
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (DCP): UMA ALTERNATIVA AO
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS URBANOS**

por

Francisco Alves da Silva Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**.

Área de Concentração: Geotecnia

Campina Grande – Paraíba
Abril de 2005

Francisco Alves da Silva Júnior

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da
Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande,
como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Área de Concentração – Geotecnia

Orientador: Prof. Ph.D. João B. Queiroz de Carvalho

Co-orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande, abril de 2005





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFSCG

S586c Silva Júnior, Francisco Alves
2005 Cone de penetração dinâmica (CPD): uma alternativa ao dimensionamento de pavimentos urbanos / Francisco Alves da Silva Júnior. — Campina Grande: UFSCG, 2005.
109f.

Inclui Bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

1— Cone de penetração 2— Pavimento 3— Dimensionamento
I— Título


CDU 625.73

Francisco Alves da Silva Júnior

**CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (DCP): UMA ALTERNATIVA AO
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS URBANOS**

Dissertação Defendida e Aprovada em: 01 / 04 / 2005

Banca Examinadora




João B. Queiroz de Carvalho, Prof. Ph.D / Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG

(Orientador)



John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. D.Sc. / Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG

(Co-orientador)



Olavo Francisco dos Santos Júnior, Prof. D.Sc. / Universidade Federal do
Rio Grande do Norte – UFRN

(Examinador Externo)



Raimundo Leidimar Bezerra, D.Sc. / Atecel

(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Francisco Alves da Silva e Maria Gomes da Costa Silva.

Ao meu avô, Basílio Gomes do Nascimento "in memoriam", pela fé em Deus.

Ao meu sobrinho, Samuel Gomes Cavalcante "in memoriam".

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por todas as coisas boas que me proporcionou.

Ao meu orientador João B. Queiroz de Carvalho, e ao meu co-orientador John Kennedy Guedes Rodrigues, pela parceria oferecida, compreensão, dedicação, e por me proporcionar a oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro à pesquisa.

À ATECEL Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. Professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da área de Geotecnia da UFCG.

Aos meus pais Francisco Alves da Silva e Maria Gomes da Costa Silva, e aos meus irmãos, por todo o incentivo e credibilidade oferecidos.

À Maria da Conceição Ribeiro, aos meus amigos Aretuza Karla e Jânio, e aos meus primos Danilo e Daniele, pelo apoio nas horas de dificuldades e amizade afetuosa, e com os quais dividi momentos inesquecíveis.

A todos os meus amigos que direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e realização deste trabalho.

A todos citados o meu muito obrigado.

RESUMO

O dimensionamento e as avaliações de pavimentos de vias urbanas, visando à obtenção de um nível mínimo de serventia, não têm métodos que abordam fatores específicos inerentes as suas realidades. No caso de vias de baixo volume de tráfego, ocorre um super dimensionamento da estrutura do pavimento quando se adota métodos convencionais. Associado a isto, a estrutura dos pavimentos em periferias de cidades brasileiras, principalmente no Nordeste, é sobreposta com uma camada de paralelepípedos como revestimento, o que acarreta numa espessura total desnecessária. O desenvolvimento do Cone de Penetração Dinâmica (DCP) foi uma resposta à necessidade de um dispositivo simples e rápido para a caracterização e avaliação da capacidade de suporte de solos. Sua estrutura torna-o uma ferramenta alternativa e atrativa, comparado com os ensaios, de elevado custo e execução laboriosas, convencionalmente usados. Este trabalho tem como objetivo o estudo sobre a possibilidade de utilização do DCP no dimensionamento de pavimentos de vias urbanas. Como método de trabalho, procurou-se estabelecer, a partir de análise de regressão, uma correlação entre os valores do Índice de Penetração (DN), obtidos com o ensaio do DCP, e os valores do CBR do subleito. Aliado a isto, realizou-se estudos preliminares que subsidiam a sugestão de um processo empírico, preliminar, para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis de vias urbanas, com baixo volume de tráfego, assim como, dos pavimentos cujo revestimento seja constituído de paralelepípedos. Pode-se inferir que: "o DCP é um ensaio relativamente rápido, versátil e efetivamente econômico quando comparado aos demais ensaios convencionalmente usados para os mesmos fins.

PALAVRAS-CHAVE: Cone de penetração, Pavimento, Dimensionamento.

