valores admissíveis para todos os sistemas estudados, com exceção da deflexão superficial do pavimento e da deformação vertical por compressão do subleito que foram parâmetros limitantes em certas misturas.

PINTO (1991) utilizou os programas computacionais FEPAVE 2 e ELSYM 5 para calcular a de solicitação de pavimentos flexíveis, verificando que ambos apresentam resultados similares.

CERATTI (1991) utilizou o programa computacional de elementos finitos FEPAVE 2 para avaliar estruturas de pavimento compostas de solo-cimento. A partir desta análise foi estabelecido um procedimento para o dimensionamento preliminar de camada de base de solo-cimento, considerando-se o comportamento à fadiga da base cimentada, através da máxima densidade de energia desenvolvida na fibra inferior desta, e a capacidade de suporte do subleito, através da tensão vertical admissível no topo do subleito.

PEREIRA e NASCIMENTO (1991) utilizaram o programa computacional ELSYM 5 para realizar análise tensional de pavimento a ser executado sobre espessa camada de argila orgânica, estudando um total de 81 estruturas, tendo como carregamento um eixo simples de roda dupla, com 8,2 tf de carga. A análise efetuada, balisada por técnicas paramétricas, permite antever que a ação do tráfego não deve ser o fator condicionante, já que o peso próprio da estrutura produz tensões mais significativas ao nível do topo do terreno de fundação.

SUZUKI et al (1991) apresentam estudos efetuados com o programa ELSYM 5, para a avaliação dos efeitos da variação dos parâmetros estruturais relevantes no desempenho de pavimentos semi-rígidos (com base cimentada) e de pavimentos com base granular e sub-base cimentada, fixando a carga do eixo padrão

de rodas duplas de 8,2 tf. O estudo paramétrico desenvolvido buscou, fundamentalmente, a determinação dos esforços atuantes que se originam no interior da estrutura carregada, de maneira a possibilitar comparações com os esforços resistentes, característicos de cada material constituinte. Os autores concluíram que as condições fundamentais de dimensionamento são: a fadiga e a deformação, que por sua vez estão relacionados com o tráfego solicitante. Os autores verificaram que através dos modelos obtidos e das equações de fadiga dos materiais apropriados é possível a previsão do início da deterioração ou trincamento de cada camada, em função de suas espessuras e módulos elásticos.

TRICHÊS (1994) utilizou a teoria das camadas elásticas e o programa ELSYM 5 para o cálculo dos deslocamentos, das tensões e das deformações em estruturas compostas de concreto compactado a rolo. O autor apresenta uma metodologia de dimensionamento de pavimento utilizando concreto compactado a rolo.

SANTOS et al (1995) afirmam que muitos trabalhos já mostraram uma boa concordância entre as deflexões medidas com a viga Benkelman e as deflexões calculadas através de programas computacionais tais como o FEPAVE e o ELSYM 5, a partir de módulos de elasticidade dinâmicos, obtidos através de ensaios de carga repetida. Os autores utilizaram o programa computacional FEPAVE para análise mecanística de trechos onde empregaram parâmetros elásticos obtidos em ensaios triaxiais de carga repetida, sob carregamento padrão de 8,2 tf.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA DA PESQUISA

3.1 Introdução

O programa de Pesquisa desta dissertação consiste no estudo de uma alternativa de estrutura de pavimento para a região costeira do Rio Grande do Sul, situada entre a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico, onde se desenvolve a rodovia RST 101. O solo utilizado no estudo é uma areia fina típica da região.

A alternativa sugerida para a execução desta rodovia envolve a estabilização desse solo arenoso com cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial como aditivo.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de estruturas de pavimento com camadas de base e/ou sub-base constituídas deste solo estabilizado, a partir da realização de ensaios de resistência, da verificação do comportamento à fadiga, bem como da realização de uma análise paramétrica.

A pesquisa foi dividida em quatro etapas, descritas a seguir e sumarizadas na Figura 3.1.

A primeira etapa consistiu na revisão da literatura disponível sobre a estabilização de solos com cinza volante e cal, emprego de aditivos, ensaios de fadiga por flexão, análise

paramétrica, bem como outros temas de interesse para a pesquisa.

Na segunda etapa foram determinadas as dosagens das misturas estudadas, a partir de estabilização granulométrica, pelo Método das Aproximações Sucessivas, e estabilização química pelo Método de Eades e Grim.

A terceira etapa envolveu a realização de ensaios laboratoriais, tais como:

- Resistência à Compressão Simples (RCS),
- Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD),
- Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRCD),
- Fadiga à Flexão.

Na quarta etapa, foi realizada uma análise paramétrica dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais, utilizando o programa computacional ELSYM 5.

3.2 Definição das Misturas a Serem Estudadas

O objetivo desta fase consiste na determinação da dosagem das misturas de solo-cinza volante-cal a serem estudadas.

Portanto, esta fase envolveu, inicialmente, a determinação da granulometria dos materiais empregados, ou seja, do solo, da cinza volante e da cal. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do Departamento de Recursos Minerais (DRM) da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC).

De posse destes resultados foi possível fazer a estabilização granulométrica do solo com a cinza volante (pelo método gráfico descrito no item 4.2.2). A estabilização granulométrica foi realizada com a finalidade de se obter a

quantidade ideal de finos (cinza volante e cal) que proporcione um material com boa distribuição granulométrica, visto que o solo natural apresenta granulometria praticamente uniforme.

Após a estabilização granulométrica, realizou-se a determinação do teor de cal necessário para a estabilização química (pelo método também descrito no item 4.2.2).

Além desses materiais, utilizou-se também cimento de alta resistência inicial, como aditivo, para a obtenção de resistência do material suficiente para em poucos dias possibilitar o tráfego de obra sobre o pavimento.

Ainda nesta fase, definiu-se os tempos de cura para os ensaios da etapa seguinte como sendo de 7, 14, 28, 60, 90 e 120 dias.

3.3 Ensaios Laboratoriais

Primeiramente realizou-se os ensaios de compactação na energia do Proctor Normal das misturas, sem aditivo de cura rápida, com a finalidade de se obter os dados de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, para a moldagem dos corpos de prova a serem usados nos demais ensaios.

Após, iniciou-se a moldagem e cura dos corpos de prova, sendo que suas dimensões variaram conforme o ensaio a que se destinaram. Os corpos de prova para os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) têm diâmetro de $5,00 \pm 0,05$ cm e altura igual a $10,00 \pm 0,05$ cm. Aqueles destinados aos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRCD) têm diâmetro de 10,15 cm e $6,00 \pm 0,1$ cm de altura. Para o ensaio de Fadiga à Flexão os corpos de prova são vigotas com $7,62 \times 7,62$ cm de seção por 45,72 cm de comprimento.

A moldagem dos corpos de prova e os ensaios de Resistência à Compressão Simples foram realizados no laboratório do DRM/CIENTEC. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGEC/UFRGS).

A realização desses ensaios está vinculada aos seguintes objetivos deste estudo:

- Verificar o crescimento da resistência no decorrer dos períodos de cura previstos, ou seja, de acordo com a evolução das reações químicas e cristalização dos produtos cimentantes formados;

- Verificar o ganho de resistência com o acréscimo de 1% de cimento de alta resistência inicial, principalmente aos 7 dias de cura;

- Obter dados para analisar o comportamento mecânico das misturas estudadas;

- Avaliar o comportamento à fadiga do solo estabilizado com cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial, selecionado para fornecer parâmetros para a análise paramétrica.

3.4 Análise Paramétrica

O objetivo desta etapa envolve a obtenção de parâmetros para projeto estrutural de pavimentos utilizando as misturas estudadas.

Os parâmetros a serem analisados no estudo são os seguintes:

- deflexão superficial;

- tensão de compressão na face inferior da camada asfáltica;
- deformação específica de compressão na face inferior da camada asfáltica;
- tensão de tração na face inferior da base cimentada;
- tensão vertical de compressão no topo do subleito;
- deformação específica de tração na face inferior da base cimentada.

Portanto, esta última etapa consiste na análise dos resultados obtidos na etapa experimental, e da simulação do comportamento estrutural do pavimento, constituído de base deste solo estabilizado e de revestimento asfáltico com 5 cm de espessura. Para tal, variou-se a espessura da camada de base e as propriedades elásticas tanto do material da base como do subleito. Através das simulações numéricas realizadas com o programa computacional ELSYM 5, determinou-se tensões, deformações e deflexões impostas às estruturas analisadas.

A partir dos dados obtidos nas simulações, foi realizada a análise de variância de cada parâmetro de interesse, com emprego do programa STATGRAPHICS.

Com os resultados da análise de variância, foi possível determinar quais os fatores mais significativos de cada parâmetro em estudo e, assim, elaborar gráficos desses parâmetros em função dos seus fatores mais significativos.

São ainda propostos gráficos de dimensionamento do pavimento com camada de base do material estudado, a partir da relação entre a vida de fadiga e a espessura do pavimento, para diversos valores de módulo de resiliência da base e do subleito.

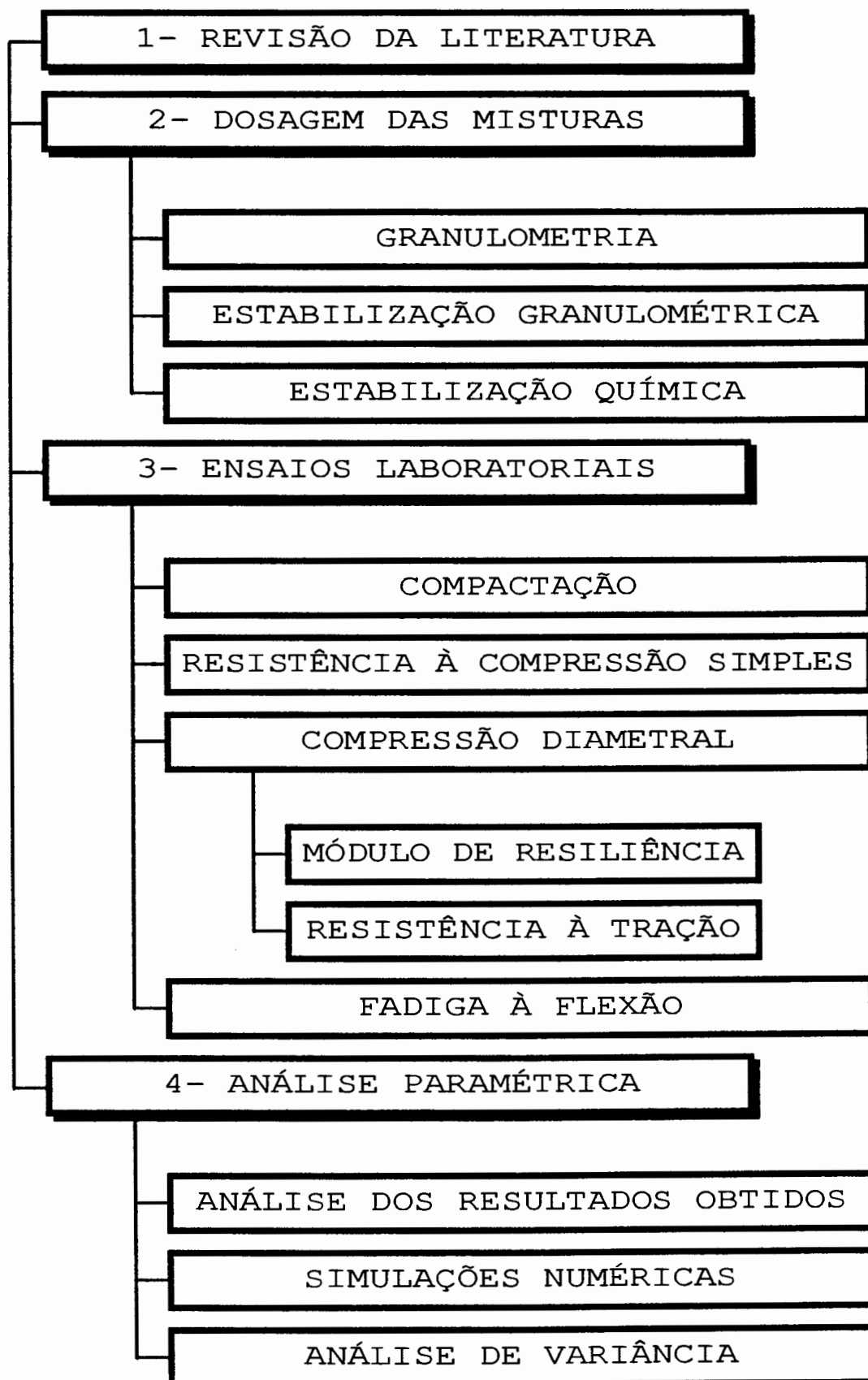


Figura 3.1 - Esquema do programa de pesquisa

CAPÍTULO 4

MATERIAIS UTILIZADOS E MISTURAS ESTUDADAS

4.1 Materiais Utilizados

4.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi uma areia proveniente de jazida próxima da rodovia RST-101, do trecho São José do Norte - Estreito. O mapa de localização do trecho está apresentado na Figura 4.1.

Este solo apresenta coloração amarelada e, texturalmente, é arenoso com predominância da fração areia fina, apresentando distribuição dos grãos muito uniforme. A presença de materiais finos como argila e silte é desprezível. A curva de distribuição granulométrica do solo é apresentada na Figura 4.2.

A análise granulométrica desse solo apresenta as seguintes características: areia fina: 94%; silte: 2%; argila: 4%, e é não plástico, o que permite classificá-lo como um solo do grupo A₃, de acordo com o sistema de classificação de solos HRB. A densidade real dos grãos é de 2,66.

4.1.2 Cinza Volante

A cinza volante utilizada é proveniente da termoelétrica de Candiota, no Rio Grande do Sul. A curva de

distribuição granulométrica da cinza volante é apresentada na Figura 4.3. A análise granulométrica da cinza volante forneceu os seguintes resultados: fração areia fina: 41%; fração silte: 54%; fração argila: 5%. A densidade real dos grãos é de 1,98.

Sob o aspecto físico a cinza volante caracteriza-se por apresentar finura Blaine de 3170 cm^2/g , sendo que as especificações recomendam um mínimo de 3000 cm^2/g , conforme relatório final do PROJETO CICASOL (1984). O índice de atividade pozolânica da cinza volante com cal é de 60,1 kg/cm^2 .

4.1.3 Cal

A cal utilizada foi uma cal dolomítica, comercialmente conhecida como Cal Hidratada "Primor Extra", produzida pela Companhia Dagoberto Barcellos S/A na cidade de Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul.

A granulometria da cal demonstra que na peneira de malha 0,075 mm, a porcentagem passante é de 93,4%, ou seja, bastante fina. De acordo com resultados obtidos no relatório final do PROJETO CICASOL (1984) esta porcentagem normalmente é da ordem de 80%.

A análise química realizada, de acordo com a Norma NBR 6473, forneceu os seguintes resultados:

- Óxido de cálcio: 28,6%
- Óxido de magnésio: 18,6%
- Óxido de cálcio disponível: 27,9%
- Resíduo insolúvel: 16,5%
- Enxofre: 0,004% em 0,012% de sulfato (SO_4)
- Cloretos: insignificante

A soma dos teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio atingiu aproximadamente 48%. O teor de óxido de cálcio está próximo aos valores obtidos por ROCHA NETO et al (1991). O

teor de óxido de magnésio é inferior aos valores obtidos por estes mesmos autores.

Acredita-se que existam outros elementos na constituição desta cal, como por exemplo óxido de ferro.

O resíduo insolúvel apresentou valor bastante elevado. Supõe-se que estes resultados se devam à carbonatação da amostra de cal, por excessiva exposição ao ar, antes da execução dos ensaios químicos.

4.1.4 Aditivo

Como aditivo foi utilizado o CIMENTO - ARI - CP V (Alta Resistência Inicial) produzido pela Camargo Corrêa Industrial S/A.

4.1.5 Água

Utilizou-se água destilada somente no ensaio de dosagem da cal, pelo método de Eades e Grim. Nos demais ensaios, bem como na moldagem dos corpos de prova, foi empregada água potável.

4.2 Misturas Estudadas

4.2.1 Dosagem das Misturas

A dosagem das misturas solo-cinza volante-cal foi realizada em duas etapas:

- Primeira Etapa: estabilização granulométrica do solo com a cinza volante, pelo Método das Aproximações Sucessivas, descrito no item 4.2.2. Através deste método adotou-se como resultado uma mistura com a seguinte composição: 75% de solo e 25% de cinza volante, conforme pode ser visto na

Figura 4.4. Adotou-se a porcentagem de 25% de cinza volante, pois com a presença da cal o teor de finos aumenta.

Na Figura 4.5 pode ser analisado o gráfico obtido caso fosse adotado o valor de 35% de cinza volante, ou seja, com maior quantidade de finos.

- Segunda Etapa: Estabilização da mistura com 75% de solo e 25% de cinza volante pelo Procedimento de Eades e Grim, descrito no item 4.2.2, através do qual obteve-se valores de pH para os teores de cal adicionados à mistura solo-cinza volante, conforme consta na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Resultado do ensaio de Eades e Grim

CAL	3%	5%	6%	7%	8%	9%
pH	12,51	12,55	12,59	12,61	12,62	12,62

Sabendo-se que neste procedimento obtém-se o teor mínimo de cal necessário para o início da reação pozolânica, considerou-se como resultado os teores de 7% e 9% de cal.

Foi necessário diminuir os teores de solo e de cinza volante para obter-se misturas totalizando 100% de material. Esta redução de porcentagem dos materiais foi realizada de modo a manter as proporções de cada um dos materiais.

Com objetivo de se obter altas resistências aos sete dias de cura, para rápida liberação do tráfego, utilizou-se o cimento de alta resistência inicial como aditivo, ou seja, apenas 1% em peso seco. Portanto, as misturas finais estudadas apresentam as composições que constam na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Composição das misturas estudadas

MISTURA	SOLO	CINZA VOLANTE	CAL	CIMENTO
1	70%	23%	7%	-
2	68%	23%	9%	-
3	70%	23%	7%	1%
4	68%	23%	9%	1%

4.2.2 Métodos de Dosagem

Foram utilizados dois métodos de estabilização para a dosagem das misturas a serem estudadas: estabilização granulométrica e estabilização química.

Primeiramente realizou-se a estabilização granulométrica empregando-se o Método das Aproximações Sucessivas. Este método foi executado conforme descrito por BAPTISTA (1975), e consiste no seguinte:

- traça-se no gráfico de distribuição granulométrica (Figuras 4.4 e 4.5) as curvas dos materiais a estabilizar;
- escolhe-se, numa primeira tentativa, as porcentagens X e Y a misturar dos materiais;
- multiplica-se estas porcentagens pelas porcentagens respectivas de cada material que passa numa peneira considerada;
- soma-se essas porcentagens obtidas e tem-se as porcentagens, em cada peneira, do material resultante da mistura;
- traça-se a curva do material resultante e verifica-se se ela está compreendida entre as curvas granulométricas dos materiais a serem estabilizados. Caso esteja, é um material estabilizado;
- se não estiver, repetir as operações com novos valores de X e Y.

A estabilização química da mistura foi realizada utilizando o método de Eades e Grim, para estabelecer o teor ótimo de cal a ser adicionado ao solo já com a cinza volante. O

método consiste em adicionar cal ao solo e realizar medidas do pH do mesmo. O teor ótimo de cal é aquele que eleva o pH a um valor maior ou igual a 12,4. Este procedimento foi realizado conforme descrito por TRB (1987).

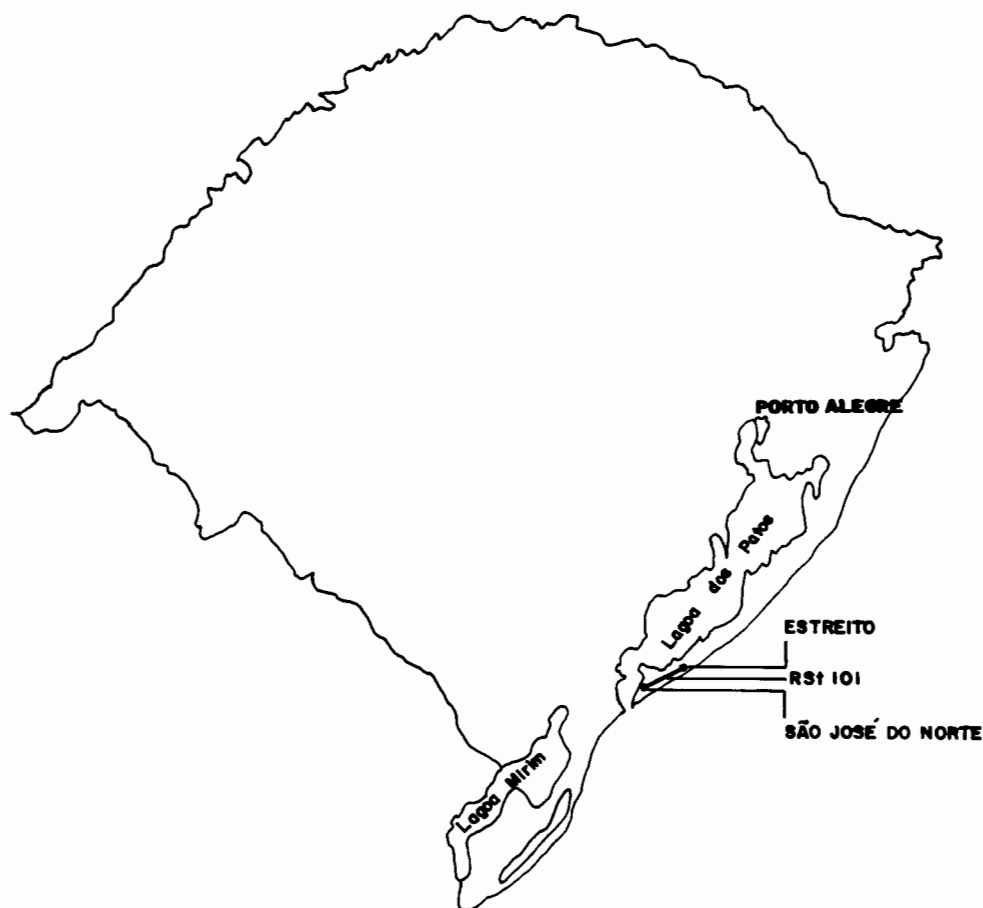


Figura 4.1 - Mapa de localização do trecho onde foi retirado o solo estudado

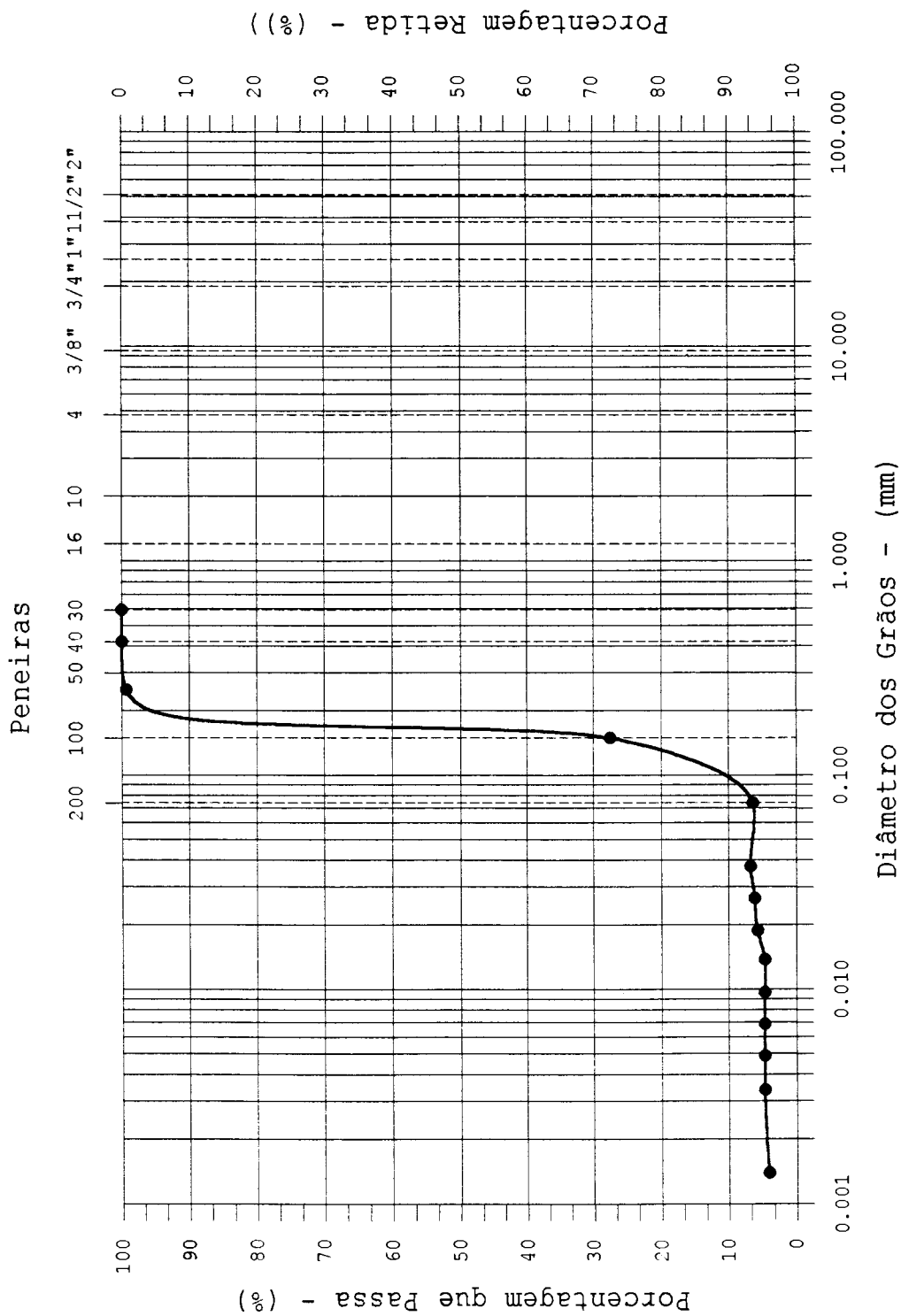


FIGURA 4.2 - Curva de distribuição granulométrica do solo

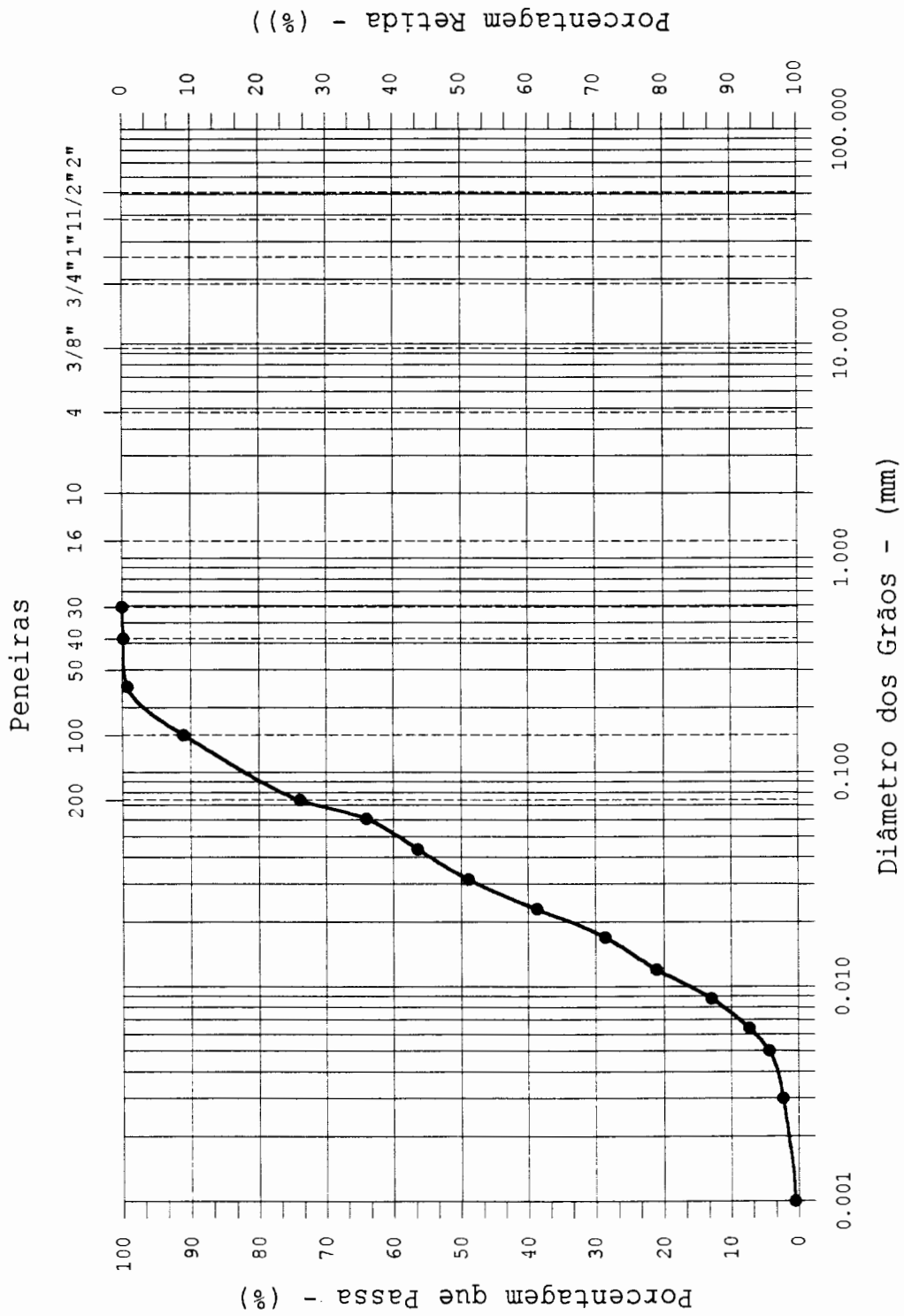


FIGURA 4.3 - Curva de distribuição granulométrica da cinza volante

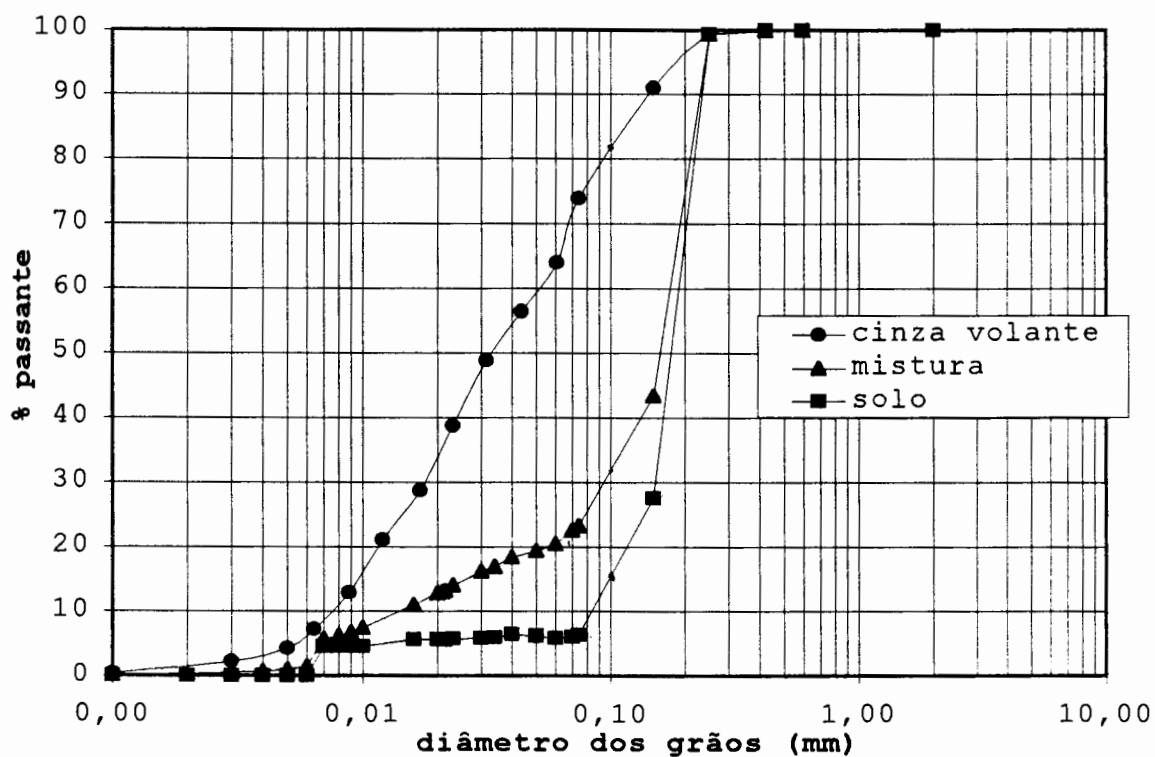


Figura 4.4- Distribuição granulométrica da mistura de 75% de solo com 25% de cinza volante

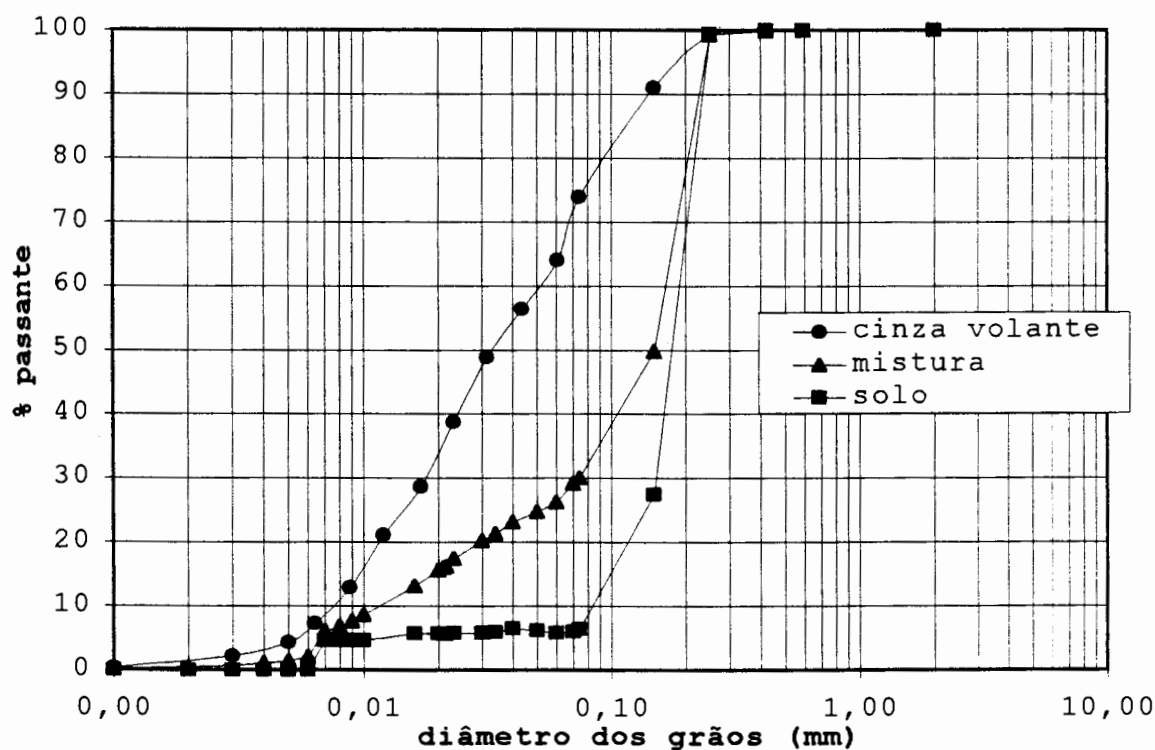


Figura 4.5- Distribuição granulométrica da mistura de 65% de solo com 35% de cinza volante

CAPÍTULO 5

ENSAIOS REALIZADOS

5.1 Preparação do Solo e da Cinza Volante

As amostras do solo utilizadas neste trabalho foram retiradas da camada superficial da jazida até 1m de profundidade.