ABSTRACT

For design and the evaluations of pavements of urban roads, in order to obtain a minimum level of usefulness, there are no methods that approach inherent specific factors of their realities. In the case of roads with a low volume of traffic, a order design of the structure of the pavement happens when it conventional methods are used. Associated to this, the structure of the pavements in the peripheries of Brazilian cities, mainly in the Northeast, is placed upon a layer of paving stones, a coating, which results in an unnecessary total thickness. The development of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) was an answer to the need of a simple and fast device for the characterization and evaluation of the support capacity of soils. The structure of DCP makes it an alternative and attractive tool, compared with the tests of high cost and laborious execution, which are used conventionally. This thesis presents the results of an investigation about the possibility of using DCP in the design of pavements on urban roads. As a working method, it was, starting from regression analysis, a correlation among the values of the Penetration Index (DN), obtained with the DCP test, and the values of CBR of the subgrade. In addition to this, preliminary studies that subsidize the suggestion of an empiric, preliminary process, for the design of the flexible pavements of urban roads, with low volume of traffic, as well as, of the pavements whose coating is made of paving stones. It can be said that: " the DCP is a relatively rehearsal fast, versatile and indeed economical when compared to the other rehearsals conventionally used for the same purpose

KEY WORDS: Cone Penetrometer, Pavement, Design

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esboço representativo das camadas do pavimento flexível (sem escala)	26
Figura 2.2 - Representação esquemática das camadas do pavimento rígido.....	27
Figura 2.3 – Pavimento com revestimento em paralelepípedo	29
Figura 2.4 – Curva de dimensionamento: IG x espessura do pavimento (SENÇO, 1997)	32
Figura 2.5 – Curvas para dimensionamento de rodovias, método do CBR (JORDÃO, 2004).....	33
Figura 2.6 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos, método de Hveem (SENÇO, 1997).....	34
Figura 2.7 – Ábaco para dimensionamento pelo método do DNER (JORDÃO, 2004).....	36
Figura 2.8 – Ábaco de dimensionamento (SENÇO, 1997)	37
Figura 2.9 – Esboço esquemático do cone de penetração dinâmica.....	40
Figura 2.10 – Relação entre o DN e CBR, espessura necessária à estrutura do pavimento (THOMAS, 1997)	44
Figura 3.1 – Poço de inspeção da pista de pouso/decolagem (PI – 104)	54
Figura 3.2 – Abertura dos poços de inspeção (PI - 101) - retirada do revestimento em CBUQ	54
Figura 3.3 – Poço de inspeção (PI - 105) - retirada da camada de base e sub-base, e coleta de amostras do material do subleito para ensaios em laboratório.....	55
Figura 3.4 – Poço de inspeção (PI - 201) - realização dos ensaios “in situ”	55
Figura 3.5 – Poço de inspeção (PI - 103) - realização de coleta de amostra de material do subleito	56
Figura 3.6 – Croqui da localização dos pontos de ensaios realizados nos PIs.....	58
Figura 3.7 – Cone de Penetração Dinâmica - DCP	59
Figura 3.8 – DCP (desmontado)	60

Figura 3.9 – Esboço do DCP utilizado no trabalho.....	60
Figura 3.10 – Posicionamento do DCP para início do ensaio.....	61
Figura 3.11 – Aparelho do ensaio de CBR.....	63
Figura 3.12 – Realização do ensaio de CBR “in situ”.....	64
Figura 4.1 – Gráfico da variação entre os CBRs, obtidos pára as várias energias, para cada poço de inspeção.....	70
Figura 4.2 – Gráfico representativo da variação da profundidade penetrada com o número de golpes.....	72
Figura 4.3 - Variação dos valores do DN para os PIs, considerando e desconsiderando o primeiro golpe do peso, e o valor do CBR “in situ”.....	73
Figura 4.4 – Relação DN/CBR “in situ” considerando o 1º golpe.....	75
Figura 4.5 – Relação DN/CBR “in situ” desconsiderando o 1º golpe.....	75
Figura 4.6 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR “in situ”, com o índice de penetração DN.....	81
Figura 4.7 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR “in situ”, com o índice de penetração DN.....	82
Figura 4.8 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para energia de 12 golpes, com o índice de penetração DN.....	82
Figura 4.9 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 12 golpes, com o índice de penetração DN.....	83
Figura 4.10 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para 26 golpes, com o índice de penetração DN.....	83
Figura 4.11 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 26 golpes, com o índice de penetração DN.....	84
Figura 4.12 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para 55 golpes, com o índice de penetração DN.....	84

Figura 4.13 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 55 golpes, com o índice de penetração DN	85
Figura 4.14 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR "final", com o índice de penetração DN	85
Figura 4.15 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR "final", com o índice de penetração DN.....	86
Figura 4.16 – Abaco de dimensionamento da espessura da estrutura do pavimento em função de DN, e do tráfego (T), para o método proposto	92
Figura 4.17 – Projetos-tipo de pavimentos para o Tráfego Tipo – 1, método proposto.....	93
Figura 4.18 – Projetos-tipo de pavimentos para o Tráfego Tipo – 2, método proposto.....	94
Figura 4.19 – Gráfico da variação das espessuras recomendadas pelo método proposto (Tipo – 1), com o método do DNER ($N = 10^4$), variando o DN do subleito.....	96
Figura 4.20 – Gráfico da variação das espessuras recomendadas pelo método proposto (Tipo – 2), com o método do DNER ($N = 10^5$), variando o DN do subleito.....	96
Figura AC.1 – Estrutura do pavimento para o exemplo 01	108
Figura AC.2 – Estrutura do pavimento para o exemplo 02.....	109