O solo foi guardado em sacos plásticos e posteriormente posto a secar ao ar. Uma vez seco foi determinada sua umidade higroscópica e novamente ensacado hermeticamente, até o momento da sua utilização.

A cinza volante foi estocada em silos hermeticamente fechados para manter sua umidade natural, que foi verificada previamente.

5.2 Preparação da Mistura

O solo foi misturado primeiro com a cinza volante, manualmente, até obter-se coloração uniforme. Após, adicionou-se cal, e nas misturas com cimento, adicionou-se cal e cimento, repetindo-se o processo manualmente.

A água potável foi então adicionada, trabalhando-se durante três minutos, aproximadamente.

As proporções de água e cimento foram relacionadas com o peso seco da mistura, misturando-se cada vez material suficiente para a moldagem de seis corpos de prova para o ensaio de Resistência à Compressão Simples, três corpos de prova para os ensaios de Compressão Diametral, e um corpo de prova para o ensaio de Fadiga por Flexão.

5.3 Ensaio de Compactação

A fim de determinar a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima para a moldagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de compactação na energia do Proctor Normal com as Misturas 1 e 2. As curvas de compactação obtidas estão apresentadas na Figura 5.1.

Devido à pequena diferença existente entre os resultados, adotou-se os valores obtidos para a Mistura 1, para a moldagem dos corpos de prova, ou seja:

$$\gamma_s \text{ máx} = 17,24 \text{ kN/m}^3; \text{ e}$$

$$\omega = 10,7\%.$$

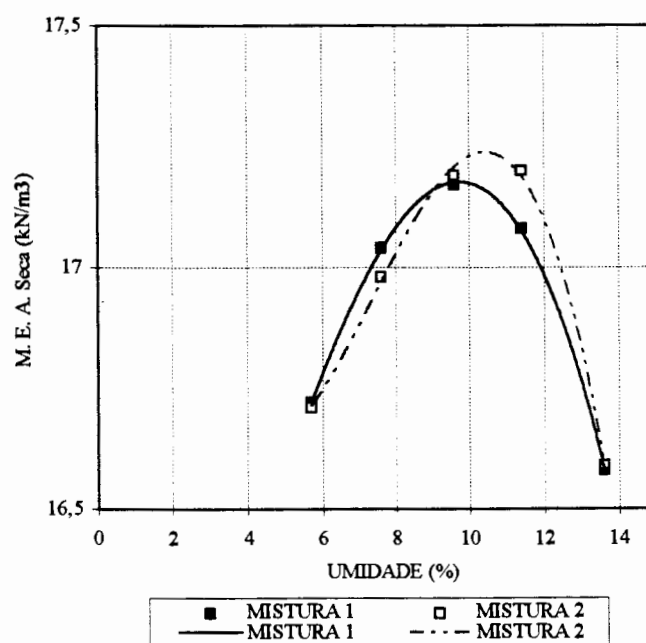


Figura 5.1- Curvas de compactação

5.4 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

5.4.1 Para os Ensaio de Resistência à Compressão Simples e Compressão Diametral

De posse dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, foram moldados os corpos de prova, de acordo com as normas DNER-ME 180/94 e DNER-ME 181/94.

Conforme foi dito no item 3.3 as dimensões dos corpos de prova variaram conforme o ensaio a que se destinaram.

Durante a moldagem, visando evitar grandes perdas de água por evaporação, as misturas foram cobertas com pano úmido.

Os corpos de prova foram moldados logo após a mistura dos materiais, procurando-se obter um teor de umidade aproximadamente igual ao ótimo ($\pm 0,5\%$).

Os corpos de prova destinados ao ensaio de RCS foram compactados dinamicamente com a energia do Proctor Normal em três camadas devidamente escarificadas. O material para cada camada foi separado e pesado para obter-se a massa específica desejada.

Os corpos de prova destinados aos ensaios de RTCD foram moldados colocando-se no cilindro o peso de material necessário para atingir a massa específica desejada, e aplicados golpes sucessivos até atingir-se a altura de 6 cm.

Para ambos os ensaios foram moldados três corpos de prova para cada período de cura, constituídos das quatro misturas citadas no Capítulo 4, totalizando 120 corpos de prova, conforme mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Número de corpos de prova moldados para cada período de cura, para cada tipo de ensaio

MISTURA	ENSAIOS											
	COMPRESSÃO						TRAÇÃO					
	CURA (dias)						CURA(dias)					
	7	14	28	60	90	120	7	14	28	60	90	120
1	3	3	3	-	3	-	3	3	3	-	3	-
2	3	3	3	-	3	-	3	3	3	-	3	-
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
TOTAL	60						60					

Após a moldagem, os corpos de prova, para ambos os ensaios, foram devidamente identificados por meio de etiquetas e envoltos em sacos plásticos, a fim de evitar perdas por umidade e carbonatação da cal pelo ar durante os períodos de cura desejados.

Então, foram colocados em câmara úmida, cuja temperatura oscilou entre 18°C e 21°C até que completassem os tempos de cura determinados.

Os corpos de prova destinados ao ensaio de RCS, após terminada a cura, antes do rompimento, foram imersos em água potável durante 24 horas.

5.4.2 Para o Ensaio de Fadiga à Flexão

O modo de preparação das vigotas foi baseado na norma ASTM D 1632 (1987), sendo as mesmas constituídas de solo, cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial, nos teores da Mistura 3, sendo moldadas um total de 15 vigotas.

A compactação das vigas foi realizada numa forma especial de aço, com tampas móveis no topo e na base, conforme mostra a Figura 5.2, na temperatura ambiente.

Antes da colocação do material na forma, todas as faces da mesma foram revestidas com plástico fino, para evitar aderência do material à forma (Figura 5.2).

O material foi então colocado dentro da forma, em quantidade suficiente para atingir o valor da massa específica aparente seca máxima, em três camadas iguais, sendo cada uma delas acomodada manualmente e esscarificada antes da camada seguinte. Na Figura 5.3 pode-se verificar a colocação do material em camadas, sendo que ao lado da forma encontra-se o material para a camada seguinte.

Em seguida, tendo a forma recebido todo o material necessário, foi colocada a tampa (Figura 5.4) e após a forma foi levada até uma prensa (Figura 5.5), onde foi aplicada uma carga até que as tampas encostassem nas laterais da forma, alcançando assim as dimensões desejadas da vigota.

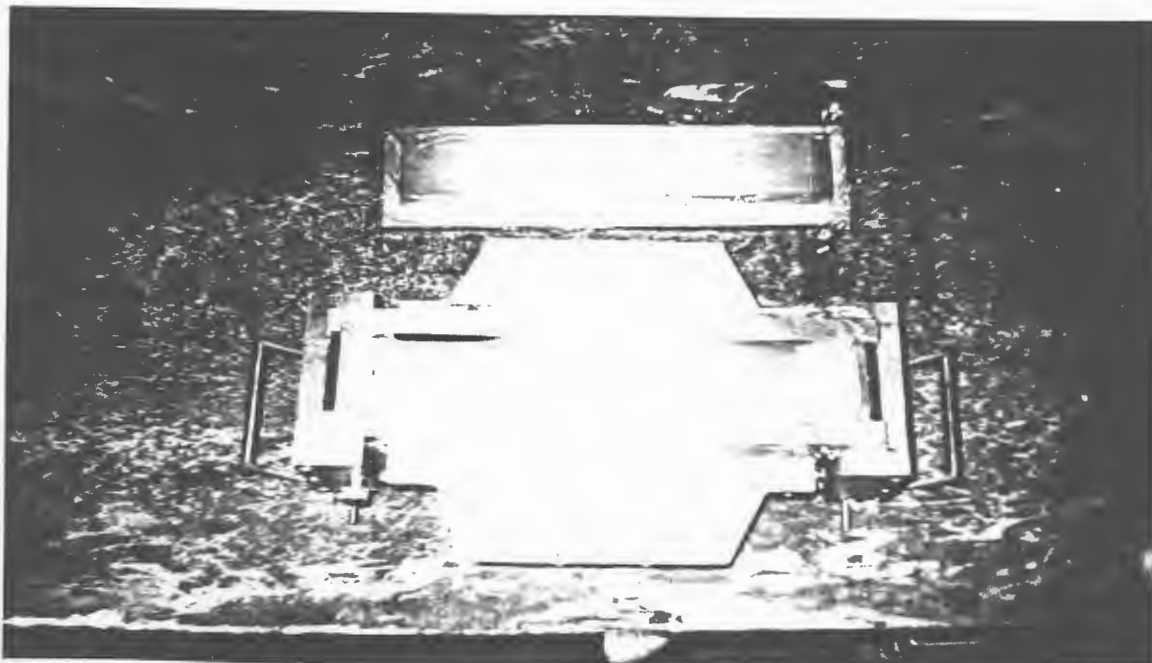


Figura 5.2- Forma especial de aço utilizada para moldagem das vigotas

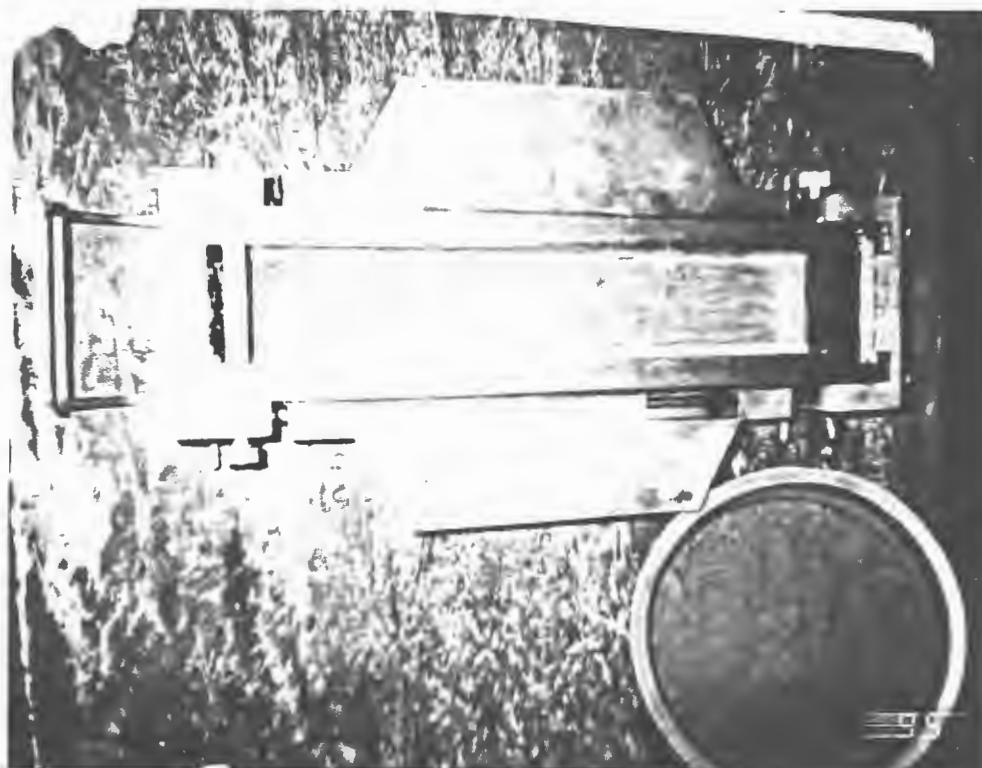


Figura 5.3- Detalhe das camadas durante a moldagem das vigotas

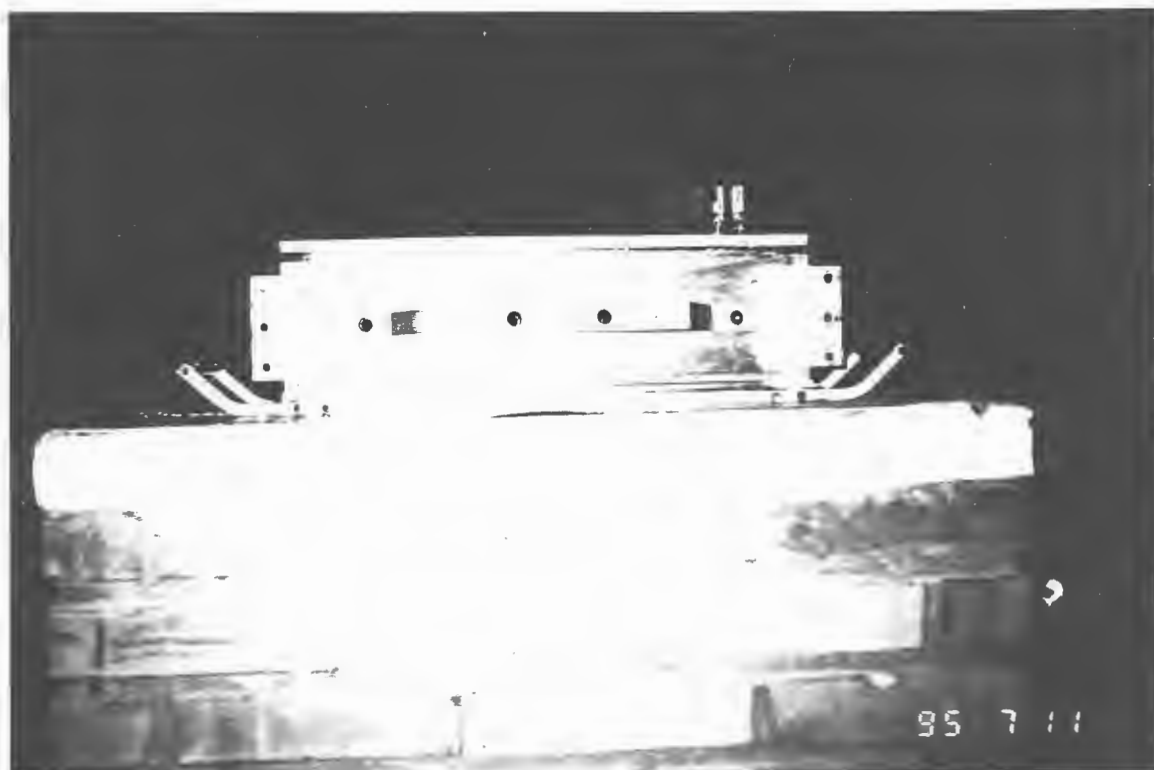


Figura 5.4- Forma com a tampa colocada



Figura 5.5- Forma com vigota moldada na fase de carregamento

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 observa-se a presença de espaçadores entre as paredes laterais e o fundo da forma, sendo que na Figura 5.5 observa-se que tais espaçadores foram retirados. A utilização desses espaçadores permite a compactação do material também na face inferior da viga.

Tanto a fase de carga como a de descarga foram feitas lentamente. Na carga, todas as vigas foram carregadas até 15 toneladas.

Depois da compactação a forma permaneceu na câmara seca, com temperatura controlada, por 24 ou 48 h, dando tempo, assim, de ocorrerem algumas reações químicas, para que a vigota não rompesse durante a desmoldagem.

Após, a vigota foi desmoldada e coberta com cera quente de abelha, que foi espalhada com pincel em todas as

faces, procurando-se evitar a perda de umidade, conforme pode ser observado nas Figuras 5.6 e 5.7. Na Figura 5.8 observa-se que a vigota está devidamente embrulhada e identificada, quando então a mesma foi colocada em câmara seca, com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, durante o período de cura de 90 dias.



Figura 5.6- Vigota recém desmoldada

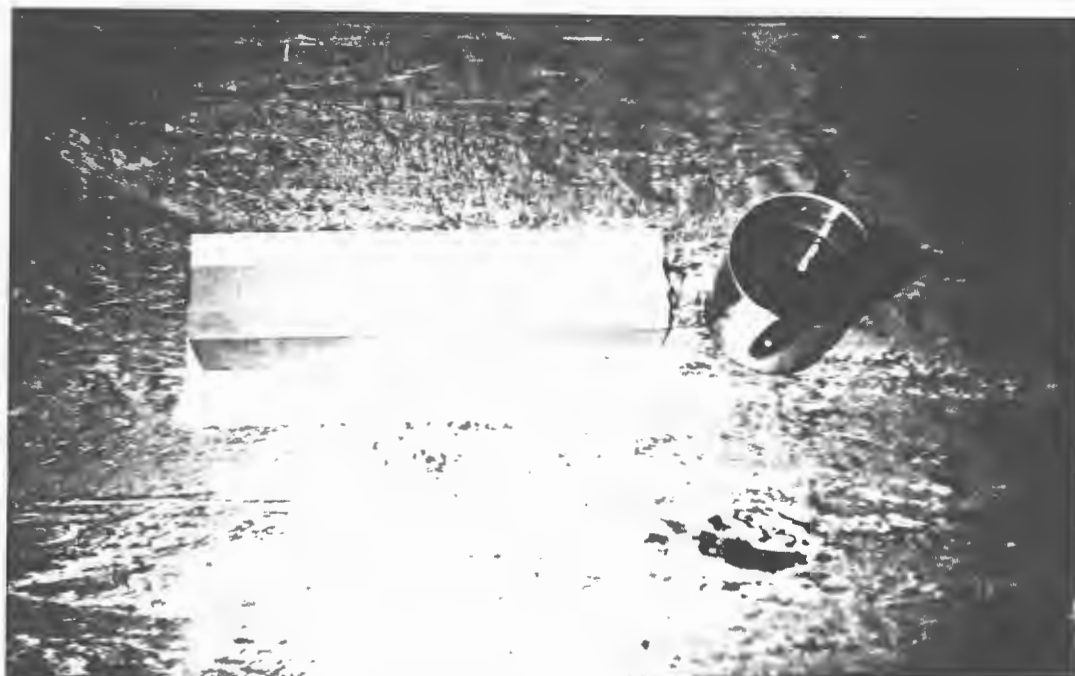


Figura 5.7- Vigota sendo coberta com cera quente de abelha

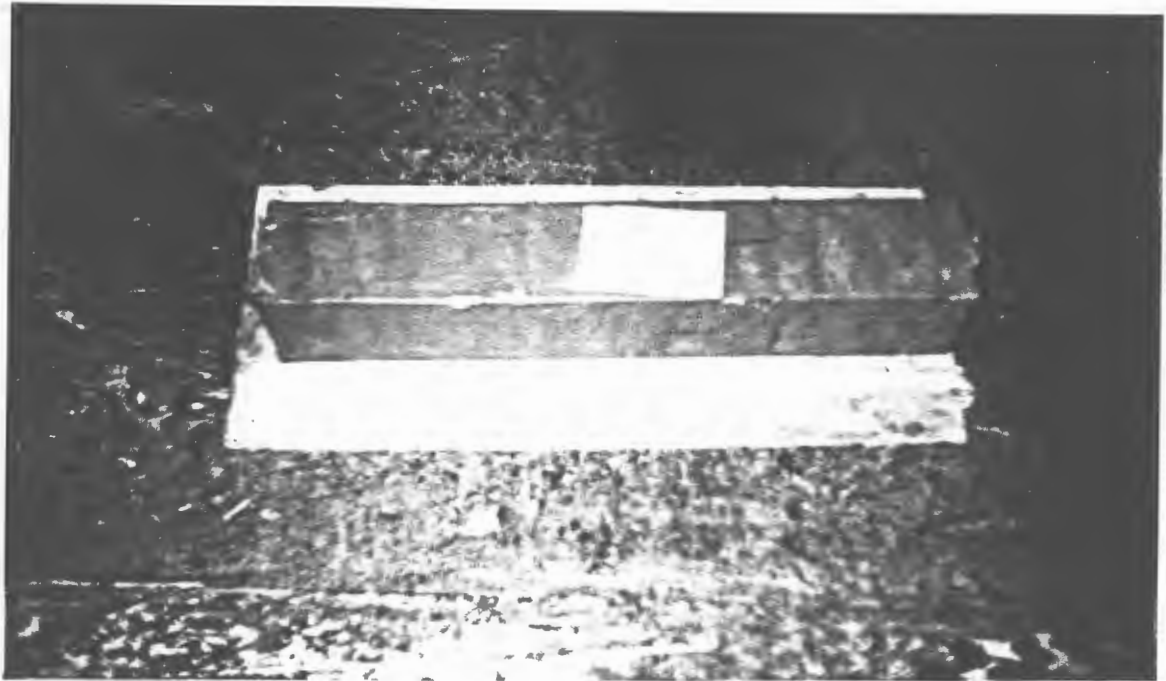


Figura 5.8- Vigota pronta para ser curada

5.5 Ensaio de Resistência

A RCS e a RTCD das quatro misturas compactadas foram determinadas conforme os métodos DNER-ME 180/94 e DNER-ME 181/94, respectivamente.

Uma vez que os corpos de prova foram rompidos em triplicata, tomou-se os valores médios das tensões de ruptura alcançadas, admitindo-se uma tolerância dos valores individuais de $\pm 10\%$ em torno da média. No caso do valor obtido para um dos três corpos de prova se afastar desse intervalo, procedeu-se à determinação de nova média com os dois restantes.

Para romper os corpos de prova destinados ao ensaio de RCS foi utilizada uma prensa com capacidade de 50000 N com velocidade de ruptura de 1,21 mm/min, sendo a carga

estática de compressão aplicada axialmente, conforme mostra a Figura 5.9.

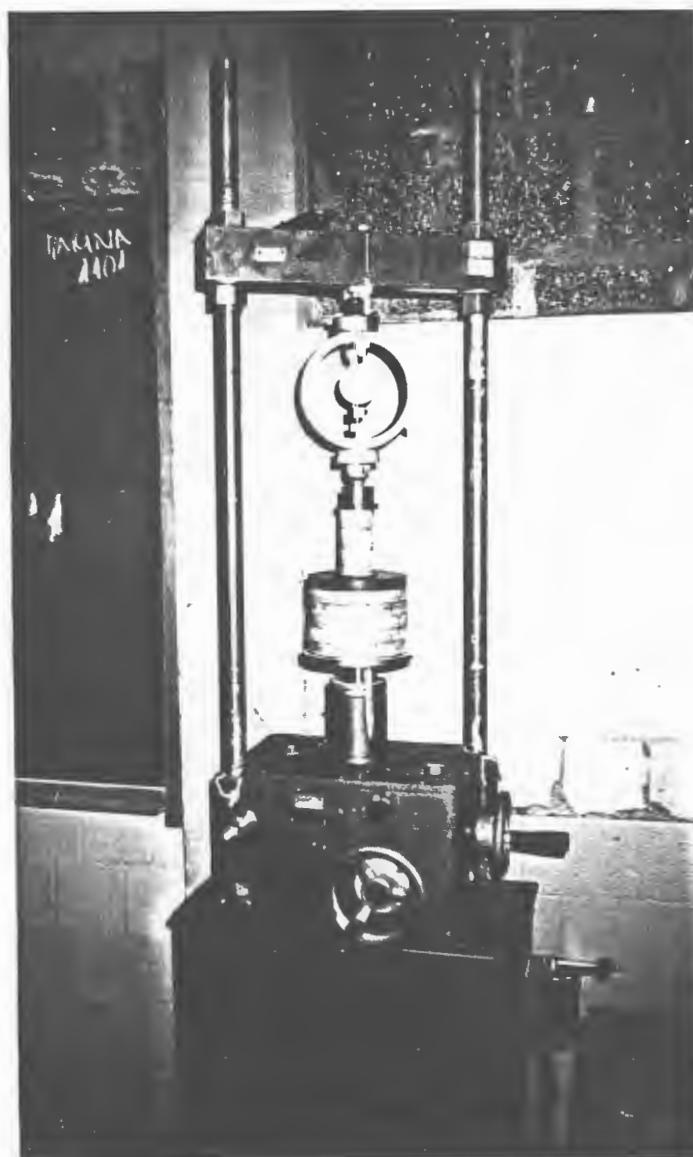


Figura 5.9- Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para romper os corpos de prova destinados ao ensaio de RTCD foi utilizada uma prensa também com capacidade de 50000 N, com velocidade de $0,05 \text{ MPa} \pm 0,02 \text{ MPa}$ por segundo, sendo a carga estática aplicada diametralmente, conforme mostra a Figura 5.10.

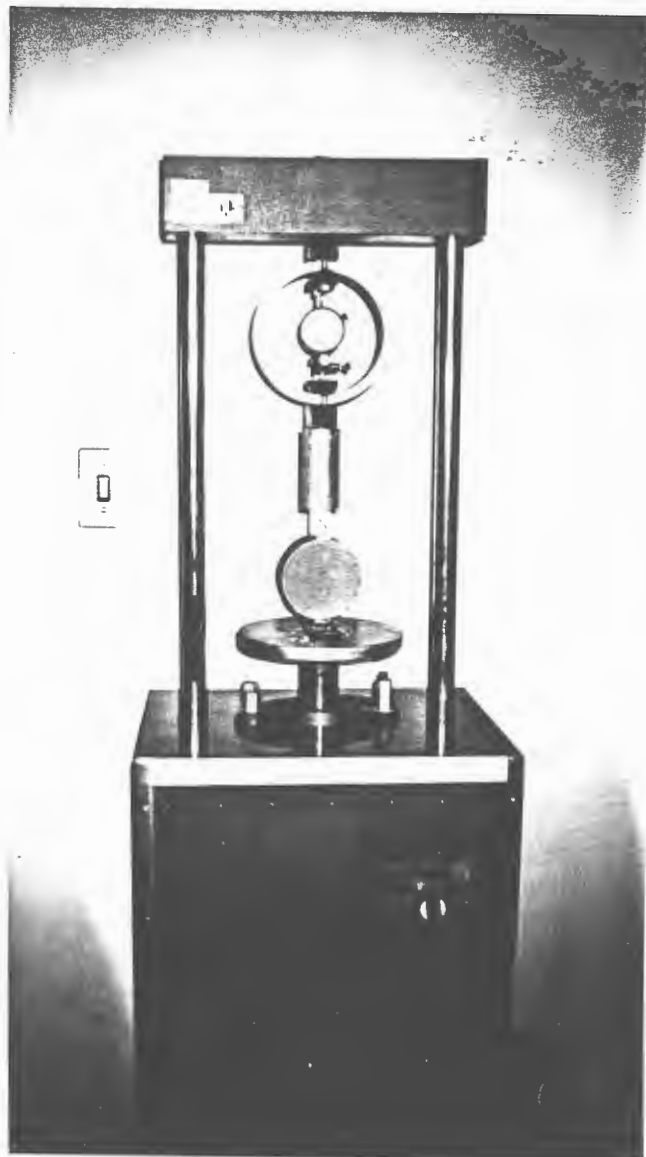


Figura 5.10- Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para o cálculo da RTCD foi utilizada a seguinte expressão:

$$R_T = \frac{2F}{100\pi dh}$$

onde:

R_T - resistência à tração por compressão diametral, (MPa);

F - força máxima aplicada, (N);

d - diâmetro do corpo de prova, (cm);

h - altura do corpo de prova, (cm).

5.6 Ensaio de Tração Indireta Com Carregamento Repetido - Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência dos corpos de prova das quatro misturas compactadas foi determinado através do ensaio de tração indireta, conforme o método DNER-ME 133/94.

O equipamento é constituído essencialmente de uma estrutura metálica com um pistão que aplica vertical e repetidamente uma carga (F) na amostra, através de um dispositivo pneumático com um sistema regulador do tempo de aplicação de carga e da frequência, conforme ilustra a Figura 5.11. Os deslocamentos horizontais (Δ) sofridos pela amostra são medidos por dois LVDTs instalados no plano diametral horizontal, cujas saídas são ligadas num oscilógrafo registrador dos deslocamentos recuperáveis.

Os transdutores LVDT transformam os deslocamentos diametraes que ocorrem durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. É necessário fazer previamente uma calibração para correlacionar os deslocamentos com o valor dos registros.

Os ensaios foram conduzidos sob tensão controlada, a níveis inferiores a 30% das tensões de ruptura por compressão diametral das amostras. De maneira geral, foi utilizada a menor tensão de tração capaz de provocar na amostra um deslocamento mensurável no traço obtido no oscilógrafo.

Na determinação dos módulos de resiliência houve uma fase de condicionamento da amostra, na qual se aplicou uma carga repetida. Nessa fase a carga foi aplicada 200 vezes, com duração de 0,1 segundo e frequência de 1 Hz. Seguiram-se outras três fases de carregamento com determinação dos deslocamentos transientes na direção perpendicular à de aplicação da carga. Em cada fase a carga foi mantida constante e os deslocamentos

foram registrados após 300 repetições na primeira fase, 400 na segunda e 500 na terceira.

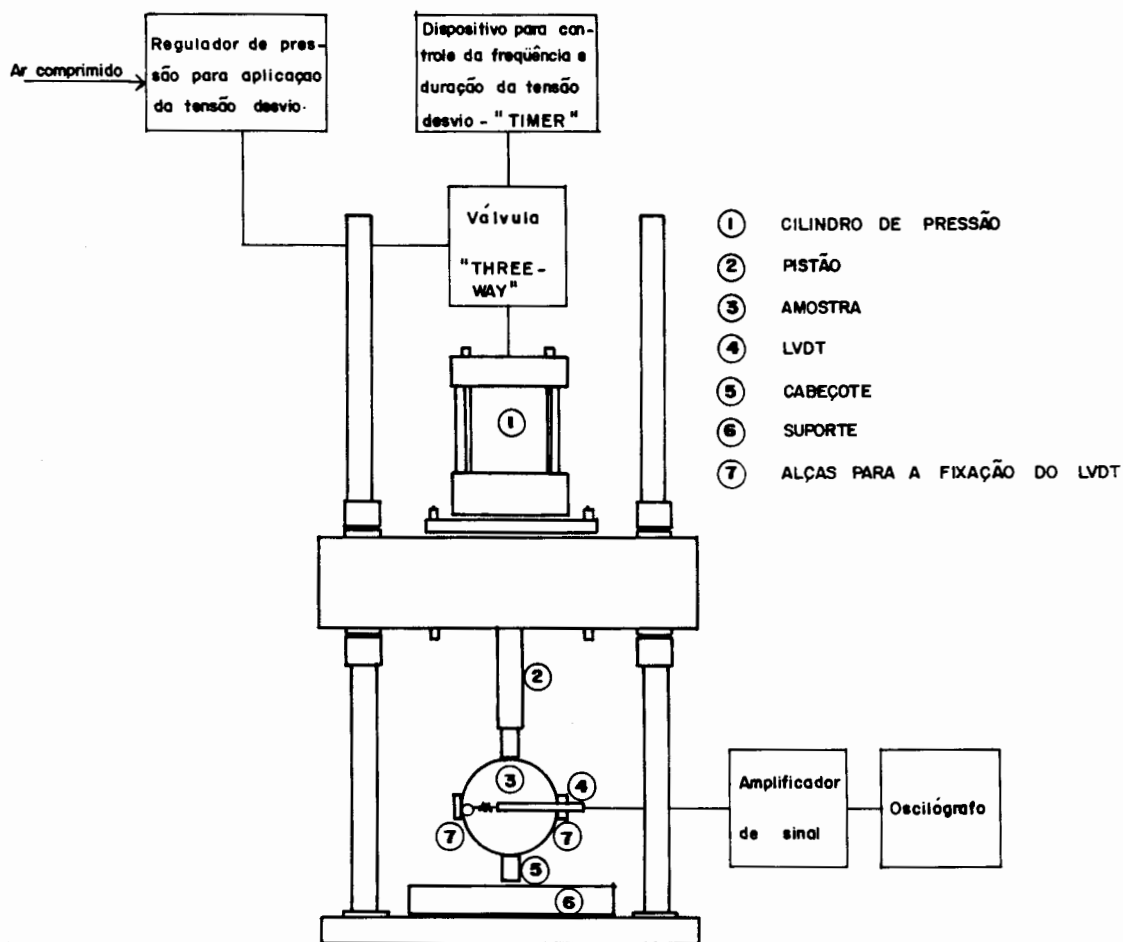


Figura 5.11- Equipamento utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência da mistura é a média dos valores calculados, em cada fase de carregamento, em função da carga aplicada, da altura do corpo de prova, da deformação resiliente e do coeficiente de Poisson. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,2, porque este é o valor típico usual para material cimentado. A formulação utilizada para o cálculo do M_R foi a seguinte:

$$M_R = \frac{F}{100\Delta H} \times (0,2692 + 0,9976\mu)$$

onde:

M_R - módulo de resiliência, (MPa);

F - carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, (N);

Δ - deformação elástica ou resiliente medida no ciclo particular de repetições de carga, (cm);

H - altura do corpo de prova, (cm);

μ - coeficiente de Poisson, (=0,2).

5.7 Ensaio de Fadiga à Flexão

O comportamento à fadiga dos corpos de prova, ou seja, das vigotas, constituídos da Mistura 3, foi determinado sob tensão controlada, de acordo com o método ASTM D 1632/87.

O ensaio consiste na sollicitação repetida de uma viga simplesmente apoiada, carregada nos terços médios por cargas concentradas e iguais, tal que no vão central se tenha somente flexão pura.

O equipamento utilizado foi o existente na UFRGS, conforme projeto desenvolvido por CERATTI (1991), como parte da sua tese de doutorado.

O equipamento consiste de um pórtico para aplicação de cargas de flexão. Neste equipamento o corpo de prova é apoiado em dois extremos a partir de garras que o envolvem nestes pontos, conforme mostram as Figuras 5.12 e 5.13.

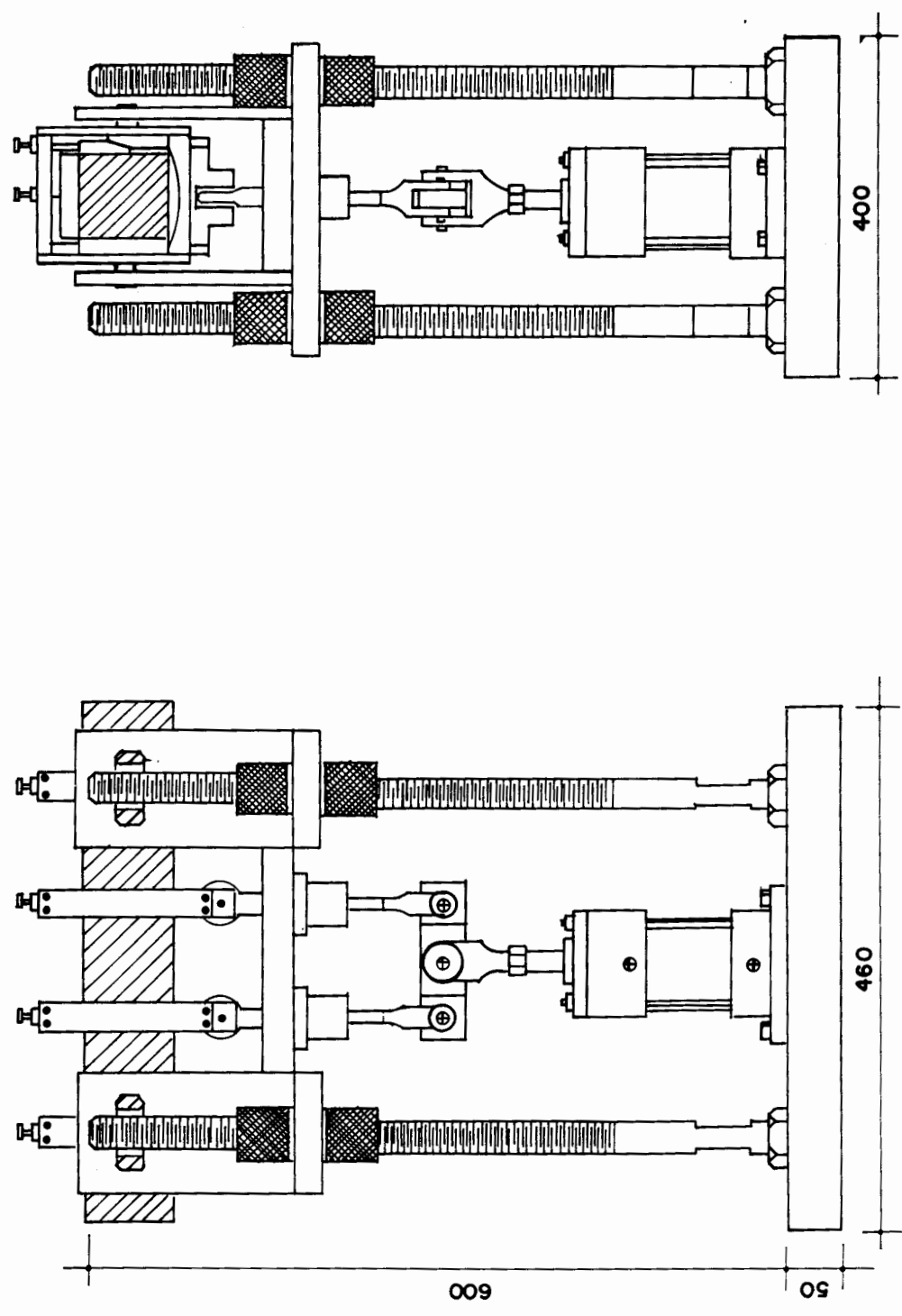


FIGURA 5.12 - Vista frontal e lateral do pórtico de aplicação de cargas (CERATTI, 1991)

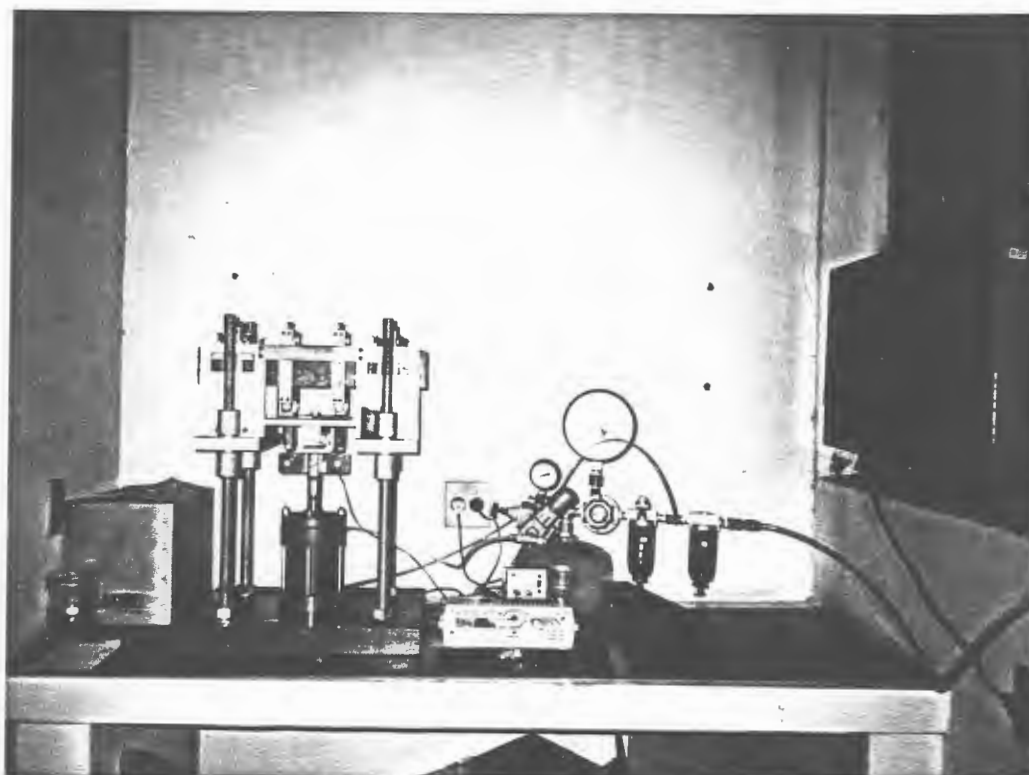


Figura 5.13 - Equipamento utilizado para ensaio de Fadiga à Flexão

O carregamento é feito através de duas garras de aplicação de cargas, localizadas de modo a coincidirem com os extremos do terço médio do corpo de prova.

O carregamento principal ocorre no sentido de baixo para cima, com objetivo de facilitar a eliminação de deformações permanentes.

A aplicação do carregamento é realizada através de um cilindro pneumático, localizado na base do pórtico de reação. A operação deste cilindro pneumático é realizada a partir de um sistema, que controla a intensidade de pressão fornecida, o tempo de atuação e a frequência.

Em cada ciclo de aplicação de carga tem-se uma reversão do sentido de carregamento, com magnitude de aproximadamente 10% da carga aplicada no ensaio.

Foram conectadas às duas entradas do cilindro pneumático válvulas do tipo solenóide. Cada uma destas válvulas é responsável por um dos sentidos da carga reversível definida. À estas válvulas foram ligados reguladores de pressão e manômetros, com a finalidade de controlar a magnitude da pressão aplicada.

Devido ao fato da fonte de ar comprimido localizar-se a uma determinada distância do sistema, foi acoplado à entrada das válvulas tipo solenóide um reservatório, com a finalidade de prover, instantaneamente, o volume de ar comprimido necessário para atingir-se no cilindro pneumático a pressão desejada.

Foi utilizado na entrada do sistema um conjunto de filtro e lubrificador de ar, com a finalidade de tratamento do ar comprimido e proteção dos elementos com ele em contato.

Para o acionamento das válvulas tipo solenóide foi utilizado um aparelho, o qual controla a frequência do ciclo de carga, que foi de 2 Hz para todos os corpos de prova ensaiados.

Foi conectado um contador digital de ciclos de seis dígitos junto a um dos manômetros, com a finalidade de obter-se o número de aplicações de carga até o rompimento de cada vigota.

Todos os corpos de prova foram orientados no equipamento de forma que a carga fosse aplicada na mesma direção da compactação.

5.7.1 Análise Teórica do Ensaio de Fadiga à Flexão

A viga é carregada nos terços do vão com cargas iguais, conforme mostra a Figura 5.14, onde:

P - carga aplicada (Kgf);

L - distância entre os apoios (cm).

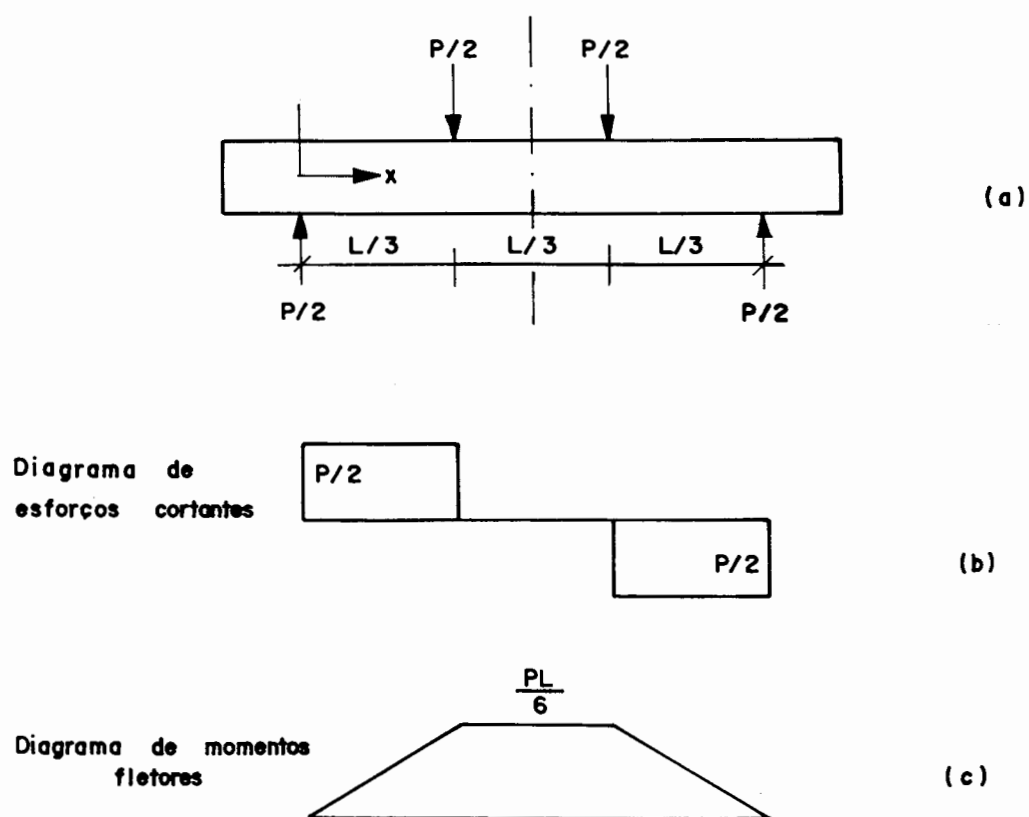


Figura 5.14 - Diagrama de momentos reais e forças cisalhantes reais

As tensões normais nos extremos de uma seção transversal de uma viga são determinadas pela equação de flexão:

$$\sigma = \frac{(M \times h)}{(2 \times I)} \quad (a)$$

onde h é a altura da viga e I seu momento de inércia, que para uma viga retangular de largura b, é dada por:

$$I = \frac{(b \times h^3)}{12} \quad (b)$$

Substituindo (b) em (a):

$$\sigma = \frac{(6 \times M)}{(b \times h^2)} \quad (c)$$

Numa viga de dimensões constantes, a tensão máxima de tração ocorre no ponto de momento máximo. Este momento, na viga carregada em dois pontos é dado por:

$$M_{\text{máx}} = \frac{(P \times L)}{6} \quad (d)$$

Substituindo (d) em (c), obtém-se:

$$\sigma_{\text{tmáx}} = \frac{(P \times L)}{(b \times h^2)} \quad (e)$$

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Resistência à Compressão Simples

Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de RCS realizados com as quatro misturas estudadas, com prévia imersão em água por 24 horas.

Tabela 6.1- Resultados de Resistência à Compressão Simples (MPa)

CURA (dias)	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3	MISTURA 4
	solo: 70% cinza: 23% cal: 7%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9%	solo: 70% cinza: 23% cal: 7% cimento: 1%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9% cimento: 1%
7	0,29	0,37	0,52	0,68
14	0,48	0,76	0,84	0,95
28	1,05	1,31	1,76	1,96
60			2,83	3,08
90	2,90	3,59	4,34	4,44
120			7,59	9,27

Ao comparar os resultados obtidos para as Misturas 1 e 2 verificou-se que a variação de 7% para 9% de cal resultou num aumento da RCS de aproximadamente 24% tanto aos 28, como aos 90 dias de cura, sendo que, este aumento foi mais significativo aos 14 dias de cura, chegando a 58%.

O acréscimo de 1% de cimento de alta resistência inicial na mistura com 7% de cal apresentou os seguintes aumentos da RCS:

- aos 7 dias de cura: 79%;
- aos 14 dias de cura: 75%;
- aos 28 dias de cura: 68%;
- aos 90 dias de cura: 50%.

Verifica-se que o cimento de alta resistência inicial reagiu, principalmente, nos primeiros dias de cura, onde ocorreu maior aumento na RCS, sendo que este aumento foi decaindo com o passar do tempo. Podemos então comprovar a eficiência deste aditivo em relação ao objetivo proposto, ou seja, obter maior resistência aos 7 dias de cura para o possível tráfego de obra durante a execução do pavimento.

O acréscimo de 1% de cimento de alta resistência inicial na mistura com 9% de cal apresentou os seguintes aumentos da RCS:

- aos 7 dias de cura: 84%;
- aos 14 dias de cura: 25%;
- aos 28 dias de cura: 49%;
- aos 90 dias de cura: 24%.

Neste caso também houve maior aumento da RCS até o sétimo dia de cura, sendo que aos 14 dias de cura este aumento não foi tão significativo.

Comparando os valores da RCS obtidos para as Misturas 3 e 4, ou seja, as misturas com a presença de 1% de cimento, observou-se que a maior diferença entre os valores obtidos da RCS é da ordem de 30% aos 7 dias de cura. Isto evidencia a pouca influência do teor mais elevado de cal quando é utilizado aditivo de cura rápida.

Para todas as misturas estudadas verificou-se que o aumento mais significativo da RCS em relação ao período de cura

ocorreu entre os 28 e os 90 dias de cura, sendo que, nas misturas sem a presença de cimento, este aumento foi da ordem de 175%, enquanto que, nas misturas que foi adicionado cimento, este aumento foi da ordem de 130%.

O aumento da RCS de 90 até 120 dias de cura foi de 75% para a Mistura 3, e 108% para a Mistura 4. Este resultado evidenciou a continuidade das reações pozolânicas ao longo do tempo, e demonstrou que as resistências obtidas aos 90 dias de cura ainda são apenas uma parcela da RCS final que as misturas podem atingir.

A Figura 6.1 mostra que o melhor ajuste para os resultados obtidos da RCS em função do período de cura até 90 dias foi o linear para todas as misturas estudadas. Na Tabela 6.2 estão apresentadas os modelos de regressão obtidos, sendo a resistência à compressão simples (RCS) expressa em (MPa) e o período de cura (t) expresso em (dias).

Tabela 6.2 - Modelos de regressão para o ensaio de RCS até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995)

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	RCS= 0,0314t + 0,0887	0,9976
MISTURA 2	RCS= 0,0380t + 0,1882	0,9979
MISTURA 3	RCS= 0,0448t + 0,2745	0,9919
MISTURA 4	RCS= 0,0448t + 0,4422	0,9905

Como todas os modelos de regressão apresentam alto coeficiente de determinação, ou seja, o valor de R² próximo da unidade, a RCS destas misturas pode ser estimada para períodos de cura não testados até os 90 dias de cura, bastando para tanto substituir (t) pelo período de cura desejado.

A partir da Figura 6.2 pode-se verificar que para as misturas com a presença de aditivo, ensaiadas aos 120 dias de

cura, ocorreu mudança no tipo do melhor ajuste dos modelos de regressão obtidos, para a RCS em relação ao período de cura. Este ajuste passou de linear para polinomial de segunda ordem. Os modelos de regressão obtidos estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Modelos de regressão para o ensaio de RCS até 120 dias de cura

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	RCS= 0,0314t + 0,0887	0,9976
MISTURA 2	RCS= 0,0380t + 0,1882	0,9979
MISTURA 3	RCS= 0,0003t ² + 0,0144t + 0,6337	0,9863
MISTURA 4	RCS= 0,0006t ² - 0,0078t + 1,056	0,9705

Estes modelos também permitem obter o valor da RCS para períodos de cura não testados até 120 dias de cura. É de se observar que os modelos obtidos apresentam coeficientes de determinação próximos da unidade, sendo todos superior a 0,95.

Quanto às misturas sem a presença de aditivo, não se conhece o seu comportamento aos 120 dias de cura, mas supõe-se que seja similar às demais misturas.

Pela análise das Figuras 6.1 e 6.2 constatou-se que ao acréscimo de 1% de cimento de alta resistência inicial correspondem os maiores ganhos de RCS, para todos os períodos de cura testados.

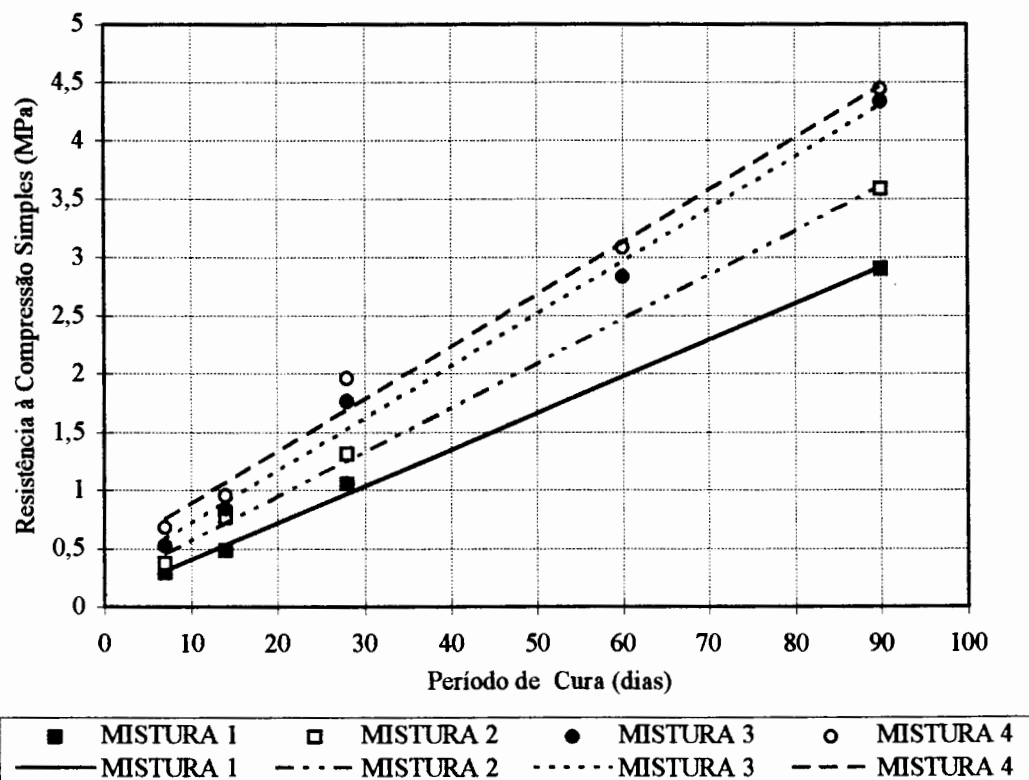


Figura 6.1 - Resultado do ensaio de RCS até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995)

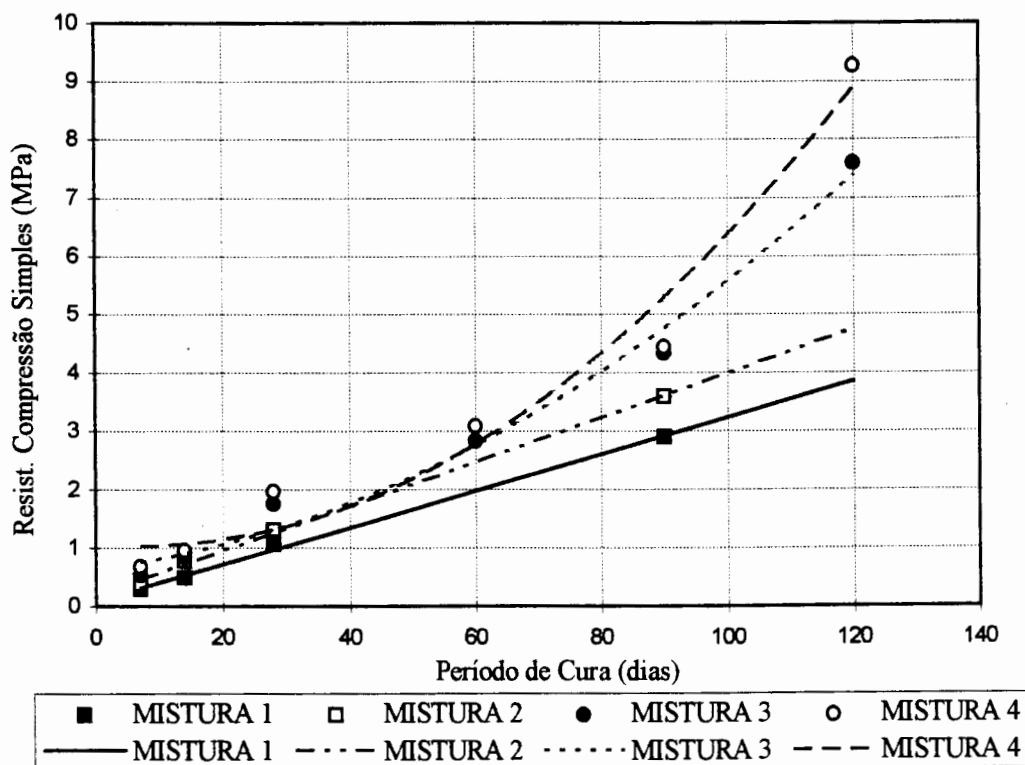


Figura 6.2- Resultado do ensaio de RCS até 120 dias de cura

6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados obtidos nos ensaios de RTCD estão apresentados na Tabela 6.4. Estes ensaios foram realizados com as quatro misturas estudadas, sem prévia imersão em água.

Tabela 6.4 - Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)

CURA (dias)	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3	MISTURA 4
	solo: 70% cinza: 23% cal: 7%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9%	solo: 70% cinza: 23% cal: 7% cimento: 1%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9% cimento: 1%
7	0,06	0,07	0,10	0,12
14	0,07	0,12	0,16	0,19
28	0,19	0,24	0,31	0,39
60			0,60	0,68
90	0,73	0,94	1,01	0,99
120			1,33	1,28

Ao comparar os resultados obtidos para as Misturas 1 e 2 verificou-se que a variação de 7% para 9% de cal resultou num aumento da RTCD de aproximadamente 25% aos 7, 28 e 90 dias de cura, sendo este aumento mais significativo aos 14 dias de cura, chegando a 71%.

De forma análoga aos resultados obtidos no ensaio de RCS, também no ensaio de RTCD constatou-se a adequabilidade do uso do cimento de alta resistência inicial. Com a presença do cimento, o ganho da RTCD foi de aproximadamente 70% aos 7 dias de cura, em relação às misturas sem aditivo.

Comparando-se os valores da RTCD obtidos para as Misturas 3 e 4, ou seja, as misturas com cimento, conclui-se que o maior teor de cal pouco influencia nos resultados em

termos de acréscimo da RTCD, a qual atingiu no máximo 26% aos 28 dias de cura.

O ganho da RTCD, em todas as misturas estudadas, é mais significativo aos 90 dias de cura, sendo que dos 28 aos 90 dias o ganho é de aproximadamente 290%, para as misturas sem aditivo e, em torno de 230%, para as misturas com aditivo.

O aumento da RTCD de 90 até 120 dias de cura para as Misturas 3 e 4 foi da ordem de 30%. Isto evidencia a continuidade das reações pozolânicas que conferem às misturas maiores resistências com o decorrer do tempo.

Analisando a Figura 6.3 verificou-se que, de forma análoga à RCS, a RTCD também apresentou como melhor ajuste o linear até os 90 dias de cura. Na Tabela 6.5 estão apresentados os modelos de regressão obtidos sendo a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) expressa em (MPa) e o período de cura (t) expresso em (dias).

Tabela 6.5 - Modelos de regressão para o ensaio de RTCD até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, 1995)

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	RTCD= 0,0084t - 0,313	0,9943
MISTURA 2	RTCD= 0,0106t - 0,0269	0,9971
MISTURA 3	RTCD= 0,0107t + 0,0095	0,9912
MISTURA 4	RTCD= 0,0104t + 0,0599	0,9969

Todos os modelos de regressão obtidos apresentam coeficiente de determinação próximo da unidade, o que permite o cálculo da RTCD para períodos de cura não testados, dentro dos limites ensaiados.

Ao considerar-se 120 dias de cura, o melhor ajuste para a RTCD, em função do período de cura, para as Misturas 3 e

4, ou seja, as misturas com a presença de aditivo, passa de linear para polinomial de segunda ordem, conforme pode ser observado na Figura 6.4 e na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Modelos de regressão para o ensaio de RTCD até 20 dias de cura

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	RTCD= 3E-05t ² + 0,0052t + 0,0083	0,9977
MISTURA 2	RTCD= 4E-05t ² + 0,0069t + 0,0186	1
MISTURA 3	RTCD= 2E-05t ² + 0,0089t + 0,0371	0,9976
MISTURA 4	RTCD= 4E-06t ² + 0,0113t + 0,0464	0,9989

Ao analisar os modelos de regressão obtidos para as Misturas 1 e 2, considerando ajuste polinomial, verificou-se que estes apresentam valores de R² mais próximos da unidade, do que aqueles obtidos para o ajuste linear.

Concluiu-se, então, que os modelos de regressão obtidos para a RTCD se ajustam à polinômios de segunda ordem, apesar de ser aceito também o ajuste linear, visto que para ambos ajustes estudados, os modelos de regressão apresentam coeficiente de determinação superior a 0,95, para todas as misturas.

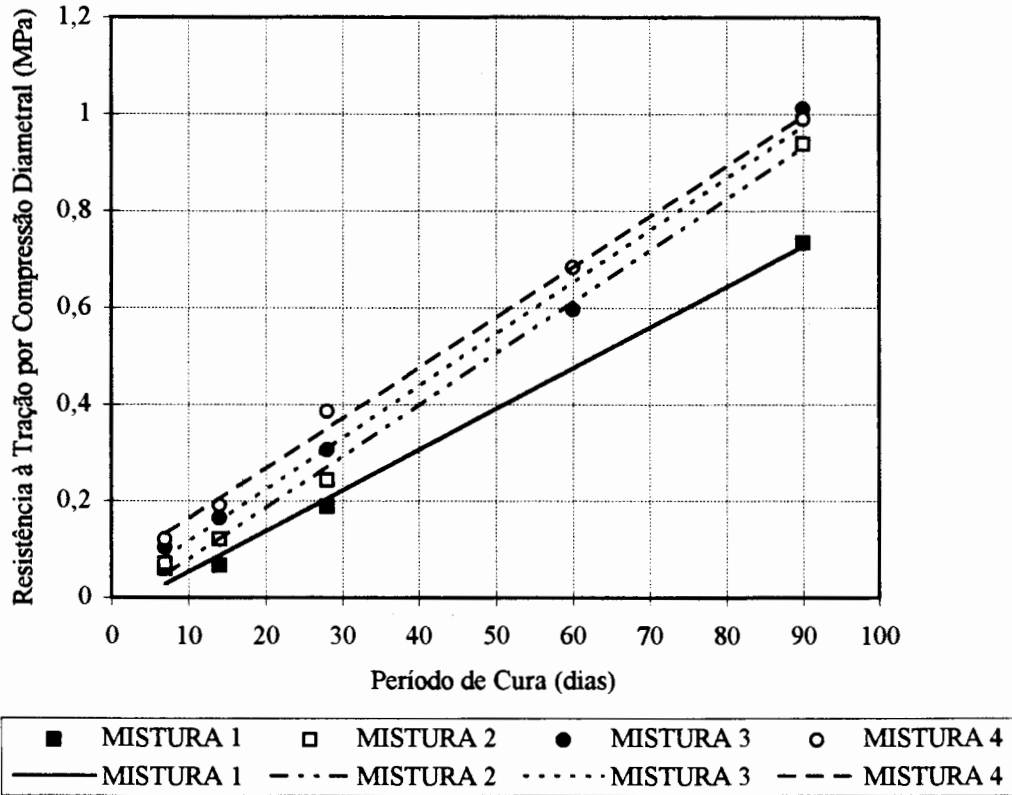


Figura 6.3 - Resultado do ensaio de RTCD até 90 dias de cura (FOGAÇA e CERATTI, (1995))

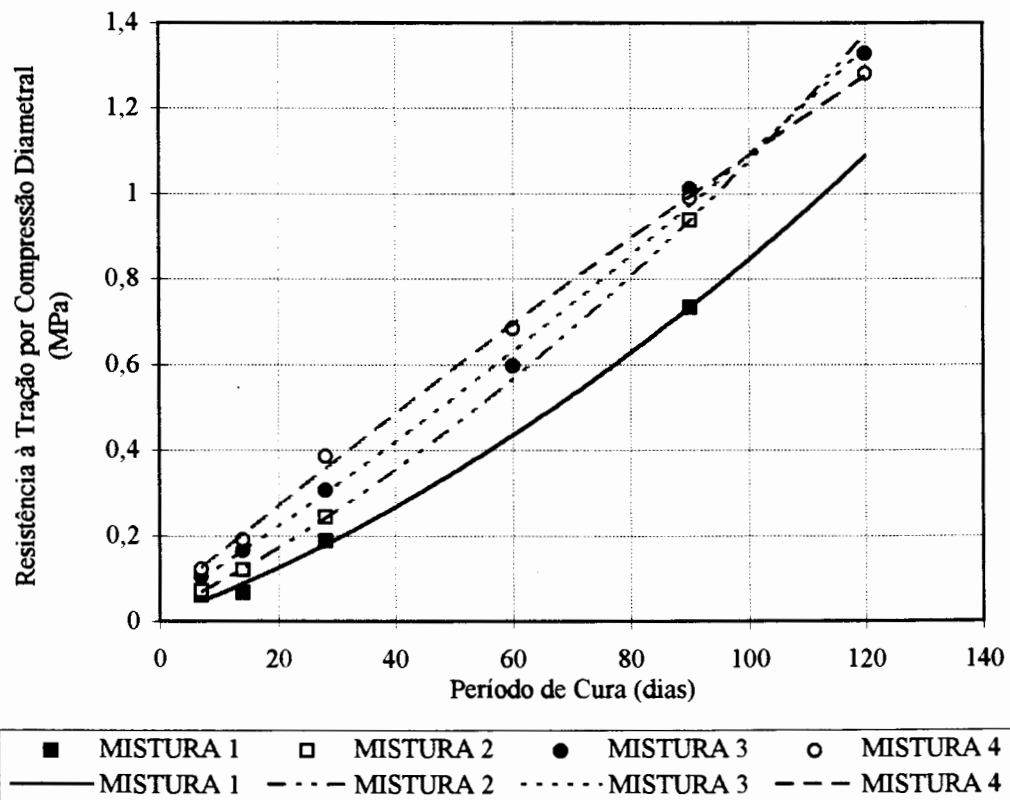


Figura 6.4- Resultado do ensaio de RTCD até 120 dias de cura

6.3 Comparações entre Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração por Compressão Diametral

A relação existente entre a RCS e a RTCD está apresentada na Tabela 6.7 e nas Figuras 6.5 e 6.6.

A partir dos dados apresentados nos itens 6.1 e 6.2 obteve-se os modelos de regressão que estão apresentadas na Tabela 6.7, com ambas resistências expressas em (MPa).

Tabela 6.7 - Modelos de regressão para RTCD em função da RCS

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	RTCD= 0,2671RCS - 0,054	0,9898
MISTURA 2	RTCD= 0,2790RCS - 0,0778	0,9906
MISTURA 3	RTCD= -0,0142RCS ² - 0,2960RCS - 0,0902	0,9859
MISTURA 4	RTCD= -0,0181RCS ² - 0,3189RCS - 0,1114	0,9942

Analisando a Figura 6.5 e a Tabela 6.7 verifica-se que as Misturas 1 e 2 apresentaram ajuste diferenciado das Misturas 3 e 4. As Misturas 1 e 2 apresentaram como melhor ajuste o linear e, no gráfico, as curvas obtidas estão praticamente sobrepostas. As Misturas 3 e 4 apresentaram como melhor ajuste o polinomial de segunda ordem e, no gráfico, as curvas também são muito próximas.

Observou-se então a mudança no tipo de melhor ajuste, devido a ação do cimento de alta resistência inicial, presente nas Misturas 3 e 4, que conferiu ao material maiores resistências nos primeiros dias de cura.

Como o coeficiente de determinação obtido para todos os modelos de regressão é superior a 0,95 torna-se possível, a partir destes modelos, estimar o valor da RTCD, para um determinado valor da RCS, dentro do intervalo dos resultados obtidos neste estudo.

A Figura 6.6 mostra a relação RTCD/RCS em função do período de cura apresentando pequena variabilidade. Para todas as misturas o quociente foi igual, em média, a 0,1959, sendo o valor mínimo de 0,1376 para a Mistura 1, aos 14 dias de cura e, o valor máximo de 0,2615 para a Mistura 2, aos 90 dias de cura.

Analisando o comportamento das curvas da Figura 6.6 constata-se que aos 7, 28 e 60 dias de cura quase não há dispersão da relação RTCD/RCS, mas aos 14, 90 e 120 dias de cura ocorreu uma pequena dispersão. Verificou-se ainda que aos 14 e aos 120 dias de cura houve uma queda da relação RTCD/RCS. Uma explicação para isto baseia-se no fato da RCS ter aumentado bem mais que a RTCD para estes períodos de cura.

Na Tabela 6.8 está apresentada a análise de variância realizada com os resultados obtidos da relação RTCD/RCS. Analisando esta tabela podemos notar que o fator período de cura é mais significativo que o fator mistura para a relação RTCD/RCS, isto quer dizer que o fator período de cura causa maior variação nos resultados da relação RTCD/RCS do que o fator mistura; o que era esperado, visto a semelhança dos teores de cal adotados e a pequena porcentagem de cimento adicionada.

Tabela 6.8 - Análise de variância da relação RTCD/RCS

FONTE DE VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	MÉDIA DOS QUADRADOS	F	F _{tab}
Período de cura	0,01587	5	0,0032	6,798	2,92
Mistura	0,0001	3	0,0000	0,106	3,41
Residual	0,0051	11	4,67E-004		
Total	0,0211	19			

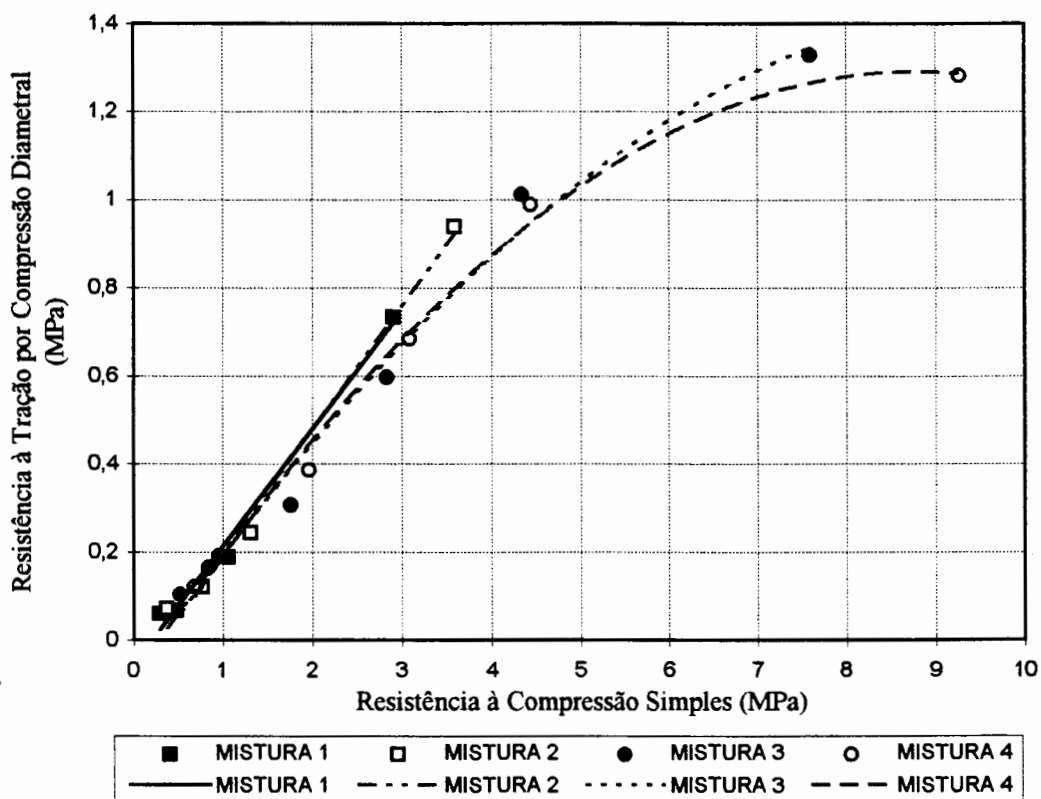


Figura 6.5 - Comparação entre RCS e RTCD

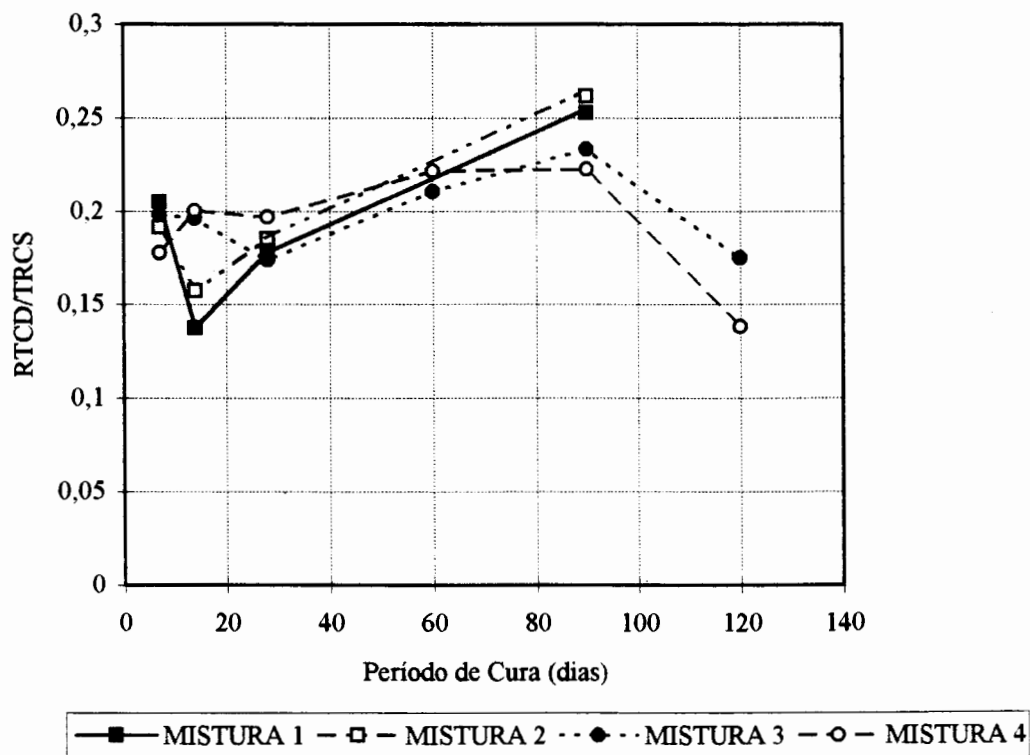


Figura 6.6 - Relação entre RTCD e RCS em função do período de cura

6.4 Módulo de Resiliência Por Compressão Diametral

No Tabela 6.9 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de MRCD para as quatro misturas estudadas.