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 – Resumo das etapas do método de Hveem.....	34
Quadro 2.2– Autores e correlações estabelecidas para CBR versus DN	45
Quadro 3.1 – Localização dos furos.....	56
Quadro 4.1 – Referências e equações das correlações entre o valor do DN (mm/golpe) e o CBR da camada penetrada.....	77
Quadro 4.2 – Referências nacionais e equações de correlação entre o valor do DN (mm/golpe) e o CBR da camada penetrada	77
Quadro 4.3 – Coeficiente de equivalência estrutural –K, para diversos materiais	90
Tabela 2.1 – Elementos considerados por alguns dos métodos de dimensionamento.....	31
Tabela 2.2 – Espessuras recomendadas – carga máxima de 10.000 lb (4095 kg).....	32
Tabela 3.1 – Espessuras das camadas do pavimento acima do subleito estudado	57
Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento.....	67
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de índices de consistência e classificação dos solos	67
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor modificado	67
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor normal	68
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor intermediário.....	68
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor modificado	68
Tabela 4.7 – Valores do CBR obtidos na curva de CBR, para 95 % da densidade obtida com 55 golpes [Método DIRENG-01-87].....	68
Tabela 4.8 – Valores do teor de umidade, densidade e CBR “in situ” obtidos em campo.....	69

Tabela 4.9 – Resultados da penetração no ensaio com o DCP	71
Tabela 4.10 – Resultados obtidos com o DCP: índices de penetração (DN), considerando e desprezando o primeiro golpe do martelo	73
Tabela 4.11 – Valores de DN para os respectivos CBRs “in situ”	74
Tabela 4.12 – Resultados das análises de regressão	76
Tabela 4.13 – Valores críticos para controle do coeficiente de correlação r , para níveis de significância $(1 - \alpha)$ e N observações	76
Tabela 4.14 – Resultados dos valores dos CBRs a partir das correlações estabelecidas por autores referidos no Quadro 4.1	78
Tabela 4.15 – Resultados dos valores dos CBRs estimados a partir das correlações de autores nacionais (Quadro 4.2).....	79
Tabela 4.16 – Média e desvio padrão, para cada PI, considerando as duas situações.....	80
Tabela 4.17 – Resultados da penetração do ensaio do DCP em laboratório.....	86
Tabela 4.18 – Resultado dos ensaios - DN para o ensaio do DCP em laboratório, considerando e desconsiderando o primeiro golpe	87
Tabela 4.19 – Resultado do ensaio do DCP em laboratório.....	87
Tabela 4.20 – Espessuras recomendadas dependendo do tipo de tráfego	91
Tabela 4.21 – Espessuras recomendadas pelo método proposto e pelo método do DNER, dependendo do DN.....	95

LISTA DE ABREVIações, SIGLAS E SÍMBOLOS

'a' e 'b' – Constantes para as fórmulas de correlações que podem variar conforme o autor da pesquisa;

α - Nível de significância (estatística);

AASHTO – American Association of State Highway Officials;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ADCP – Automated Dynamic Cone Penetrometer;

ATECEL – Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior;

CBR – Califórnia Bearing Ratio;

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente;

C_m – Coesão;

DCP – Dynamic Cone Penetrometer (Cone de Penetração Dinâmica);

DIRENG – Diretoria de Engenharia da Aeronáutica;

DN – Índice de Penetração;

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;

'e' - Espessura do Pavimento;

E_q – Espessura equivalente;

E_r – Espessura real;

E_{RB} – Espessura do revestimento + espessura da camada de base;

E_{SUB} – Espessura da sub-base;

E_{TOTAL} – Espessura total da estrutura do pavimento;

EUA – Estados Unidos da América;

EWL – Número de repetições de carga de roda;

FC – Fator de carga;

FE – Fator de eixo;

FR – Fator climático regional;

' h_i ' – Espessura do material que vai compor a camada;

HRB – Highway Research Board;

IG – Índice de grupo;

IS – Índice de suporte;

IT – Índice de tráfego;

ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica;

K – Coeficiente de equivalência estrutural;

KE – Energia cinética;

LL – Limite de liquidez;

LP – Limite de plasticidade;

'm' – Massa do martelo em kg;