Tabela 6.9 - Resultados de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MPa)

CURA (dias)	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3	MISTURA 4
	solo: 70% cinza: 23% cal: 7%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9%	solo: 70% cinza: 23% cal: 7% cimento: 1%	solo: 68% cinza: 23% cal: 9% cimento: 1%
7	1880	3160	5730	5730
14	2770	5300	8080	7370
28	8810	10420	12670	19100
60			22170	28040
90	20640	26100	27730	27810
120			26790	26500

Como ocorreu com os ensaios de RCS e RTCD, também neste ensaio, observou-se o aumento dos valores do MRCD entre as Misturas 1 e 2, ou seja, com a variação de 7% para 9% de cal, sendo este aumento mais significativo aos 14 dias de cura, onde atingiu 91% e, pouco significativo aos 28 dias de cura, cujo aumento foi de apenas 18%.

Comparando os resultados obtidos entre as Misturas 1 e 3, verificou-se que o acréscimo de 1% de cimento de alta resistência inicial, como aditivo, causou um acréscimo no valor do MRCD da ordem de 205% aos 7 dias de cura. Isto evidencia a ação do cimento de alta resistência inicial como aditivo, e comprova a eficiência da finalidade pela qual optou-se por sua utilização, ou seja, obter valores razoáveis das variáveis em estudo aos 7 dias de cura, para possibilitar tráfego até mesmo durante a execução do pavimento.

Comparando os resultados obtidos para o MRCD entre as Misturas 3 e 4, ou seja, as misturas com cimento de alta resistência inicial como aditivo, percebe-se que entre as mesmas os valores são similares para 7, 14, 90 e 120 dias de cura. Isto evidencia a pouca influência do teor mais elevado de cal quando está presente o cimento de alta resistência inicial, como aditivo.

Analisando os resultados obtidos para o MRCD aos 120 dias de cura notou-se que a partir dos 90 dias de cura não houve aumento nos valores do MRCD, mas ao contrário, ocorreu uma pequena queda destes valores.

Como aconteceu com os resultados obtidos no ensaio de RTCD que apresentou ajuste polinomial de segunda ordem, também os valores de MRCD apresentaram este tipo de ajuste. Tal ajuste pode ser verificado na Figura 6.7 e na Tabela 6.10 onde o módulo de resiliência por compressão diametral (MRCD) é expresso em (MPa) e o período de cura (t) é expresso em (dias).

Tabela 6.10 - Modelos de regressão para o ensaio de MRCD

MISTURA	MODELOS	R ²
MISTURA 1	MRCD= $-1,7095t^2 + 399,59t - 1461,9$	0,9927
MISTURA 2	MRCD= $-1,1254t^2 + 387,44t + 347,22$	0,9997
MISTURA 3	MRCD= $-2,1758t^2 + 471,55t + 1963,1$	0,9954
MISTURA 4	MRCD= $-3,9052t^2 + 674,30t + 901,2$	0,9684

Tal como ocorreu com os ensaios de RCS e RTCD, também o MRCD pode ser estimado para um determinado período de cura não testado, dentro do intervalo estudado, pois os modelos de regressão apresentam alto coeficiente de determinação, ou seja, valor de R² superior a 0,95.

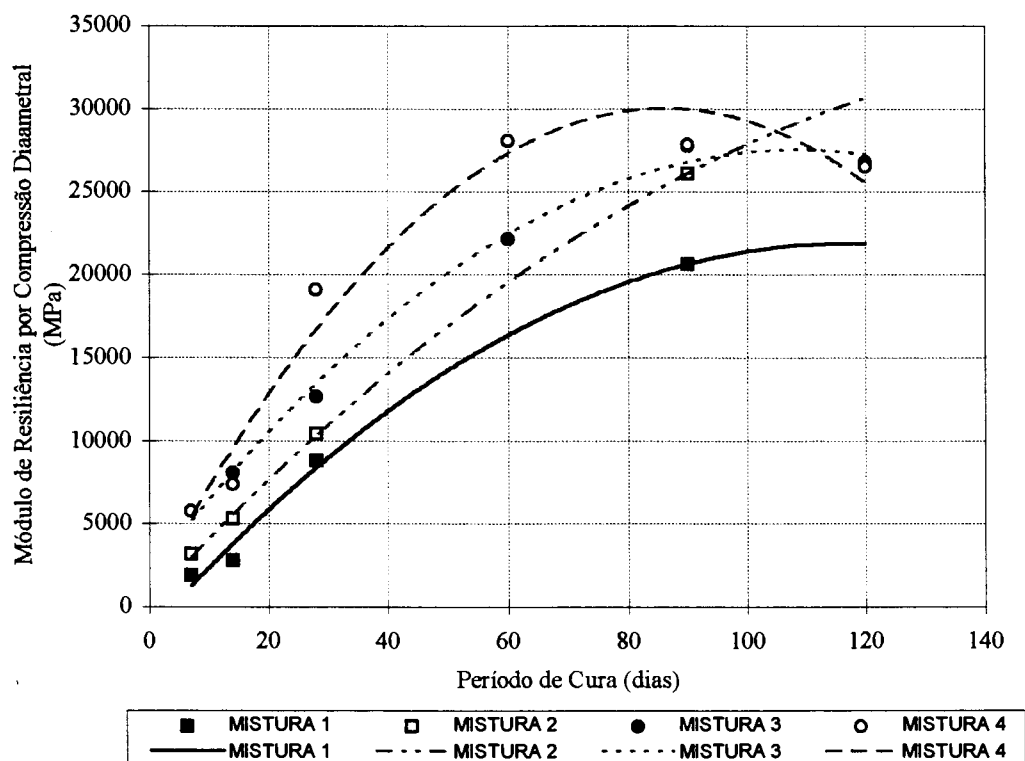


Figura 6.7- Resultado do ensaio de MRCD até 120 dias de cura

6.5 Ensaio de Fadiga à Flexão

Na Tabela 6.11 e na Figura 6.8 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de fadiga à flexão realizado com vigotas compostas com a Mistura 3 (solo: 68%, cinza volante: 23%, cal: 7%, cimento: 1%), sendo que foi rompido um total de 15 vigotas.

As vigotas foram ensaiadas com o tempo de cura de no mínimo 90 dias, visto que, de acordo com os dados do ensaio de RCS, obtidos até o momento do início da realização do ensaio de fadiga à flexão, verificou-se que dos 28 aos 90 dias de cura o aumento de RCS foi da ordem de 175%, para as misturas sem adição de cimento, e da ordem de 130%, para as misturas com presença de cimento. Estes dados, portanto, desaconselham a realização do ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova com

período de cura inferior a noventa dias, pois neste período o ganho de resistência é considerável.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6.11 verifica-se que as vigotas de número 7, 11 e 14 romperam junto ao apoio. Acredita-se que estas vigotas romperam no apoio por não estarem devidamente ajustadas neste ponto. Quanto à vigota de número 13, durante a execução do ensaio, ocorreu uma falha no aparelho de acionamento das válvulas e perdeu-se a contagem do número de ciclos.

Tabela 6.11 - Resultados obtidos no ensaio de Fadiga à Flexão

Viga	Esforço Aplicado (Kgf)	Tensão Máx. de Tração (MPa)	Número de Ciclos
1	70	0,47	864000
2	100	0,71	738334
3	120	0,82	591055
4	110	0,75	543285
5	120	0,85	524419
6	130	0,92	17280
7	130	-	rompeu no apoio
8	130	0,89	218853
9	120	0,85	519441
10	130	0,92	260789
11	100	-	rompeu no apoio
12	100	0,68	719376
13	100	-	problemas
14	100	-	rompeu no apoio
15	110	0,75	715399

Na Figura 6.8 apresenta-se a relação existente entre a Tensão Máxima de Tração e a Vida de Fadiga. Convém lembrar que a tensão máxima de tração foi calculada de acordo com a formulação apresentada no item 5.7.1.

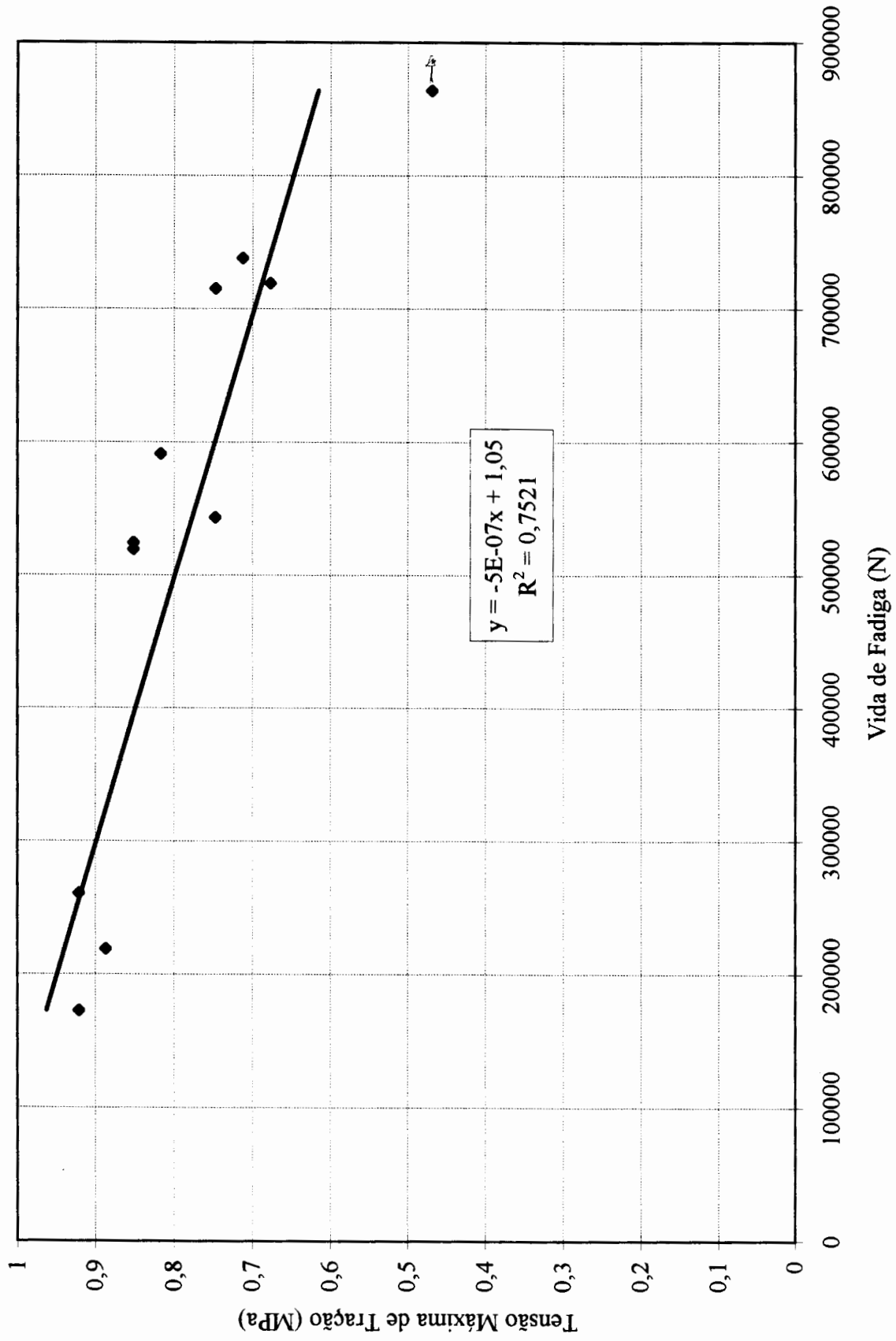


Figura 4 - Relação entre a Vida de Fadiga e a Tensão Máxima de Tração

A partir da Figura 6.8 foi possível chegar ao seguinte modelo de regressão:

$$\sigma_{tm\acute{a}x} = -5E-07 \times Nf + 1,05$$

onde:

$\sigma_{tm\acute{a}x}$ - tensão máxima de tração (MPa)

Nf - vida de fadiga, ou número de ciclos

O coeficiente de determinação para o modelo anterior foi de $R^2 = 0,7521$.

Na Figura 6.9 observa-se a forma de ruptura que ocorreu na maioria das vigotas, sendo a ruptura vertical e localizada entre os apoios centrais, com exceção das vigas de número 7, 11 e 14 que foram desconsideradas.

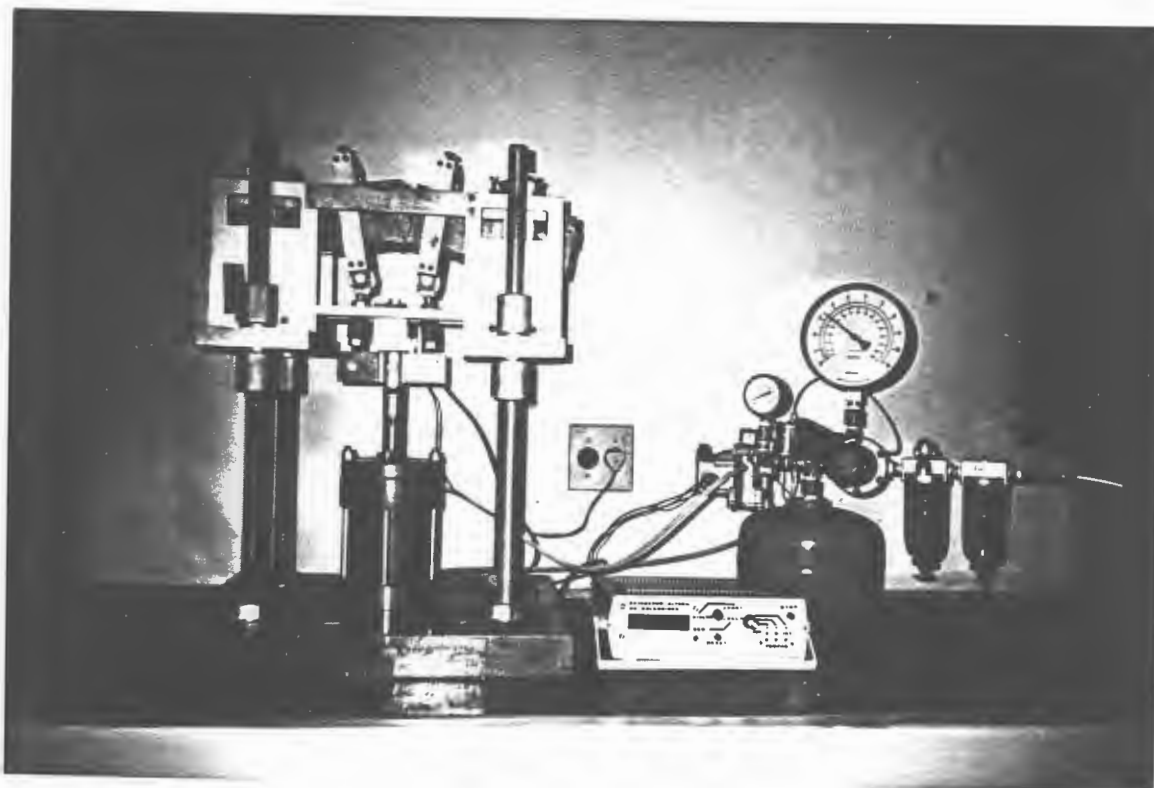


Figura 6.9 - Forma de ruptura das vigas no ensaio de Fadiga  Flexão

Das duas misturas com adição de cimento, ou seja, as Misturas 3 e 4, a mistura com menor teor de cal (Mistura 3) apresentou resultados de RCS e RTCD aceitáveis, como também aquela com maior teor de cal (Mistura 4). Daí a escolha da mistura com menor teor de cal (Mistura 3) para a realização do ensaio de fadiga à flexão.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO CONTENDO BASE DE SOLO ESTABILIZADO COM CINZA VOLANTE E CAL

7.1 Introdução

O projeto de pavimentos requer um conhecimento dos deslocamentos, deformações específicas e tensões causadas por cargas de eixos. Com o objetivo de prever o desempenho de pavimentos contendo base do solo estudado, estabilizado com cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial como aditivo, foi utilizado um programa computacional para determinar os efeitos causados pela passagem das cargas.

Este programa baseia-se na teoria das camadas elásticas, a qual pode ser utilizada com sucesso em pavimentos que contenham camadas de base estabilizada, devido ao fato do material cimentado apresentar alta rigidez, o que lhe proporciona comportamento relativamente elástico linear.

Quando se utiliza a teoria das camadas elásticas, os materiais utilizados são caracterizados por suas constantes elásticas: coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade.

As hipóteses que a teoria das camadas elásticas considera são:

- Cada camada atua como um meio linear elástico, contínuo, isotrópico, homogêneo e infinito na direção horizontal;

- A carga superficial é geralmente representada por uma tensão vertical uniformemente distribuída atuando sobre uma área circular;

- As condições das interfaces entre as camadas podem ser representadas como permitindo ou não deslocamentos relativos;

- Cada camada é suportada de forma contínua pela camada imediatamente abaixo;

- As forças de inércia são desprezíveis;

- As deformações no sistema são pequenas;

- Os efeitos da temperatura não são considerados.

7.2 O Programa Computacional Utilizado

7.2.1 Introdução

Na década de 60 surgiram os primeiros programas computacionais para a solução de sistemas estratificados de várias camadas, sob a ação de uma ou mais cargas de roda de eixos rodoviários e aeroportuários.

Atualmente existem em forma operacional vários programas elásticos ou de elementos finitos, que podem ser utilizados em análises mecânicas de pavimentos. Os programas atualmente em uso e aplicáveis em estudos de pavimentos com base de misturas cimentadas, são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Características dos programas computacionais utilizáveis em estudos de pavimentos (CERATTI, 1991)

PROGRAMA	BISTRO Shell	CHEVRON5L	ELSYM5	FEPAVE2
Base teórica	teoria de Burmister	teoria de Burmister	teoria de Burmister	MEF
Tipo de pavimento analisado	rígidos e flexíveis	rígidos e flexíveis	rígidos e flexíveis	rígidos e flexíveis
Nº de camadas	10	5	5	15
Nº de cargas aplicadas	12	5	10	1
Juntas em pavimentos rígidos	não	não	não	não
Concentração de tensões nas juntas	não	não	não	não
Cargas nas bordas em pavimentos rígidos	não	não	não	não
Propriedades dos materiais	elásticos lineares	elásticos lineares	elásticos lineares	elásticos não lineares
Descontinuidades	não	não	não	não

7.2.2 O Programa ELSYM5

Na análise apresentada nesta dissertação foi utilizado o programa computacional ELSYM5 - "Elastic Layered System" desenvolvido em 1972 por AHLBORN, no Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia em Bekerley.

O programa ELSYM 5 é baseado na teoria de BURMISTER, que considera as camadas do pavimento com comportamento elástico, e leva em conta as hipóteses da teoria das camadas elásticas.

O programa utiliza o método das diferenças finitas no cálculo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos definidos pelo usuário para uma carga de roda. No caso de mais de uma carga, adota o princípio da superposição dos efeitos para levar em conta a ação das demais cargas (PINTO, 1991).

O programa possui três tipos de entradas principais: variáveis de caracterização do material ou da camada, variáveis de carregamento e informações das coordenadas do sistema.

Os sistemas podem ser constituídos por até cinco camadas, consideradas isotrópicas. Cada camada é caracterizada pela espessura, módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, sendo estes considerados constantes. A espessura da camada inferior, ou seja o subleito, é considerada semi-infinita.

As cargas colocadas no sistema de camadas são caracterizadas por duas destas três variáveis de entrada: a carga, a pressão do pneu e o raio da área carregada. Podem ser colocadas até 10 cargas idênticas, em diferentes coordenadas. O programa superpõe os efeitos de todas as cargas a fim de obter os resultados nas coordenadas desejadas.

O sistema tridimensional utiliza as coordenadas x e y , num plano horizontal, e a coordenada z representa a profundidade. O programa calcula os resultados para cada profundidade (z) de interesse e todos os resultados para cada par (até 100) de coordenadas (x, y) de entrada.

Esse programa tem como principais vantagens o seu baixo tempo de processamento e a facilidade de uso rotineiro.

O programa tem contra si os seguintes fatores: não considera a não-linearidade dos materiais e fornece o estado de tensão e deformação somente para o carregamento centrado na placa, o que nem sempre ocorre numa rodovia.

Apesar desses contras o programa tem apresentado bons resultados, sendo estes similares aos obtidos por outros programas tais como o FEPAVE, conforme PINTO (1991). Devido ao grande número de simulações realizadas fez-se necessário utilizar um programa de procedimento rápido e de fácil operação.

7.3 As Estruturas e Parâmetros Analisadas

Como estrutura de referência considerou-se um sistema de três camadas elásticas, composto de uma camada de rolamento, uma base cimentada e um subleito.

A camada de rolamento, ou seja, o revestimento, foi considerado de revestimento asfáltico com 5 cm de espessura. O seu módulo de resiliência foi adotado igual a 3000 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,30.

Para a camada de base, a qual é constituída de solo estabilizado com cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial como aditivo de cura rápida, foram estudadas cinco espessuras: 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm e 40 cm. Para o módulo de resiliência deste material foram considerados cinco valores: 6000 MPa, 11000 MPa, 17000 MPa, 22000 MPa e 27000 MPa; estes valores correspondem aos obtidos no Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral apresentado nos itens 5.8 e 6.4. O coeficiente de Poisson adotado para este material foi de 0,20.

Para o subleito, de espessura semi-finita, foram considerados cinco valores de módulo de resiliência: 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa e 250 MPa. O coeficiente de Poisson adotado para esta camada foi de 0,35.

Considerando-se as combinações entre os valores de módulo de resiliência da base e do subleito e as variações de espessura da camada de base, um total de 125 estruturas foi submetido à análise computacional.

Como carregamento representativo a ser utilizado nesta análise foi selecionado um eixo simples de rodas duplas, equivalente ao eixo padrão brasileiro de 8,2 tf, sendo esta carga aplicada numa área circular com raio igual a 11 cm, (Figura 7.1). Nesta figura verifica-se também os pontos 1 e 2 onde analisa-se as tensões, as deformações e os deslocamentos, ou seja, sob a roda e entre as rodas.

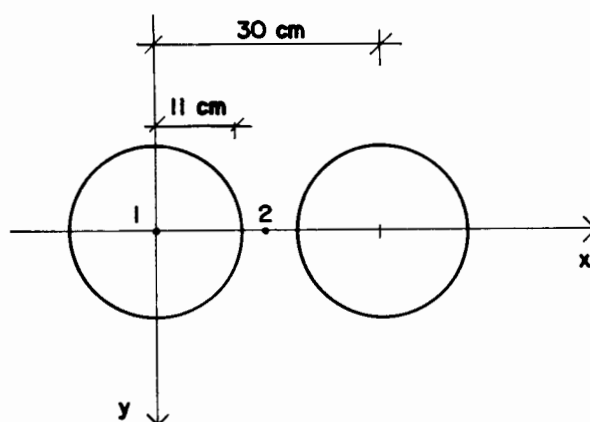


Figura 7.1- Localização das cargas solicitantes

A estrutura de referência utilizada na simulação, com respectivo carregamento, e posição dos pontos de análise das variáveis de interesse neste trabalho estão apresentados na Figura 7.2.

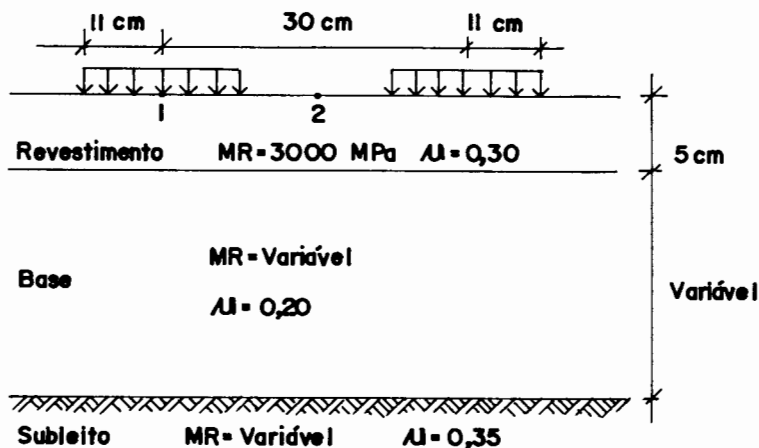
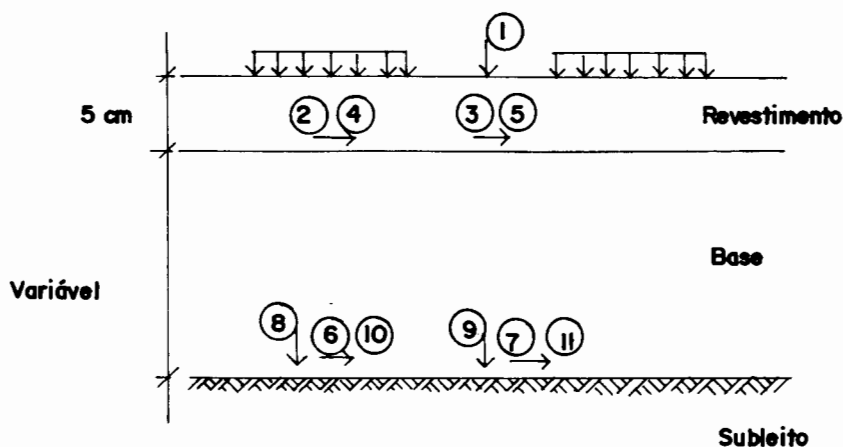


Figura 7.2- Estrutura de referência e carregamento utilizados na simulação com o ELSYM5

Para cada estrutura foram analisados os parâmetros, conforme estão indicados na Figura 7.3.



- 1- deflexão superficial (entre as rodas) - DEF_{SUP}
- 2- tensão de compressão na face inferior da camada asfáltica (sob a roda) - TC_{REV1}
- 3- tensão de compressão na face inferior da camada asfáltica (entre as rodas) - TC_{REV2}
- 4- deformação específica de compressão na face inferior da camada asfáltica (sob a roda) - DC_{REV1}
- 5- deformação específica de compressão na face inferior da camada asfáltica (entre as rodas) - DC_{REV2}
- 6- tensão de tração na face inferior da base cimentada (sob a roda) - TT_{BAS1}
- 7- tensão de tração na face inferior da base cimentada (entre as rodas) - TT_{BAS2}
- 8- tensão vertical de compressão no topo do subleito (sob a roda) - $TVC_{SUBLEITO1}$
- 9- tensão vertical de compressão no topo do subleito (entre as rodas) - $TVC_{SUBLEITO2}$
- 10- deformação específica de tração na face inferior da base cimentada (sob a roda) - DT_{BAS1}
- 11- deformação específica de tração na face inferior da base cimentada (entre as rodas) - DT_{BAS2}

Figura 7.3 - Parâmetros estudados

7.4 Apresentação dos Resultados Obtidos Com o ELSYM5

Em anexo estão apresentados os resultados obtidos através do programa computacional ELSYM5. A partir dos dados obtidos verificou-se que o parâmetro limitante foi a tensão radial de tração na face inferior da base, que para alguns casos apresentou valores bastante elevados.

Quanto a posição da carga, constatou-se que o ponto mais crítico foi entre as rodas, pois neste ponto, os valores da tensão radial de tração na face inferior da base foram mais elevados do que aqueles obtidos no ponto sob a roda. Como o ponto de aplicação da carga entre as rodas foi considerado o mais crítico, nos itens seguintes a análise apresentada refere-se somente a este ponto.

7.5 Análise dos Parâmetros Estudados

7.5.1 Introdução

A partir dos resultados obtidos pela simulação numérica, realizada com o programa computacional ELSYM 5, o qual foi utilizado para o cálculo do modo de sollicitação de pavimentos, foram procedidas análises de variância para cada parâmetro estudado. As análises de variância foram realizadas com o objetivo de verificar qual dos fatores estudados (espessura da base, módulo de resiliência da base, módulo de resiliência do subleito) causa maior influência em cada parâmetro em estudo.

Com base nos resultados obtidos na análise de variância de cada parâmetro foi possível elaborar gráficos para verificar a relação existente entre cada parâmetro e os fatores em estudo.

7.5.2 Deflexão Superficial (DEF_{SUP})

A análise de variância deste parâmetro, apresentada na Tabela 7.2, permite concluir que o seu fator mais significativo é o módulo de resiliência do subleito e depois a espessura da base, sendo o módulo de resiliência da base o fator menos significativo.

Tabela 7.2- Análise de variância para deflexão superficial

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	8,532E-04	4	2,133E-04	102,736	2,45
MR_{BASE}	4,903E-04	4	1,226E-04	59,041	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	5,254E-03	4	1,312E-03	632,65	2,45
Residual	2,325E-04	112	2,076E-06		
Total	6,830E-03	124			

Nas Figuras 7.4 a 7.8 apresenta-se a relação existente entre a deflexão superficial e o módulo de resiliência do subleito para as espessuras estudadas e também para cada módulo de resiliência da base.

Analisando-se estas figuras verifica-se que os valores obtidos para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa e para as espessuras de 20 cm, 25 cm e 30 cm, para o módulo de resiliência da base de 6000 MPa geram valores de deflexão superficial superiores a 0,30 mm, que é a deflexão superficial máxima admissível, para diminuir a possibilidade de trincamentos.

Para uma mesma espessura da base, conforme aumenta o módulo de resiliência do subleito ocorre um decréscimo na deflexão superficial, isto para todos os valores de módulo de resiliência da base estudados. De acordo com o aumento do módulo de resiliência da base diminui a deflexão superficial.

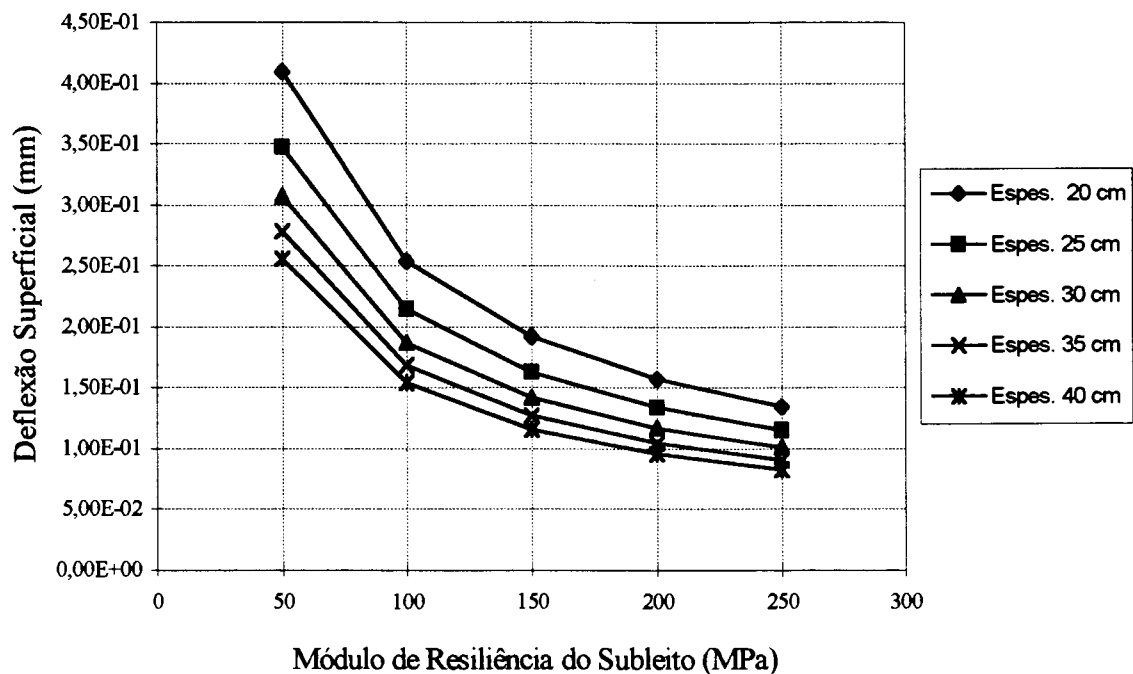


Figura 7.4 - Variação da deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 6000 MPa.

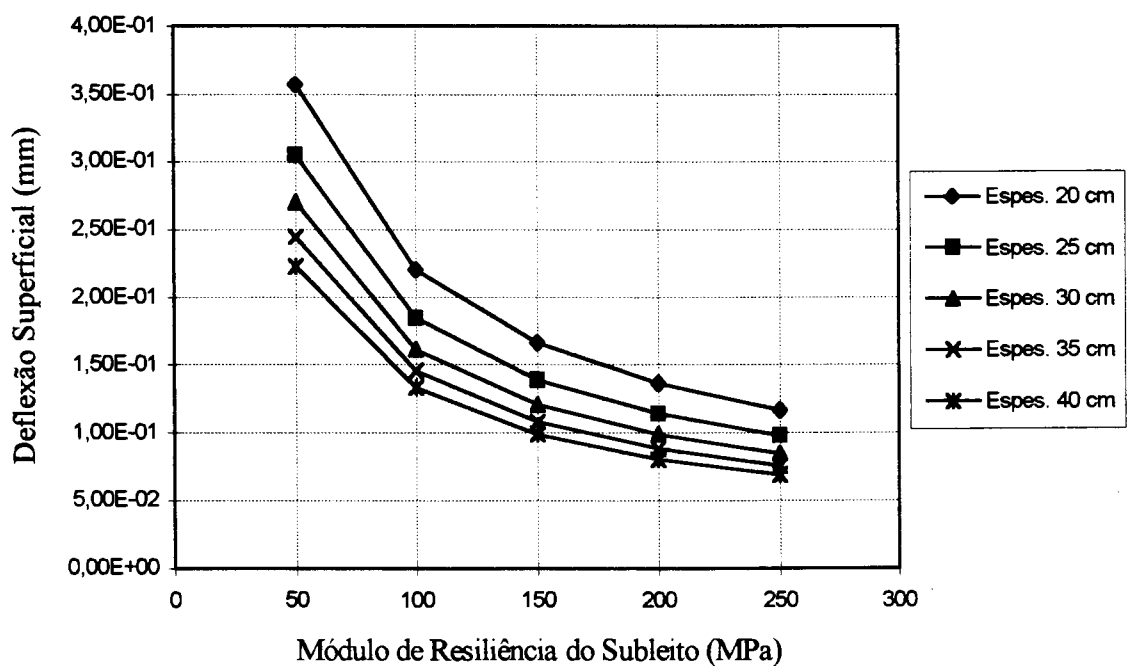


Figura 7.5 - Variação da deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 11000 MPa.

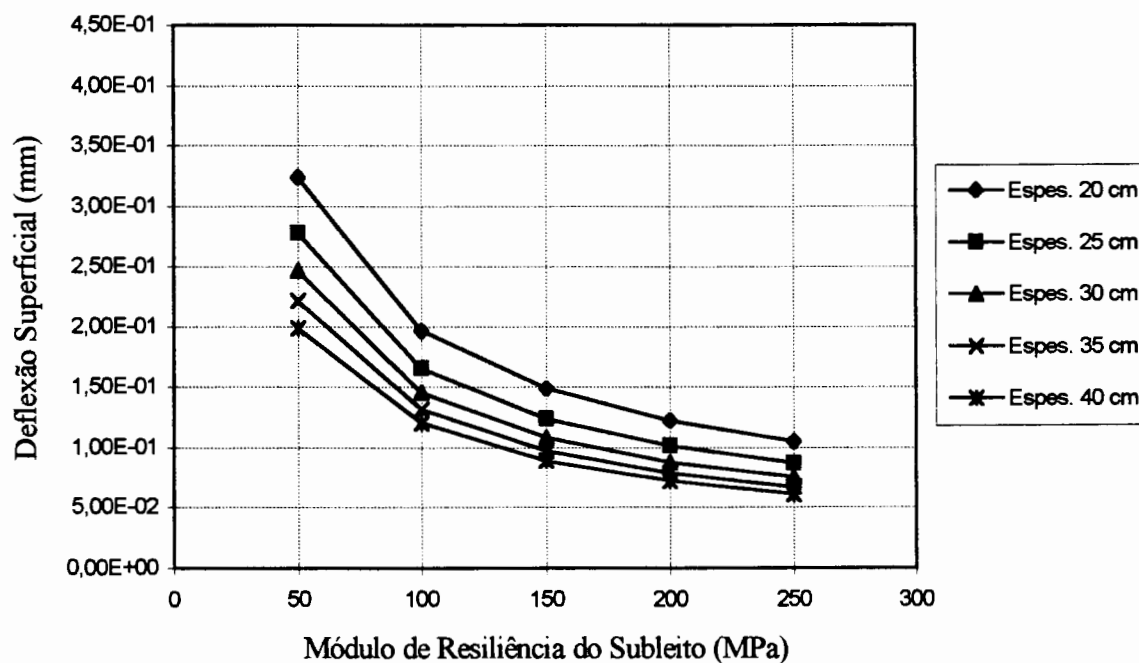


Figura 7.6 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 17000 MPa.

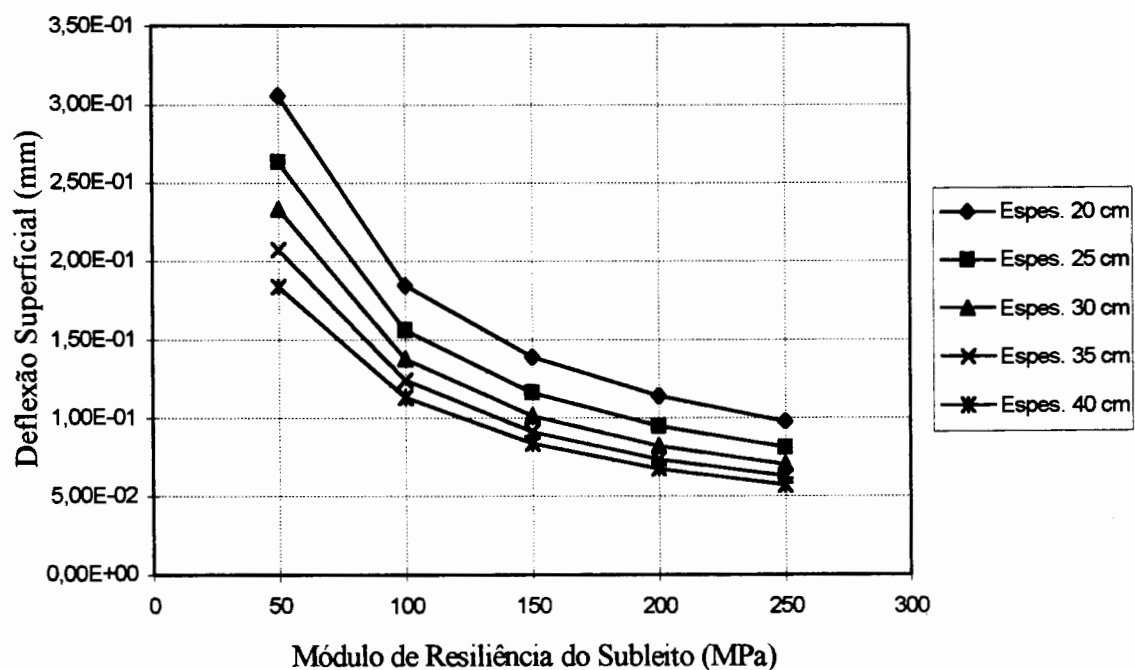


Figura 7.7 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 22000 MPa.

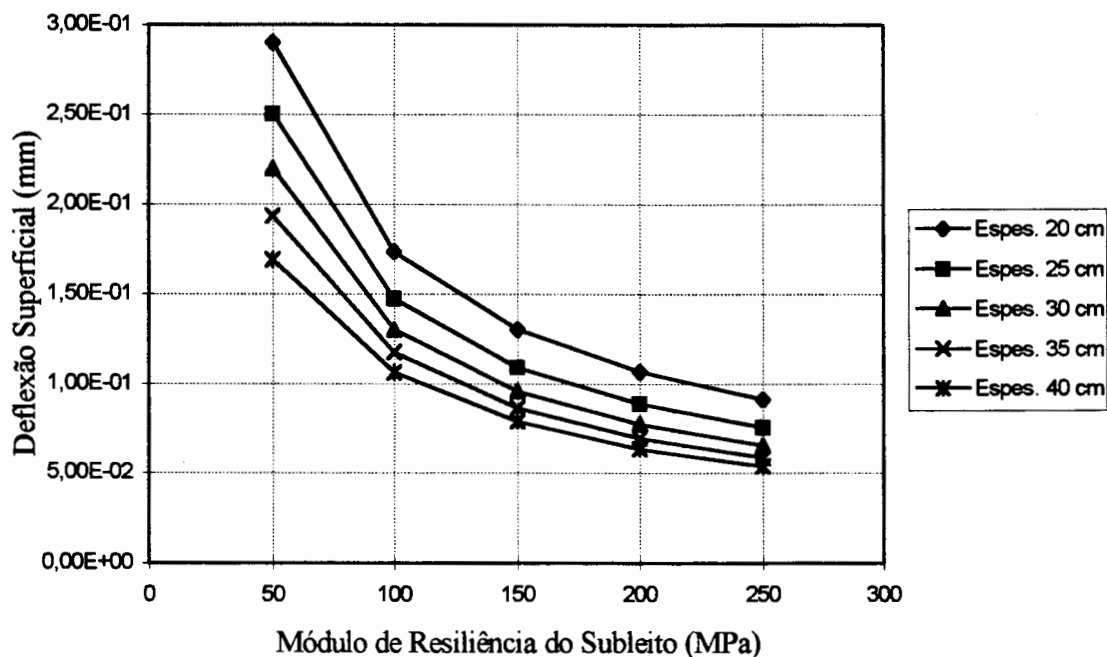


Figura 7.8 - Variação entre a deflexão superficial no topo do revestimento com o módulo de resiliência do subleito, para o módulo de resiliência da base de 28000 MPa.

7.5.3 Tensão de Compressão no Revestimento (TC_{REV})

A análise de variância deste parâmetro, apresentada nas Tabelas 7.3 e 7.4, permite concluir que o fator de maior significância muda de acordo com o ponto de aplicação da carga, ou seja, se verificarmos sob a roda o fator de maior significância é a espessura da base, mas entre as rodas o fator de maior significância é o módulo de resiliência da base.

Tabela 7.3- Análise de variância para TC_{REV} (sob a roda)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	7,670	4	1,917	261,65	2,45
MR_{BASE}	5,273	4	1,318	179,89	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	1,696	4	0,423	57,86	2,45
Residual	8,207E-01	112	7,328E-03		
Total	15,459	124			

Tabela 7.4- Análise de variância para TC_{REV} (entre as rodas)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	9,793	4	2,448	263,30	2,45
MR_{BASE}	14,876	4	3,719	399,94	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	1,486	4	0,371	39,95	2,45
Residual	1,041	112	9,299E-03		
Total	27,197	124			

Analisando-se os dados obtidos a partir do ELSYM 5 (em anexo) para a tensão de tração na face inferior da base verifica-se que os valores mais elevados correspondem ao ponto entre as rodas, sendo este o ponto mais crítico. Portanto, para este parâmetro, mesmo tendo comportamento diferenciado nos dois pontos, apresenta-se somente a relação obtida para o ponto mais crítico.

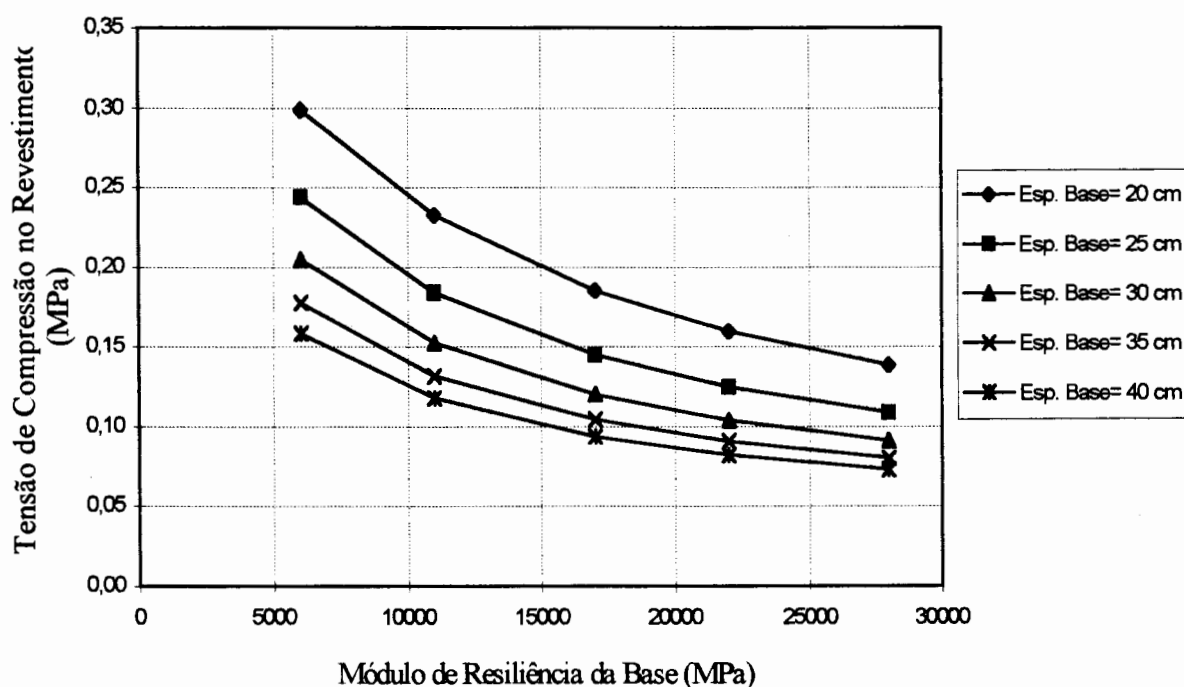


Figura 7.9 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.

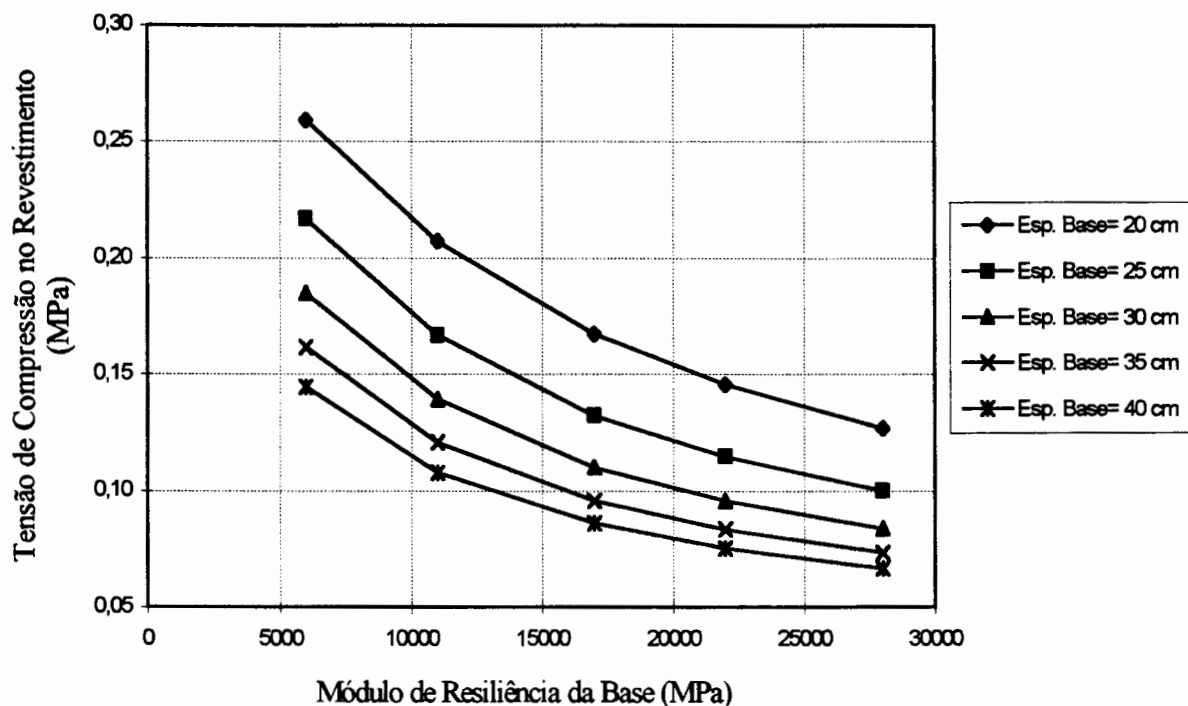


Figura 7.10 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.

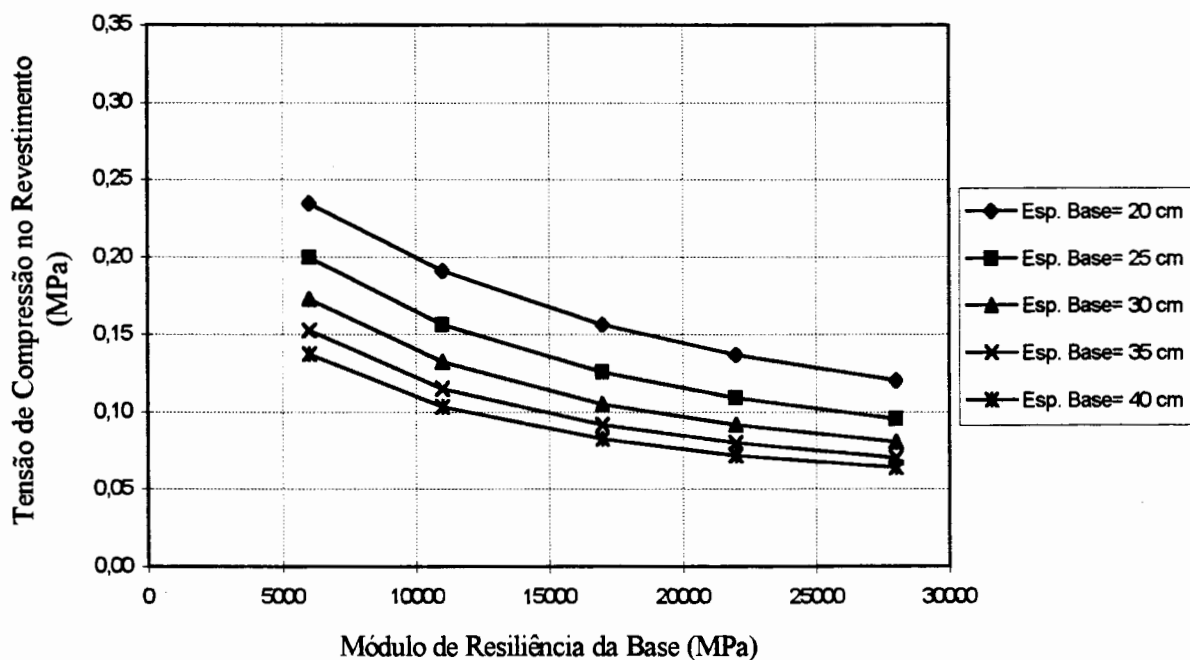


Figura 7.11 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.

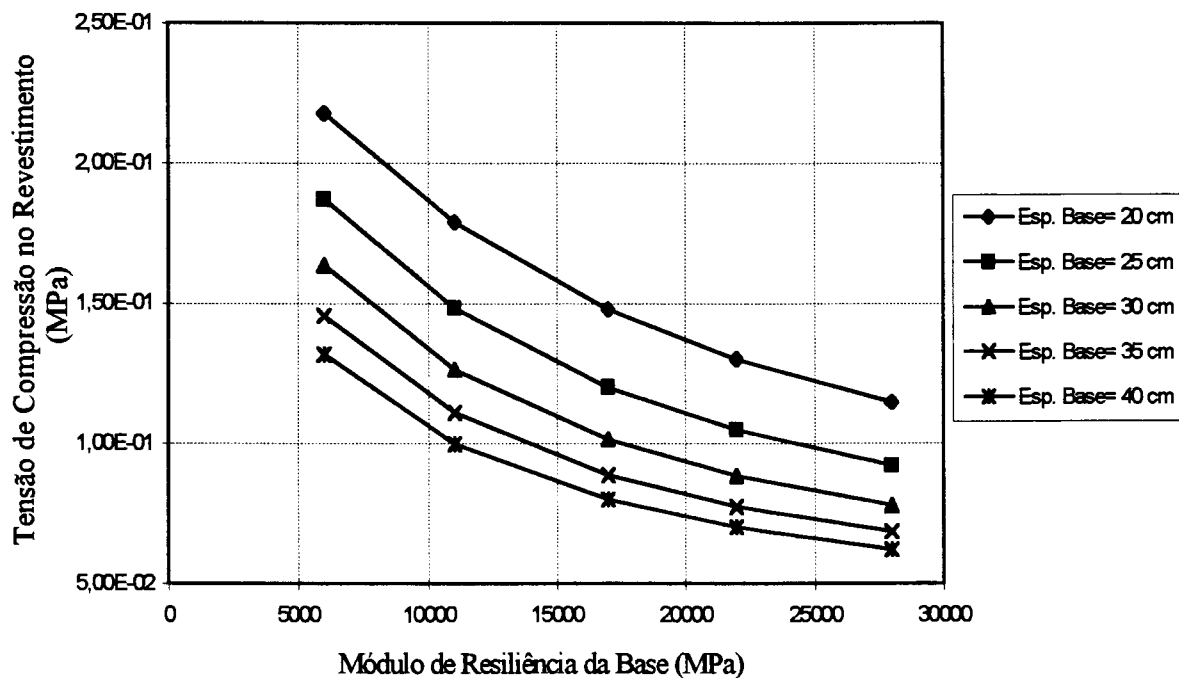


Figura 7.12 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.

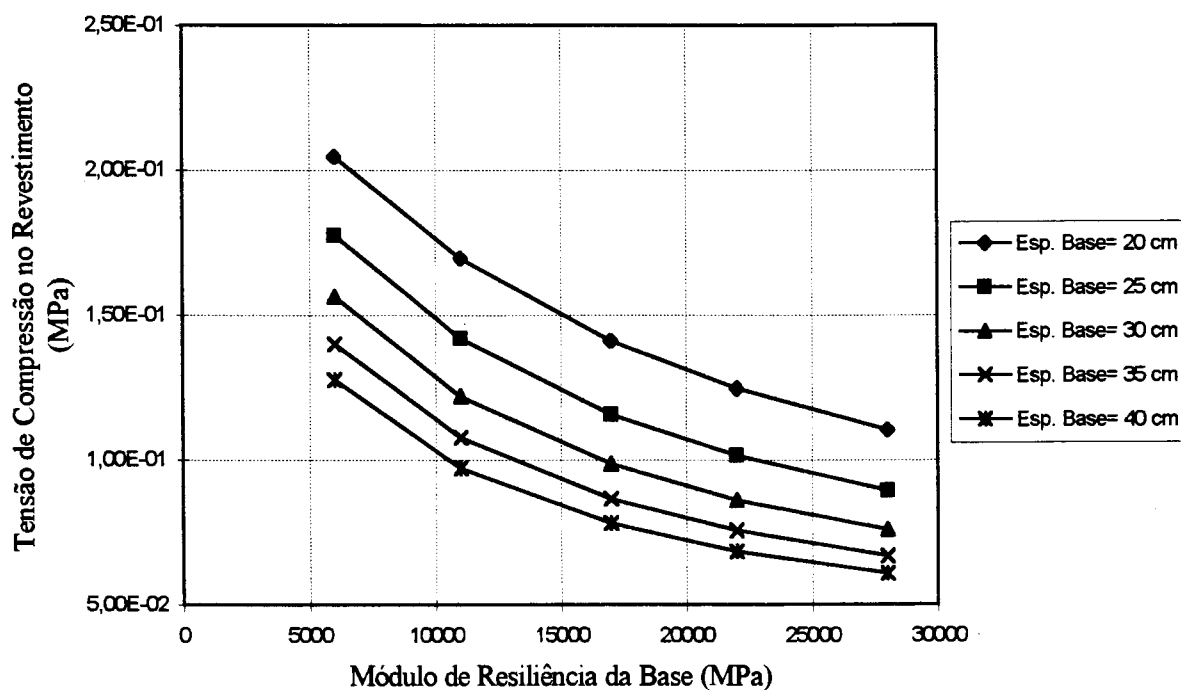


Figura 7.13 - Variação entre a tensão de compressão no revestimento com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.

Verificou-se que a tensão na face inferior do revestimento é de compressão e não de tração, o que significa que o revestimento trabalha o tempo todo à compressão, e portanto não sujeito ao fenômeno de fadiga.

A TC_{REV} para uma mesma espessura sofre decréscimo conforme aumenta o módulo de resiliência da base. Conforme aumenta a espessura da base ocorre um decréscimo na TRC_{REV} .

A TC_{REV} será tanto mais elevada quanto menor for o módulo de resiliência do subleito.

7.5.4 Deformação Específica de Compressão na Face Inferior do Revestimento (DC_{REV})

De acordo com a análise de variância apresentada na Tabela 7.5 para esta variável, o fator mais significativo foi a espessura da base, seguido do módulo de resiliência da base, sendo o módulo de resiliência do subleito o fator menos significativo.

Tabela 7.5- Análise de variância para DC_{REV}

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	6,320E-09	4	1,580E-09	271,02	2,45
MR_{BASE}	5,289E-09	4	1,322E-09	226,83	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	8,310E-10	4	2,078E-10	35,64	2,45
Residual	6,529E-10	112	5,830E-12		
Total	1,309E-08	124			

A partir da Figuras 7.14 a 7.18 verifica-se que a DC_{REV} apresenta valores da ordem de grandeza de 10^{-5} que é a faixa de valores admissível, para este parâmetro.

Para um mesmo valor de módulo de resiliência da base a DC_{REV} decresce conforme aumenta a espessura da base, porque quanto maior a espessura da base, a estrutura sofrerá menos deformação de compressão.

Conforme aumenta o módulo de resiliência da base diminui a DC_{REV} , ou seja, quanto maior for a rigidez do sistema menores serão as deformações por ele sofridas.

Para módulos de resiliência do subleito mais elevados ocorre um decréscimo nos valores da DC_{REV} .

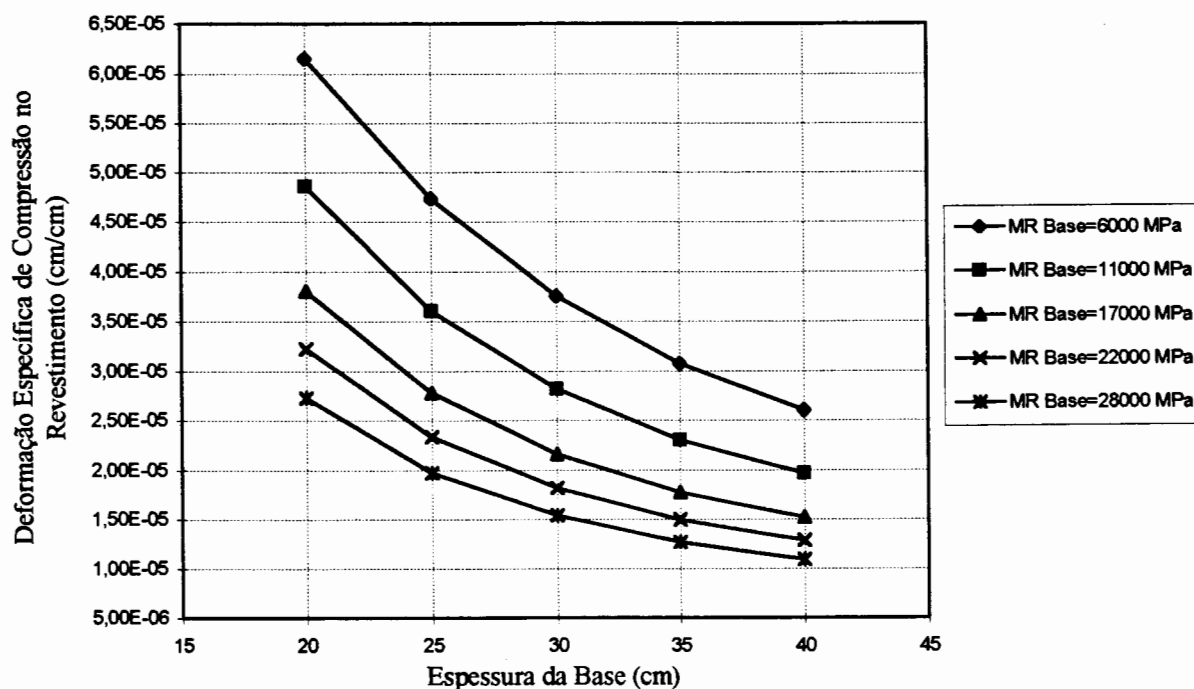


Figura 7.14 - Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.

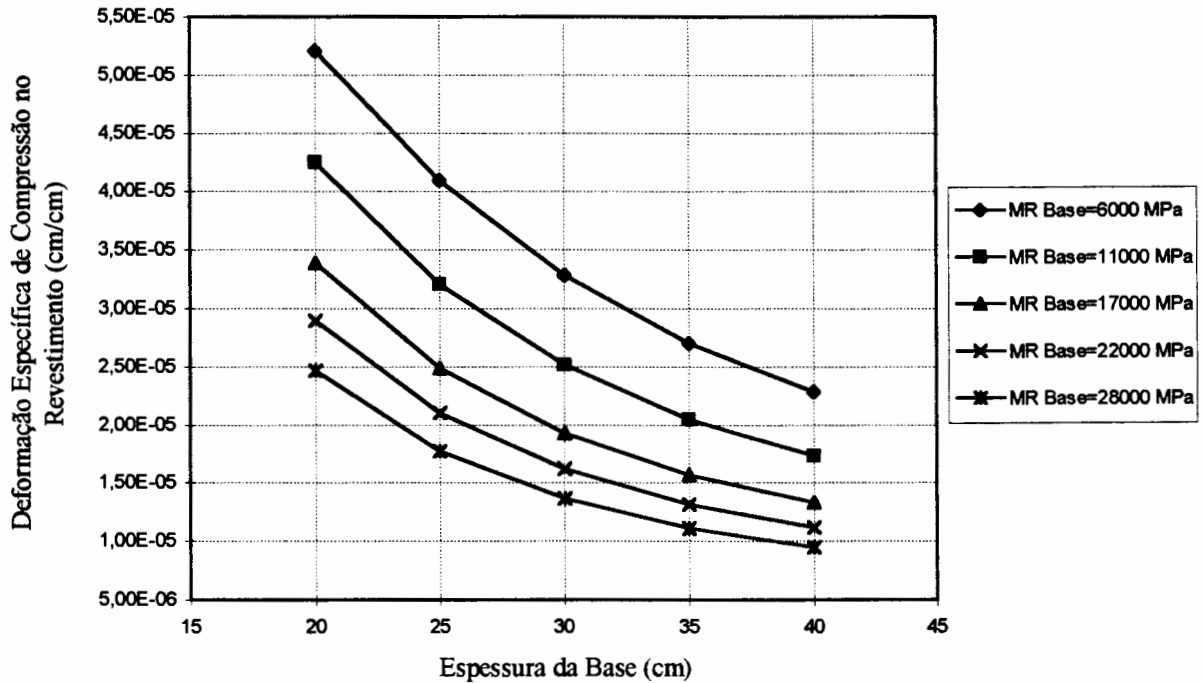


Figura 7.15 - Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.

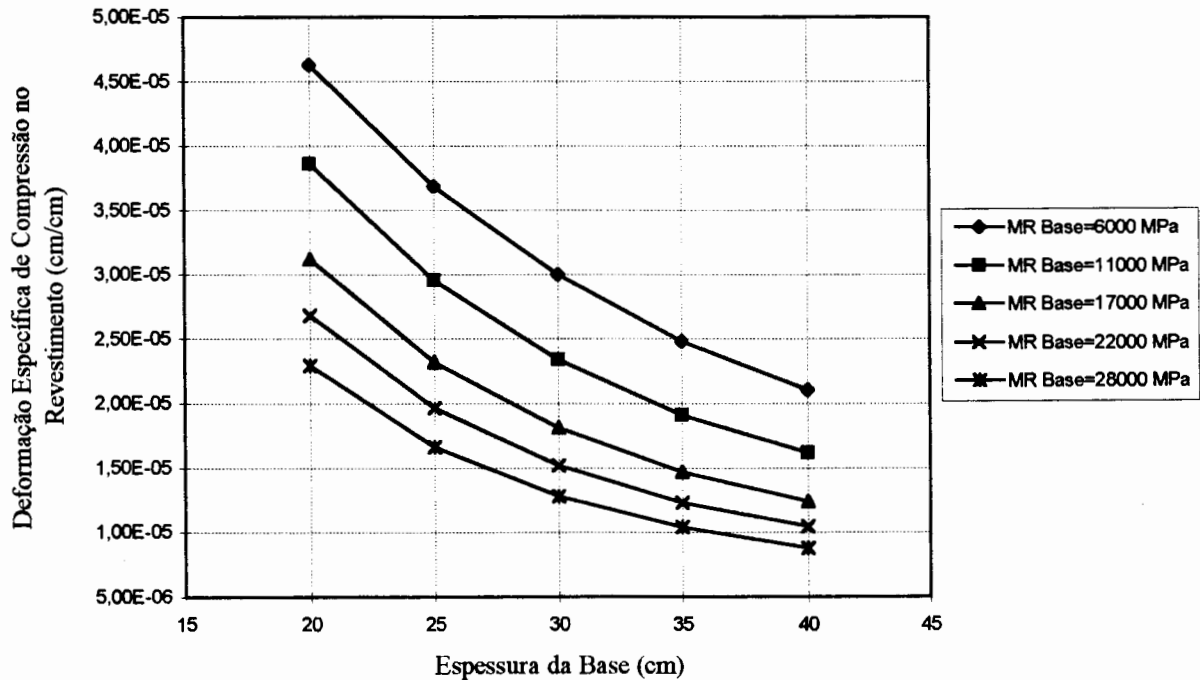


Figura 7.16 - Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.

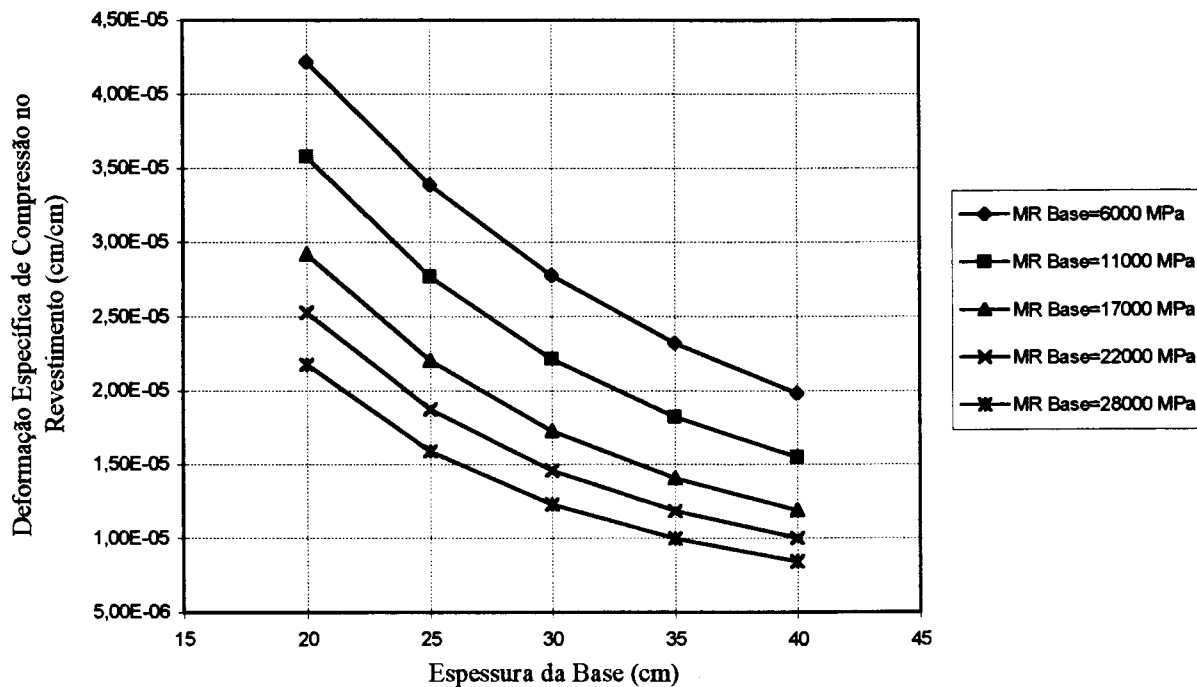


Figura 7.17 - Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.

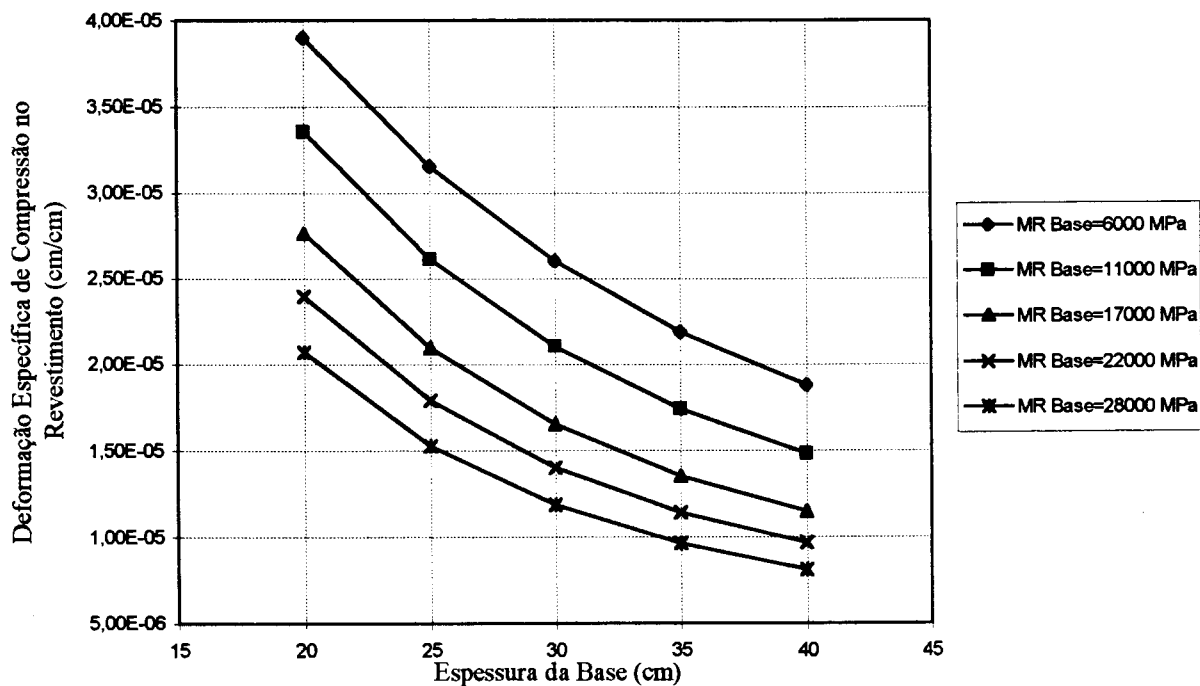


Figura 7.18 - Variação entre a deformação específica de compressão no revestimento com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.