Mn/DOT- Minnesota Department of Transportation;

N – Número equivalente de operações do eixo padrão em um período de projeto;

NBR – Normas brasileiras;

NCDOT - North Carolina Department of Transportation;

NP – Não plástico;

P – Período de projeto;

P (%) – Porcentagem que passa;

P_d – Distância de penetração do solo (m);

$P_{inicial}$ – Penetração inicial, profundidade penetrada com o peso do equipamento;

$P_{penetrada}$ – Profundidade penetrada em cm;

PI – Poço de inspeção;

PL – Plástico;

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo;

PRA – Public Roads Administration;

PV – Poço de visita;

R – Resistência do subleito;

R^2 – Coeficiente de determinação;

' R_s ' – Resistência do solo;

SM – Areia fina silteosa;

SPT – Standard Penetration Test;

SUCS – Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Classificação de Solos);

T – Tráfego;

UNICAMP – Universidade de Campinas;

'v' – Velocidade de queda, em m/s;

'v₀' – Velocidade no tempo 0 em m/s;

W_s – Trabalho feito pelo solo, em J;

'x' – Altura de queda, em m.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01	21
1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	21
1.1 Introdução	21
1.2 Objetivos	22
1.3 Organização do trabalho	23
CAPÍTULO 02	25
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 Pavimento	25
2.1.1 Generalidades	25
2.1.2 Classificação dos pavimentos	26
2.1.3 Camadas do pavimento	27
2.2 Dimensionamento de pavimentos	29
2.2.1 Generalidades	29
2.2.2 Dimensionamento de pavimentos flexíveis	30
2.2.2.1 Método do Índice de Grupo (IG)	31
2.2.2.2 Método do Highway Research Board (HRB)	32
2.2.2.3 Método do CBR	33
2.2.2.4 Método de Hveem	34
2.2.2.5 Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER)	35
2.2.2.6 Método da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP)	37
2.3 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)	37
2.3.1 Breve histórico	38
2.3.2 Cone de penetração dinâmica – o equipamento	39
2.3.3 Penetração do DCP	40
2.3.4 Cone de penetração dinâmica automatizado	42

2.3.5 Índice de penetração (DN)	43
2.3.6 Correlações de resultados do DCP com o CBR	43
2.3.7 Aplicação do DCP no controle de qualidade da compactação	45
2.3.7.1 <i>Materiais de reaterro</i>	45
2.3.7.2 <i>Camada de base granular</i>	46
2.3.7.3 <i>Reaterros de trincheiras nos drenos do pavimento</i>	47
2.3.7.4 <i>Avaliação do desempenho das camadas do pavimento no processo de reabilitação</i>	47
2.3.8 Fatores que afetam os resultados do DCP	48
2.3.8.1 <i>Efeitos dos materiais</i>	48
2.3.8.2 <i>Efeito do confinamento lateral</i>	49
2.3.8.3 <i>Efeito do atrito lateral</i>	49
2.3.9 Vantagens do DCP	49
2.4 Ensaio de Califórnia Bearing Ratio (CBR)	50
2.4.1 Ensaio de CBR “in situ”	51
 CAPÍTULO 03	 52
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 Método	52
3.2 Materiais	52
3.2.1 Características geotécnicas do local de realização dos ensaios	57
3.3 Ensaio em campo	57
3.3.1 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)	58
3.3.1.1 <i>Equipamento</i>	58
3.3.1.2 <i>Ensaio do DCP</i>	61
3.3.1.3 <i>Processamento dos dados</i>	62
3.3.2 CBR “in situ”	63
3.3.2.1 <i>Equipamento</i>	63
3.3.2.2 <i>Ensaio de CBR “in situ”</i>	63

3.4 Ensaio em laboratório	64
3.4.1 Ensaio do DCP em laboratório.....	65
3.5 Correlações e comparações (DCP/CBR).....	65
CAPÍTULO 04	66
4.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
4.1 Características do material ensaiado (subleito)	66
4.1.1 Ensaio em laboratório	66
4.1.1.1 <i>Granulometria, índices de consistência e classificação dos solos</i>	66
4.1.1.2 <i>Compactação e CBR</i>	67
4.1.2 Ensaio em campo	69
4.1.2.1 <i>Massa específica aparente seca e CBR "in situ"</i>	69
4.1.2.2 <i>Cone de Penetração Dinâmica (DCP)</i>	70
4.1.2.2.1 <i>Índice de penetração (DN)</i>	72
4.2 Correlação entre DCP e o CBR "in situ"	74
4.3 CBR "calculado" a partir do índice de penetração (DN)	77
4.4 Relação CBR e DCP "in situ"	81
4.5 Relação entre CBR e DN obtidos em laboratório	86
4.6 Método proposto	88
4.6.1 <i>Análise do tráfego</i>	88
4.6.2 <i>Subleito</i>	89
4.6.3 <i>Camadas do pavimento</i>	89
4.6.4 <i>Dimensionamento da espessura do pavimento</i>	90
CAPÍTULO 05	97
5.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	97
5.1 <i>Conclusões</i>	97
5.2 <i>Sugestões</i>	98
CAPÍTULO 06	97

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	104
ANEXO AA – Locação dos Pis e PVs no Aeroporto de Parnaíba - PI	105
ANEXO AB – Perfis de sondagem	106
ANEXO AC – Exemplos de dimensionamento	107

CAPÍTULO 01

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

O desenvolvimento de técnicas de investigação "in situ" dos solos tem sido, nas últimas décadas, uma tendência mundial. A necessidade de utilização de amostras indeformadas e a impossibilidade de obtenção dessas amostras, em alguns tipos de solos, justificam e corroboram a elaboração de novos processos de avaliação da resistência dos solos.

Os materiais analisados "in situ", por meio de ensaios geotécnicos, por incorporarem a maioria das propriedades naturais e por envolverem uma grande massa de solo, podem representar mais fielmente as condições do solo, o que é de fundamental interesse na Engenharia de Pavimentos.

Os ensaios em campo envolvem equipamentos pesados e de difícil locomoção, de instalação, e inicialmente apresentam algumas limitações, comparadas aos ensaios em laboratório. Isto os tornam, em muitos casos, onerosos e restritos a obras de grande porte. Porém, as condições em que são realizados esses ensaios favorecem uma análise mais realista das variáveis sob observação, e trazem, para si e em sua defesa, argumentos positivos de uma grande parte de pesquisadores em todo mundo.

O desenvolvimento do Cone de Penetração Dinâmica (DCP) foi e é uma das tentativas de resposta à necessidade de um dispositivo simples e rápido para a caracterização de solos utilizados na pavimentação. Foi introduzido e inicialmente desenvolvido em 1956 por Scala como uma técnica de avaliação "in situ" da resistência das camadas do solo (AMINI 2003).

Os custos de execução e de manutenção dos pavimentos urbanos oneram de forma significativa os orçamentos das prefeituras. Os danos que ocorrem nestes tipos de pavimentos têm causas em diversos fatores como o clima, o excesso de tráfego, a infiltração de água, problemas construtivos, dimensionamento, execução e manutenção inadequadas de obras de prestadoras de serviços de água, esgoto, telefonia e energia.

O dimensionamento, a avaliação e os serviços de manutenção, visando à obtenção de um nível mínimo de serventia das vias urbanas, não obtêm resultados adequados, visto que os métodos de dimensionamentos preconizados por órgãos do governo não se adaptam à realidade da maioria destas vias, principalmente nas periferias das grandes cidades brasileiras.

Os pavimentos urbanos, em geral, são construídos adotando-se uma estrutura similar aos pavimentos rurais ou de rodovias. Entretanto verifica-se que, para o caso específico de vias de baixo volume de tráfego, ocorre um superdimensionamento das camadas do pavimento. Estes pavimentos terão componentes característicos de vias mais solicitadas, acarretando em um erro majorado de solicitação de tráfego. Associado a isto, a estrutura de pavimentos em periferias de grandes cidades do Nordeste brasileiro é sobreposta com uma camada de paralelepípedos como revestimento o que pode vir a acrescentar uma margem de segurança, desnecessária.

Atualmente, existe a necessidade de aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento, para pavimentos de vias urbanas. Um método com uma composição de tráfego, e uma caracterização mais realística possível das condições da estrutura do material das camadas e do subleito, pode gerar uma economia significativa no orçamento destinado a elaboração de projetos e a execução destes pavimentos.

1.2 Objetivos

Os objetivos gerais desta pesquisa são: estabelecer uma correlação entre os valores de Índice de Penetração (DN), em mm/golpe, obtidos com o ensaio do DCP, e os valores do CBR do subleito; e propor um método de dimensionamento de pavimentos para vias urbanas considerando um volume de tráfego adequado as suas realidades.

Como objetivos específicos, têm-se:

- verificar se a penetração equivalente ao primeiro golpe exerce influência nos resultados sobre as condições estruturais da camada penetrada como um todo;
- verificar a eficácia das correlações entre o DN e o CBR para o tipo de solo estudado e nas condições estabelecidas;
- comparar os valores dos CBRs "calculados", a partir dos valores obtidos com o DCP "in situ", pelas diversas correlações existentes na literatura disponível;
- realizar o ensaio do DCP em corpos de provas, sem imersão, moldados na energia do Proctor normal (12 golpes) em laboratório, e comparar os valores, entre o CBR "calculado" e o obtido, na mesma energia;
- realizar um estudo comparativo sobre métodos de dimensionamento de pavimentos do DNER e o método proposto neste trabalho;
- verificar se o DCP pode ser uma ferramenta rápida, versátil, e se é um equipamento adequado para a avaliação "in situ", comparado com os demais ensaios convencionais.