7.5.5 Tensão de Tração na Face Inferior da Base Cimentada (TT_{BAS})

A Tabela 7.6 apresenta a análise de variância para esta variável, a qual tem como fator mais significativa a espessura da base, depois o módulo de resiliência da base, e por último o módulo de resiliência do subleito.

Tabela 7.6- Análise de variância para TT_{BAS}

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	391,625	4	97,906	551,62	2,45
MR_{BASE}	59,208	4	14,802	83,40	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	35,940	4	8,985	50,62	2,45
Residual	19,879	112	0,177		
Total	509,651	124			

A partir da Figuras 7.19 a 7.23 verifica-se que a TT_{BAS} apresentou valores bastante elevados para as menores espessuras, sendo que no ensaio de RTCD os valores obtidos chegam a esta ordem de grandeza somente aos 90 dias de cura. Portanto, conclui-se que para a TT_{BAS} não ser uma variável limitante deve-se optar por uma base mais espessa.

Percebe-se também, que para o mesmo módulo de resiliência da base, conforme aumenta a espessura, a TT_{BAS} diminui e, quanto maior for o módulo de resiliência da base maior será a TT_{BAS} . De acordo com o aumento do módulo de resiliência do subleito ocorre decréscimo na TT_{BAS} .

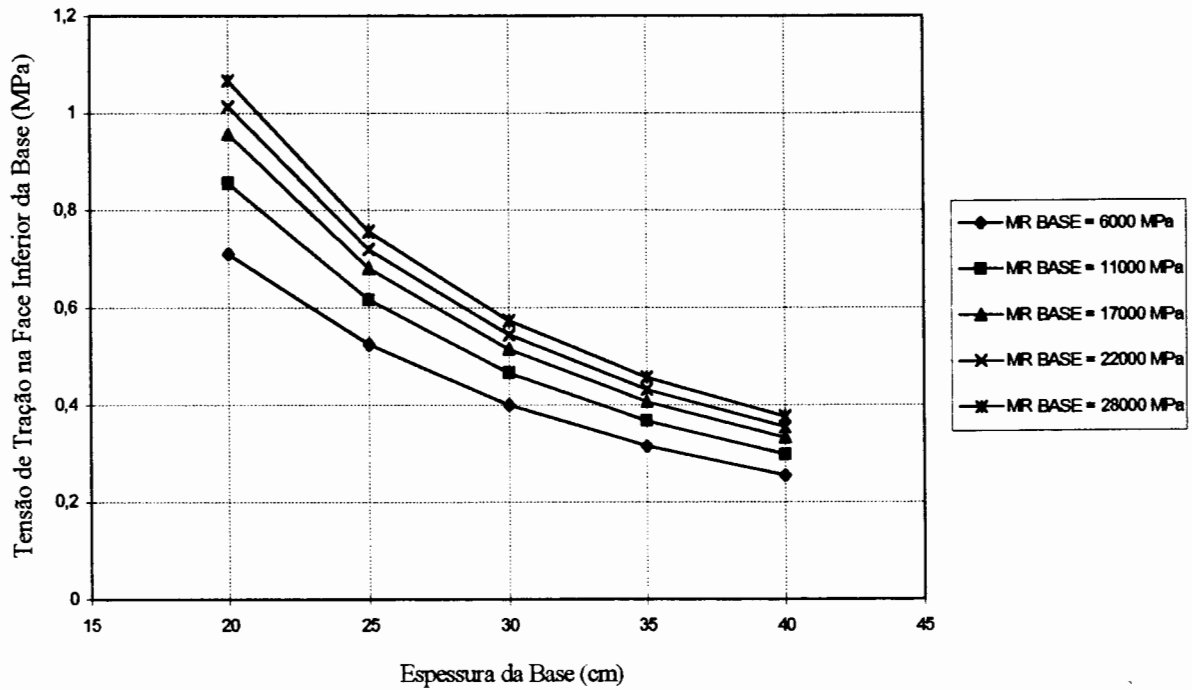


Figura 7.19 - Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.

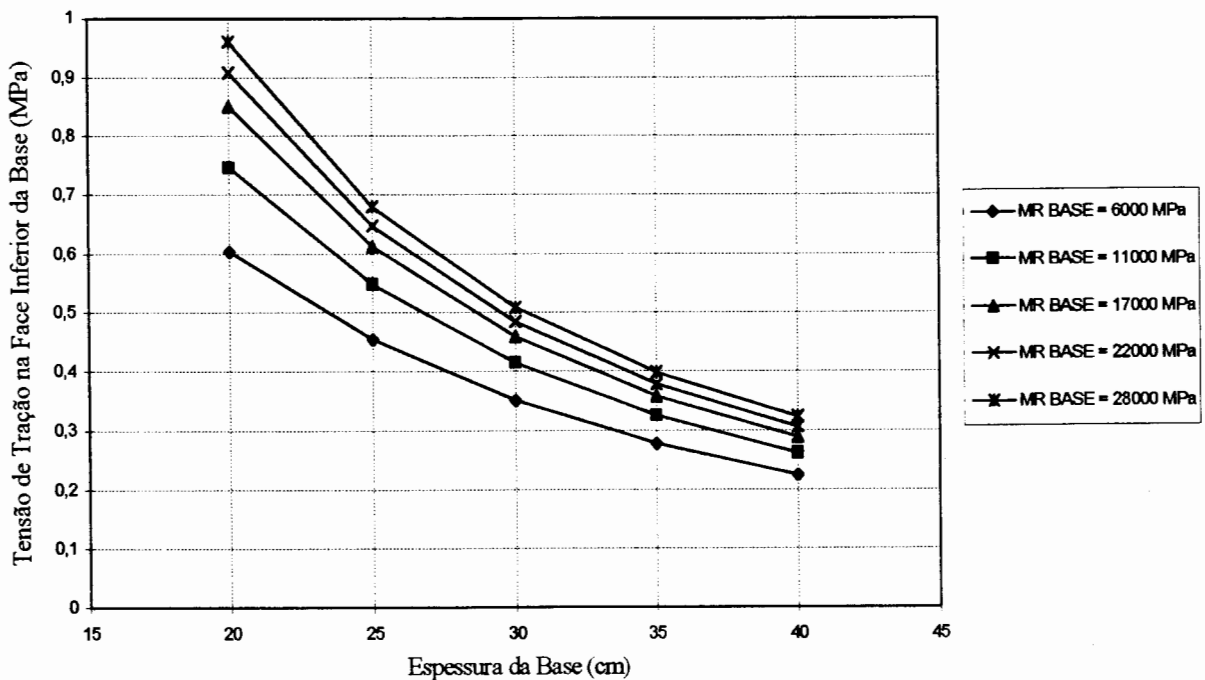


Figura 7.20 - Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.

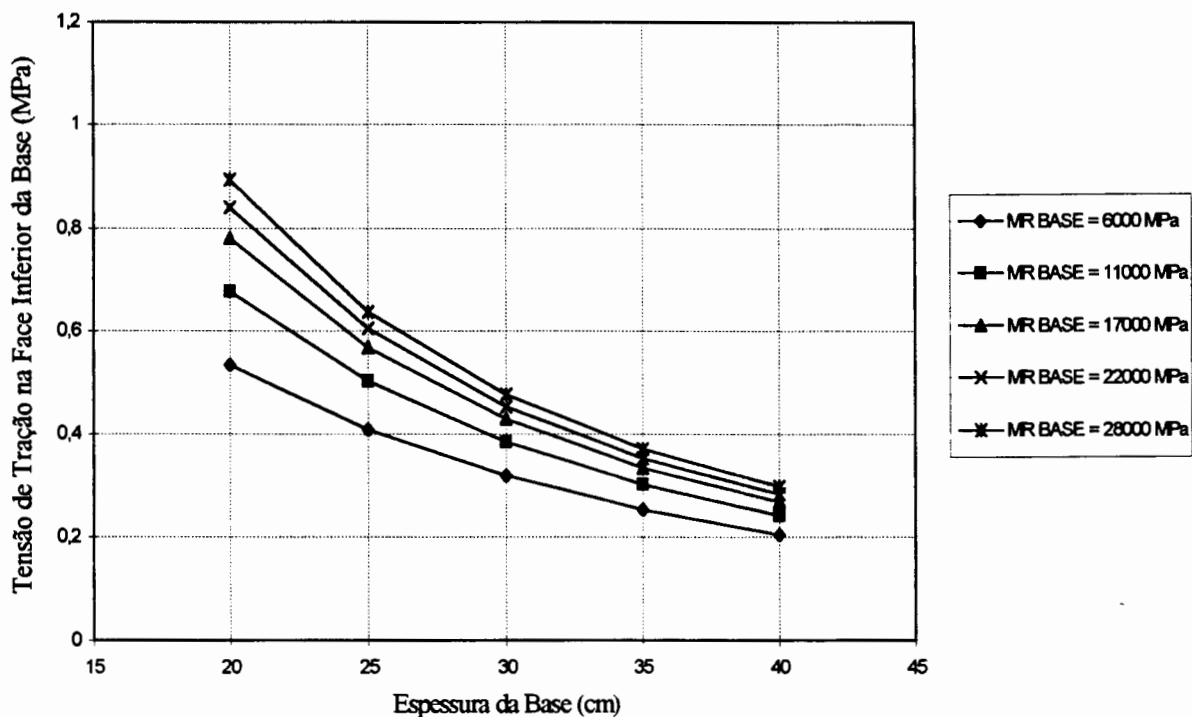


Figura 7.21 - Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.

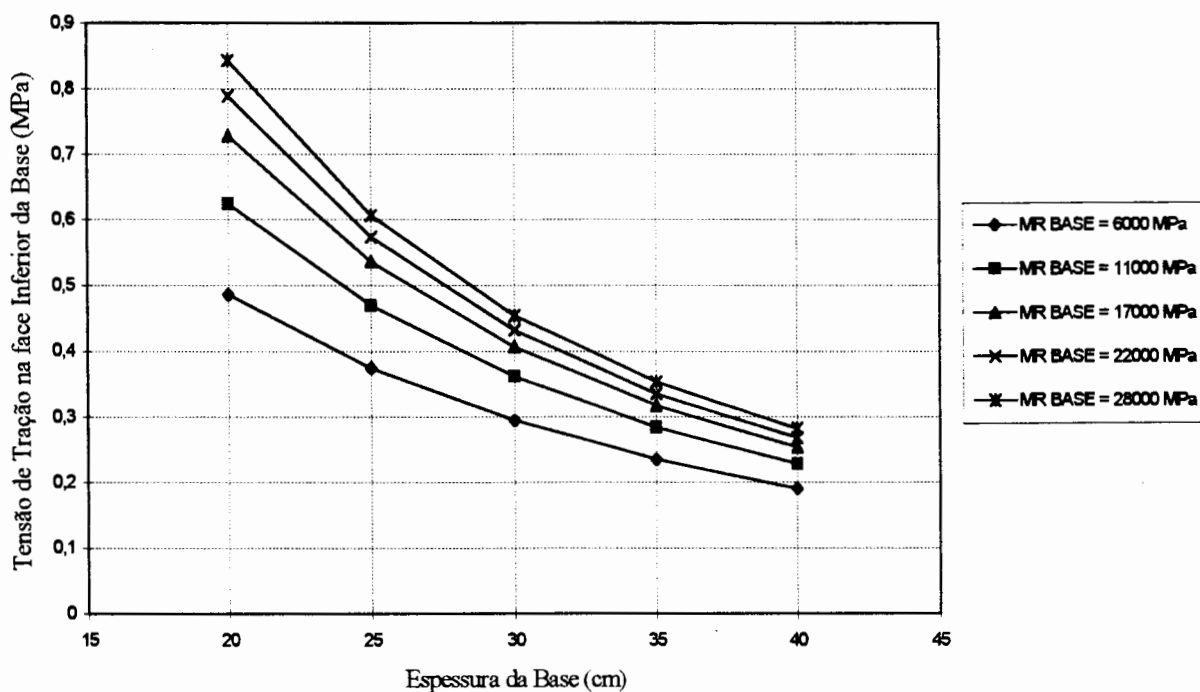


Figura 7.22 - Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.

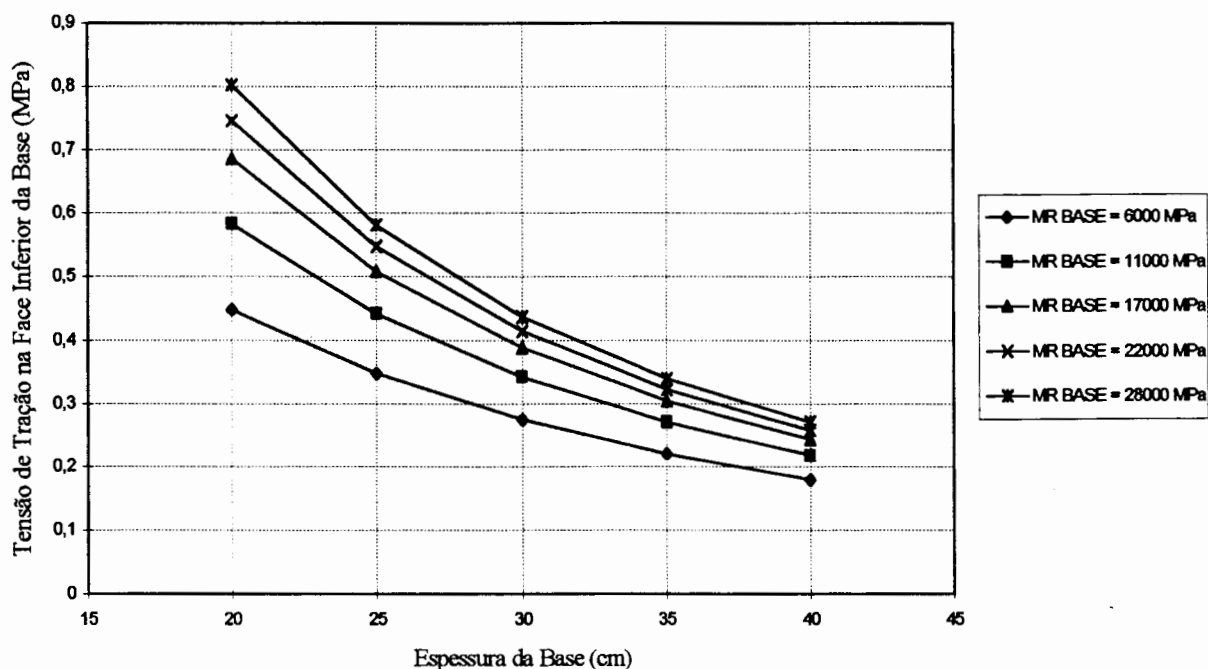


Figura 7.23 - Variação entre a tensão de tração na face inferior da base com a espessura da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.

7.5.6 Tensão Vertical de Compressão no Topo do Subleito (TVC_{SUBLEITO})

A partir da Tabela 7.7 verifica-se que a espessura da base foi o fator mais significativo para este parâmetro, sendo que apesar da pequena diferença entre o valor de F para o módulo de resiliência da base e o módulo de resiliência do subleito este último é mais significativo que o anterior.

Tabela 7.7- Análise de variância para TVC_{SUBLEITO}

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	0,394	4	0,098	124,40	2,45
MR_{BASE}	0,232	4	0,057	73,21	2,45
MR_{SUBLEITO}	0,243	4	0,061	76,87	2,45
Residual	0,088	112	7,908E-04		
Total	0,957	124			

A partir da Figuras 7.24 a 7.28 verifica-se que os valores mais elevados da TVC_{SUBLEITO} , se comparados aos obtidos no ensaio de RCS, correspondem aos obtidos aos 7 dias de cura para as misturas com a presença de cimento de alta resistência inicial como aditivo e, aos 14 dias de cura para todas as misturas estudadas, ou seja, esta variável não causa problemas no dimensionamento do pavimento.

Para o mesmo valor de módulo de resiliência do subleito a TVC_{SUBLEITO} diminui conforme aumenta a espessura da base. Ao aumento do módulo de resiliência do subleito corresponde o aumento da TVC_{SUBLEITO} . Mas, conforme aumenta o módulo de resiliência da base diminui TVC_{SUBLEITO} .

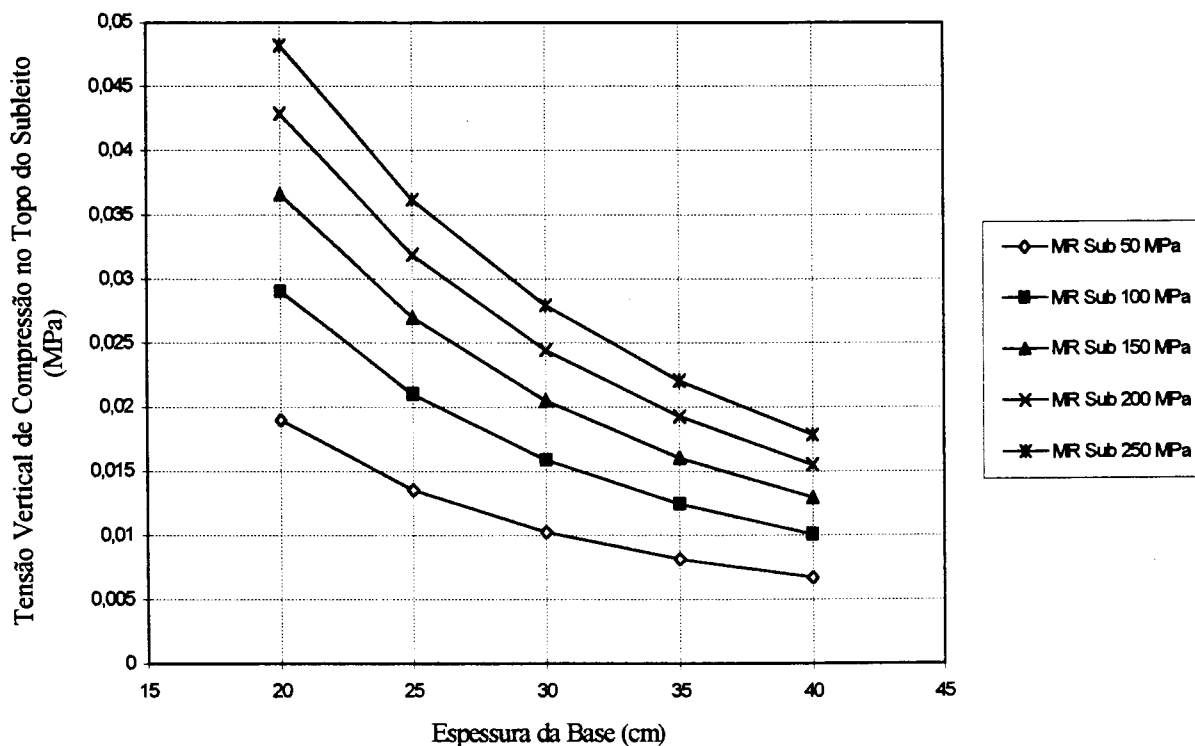


Figura 7.24 - Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 6000 MPa.

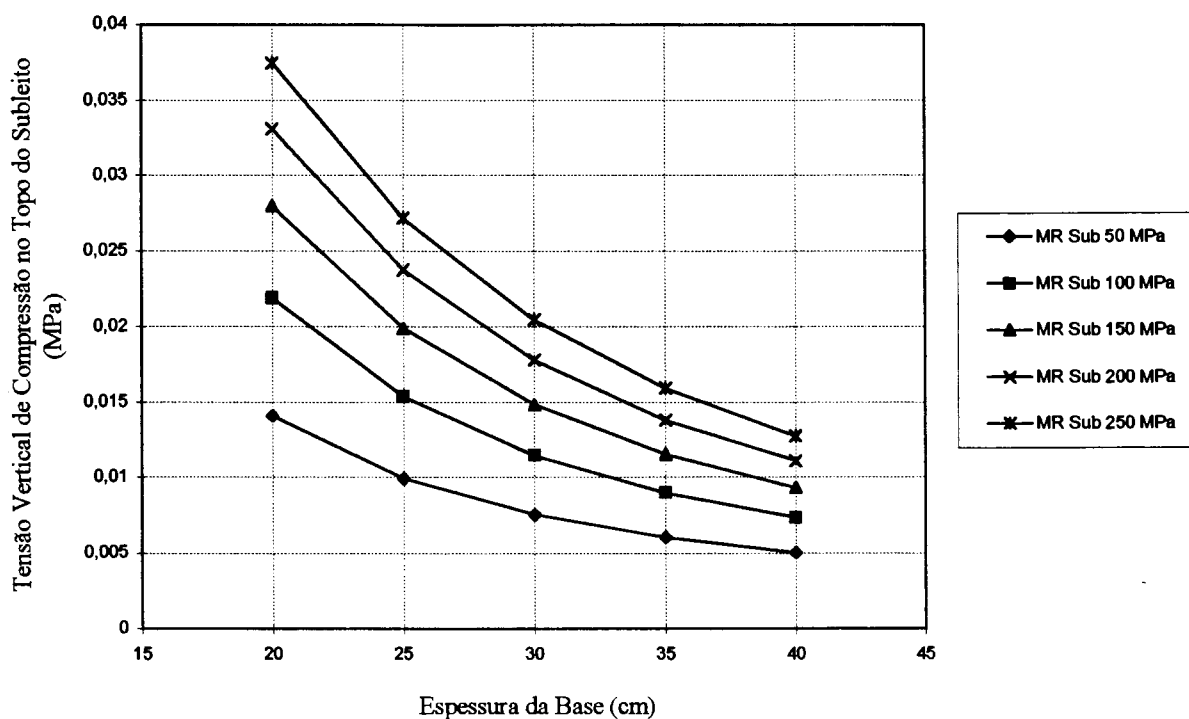


Figura 7.25 - Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 11000 MPa.

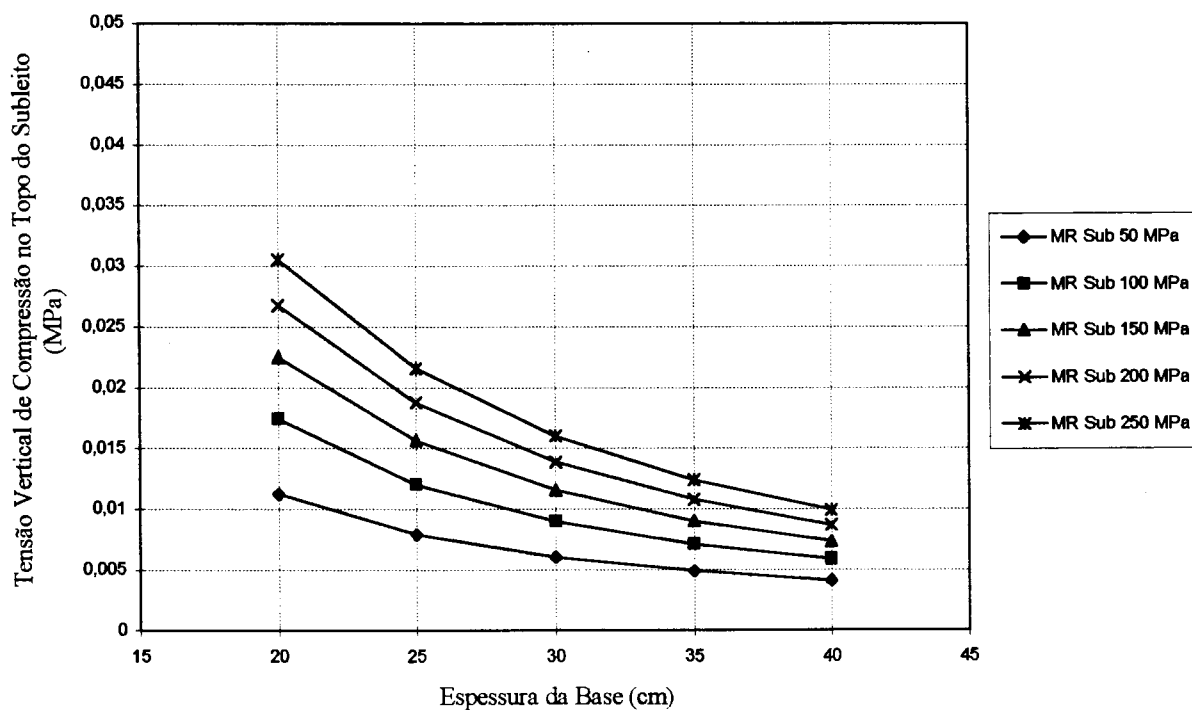


Figura 7.26 - Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 17000 MPa.

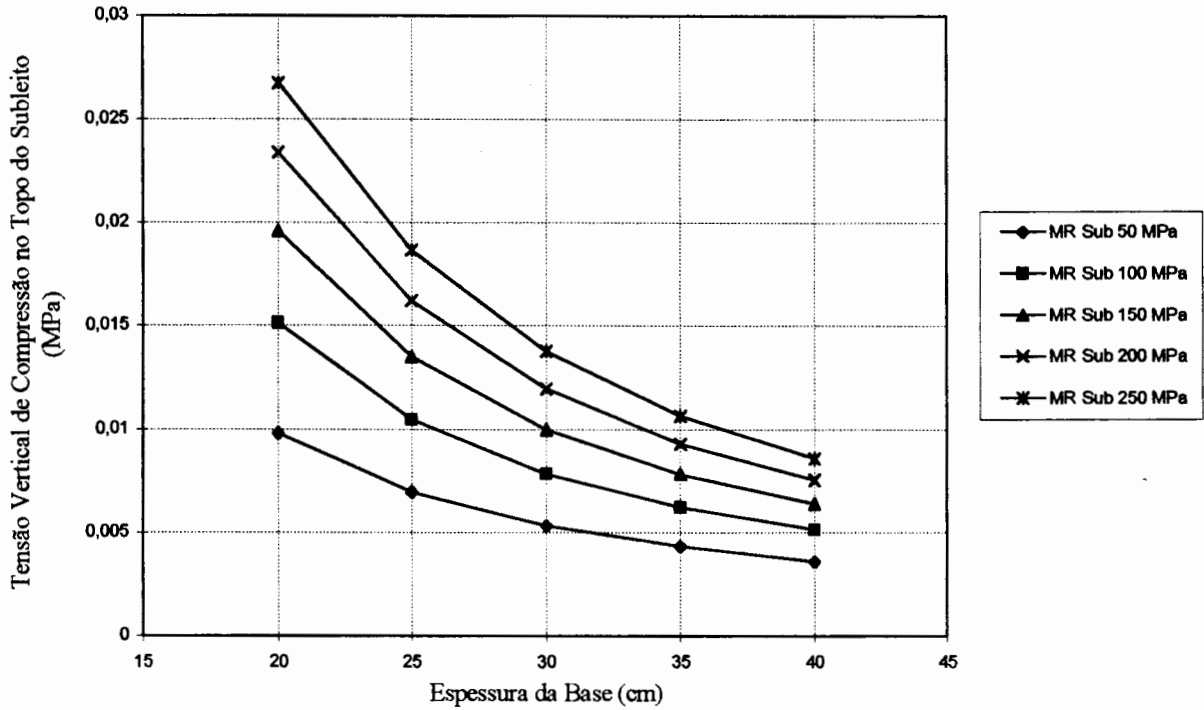


Figura 7.27 - Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 22000 MPa.

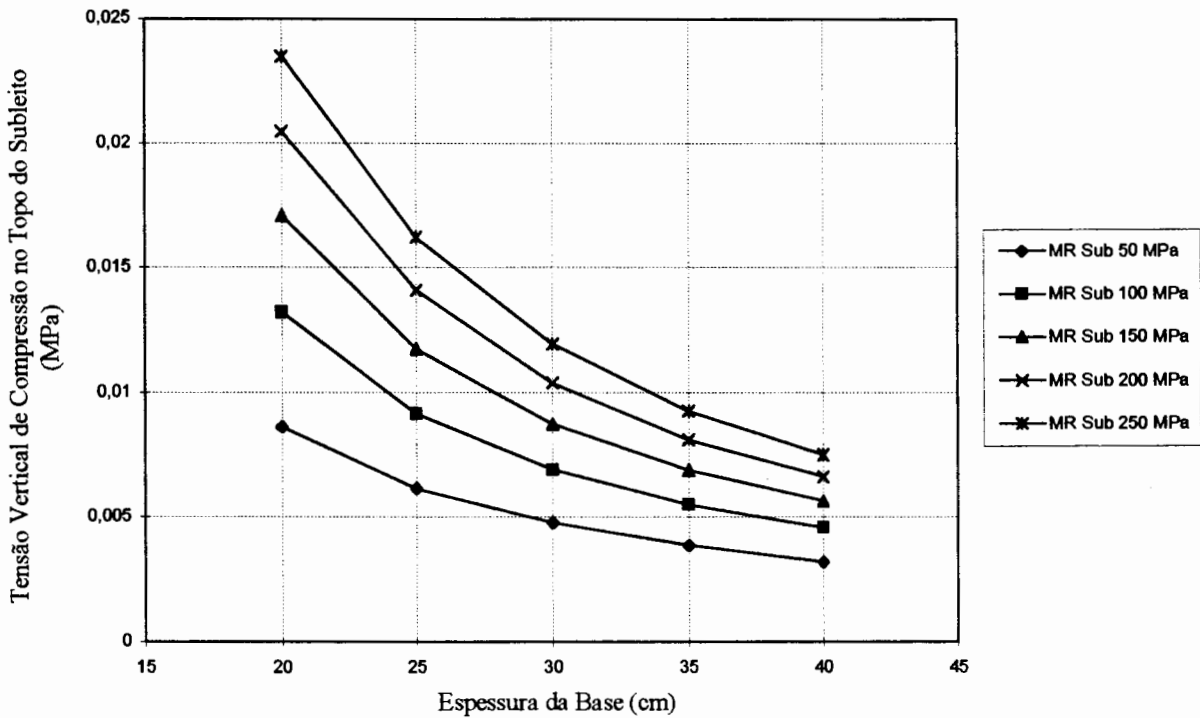


Figura 7.28 - Variação entre a tensão vertical de compressão no topo do subleito com a espessura da base, para o módulo de resiliência da base de 28000 MPa.

7.5.7 Deformação Específica de Tração na Face Inferior da Base Cimentada (DT_{BAS})

A partir da tabela 7.8 verifica-se que para este parâmetro o fator mais significativo é o módulo de resiliência da base, depois a espessura da base e por último o módulo de resiliência do subleito.

Tabela 7.8 - Análise de variância para DT_{BAS}

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	F_{tab}
Espessura	1,495E-08	4	3,738E-09	140,55	2,45
MR_{BASE}	1,869E-08	4	4,673E-09	175,73	2,45
$MR_{SUBLEITO}$	1,385E-09	4	3,463E-10	13,02	2,45
Residual	2,979E-09	112	2,659E-11		
Total	3,801E-08	124			

A partir das Figuras 7.28 a 7.33 verifica-se que a DT_{BAS} chega a atingir valores da ordem de grandeza de 10^{-4} , sendo que as deformações admissíveis são da ordem de 10^{-5} . Sendo assim, deve-se optar por módulos de resiliência tanto, da base como do subleito, e espessura, que não apresentem tais valores de DT_{BAS} .

Para uma mesma espessura a DT_{BAS} diminui com o aumento do módulo de resiliência da base, ou seja, conforme aumenta a rigidez diminui a deformação.

De acordo com o aumento da espessura da base e do módulo de resiliência do subleito ocorre decréscimo na DT_{BAS} .

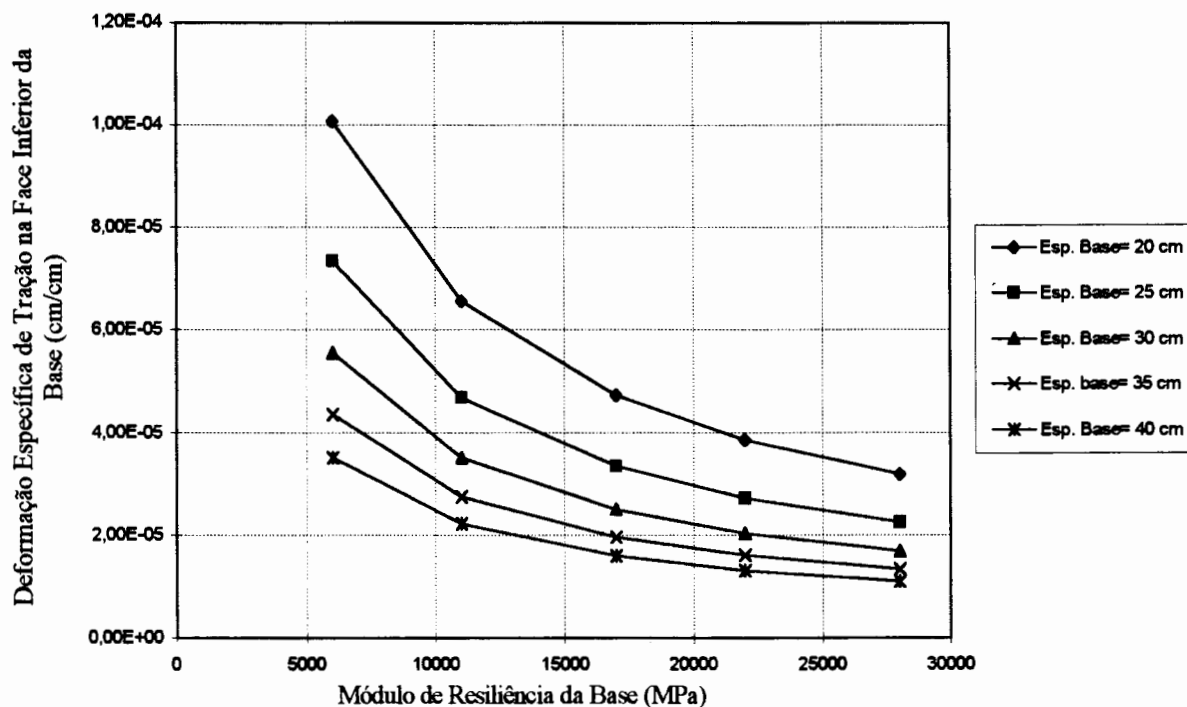


Figura 7.29 - Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.