1.3 Organização do trabalho

O relato encontra-se dividido em um volume distribuído em seis capítulos, da seguinte forma:

Introdução e Objetivos [Capítulo 01] – é descrita uma visão geral do trabalho, a justificativa e os objetivos a serem alcançados.

Revisão da Literatura [Capítulo 02] – são discutidos e descritos assuntos relacionados a: classificação de pavimentos, estruturas das camadas que os compõem, métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, cone de penetração dinâmica (DCP), com breve histórico, correlações existentes, aplicações atuais, fatores que afetam os resultados, vantagens e suas limitações.

Materiais e Métodos [Capítulo 03] – são relatados aspectos, considerados importantes, sobre método de pesquisa, materiais e métodos dos ensaios realizados em laboratório e em campo que serviram de subsídios ao desenvolvimento da proposta.

Apresentação e Análises dos Resultados [Capítulo 04] – são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental do trabalho.

Conclusões e Sugestões [Capítulo 05] – expõe-se as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

Referências Bibliográficas [Capítulo 06]. – são mostradas todas as referências consultadas para a realização deste trabalho.

Anexos – dados e informações adicionais utilizados na pesquisas.

CAPÍTULO 02

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pavimento

2.1.1 Generalidades

Pavimento é a superestrutura, constituída por um sistema de camadas finitas de diferentes materiais, colocados em contato, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito, com infra-estrutura ou terreno de fundação, denominado de subleito.

A estrutura do pavimento é construída sobre o terrapleno e se destina, técnica e economicamente, a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los; melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança; resistir aos esforços horizontais (desgastes), tornando mais durável a superfície de rolamento, entre outras características.

O subleito é o terreno de fundação, não sendo considerado como camada do pavimento, deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam de forma significativa, as cargas impostas pelo tráfego, transmitidas pelo pavimento. A profundidade denominada de subleito deve situar-se numa faixa de 0,60 a 1,50 m (DNER, 1996). Segundo Senço (1997), a sondagem do subleito de um pavimento pode ter profundidades de até três metros abaixo da superfície, considerando como fundação efetiva profundidades variando de um metro a um metro e meio, aproximadamente.

2.1.2 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis e rígidos.

Pavimento flexível - É aquele em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento. É dimensionado, normalmente, à compressão e à tração na flexão, provocadas pelo aparecimento de bacias de deformações sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 1997). Sua estrutura é constituída de uma ou mais camadas de espessuras finitas, com revestimento normalmente betuminoso. No caso em que algumas das camadas subjacentes ao revestimento betuminoso, for cimentada, diz-se que o pavimento é semi-rígido. Esse tipo de pavimento gera pequenas áreas de distribuição de carga e grande pressão na fundação do pavimento. É constituído de revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, como representado esquematicamente na Figura 2.1.

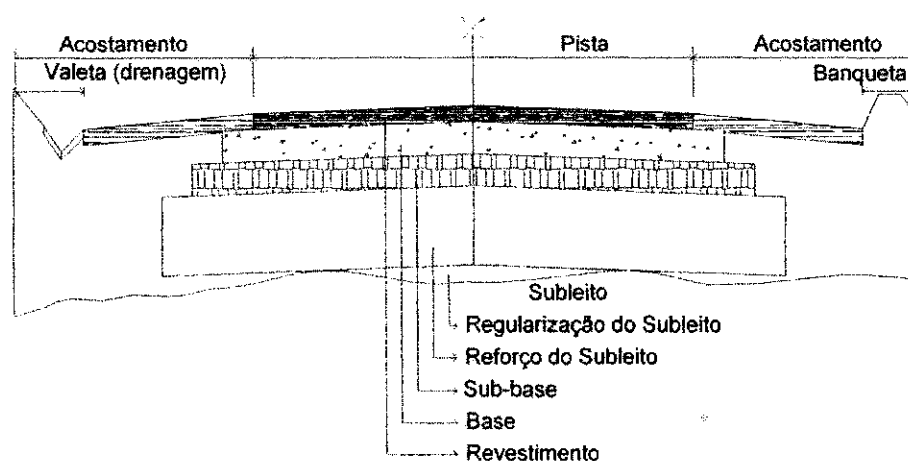


Figura 2.1 – Esboço representativo das camadas do pavimento flexível.

Pavimento rígido - É aquele pouco deformável, formado por camadas que trabalham sensivelmente à tração, rompem por tração na flexão, quando sujeitos à deformações (SENÇO, 1997). As camadas são constituídas, geralmente, de placas de concreto de cimento, camada que desempenha o papel de revestimento e base, e sub-base (Figura 2.2), Este tipo de pavimento proporciona uma grande área de distribuição de carga e uma pequena pressão na fundação. O dimensionamento é comandado pela resistência do próprio pavimento.

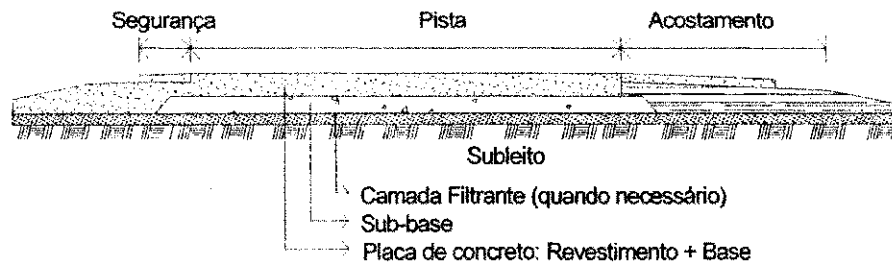


Figura 2.2 - Representação esquemática das camadas do pavimento rígido.

2.1.3 Camadas do pavimento

As camadas do pavimento podem ser classificadas em:

Regularização do subleito - Camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada, quando necessário, a preparar o leito da estrada para receber o pavimento.

Reforço do subleito - Camada de espessura constante, construída, se necessário, em casos de pavimentos muito espessos, com a finalidade de reduzir a espessura da sub-base. Tem função de complemento da sub-base, que por sua vez, tem função de complemento da base. Logo, o reforço do subleito também tem a finalidade de resistir e distribuir esforços verticais, não tendo características de absorver definitivamente esses esforços.

Sub-base - Camada complementar à base. Tem espessura constante em seção transversal e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Assim como a base, a sub-base deve apresentar estabilidade e durabilidade para resistir às cargas do trânsito, transmitidas pela base e distribuí-las adequadamente às camadas inferiores.

Base - Camada do pavimento situada imediatamente abaixo da capa de revestimento, destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Todavia, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que, a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

Os materiais empregados nas bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas devem ser constituídos de solos, areias, rochas alteradas, escórias, misturas de solos, mistura de

diferentes tipos de agregados (brita, areia, etc.) ou ainda por qualquer combinação destes materiais.

Revestimento - É a camada mais "nobre" do pavimento destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, diminuir a permeabilidade do pavimento, transmitir, de forma atenuada, as ações do tráfego às camadas inferiores, melhorar as condições de rolamento com certo nível de serventia, promover conforto e segurança ao usuário, além de resistir ao desgaste e aumentar a durabilidade do pavimento.

Revestimentos flexíveis ou betuminosos, em síntese, podem ser classificados em:

- Betuminosos: por penetração (invertida/direta) ou por mistura (concreto betuminoso usinado a quente, pré-misturado a frio ou pré-misturado a quente).
- Calçamento: alvenaria poliédrica; paralelepípedos e blocos de concreto pré-moldados e articulados.

Os revestimentos flexíveis por calçamento podem ser divididos como se segue:

Revestimento flexível por calçamento em alvenaria poliédrica - Consiste de camadas de pedras irregulares assentadas e comprimidas sobre um colchão de regularização de material granular, o qual geralmente é areia.

Revestimento flexível por calçamento em paralelepípedos - Define-se como paralelepípedo, uma peça de pedra cujo formato assemelha-se à desse sólido. Assim pavimentos em paralelepípedos são aqueles formados por "este tipo de pedra" assentes sobre um colchão de regularização (base) de material granular (areia). Os paralelepípedos podem ser de granito, gnaisse, ou originados de outros tipos de rocha de resistência equivalente, apresentando uma distribuição uniforme dos materiais constituintes e estarem isentos de veios, falhas, materiais em desagregação ou arestas quebradas. As juntas entre os paralelepípedos podem ser tomadas com o próprio material do colchão de regularização, brita, materiais de misturas betuminosas ou argamassa de cimento Portland (revestimentos semi-rígidos), ou até mesmo, uma parcela de cada um destes materiais (Figura 2.3).

Os paralelepípedos com rejuntamento de argamassa de cimento são considerados como revestimentos rígidos, devendo ser assentes sobre uma camada devidamente compactada.