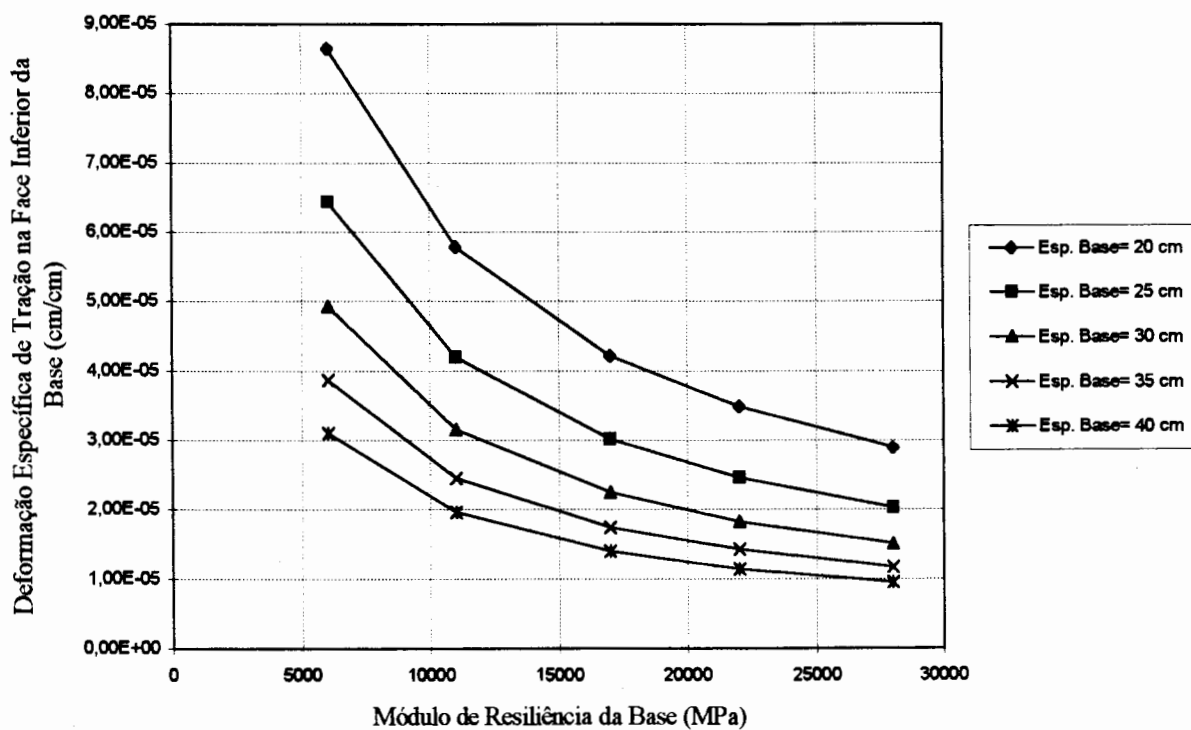


Figura 7.30 - Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.

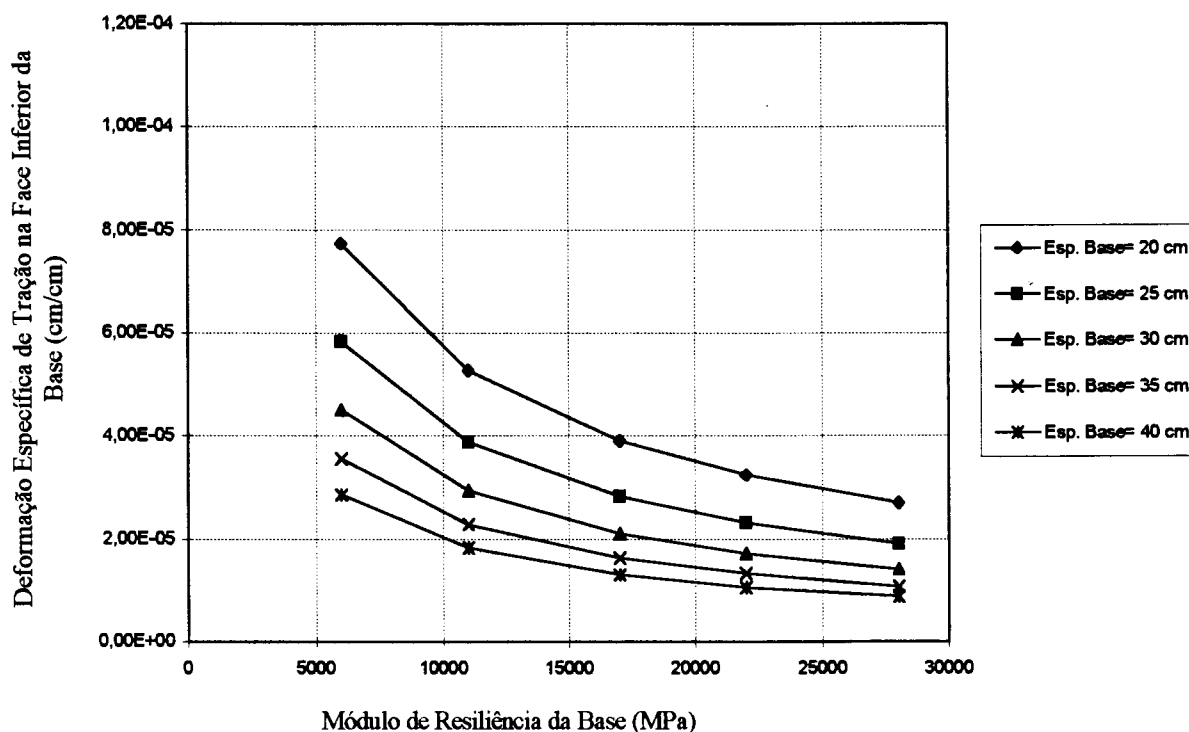


Figura 7.31 - Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.

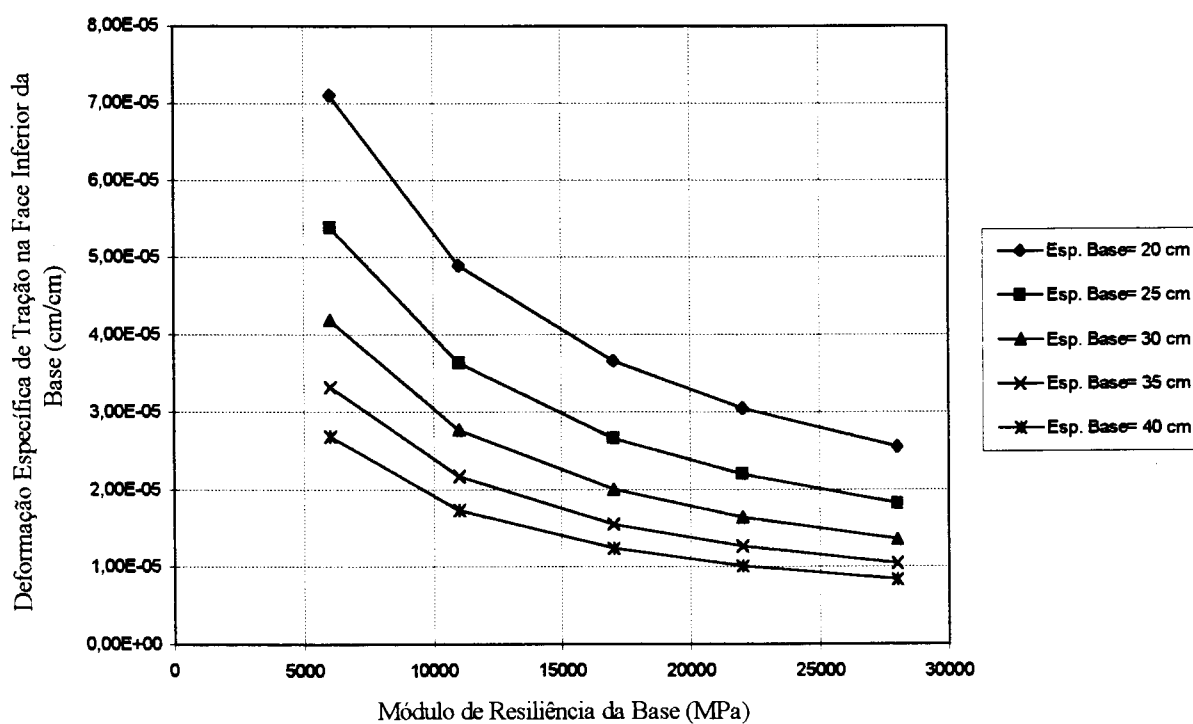


Figura 7.32 - Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.

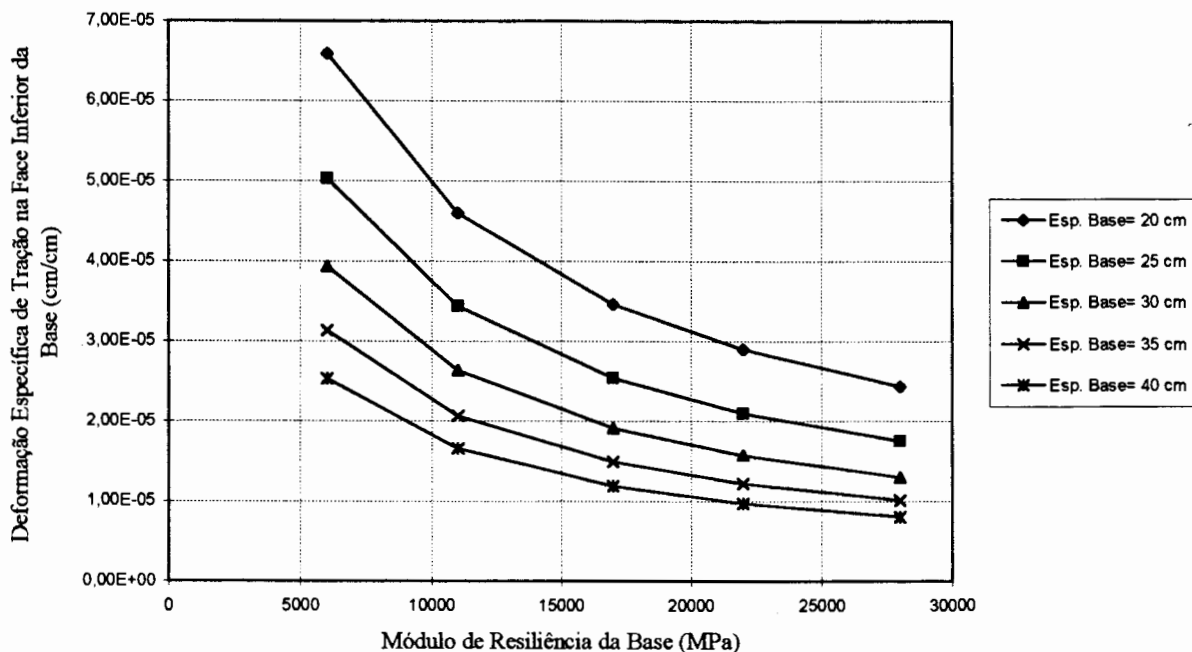


Figura 7.33 - Variação entre a deformação de tração da face inferior da base com o módulo de resiliência da base, para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.

7.6 Proposta de Pré-Dimensionamento de Pavimentos com Camada de Base Cimentada

A partir da relação existente entre a vida de fadiga e a tensão máxima de tração apresentada no item 6.5, cujo coeficiente de determinação foi 75%, da relação entre a tensão de tração na face inferior da base apresentada no item 7.6.5, foi possível determinar a relação entre a vida de fadiga com a espessura da base para os valores de módulo de resiliência da base e do subleito estudados.

Analisando-se as Figuras 7.34 a 7.38 verifica-se que para uma mesma espessura da base, conforme aumenta o módulo de resiliência da base diminui a vida de fadiga; isto porque com o aumento da rigidez da base as deformações admissíveis no pavimento são menores. Constata-se, também que, a vida de fadiga aumenta com o aumento da espessura da base e com o aumento do módulo de resiliência do subleito.

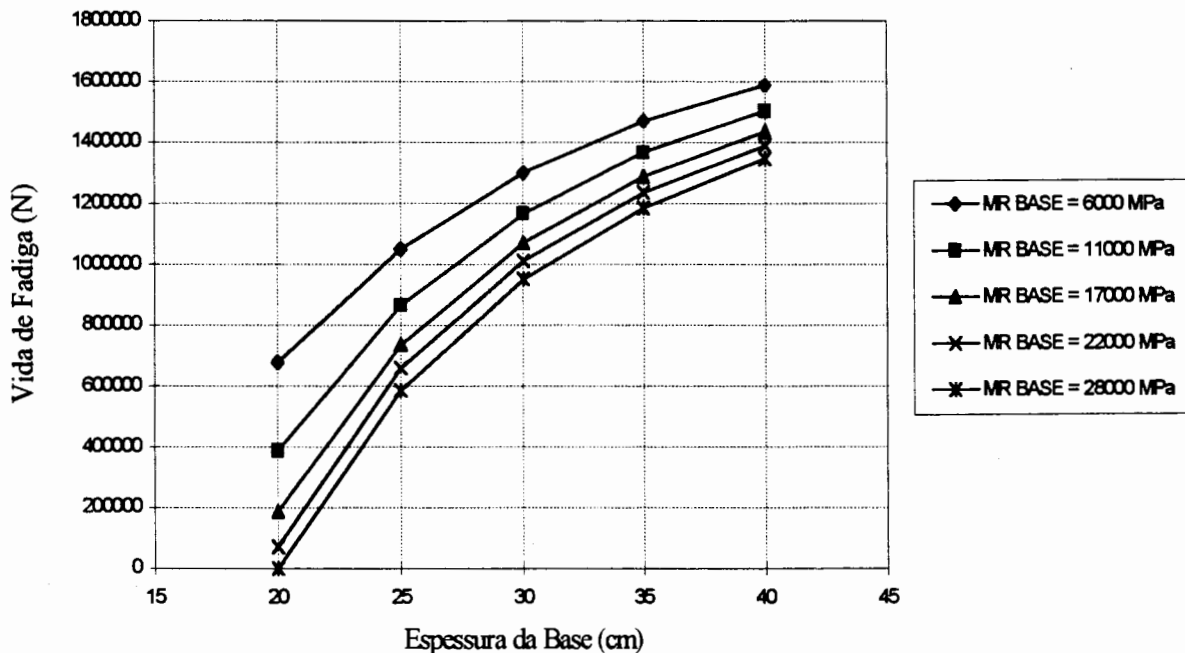


Figura 7.34 - Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 50 MPa.

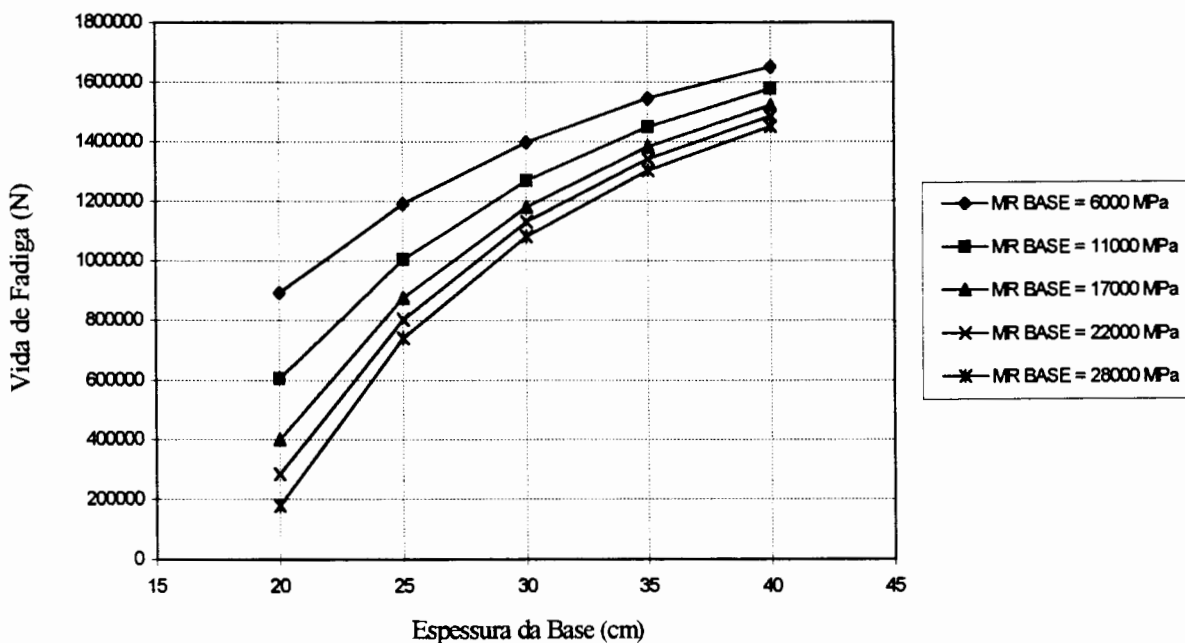


Figura 7.35 - Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 100 MPa.

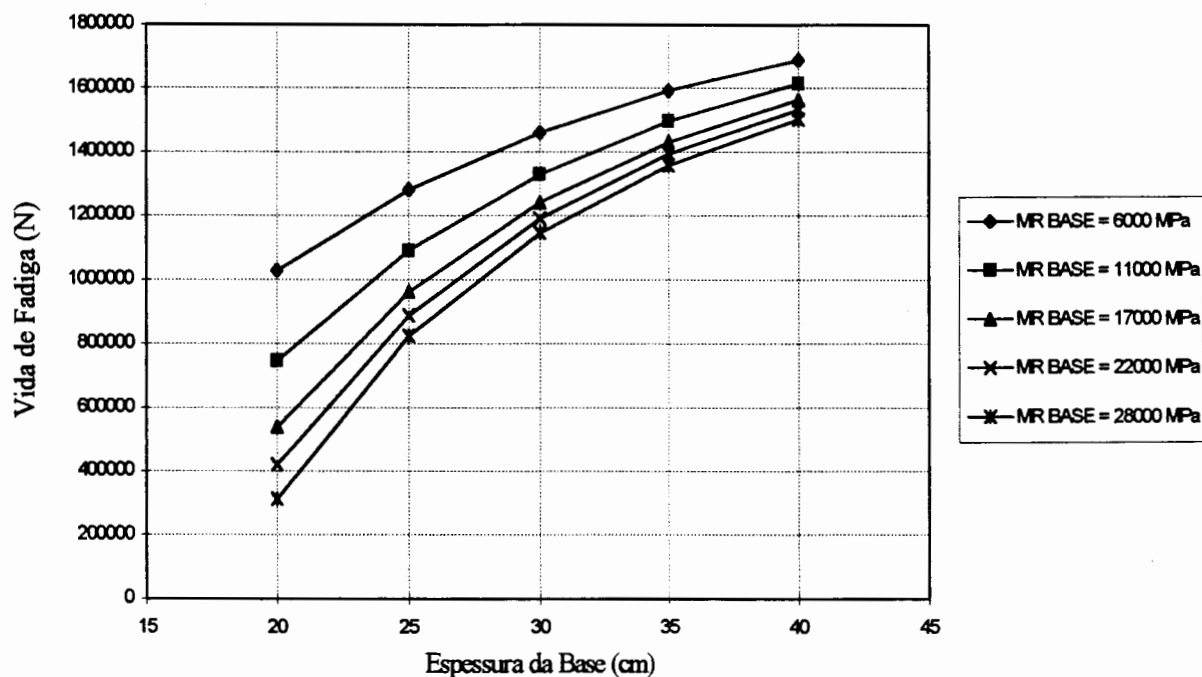


Figura 7.36 - Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 150 MPa.

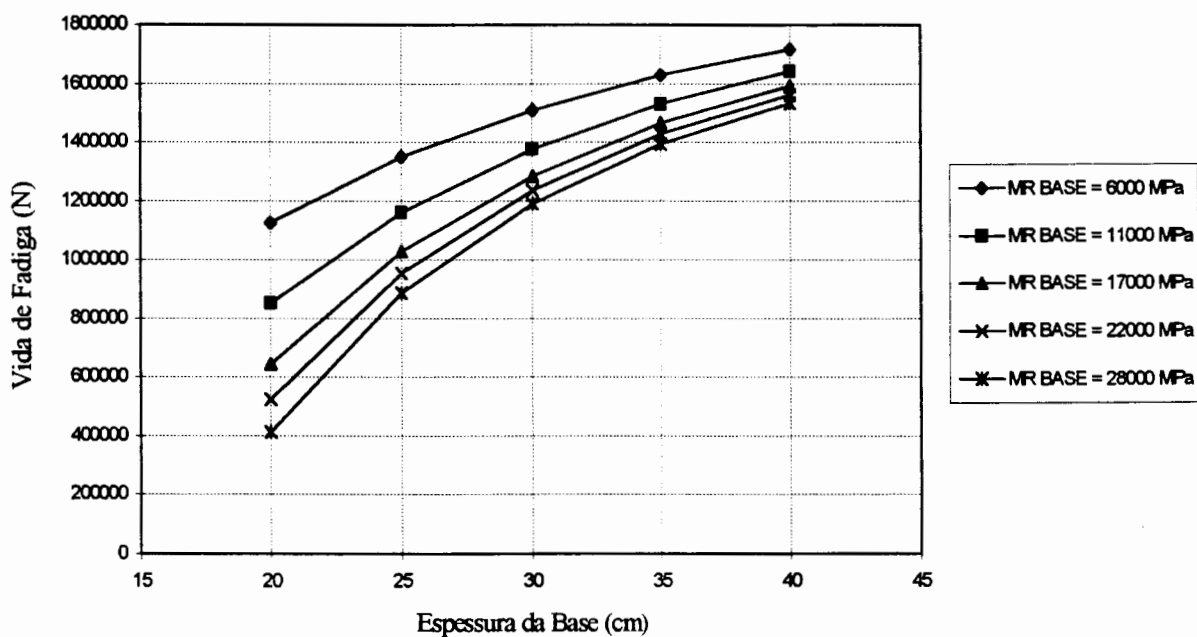


Figura 7.37 - Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 200 MPa.

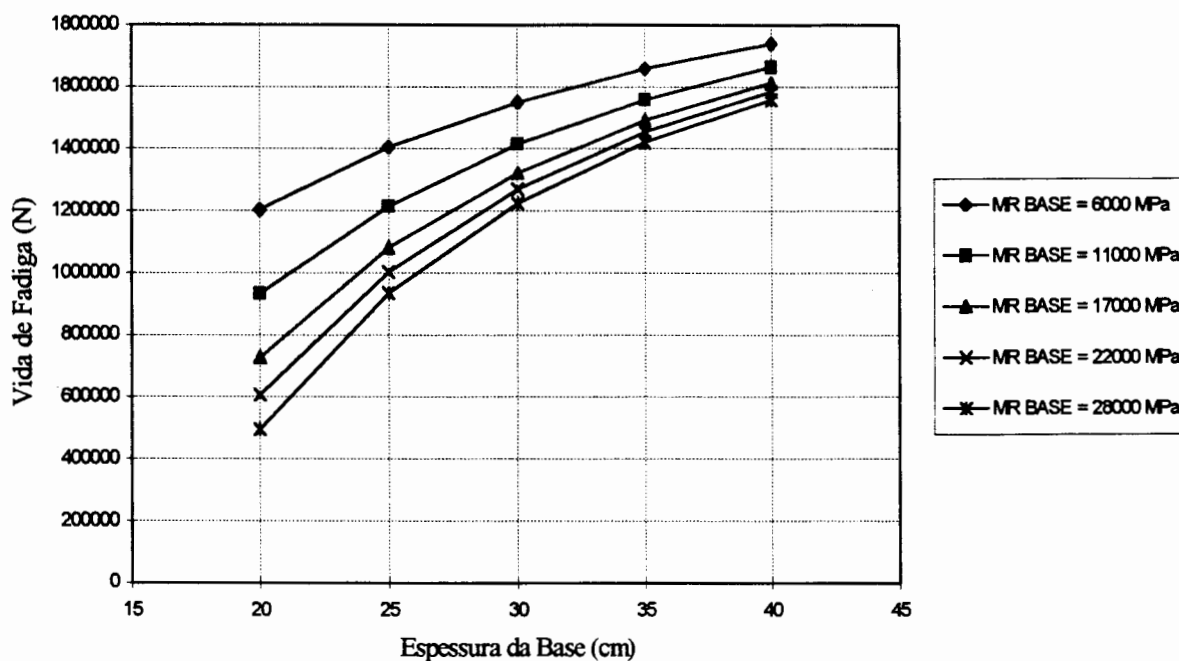


Figura 7.38 - Relação entre a vida de fadiga e a espessura da base, em função do módulo de resiliência da base para o módulo de resiliência do subleito de 250 MPa.

A partir das Figuras 7.34 a 7.38 propõe-se uma metodologia de dimensionamento preliminar de pavimentos utilizando base de material cimentado, com revestimento asfáltico de 5 cm de espessura. Para utilizar essas figuras deve-se conhecer o valor do módulo de resiliência do material a ser utilizado, e o módulo de resiliência do subleito. Com esses valores determina-se a espessura da base para uma determinada vida de fadiga do pavimento.

7.7 Fator laboratório-campo

Um modelo analítico-empírico pode derivar de uma relação de fadiga do material em estudo. É aquele em que uma lei fenomenológica para caracterizar o comportamento estrutural do material do pavimento, relacionada à origem e propagação de trincas, é calibrada com dados experimentais de campo.

A calibração consiste na determinação de um fator laboratório-campo f_o , da equação:

$$N_{C(TR)} = f_o N_{lab}$$

onde $N_{C(TR)}$ é o número real de operação do eixo padrão necessário para que o revestimento atinja uma porcentagem de área trincada TR. O fator de calibração é, portanto, somente uma função de TR, se a lei de fadiga for capaz de explicar o comportamento mecânico intrínseco.

PINTO (1991) determinou o fator laboratório-campo para misturas asfálticas, a partir do ensaio de fadiga e de dados experimentais de campo.

De acordo com PINTO (1991) o fator laboratório-campo determinado para os trechos analisados caracterizou potências de 10^2 a 10^4 para levar o pavimento a cerca de 20% de área trincada, para a temperatura de referência de 25°C. Esse fator varia em função do tipo de ensaio considerado e dos parâmetros abordados: tensão, deformação e densidade de energia.

Cabe salientar que na metodologia de dimensionamento proposta neste trabalho não foi considerado o fator laboratório-campo, visto ainda não se ter notícia de determinações deste fator para pavimentos com base cimentada. Devido ao ensaio de fadiga ter sido executado no modo de tensão controlada, acredita-se que as curvas de pré-dimensionamento definidas forneçam valores conservativos de espessuras de base da camada cimentada, semelhantemente às experiências em estruturas de pavimentos flexíveis, descritas por PINTO (1991).

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 Conclusões

Os resultados dos ensaios laboratoriais, apresentados nos Capítulos 5 e 6, bem como a análise paramétrica, descrita e comentada no Capítulo 7, permitiram chegar às seguintes conclusões:

1 - As misturas estudadas, compostas de solo, cinza volante e cal, bem como as de solo, cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial, apresentaram comportamento compatível com o aceitável, segundo o conhecimento atual, em todos os ensaios realizados, possibilitando a utilização destas misturas como base de pavimento.

2 - O cimento de alta resistência inicial foi efetivo, principalmente, nos primeiros dias de cura, onde ocorreu maior ganho tanto na RCS como na RTCD. Comparando os resultados obtidos para as misturas com e sem cimento, aos 7 dias de cura, verificou-se um aumento da RCS da ordem de 80%, enquanto que a RTCD apresentou um aumento da ordem de 70%. Podemos então, comprovar a eficiência deste aditivo em obter maiores resistências em poucos dias de cura, para possibilitar tráfego de obra até mesmo durante a execução do pavimento.

3 - A variação de 7% para 9% de cal resultou num aumento da RCS de aproximadamente 24% tanto aos 28 como aos 90 dias de cura, sendo similar para a RTCD que apresentou um aumento de aproximadamente 25% aos 7, 28 e 90 dias de cura.

Para ambos ensaios de resistência o aumento mais significativo foi aos 14 dias de cura, chegando a 58%.

4 - Comparando-se as resistências obtidas tanto à compressão simples, como à tração por compressão diametral, para as misturas com a presença do cimento como aditivo, verificou-se, que com a presença do cimento, a influência do teor mais elevado de cal não ficou evidenciada. A diferença da RCS entre as misturas chegou somente a 30% aos 7 dias de cura, e a RTCD chegou a 26% aos 28 dias de cura.

5 - Dos 28 aos 90 dias de cura o aumento da RCS foi da ordem de 175% para as misturas sem aditivo e da ordem de 130% para as misturas com aditivo. Para a RTCD os acréscimos foram da ordem de 290% para as misturas sem aditivo e, de 230% para as misturas com aditivo. Este aumento de resistência desaconselha a realização de ensaios de fadiga em corpos de prova curados por um período inferior a 90 dias.

6 - Dos 90 aos 120 dias de cura o acréscimo da RCS foi da ordem de 75% para a Mistura 3 (solo: 70%, cinza: 23%, cal: 7%, cimento: 1%) e da ordem de 100% para a Mistura 4 (solo: 68%, cinza: 23%, cal: 7%, cimento: 1%). Para a RTCD este acréscimo foi da ordem de 30%. Este acréscimo de resistência após 90 dias de cura evidencia a continuidade das reações pozolânicas ao longo do tempo, bem como a ocorrência de aumento da rigidez.

7 - Os modelos de regressão obtidos para a RCS em função do período de cura, apresentaram como melhor ajuste o linear até 90 dias de cura, com coeficiente de determinação de 99% para todas as misturas. Mas, se considerarmos 120 dias de cura o ajuste deixa de ser linear e passa a ser polinomial de segunda ordem, com coeficiente de determinação superior a 95%. Como os coeficientes de determinação obtidos são próximos da unidade, os modelos de regressão encontrados podem ser

utilizados para previsão da RCS para períodos de cura não estudados até 120 dias, para misturas semelhantes às estudadas.

8 - Os modelos de regressão obtidos para a RTCD em função do período de cura apresentaram ajuste linear até 90 dias. De forma análoga com o que ocorreu com a RCS, também a RTCD apresentou ajuste polinomial de segunda ordem ao considerarmos 120 dias de cura. Como todos os coeficientes de determinação obtidos são superiores a 95%, os modelos encontrados podem ser utilizados para prever a RTCD para períodos de cura não estudados até 120 dias, para misturas semelhantes às estudadas.

9 - A relação RTCD/RCS apresenta ajuste diferenciado para as misturas com e sem aditivo, isto devido a mudança de comportamento pela presença do cimento de alta resistência inicial. Esta relação, de acordo com análise de variância realizada, sofre maior influência do fator período de cura do que do fator mistura.

10 - A variação de 7% para 9% de cal provocou um aumento do módulo de resiliência que foi mais significativo aos 14 dias de cura sendo da ordem de 91%, aos 28 dias de cura este aumento foi de apenas 18%.

11 - A presença do aditivo elevou o módulo de resiliência em até 205% aos 7 dias de cura. Isto evidencia o grande aumento de rigidez provocado pela presença do cimento, o que possibilita o tráfego de obra durante a execução do pavimento.

12 - A diferença de módulo de resiliência entre as misturas com a presença do aditivo foi bastante pequena, o que demonstra que o teor mais elevado de cal pouco influencia na presença do cimento como aditivo.

13 - Os modelos de regressão obtidos para o módulo de resiliência, em função do período de cura, apresentaram ajuste polinomial de segunda ordem, com coeficiente de determinação superior a 95%.

14 - Resultados do ensaio de fadiga à flexão permitiram estabelecer uma relação entre a vida de fadiga e a tensão máxima à tração através da seguinte expressão, cujo coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,7521$:

$$\sigma_{tm\acute{a}x} = -5E-07 \times Nf + 1,05$$

onde:

$\sigma_{tm\acute{a}x}$ - tensão máxima de tração

Nf - vida de fadiga, ou número de ciclos

15 - Na análise paramétrica o parâmetro limitante foi a tensão de tração na face inferior da base que apresentou valores elevados para pequena espessura da base. Os valores obtidos para o ponto entre as rodas foram superiores aos obtidos para o ponto sob a roda, portanto, o ponto entre as rodas, por ser mais crítico, foi o estudado para os demais parâmetros.

16 - Foi estabelecido um procedimento para dimensionamento preliminar da base de solo-cinza volante-calçimento de alta resistência inicial, a partir da análise computacional, considerando-se a vida de fadiga em função da espessura da base, para os módulos de resiliência da base e do subleito estudados. Convém ressaltar que este procedimento considera um revestimento asfáltico com 5 cm de espessura com módulo de resiliência de 3000 MPa. Para definir preliminarmente a espessura da base cimentada através deste procedimento, deve-se obter o módulo de resiliência do material cimentado, o módulo de resiliência do subleito, e definir a vida de fadiga desejada, e através dos gráficos apresentados, verificar qual a espessura mais adequada para o caso.

8.2 Sugestões

1 - Realizar ensaio de resistência à compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral, para períodos de cura superiores a 120 dias.

2 - Estudar novos processos de cura acelerada, para reduzir o tempo necessário entre a moldagem e os ensaios de fadiga.

3 - Realizar ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e também, de fadiga à flexão, todos com medida de deformação, para possibilitar a comparação dessas deformações com as obtidas pelo ELSYM 5.

4 - Aplicar o procedimento sugerido de dimensionamento preliminar de pavimentos com base de solo-cinza volante-cal-cimento de alta resistência inicial a casos reais ou trechos experimentais instrumentados, efetuando medidas de deflexão superficial, tensões e deformações impostas ao pavimento pela passagem de cargas, para comparar os dados obtidos no campo com aqueles obtidos através do ELSYM 5 e aqui apresentados.

5 - Estudar o fator laboratório-campo para o ensaio de fadiga à flexão em misturas cimentadas, visto que este ensaio foi definido a partir de condições especiais (carga uniforme, frequência determinada, tipo de carregamento, fatores ambientais que não são reproduzidos em seus ciclos, tipo de compactação dos corpos de prova).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory.** D 1632, Philadelphia, 1987.
- 2 BAPTISTA, C. N. **Pavimentação.** Porto Alegre: Globo, 1976.
v.2: Estabilização de Solos
- 3 CERATTI, J. A. P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado.**
Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1979.
- 4 CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento a fadiga se solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos.**
Tese (Doutorado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- 5 CONCHA, L. M. C. **Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1986.
- 6 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência.** DNER - ME 133, Rio de Janeiro, 1994.
- 7 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada-determinação da resistência à compressão simples.** DNER - ME 180, Rio de Janeiro, 1994.

- 8 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada-determinação da resistência à tração por compressão diametral.** DNER - ME 181, Rio de Janeiro, 1994.
- 9 DIAMOND, S.; KINTER, E. B. **Mechanisms of soil-lime stabilization.** *Highway Research Record*, Washington, D. C., 92: 83-9672, 1965.
- 10 DIAS, C. R. R. Estabilização de solos arenosos da planície costeira do Rio Grande do Sul com emprego de cinza volante. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá, MT. **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1995. 4v v2, p.207-226.
- 11 EADS, J. L.; GRIM, R. E. **A quick test to determine lime requirements for lime stabilization.** *Highway Research Record*, Washington, D. C., 139: 61-72, 1966.
- 12 FOGAÇA, B. C.; CERATTI, J. A. P. Estudo do comportamento mecânico e de deformabilidade de misturas de cinza volante, cal e areia do litoral do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá, MT. **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1995. 4v v2, p.346-360.
- 13 FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Projeto de Pesquisa CICASOL. **Pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal.** Porto Alegre: CIENTEC, 1984. Relatório Final
- 14 HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime -soil mixtures.** *Highway Research Record Bulletin*, Washington, D. C., 304: 99-121, 1961.
- 15 LOCKETT, L. M.; MOORE, R. K. **Lime-soil mixture design considerations for soils of Southeastern United States.** Washington, 1982. (*Transportation Research Record*, 839).

- 16 MACHADO, C. F. D. **Estabilização de solo típico regional visando sua utilização como base de pavimentos.**
Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1978.
- 17 MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization de Iowa soils with lime and fly ash.** Ann Arbor, 1961. Ph.D. Thesis, University Microfilms, , Iowa State University of Science & Technology.
- 18 MATEOS, M.; DAVIDSON, D. T. **Lime and fly ash proportions in soil, lime and fly ash mixtures, and some aspects of soil lime stabilization.** Washington: Highway Research Board, 1962. (Highway Research Board. Special Report, 335).
- 19 MOTTA, L.; MEDINA, J. Um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido no Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1991. 4v v2, p.1177-1206.
- 20 MOTTA, L.; MEDINA, J. Análise paramétrica de estruturas de pavimentos para anteprojeto. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1991. 4v v2, p.1241-1282.
- 21 MONTESTRUQUE, G. E.; RODRIGUES, R. M. Fadiga de revestimentos asfálticos com camada intermediária de geotêxtil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá, MT. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1995. 4v v1, p.130-145.
- 22 NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal - efeito do cimento como aditivo e de brita nas misturas.**
Dissertação (Mestrado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1975.

- 23 NARDI, J. V. Determinação da resistência à compressão simples de misturas de solo estabilizado com cinza volante e cal hidratada. Tentativa de método de ensaio. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 14., 1978, João Pessoa, PB. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1978.
- 24 NARDI, J. V. **Introdução à estabilização de solos com cinza volante e cal.** Florianópolis, Departamento de Estradas de Rodagem, Florianópolis, 1979.
- 25 NUNEZ, W. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1991.
- 26 OBI, B. C. A.; Asce, A. M. Soil-cement bases under thin bituminous surfacing. **Transportation Engineering Journal**, vol. 98, 1972.
- 27 OTTE, E. **Factors affecting the behavior of cement treated layers in pavements.** NITRR Tech. Rep. RR/292, Pretoria, CSIR, 1978.
- 28 OTTE, E.; SAVAGE, P. F.; MONISMITH, C. L. Structural design of cemented pavement layers. **Transportation Engineering Journal**, ASCE, vol. 108, n° TE4, 1982. *NY 707*
- 29 PEREIRA, D. M.; NASCIMENTO, N. A. Análise tensional de pavimento a ser executado sobre espessa camada de argila orgânica. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1991. 4v v2, p.1283-1306.
- 30 PETRORIUS, P. C. **Design considerations for pavements containing soil cement bases.** Berkeley, 1970. Dissertation (Doctor in Philosophy). University of California.

- 31 PINTO, S. **Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1971.
- 32 PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- 33 PINTO, S. et al. O sistema automático IPR para realização de ensaios com carregamento repetido em materiais de pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis, SC, **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1988. v1, p. 13-24
- 34 PINTO, S. et al. Avaliação de desempenho dos trechos experimentais do Instituto de Pesquisas Rodoviárias/DNER com utilização de cinza volante e cal. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis, SC, **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1988. v1, p. 265-286
- 35 PINTO, S.; MOTTA, L. M. G. **Catálogo de curvas de fadiga**. Rio de Janeiro: ABPv, 1995. (Boletim Técnico, 16)
- 36 PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Módulos resilientes de concretos asfálticos**. Rio de Janeiro, DNER, 1980.
- 37 PINTO, S.; PREUSSLER, E. S.; GONÇALVES, J. V. S. **Método de projeto de pavimentação semi-rígido: aplicação para caso de base pozolânica**. Rio de Janeiro, DNER, 1983.
- 38 PREUSSLER, E. S. **Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1978.
- 39 PREUSSLER, E. S. A consideração da resiliência dos solos em projetos de pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. **Anais ...**Porto Alegre: ABMS, 1986.

- 40 ROCHA NETO, J. B. et al. Caracterização das cales hidratadas consumidas na região de Santa Maria. In: REVISTA DO CENTRO DE TECNOLOGIA - UFSM. vol: 14, n°: 1-2, 1991.
- 41 SANTOS, J. D. Análise mecanística de trechos de rodovias do estado de Mato Grosso. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá, MT. **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1995. 4v v2, p.258-281.
- 42 SILVA, M. A. M. **Efeito da estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando sua utilização em construção civil e em pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1982.
- 43 SUZUKI, C. V. et al Estudo paramétrico comparativo entre pavimentos com base cimentada e com sub-base cimentada (pavimento invertido). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1991. 4v v2, p.1307-1336.
- 44 SWANSON, T. E.; THOMPSON, M. R. **Flexural fatigue strength of lime-soil mixtures.** Highway Research Record, n° 198, 1967.
- 45 THOMPSON, M. R.; FIGUEROA, J. L. **Mechanistic thickness design procedure for soil-lime layers.** Washington, 1980. (Transportation Research Record, 754)
- 46 TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization: reactions, properties, design and construcion.** Washington, D. C., 1987. 58p. (State of the Art Report, 5)
- 47 TRICHÊS, G. Metodologia de dimensionamento de pavimentos semi-rígidos que contenham camada de concreto compactado a rolo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte, MG. **Anais...**Rio de Janeiro: ABPv, 1994. 2v v2, p.944-958.

ANEXO

**RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA
UTILIZANDO O ELSYM 5**

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Deflexão Superf. (cm)1	Tensão Comp. Rev. (MPa)		Def. Compressão Rev.	
				Sob a roda2	Entre rodas3	Sob a roda4	Entre rodas5
20	6000	50	4,09E-02	4,45E-01	2,99E-01	5,72E-05	6,15E-05
20	6000	100	2,54E-02	4,07E-01	2,59E-01	4,82E-05	5,21E-05
20	6000	150	1,92E-02	3,85E-01	2,35E-01	4,29E-05	4,63E-05
20	6000	200	1,57E-02	3,70E-01	2,18E-01	3,91E-05	4,22E-05
20	6000	250	1,34E-02	3,58E-01	2,05E-01	3,61E-05	3,90E-05
20	11000	50	3,57E-02	4,05E-01	2,33E-01	4,61E-05	4,86E-05
20	11000	100	2,20E-02	3,79E-01	2,07E-01	3,99E-05	4,25E-05
20	11000	150	1,66E-02	3,64E-01	1,91E-01	3,63E-05	3,86E-05
20	11000	200	1,36E-02	3,53E-01	1,79E-01	3,37E-05	3,58E-05
20	11000	250	1,17E-02	3,45E-01	1,70E-01	3,16E-05	3,36E-05
20	17000	50	3,24E-02	3,70E-01	1,85E-01	3,67E-05	3,81E-05
20	17000	100	1,97E-02	3,50E-01	1,67E-01	3,20E-05	3,39E-05
20	17000	150	1,49E-02	3,39E-01	1,56E-01	2,94E-05	3,12E-05
20	17000	200	1,22E-02	3,32E-01	1,48E-01	2,75E-05	2,92E-05
20	17000	250	1,05E-02	3,26E-01	1,41E-01	2,61E-05	2,76E-05
20	22000	50	3,06E-02	3,50E-01	1,60E-01	3,14E-05	3,22E-05
20	22000	100	1,85E-02	3,33E-01	1,46E-01	2,75E-05	2,89E-05
20	22000	150	1,39E-02	3,24E-01	1,37E-01	2,53E-05	2,68E-05
20	22000	200	1,14E-02	3,18E-01	1,30E-01	2,38E-05	2,52E-05
20	22000	250	9,76E-03	3,13E-01	1,25E-01	2,27E-05	2,40E-05
20	28000	50	2,90E-02	3,33E-01	1,38E-01	2,69E-05	2,73E-05
20	28000	100	1,74E-02	3,19E-01	1,27E-01	2,36E-05	2,46E-05
20	28000	150	1,30E-02	3,11E-01	1,20E-01	2,18E-05	2,30E-05
20	28000	200	1,07E-02	3,06E-01	1,15E-01	2,06E-05	2,17E-05
20	28000	250	9,13E-03	3,02E-01	1,11E-01	1,96E-05	2,07E-05
25	6000	50	3,47E-02	3,97E-01	2,44E-01	4,47E-05	4,74E-05
25	6000	100	2,14E-02	3,69E-01	2,17E-01	3,80E-05	4,09E-05
25	6000	150	1,63E-02	3,53E-01	2,00E-01	3,41E-05	3,69E-05
25	6000	200	1,34E-02	3,42E-01	1,87E-01	3,14E-05	3,39E-05
25	6000	250	1,15E-02	3,33E-01	1,78E-01	2,90E-05	3,16E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Deflexão Superf. (cm) 1	Tensão Comp. Rev. (MPa)		Def. Compressão Rev.	
				Sob a roda2	Entre rodas3	Sob a roda4	Entre rodas5
25	11000	50	3,05E-02	3,63E-01	1,84E-01	3,52E-05	3,61E-05
25	11000	100	1,84E-02	3,44E-01	1,67E-01	3,05E-05	3,21E-05
25	11000	150	1,39E-02	3,33E-01	1,56E-01	2,79E-05	2,96E-05
25	11000	200	1,14E-02	3,25E-01	1,48E-01	2,61E-05	2,77E-05
25	11000	250	9,80E-03	3,19E-01	1,42E-01	2,47E-05	2,62E-05
25	17000	50	2,78E-02	3,35E-01	1,44E-01	2,76E-05	2,77E-05
25	17000	100	1,66E-02	3,20E-01	1,33E-01	2,41E-05	2,49E-05
25	17000	150	1,24E-02	3,12E-01	1,25E-01	2,22E-05	2,32E-05
25	17000	200	1,01E-02	3,07E-01	1,20E-01	2,09E-05	2,20E-05
25	17000	250	8,69E-03	3,03E-01	1,16E-01	1,99E-05	2,10E-05
25	22000	50	2,63E-02	3,19E-01	1,25E-01	2,35E-05	2,33E-05
25	22000	100	1,56E-02	3,07E-01	1,15E-01	2,06E-05	2,10E-05
25	22000	150	1,16E-02	3,00E-01	1,09E-01	1,90E-05	1,97E-05
25	22000	200	9,45E-03	2,96E-01	1,05E-01	1,79E-05	1,87E-05
25	22000	250	8,08E-03	2,92E-01	1,02E-01	1,71E-05	1,79E-05
25	28000	50	2,50E-02	3,06E-01	1,08E-01	2,00E-05	1,97E-05
25	28000	100	1,47E-02	2,95E-01	9,98E-02	1,75E-05	1,77E-05
25	28000	150	1,09E-02	2,90E-01	9,53E-02	1,62E-05	1,67E-05
25	28000	200	8,86E-03	2,86E-01	9,21E-02	1,53E-05	1,59E-05
25	28000	250	7,56E-03	2,83E-01	8,95E-02	1,47E-05	1,53E-05
30	6000	50	3,07E-02	3,64E-01	2,05E-01	3,62E-05	3,75E-05
30	6000	100	1,87E-02	3,41E-01	1,85E-01	3,08E-05	3,29E-05
30	6000	150	1,42E-02	3,29E-01	1,73E-01	2,78E-05	3,00E-05
30	6000	200	1,17E-02	3,20E-01	1,64E-01	2,57E-05	2,78E-05
30	6000	250	1,01E-02	3,13E-01	1,56E-01	2,41E-05	2,60E-05
30	11000	50	2,70E-02	3,36E-01	1,52E-01	2,82E-05	2,81E-05
30	11000	100	1,61E-02	3,20E-01	1,39E-01	2,45E-05	2,51E-05
30	11000	150	1,21E-02	3,12E-01	1,32E-01	2,25E-05	2,34E-05
30	11000	200	9,88E-03	3,06E-01	1,27E-01	2,11E-05	2,21E-05
30	11000	250	8,49E-03	3,01E-01	1,22E-01	2,00E-05	2,11E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Deflexão Superf. (cm) 1	Tensão Comp. Rev. (MPa)		Def. Compressão Rev.	
				Sob a roda2	Entre rodas3	Sob a roda4	Entre rodas5
30	17000	50	2,47E-02	3,13E-01	1,20E-01	2,20E-05	2,16E-05
30	17000	100	1,46E-02	3,01E-01	1,10E-01	1,92E-05	1,93E-05
30	17000	150	1,08E-02	2,95E-01	1,05E-01	1,77E-05	1,81E-05
30	17000	200	8,78E-03	2,90E-01	1,01E-01	1,67E-05	1,72E-05
30	17000	250	7,51E-03	2,87E-01	9,85E-02	1,60E-05	1,66E-05
30	22000	50	2,33E-02	3,00E-01	1,04E-01	1,87E-05	1,82E-05
30	22000	100	1,38E-02	2,90E-01	9,54E-02	1,63E-05	1,62E-05
30	22000	150	1,01E-02	2,85E-01	9,13E-02	1,51E-05	1,52E-05
30	22000	200	8,21E-03	2,81E-01	8,84E-02	1,43E-05	1,46E-05
30	22000	250	6,99E-03	2,79E-01	8,61E-02	1,36E-05	1,40E-05
30	28000	50	2,20E-02	2,89E-01	9,08E-02	1,58E-05	1,54E-05
30	28000	100	1,30E-02	2,81E-01	8,35E-02	1,39E-05	1,37E-05
30	28000	150	9,58E-03	2,77E-01	8,00E-02	1,28E-05	1,28E-05
30	28000	200	7,73E-03	2,74E-01	7,77E-02	1,22E-05	1,23E-05
30	28000	250	6,56E-03	2,71E-01	7,59E-02	1,16E-05	1,19E-05
35	6000	50	2,78E-02	3,41E-01	1,77E-01	3,02E-05	3,07E-05
35	6000	100	1,68E-02	3,21E-01	1,62E-01	2,57E-05	2,70E-05
35	6000	150	1,27E-02	3,11E-01	1,52E-01	2,32E-05	2,48E-05
35	6000	200	1,05E-02	3,04E-01	1,46E-01	2,16E-05	2,32E-05
35	6000	250	9,02E-03	2,99E-01	1,40E-01	2,03E-05	2,19E-05
35	11000	50	2,45E-02	3,17E-01	1,32E-01	2,35E-05	2,30E-05
35	11000	100	1,45E-02	3,04E-01	1,21E-01	2,04E-05	2,05E-05
35	11000	150	1,08E-02	2,97E-01	1,15E-01	1,87E-05	1,92E-05
35	11000	200	8,81E-03	2,92E-01	1,11E-01	1,76E-05	1,82E-05
35	11000	250	7,55E-03	2,89E-01	1,08E-01	1,68E-05	1,75E-05
35	17000	50	2,21E-02	2,98E-01	1,04E-01	1,83E-05	1,77E-05
35	17000	100	1,32E-02	2,88E-01	9,56E-02	1,60E-05	1,57E-05
35	17000	150	9,71E-03	2,83E-01	9,15E-02	1,48E-05	1,47E-05
35	17000	200	7,86E-03	2,79E-01	8,87E-02	1,39E-05	1,41E-05
35	17000	250	6,69E-03	2,77E-01	8,65E-02	1,33E-05	1,36E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Deflexão Superf. (cm) 1	Tensão Comp. Rev. (MPa)		Def. Compressão Rev.	
				Sob a roda 2	Entre rodas 3	Sob a roda 4	Entre rodas 5
35	22000	50	2,07E-02	2,87E-01	9,07E-02	1,55E-05	1,50E-05
35	22000	100	1,24E-02	2,79E-01	8,32E-02	1,36E-05	1,32E-05
35	22000	150	9,13E-03	2,75E-01	7,97E-02	1,25E-05	1,24E-05
35	22000	200	7,37E-03	2,72E-01	7,74E-02	1,19E-05	1,18E-05
35	22000	250	6,25E-03	2,70E-01	7,57E-02	1,14E-05	1,14E-05
35	28000	50	1,94E-02	2,78E-01	8,00E-02	1,31E-05	1,27E-05
35	28000	100	1,17E-02	2,71E-01	7,33E-02	1,15E-05	1,11E-05
35	28000	150	8,64E-03	2,68E-01	7,03E-02	1,07E-05	1,04E-05
35	28000	200	6,95E-03	2,65E-01	6,84E-02	1,01E-05	9,95E-06
35	28000	250	5,88E-03	2,64E-01	6,69E-02	9,68E-06	9,62E-06
40	6000	50	2,56E-02	3,23E-01	1,58E-01	2,59E-05	2,60E-05
40	6000	100	1,54E-02	3,07E-01	1,45E-01	2,20E-05	2,28E-05
40	6000	150	1,16E-02	2,98E-01	1,37E-01	1,99E-05	2,11E-05
40	6000	200	9,53E-03	2,92E-01	1,32E-01	1,85E-05	1,98E-05
40	6000	250	8,22E-03	2,88E-01	1,28E-01	1,75E-05	1,88E-05
40	11000	50	2,23E-02	3,04E-01	1,18E-01	2,02E-05	1,96E-05
40	11000	100	1,33E-02	2,93E-01	1,08E-01	1,76E-05	1,73E-05
40	11000	150	9,88E-03	2,87E-01	1,03E-01	1,62E-05	1,62E-05
40	11000	200	8,04E-03	2,83E-01	9,98E-02	1,52E-05	1,55E-05
40	11000	250	6,87E-03	2,80E-01	9,73E-02	1,45E-05	1,49E-05
40	17000	50	1,99E-02	2,87E-01	9,38E-02	1,56E-05	1,52E-05
40	17000	100	1,20E-02	2,79E-01	8,59E-02	1,37E-05	1,33E-05
40	17000	150	8,89E-03	2,75E-01	8,22E-02	1,27E-05	1,25E-05
40	17000	200	7,18E-03	2,72E-01	7,99E-02	1,20E-05	1,19E-05
40	17000	250	6,10E-03	2,70E-01	7,81E-02	1,15E-05	1,15E-05
40	22000	50	1,84E-02	2,78E-01	8,21E-02	1,32E-05	1,28E-05
40	22000	100	1,13E-02	2,71E-01	7,52E-02	1,16E-05	1,12E-05
40	22000	150	8,36E-03	2,68E-01	7,20E-02	1,08E-05	1,05E-05
40	22000	200	6,74E-03	2,65E-01	7,00E-02	1,02E-05	1,00E-05
40	22000	250	5,71E-03	2,64E-01	6,86E-02	9,81E-06	9,66E-06

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Deflexão Superf. (cm) 1	Tensão Comp. Rev. (MPa)		Def. Compressão Rev.	
				Sob a roda 2	Entre rodas 3	Sob a roda 4	Entre rodas 5
40	28000	50	1,69E-02	2,70E-01	7,27E-02	1,11E-05	1,09E-05
40	28000	100	1,06E-02	2,65E-01	6,67E-02	9,86E-06	9,48E-06
40	28000	150	7,88E-03	2,62E-01	6,38E-02	9,17E-06	8,83E-06
40	28000	200	6,36E-03	2,60E-01	6,21E-02	8,70E-06	8,42E-06
40	28000	250	5,38E-03	2,58E-01	6,09E-02	8,35E-06	8,14E-06

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Tensão Tração Base (MPa)		Tensão Vert Comp Subleito (MPa)	
			Sob a roda 6	Entre rodas 7	Sob a roda 8	Entre rodas 9
20	6000	50	6,71E-01	7,12E-01	1,84E-02	1,90E-02
20	6000	100	5,70E-01	6,03E-01	2,77E-02	2,91E-02
20	6000	150	5,08E-01	5,36E-01	3,50E-02	3,66E-02
20	6000	200	4,63E-01	4,87E-01	4,10E-02	4,29E-02
20	6000	250	4,27E-01	4,48E-01	4,62E-02	4,82E-02
20	11000	50	8,15E-01	8,56E-01	1,40E-02	1,41E-02
20	11000	100	7,05E-01	7,47E-01	2,11E-02	2,19E-02
20	11000	150	6,40E-01	6,77E-01	2,67E-02	2,80E-02
20	11000	200	5,93E-01	6,25E-01	3,15E-02	3,31E-02
20	11000	250	5,55E-01	5,84E-01	3,58E-02	3,75E-02
20	17000	50	9,21E-01	9,57E-01	1,14E-02	1,13E-02
20	17000	100	8,04E-01	8,50E-01	1,70E-02	1,75E-02
20	17000	150	7,37E-01	7,81E-01	2,16E-02	2,25E-02
20	17000	200	6,88E-01	7,28E-01	2,56E-02	2,68E-02
20	17000	250	6,50E-01	6,86E-01	2,91E-02	3,05E-02
20	22000	50	9,85E-01	1,01E+00	1,01E-02	9,81E-03
20	22000	100	8,62E-01	9,08E-01	1,50E-02	1,51E-02
20	22000	150	7,93E-01	8,40E-01	1,89E-02	1,96E-02
20	22000	200	7,44E-01	7,89E-01	2,24E-02	2,34E-02
20	22000	250	7,06E-01	7,47E-01	2,55E-02	2,68E-02
20	28000	50	1,05E+00	1,07E+00	8,94E-03	8,62E-03
20	28000	100	9,17E-01	9,61E-01	1,32E-02	1,32E-02
20	28000	150	8,46E-01	8,94E-01	1,67E-02	1,71E-02
20	28000	200	7,96E-01	8,44E-01	1,98E-02	2,05E-02
20	28000	250	7,58E-01	8,02E-01	2,25E-02	2,35E-02
25	6000	50	4,96E-01	5,25E-01	1,34E-02	1,35E-02
25	6000	100	4,24E-01	4,55E-01	2,01E-02	2,10E-02
25	6000	150	3,81E-01	4,09E-01	2,55E-02	2,70E-02
25	6000	200	3,50E-01	3,75E-01	3,01E-02	3,19E-02
25	6000	250	3,25E-01	3,48E-01	3,41E-02	3,62E-02

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Tensão Tração Base (MPa)		Tensão Vert Comp Subleito (MPa)	
			Sob a roda 6	Entre rodas 7	Sob a roda 8	Entre rodas 9
25	11000	50	5,94E-01	6,17E-01	1,01E-02	9,94E-03
25	11000	100	5,15E-01	5,48E-01	1,51E-02	1,54E-02
25	11000	150	4,70E-01	5,04E-01	1,91E-02	1,99E-02
25	11000	200	4,38E-01	4,70E-01	2,26E-02	2,38E-02
25	11000	250	4,12E-01	4,42E-01	2,57E-02	2,72E-02
25	17000	50	6,68E-01	6,82E-01	8,19E-03	7,93E-03
25	17000	100	5,82E-01	6,12E-01	1,21E-02	1,20E-02
25	17000	150	5,34E-01	5,69E-01	1,53E-02	1,57E-02
25	17000	200	5,01E-01	5,36E-01	1,81E-02	1,88E-02
25	17000	250	4,75E-01	5,10E-01	2,06E-02	2,16E-02
25	22000	50	7,13E-01	7,20E-01	7,20E-03	6,95E-03
25	22000	100	6,21E-01	6,48E-01	1,06E-02	1,05E-02
25	22000	150	5,72E-01	6,05E-01	1,34E-02	1,35E-02
25	22000	200	5,38E-01	5,74E-01	1,58E-02	1,62E-02
25	22000	250	5,12E-01	5,48E-01	1,80E-02	1,87E-02
25	28000	50	7,52E-01	7,57E-01	6,37E-03	6,16E-03
25	28000	100	6,59E-01	6,80E-01	9,38E-03	9,15E-03
25	28000	150	6,08E-01	6,38E-01	1,18E-02	1,17E-02
25	28000	200	5,73E-01	6,07E-01	1,39E-02	1,41E-02
25	28000	250	5,46E-01	5,82E-01	1,58E-02	1,62E-02
30	6000	50	3,83E-01	4,00E-01	1,03E-02	1,02E-02
30	6000	100	3,27E-01	3,51E-01	1,54E-02	1,59E-02
30	6000	150	2,95E-01	3,19E-01	1,95E-02	2,05E-02
30	6000	200	2,72E-01	2,95E-01	2,30E-02	2,45E-02
30	6000	250	2,54E-01	2,75E-01	2,62E-02	2,79E-02
30	11000	50	4,56E-01	4,66E-01	7,74E-03	7,54E-03
30	11000	100	3,94E-01	4,16E-01	1,15E-02	1,15E-02
30	11000	150	3,60E-01	3,85E-01	1,45E-02	1,48E-02
30	11000	200	3,36E-01	3,62E-01	1,71E-02	1,78E-02
30	11000	250	3,17E-01	3,43E-01	1,95E-02	2,05E-02

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Tensão Tração Base (MPa)		Tensão Vert Comp Subleito (MPa)	
			Sob a roda 6	Entre rodas 7	Sob a roda 8	Entre rodas 9
30	17000	50	5,11E-01	5,15E-01	6,22E-03	6,07E-03
30	17000	100	4,43E-01	4,59E-01	9,20E-03	9,02E-03
30	17000	150	4,07E-01	4,29E-01	1,16E-02	1,16E-02
30	17000	200	3,82E-01	4,07E-01	1,37E-02	1,39E-02
30	17000	250	3,62E-01	3,89E-01	1,55E-02	1,60E-02
30	22000	50	5,45E-01	5,45E-01	5,44E-03	5,34E-03
30	22000	100	4,73E-01	4,85E-01	8,05E-03	7,84E-03
30	22000	150	4,35E-01	4,54E-01	1,01E-02	1,00E-02
30	22000	200	4,09E-01	4,32E-01	1,19E-02	1,20E-02
30	22000	250	3,89E-01	4,14E-01	1,35E-02	1,38E-02
30	28000	50	5,76E-01	5,74E-01	4,78E-03	4,78E-03
30	28000	100	5,02E-01	5,09E-01	7,09E-03	6,90E-03
30	28000	150	4,61E-01	4,77E-01	8,91E-03	8,72E-03
30	28000	200	4,34E-01	4,55E-01	1,05E-02	1,04E-02
30	28000	250	4,14E-01	4,37E-01	1,19E-02	1,19E-02
35	6000	50	3,06E-01	3,15E-01	8,26E-03	8,13E-03
35	6000	100	2,61E-01	2,77E-01	1,23E-02	1,24E-02
35	6000	150	2,36E-01	2,54E-01	1,55E-02	1,61E-02
35	6000	200	2,18E-01	2,36E-01	1,83E-02	1,93E-02
35	6000	250	2,03E-01	2,21E-01	2,08E-02	2,21E-02
35	11000	50	3,64E-01	3,67E-01	6,14E-03	6,04E-03
35	11000	100	3,13E-01	3,25E-01	9,10E-03	8,98E-03
35	11000	150	2,85E-01	3,02E-01	1,15E-02	1,15E-02
35	11000	200	2,67E-01	2,85E-01	1,35E-02	1,38E-02
35	11000	250	2,52E-01	2,71E-01	1,54E-02	1,59E-02
35	17000	50	4,07E-01	4,06E-01	4,89E-03	4,90E-03
35	17000	100	3,52E-01	3,58E-01	7,27E-03	7,12E-03
35	17000	150	3,22E-01	3,34E-01	9,15E-03	9,03E-03
35	17000	200	3,02E-01	3,17E-01	1,08E-02	1,08E-02
35	17000	250	2,86E-01	3,04E-01	1,22E-02	1,24E-02

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Tensão Tração Base (MPa)		Tensão Vert Comp Subleito (MPa)	
			Sob a roda 6	Entre rodas 7	Sob a roda 8	Entre rodas 9
35	22000	50	4,32E-01	4,32E-01	4,24E-03	4,34E-03
35	22000	100	3,75E-01	3,79E-01	6,35E-03	6,23E-03
35	22000	150	3,44E-01	3,53E-01	7,99E-03	7,83E-03
35	22000	200	3,23E-01	3,36E-01	9,40E-03	9,29E-03
35	22000	250	3,07E-01	3,23E-01	1,07E-02	1,07E-02
35	28000	50	4,56E-01	4,57E-01	3,70E-03	3,87E-03
35	28000	100	3,98E-01	3,99E-01	5,57E-03	5,51E-03
35	28000	150	3,65E-01	3,71E-01	7,02E-03	6,87E-03
35	28000	200	3,43E-01	3,53E-01	8,26E-03	8,11E-03
35	28000	250	3,27E-01	3,40E-01	9,38E-03	9,27E-03
40	6000	50	2,52E-01	2,55E-01	6,79E-03	6,70E-03
40	6000	100	2,14E-01	2,24E-01	1,01E-02	1,01E-02
40	6000	150	1,93E-01	2,05E-01	1,27E-02	1,30E-02
40	6000	200	1,78E-01	1,91E-01	1,50E-02	1,55E-02
40	6000	250	1,67E-01	1,80E-01	1,70E-02	1,79E-02
40	11000	50	2,98E-01	2,98E-01	4,99E-03	5,02E-03
40	11000	100	2,56E-01	2,61E-01	7,44E-03	7,32E-03
40	11000	150	2,33E-01	2,42E-01	9,36E-03	9,31E-03
40	11000	200	2,17E-01	2,29E-01	1,10E-02	1,11E-02
40	11000	250	2,05E-01	2,18E-01	1,25E-02	1,28E-02
40	17000	50	3,32E-01	3,32E-01	3,39E-03	4,08E-03
40	17000	100	2,87E-01	2,89E-01	5,91E-03	5,86E-03
40	17000	150	2,63E-01	2,68E-01	7,46E-03	7,34E-03
40	17000	200	2,46E-01	2,54E-01	8,78E-03	8,69E-03
40	17000	250	2,33E-01	2,43E-01	9,96E-03	9,94E-03
40	22000	50	3,52E-01	3,55E-01	3,39E-03	3,60E-03
40	22000	100	3,06E-01	3,06E-01	5,14E-03	5,15E-03
40	22000	150	2,80E-01	2,83E-01	6,50E-03	6,40E-03
40	22000	200	2,63E-01	2,69E-01	7,65E-03	7,53E-03
40	22000	250	2,50E-01	2,58E-01	8,68E-03	8,59E-03

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Tensão Tração Base(MPa)		Tensão Vert Comp Subleito(MPa)	
			Sob a roda 6	Entre rodas 7	Sob a roda 8	Entre rodas 9
40	28000	50	3,71E-01	3,76E-01	2,93E-03	3,20E-03
40	28000	100	3,24E-01	3,24E-01	4,49E-03	4,57E-03
40	28000	150	2,98E-01	2,99E-01	5,69E-03	5,65E-03
40	28000	200	2,79E-01	2,83E-01	6,71E-03	6,61E-03
40	28000	250	2,66E-01	2,71E-01	7,62E-03	7,50E-03

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Def. Tracção Base	
			Sob a roda 10	Entre rodas 11
20	6000	50	9,43E-05	1,01E-04
20	6000	100	8,09E-05	8,64E-05
20	6000	150	7,26E-05	7,75E-05
20	6000	200	6,66E-05	7,10E-05
20	6000	250	6,19E-05	6,60E-05
20	11000	50	6,20E-05	6,57E-05
20	11000	100	5,41E-05	5,78E-05
20	11000	150	4,94E-05	5,28E-05
20	11000	200	4,59E-05	4,90E-05
20	11000	250	4,32E-05	4,60E-05
20	17000	50	4,52E-05	4,73E-05
20	17000	100	3,97E-05	4,22E-05
20	17000	150	3,66E-05	3,91E-05
20	17000	200	3,43E-05	3,66E-05
20	17000	250	3,25E-05	3,47E-05
20	22000	50	3,73E-05	3,87E-05
20	22000	100	3,28E-05	3,49E-05
20	22000	150	3,03E-05	3,24E-05
20	22000	200	2,86E-05	3,05E-05
20	22000	250	2,72E-05	2,90E-05
20	28000	50	3,11E-05	3,19E-05
20	28000	100	2,74E-05	2,89E-05
20	28000	150	2,54E-05	2,70E-05
20	28000	200	2,39E-05	2,56E-05
20	28000	250	2,28E-05	2,44E-05
25	6000	50	6,93E-05	7,36E-05
25	6000	100	5,99E-05	6,44E-05
25	6000	150	5,42E-05	5,84E-05
25	6000	200	5,01E-05	5,39E-05
25	6000	250	4,68E-05	5,03E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Def. Tracção Base	
			Sob a roda 10	Entre rodas 11
25	11000	50	4,51E-05	4,70E-05
25	11000	100	3,94E-05	4,20E-05
25	11000	150	3,61E-05	3,88E-05
25	11000	200	3,38E-05	3,64E-05
25	11000	250	3,20E-05	3,44E-05
25	17000	50	3,27E-05	3,35E-05
25	17000	100	2,86E-05	3,02E-05
25	17000	150	2,64E-05	2,82E-05
25	17000	200	2,49E-05	2,67E-05
25	17000	250	2,37E-05	2,54E-05
25	22000	50	2,69E-05	2,73E-05
25	22000	100	2,36E-05	2,46E-05
25	22000	150	2,18E-05	2,31E-05
25	22000	200	2,06E-05	2,20E-05
25	22000	250	1,96E-05	2,11E-05
25	28000	50	2,24E-05	2,25E-05
25	28000	100	1,96E-05	2,03E-05
25	28000	150	1,82E-05	1,91E-05
25	28000	200	1,72E-05	1,82E-05
25	28000	250	1,64E-05	1,75E-05
30	6000	50	5,34E-05	5,57E-05
30	6000	100	4,61E-05	4,93E-05
30	6000	150	4,19E-05	4,51E-05
30	6000	200	3,88E-05	4,19E-05
30	6000	250	3,64E-05	3,93E-05
30	11000	50	3,45E-05	3,51E-05
30	11000	100	3,00E-05	3,16E-05
30	11000	150	2,76E-05	2,94E-05
30	11000	200	2,58E-05	2,77E-05
30	11000	250	2,45E-05	2,64E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Def. Tracção Base	
			Sob a roda 10	Entre rodas 11
30	17000	50	2,49E-05	2,51E-05
30	17000	100	2,18E-05	2,25E-05
30	17000	150	2,00E-05	2,11E-05
30	17000	200	1,89E-05	2,01E-05
30	17000	250	1,80E-05	1,92E-05
30	22000	50	2,05E-05	2,05E-05
30	22000	100	1,79E-05	1,83E-05
30	22000	150	1,65E-05	1,72E-05
30	22000	200	1,56E-05	1,64E-05
30	22000	250	1,49E-05	1,58E-05
30	28000	50	1,70E-05	1,69E-05
30	28000	100	1,49E-05	1,51E-05
30	28000	150	1,37E-05	1,42E-05
30	28000	200	1,30E-05	1,36E-05
30	28000	250	1,24E-05	1,31E-05
35	6000	50	4,25E-05	4,36E-05
35	6000	100	3,66E-05	3,86E-05
35	6000	150	3,33E-05	3,56E-05
35	6000	200	3,09E-05	3,33E-05
35	6000	250	2,91E-05	3,13E-05
35	11000	50	2,74E-05	2,75E-05
35	11000	100	2,38E-05	2,45E-05
35	11000	150	2,18E-05	2,29E-05
35	11000	200	2,04E-05	2,17E-05
35	11000	250	1,94E-05	2,07E-05
35	17000	50	1,98E-05	1,97E-05
35	17000	100	1,72E-05	1,75E-05
35	17000	150	1,58E-05	1,63E-05
35	17000	200	1,49E-05	1,56E-05
35	17000	250	1,42E-05	1,49E-05

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Def. Tração Base	
			Sob a roda 10	Entre rodas 11
35	22000	50	1,62E-05	1,61E-05
35	22000	100	1,41E-05	1,42E-05
35	22000	150	1,30E-05	1,33E-05
35	22000	200	1,23E-05	1,27E-05
35	22000	250	1,17E-05	1,22E-05
35	28000	50	1,34E-05	1,34E-05
35	28000	100	1,18E-05	1,17E-05
35	28000	150	1,08E-05	1,07E-05
35	28000	200	1,02E-05	1,05E-05
35	28000	250	9,74E-06	1,01E-05
40	6000	50	3,48E-05	3,51E-05
40	6000	100	2,99E-05	3,10E-05
40	6000	150	2,71E-05	2,86E-05
40	6000	200	2,52E-05	2,68E-05
40	6000	250	2,37E-05	2,54E-05
40	11000	50	2,24E-05	2,23E-05
40	11000	100	1,94E-05	1,96E-05
40	11000	150	1,77E-05	1,83E-05
40	11000	200	1,66E-05	1,73E-05
40	11000	250	1,57E-05	1,66E-05
40	17000	50	1,61E-05	1,60E-05
40	17000	100	1,40E-05	1,40E-05
40	17000	150	1,28E-05	1,30E-05
40	17000	200	1,21E-05	1,24E-05
40	17000	250	1,15E-05	1,19E-05
40	22000	50	1,32E-05	1,32E-05
40	22000	100	1,15E-05	1,15E-05
40	22000	150	1,06E-05	1,06E-05
40	22000	200	9,94E-06	1,01E-05
40	22000	250	9,47E-06	9,72E-06

Esp. Base	MR Base	MR Subleito	Def. Tracção Base	
			Sob a roda 10	Entre rodas 11
40	28000	50	1,09E-05	1,10E-05
40	28000	100	9,55E-06	9,49E-06
40	28000	150	8,80E-06	8,78E-06
40	28000	200	8,28E-06	8,34E-06
40	28000	250	7,89E-06	8,02E-06