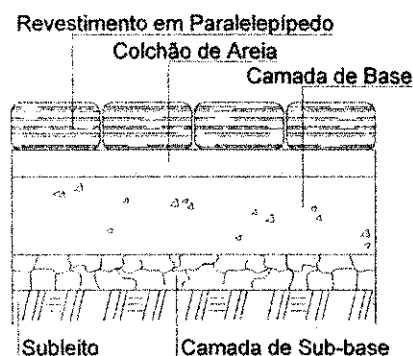


Figura 2.3 – Pavimento com revestimento em paralelepípedo (sem escala).

Revestimento flexível por blocos de concreto pré-moldados e articulados - É um revestimento construído com blocos de concreto de dimensões e formas definidas, produzidos em fábricas próprias. Geralmente as formas, dimensões, espessuras e esquemas de articulação são patenteados. Têm sido empregados com muita frequência em vias urbanas, pátios de estacionamentos, acostamentos de rodovias e paradas de ônibus (SENÇO, 1997).

2.2 Dimensionamento de pavimentos

2.2.1 Generalidades

O dimensionamento de um pavimento consiste na determinação do valor da espessura das camadas e suas respectivas geometrias, de forma que estas sejam suficientes para resistir, transmitir, e distribuir as pressões resultantes da passagem dos veículos ao subleito, sem que o conjunto sofra ruptura, deformações apreciáveis ou desgastes superficiais prematuros e excessivos.

Sobre a ótica racional, no dimensionamento deve-se verificar o estado de tensão e deformações, plásticas e reversíveis ("elásticas"), de um determinado ponto da estrutura solicitada por uma carga de roda que gera uma pressão de contato. As deformações serão tanto maiores quanto maior for a intensidade das solicitações.

Tomando por base uma carga repetida provocada pelo tráfego, e em função das condições de suporte do subleito, determina-se a espessura total do pavimento necessária e as fatias correspondentes às camadas, considerando:

- a qualidade dos materiais utilizados;
- suas especificações;
- tensões decrescentes com a profundidade;
- as condições climáticas e de drenagem;
- grau de compactação;
- velocidade de aplicação das cargas;
- e a manutenção, como também o nível de serventia que solicita o pavimento.

Os materiais que constituem as camadas do pavimento podem romper por ruptura generalizada ou localizada. Segundo Barber (apud SENÇO, 1997) as condições de um solo ao sofrer deformação ou ao se romper, são diferentes de um corpo rígido. O solo, após o rompimento, por ação de determinado esforço, adquire um novo rearranjo entre as suas partículas, que após a retirada do esforço inicial, e reaplicado, o mesmo ainda apresenta certa resistência.

2.2.2 Dimensionamento de pavimentos flexíveis

Devido a menor condição de distribuir as pressões ao subleito, comparadas com o pavimento rígido, a análise de materiais de base, sub-base e reforço do subleito, tem fundamental importância no dimensionamento.

Para este tipo de pavimento, os métodos de dimensionamento podem ser classificados em métodos empíricos e racionais. Um dos exemplos de método racional de dimensionamento

de pavimento flexível é o método baseado no princípio da teoria de Boussinesq, que admite o subleito como um semi-espaço infinito, contínuo, homogêneo, isotrópico, linear e elástico.

Os métodos empíricos são baseados em fórmulas, constantes e coeficientes decorrentes de experiências e verificações "in situ", comparando resultados de cálculos com o comportamento, no campo.

Dentre estes métodos de dimensionamento podem-se citar: o do Índice de Grupo (IG), o do Highway Research Board (HRB); e os que empregam os ensaios de resistência dos solos: o do CBR (Califórnia Bearing Ratio); o de Hveem; o do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER; e o da Prefeitura Municipal de São Paulo. A Tabela 2.1 ilustra os elementos considerados por alguns dos métodos de dimensionamento.

Tabela 2.1 – Elementos considerados por alguns dos métodos de dimensionamento.

Método	Resistência do subleito	Tráfego	Materiais empregados
IG	IG	Veículos comerciais/dias. Leve, médio e pesado	Sub-base com IG = 0
CBR	CBR	Carga por roda	Sub-base CBR \geq 20% e base CBR \geq 60 ou 80 %
Hveem	Resist. à deformação plástica (R)	Número de repetições de carga de roda (EWL)	Coesão
DNER	CBR (IS)	Número equivalente de operações do eixo padrão em um período de projeto (N)	Equivalência estrutural (K)
PMSP	CBR	Veículos comerciais/dia/direção. Muito leve, leve, médio, pesado e muito pesado	Equivalência estrutural (K)

A seguir serão descritos, de forma resumida, alguns métodos de dimensionamentos de pavimentos flexíveis.

2.2.2.1 Método do Índice de Grupo (IG)

Método concebido por Mr. D. J. Steele, Engenheiro do Bureau of Public Roads. Método empírico baseado somente no índice de grupo (IG). Este método classifica os solos dependendo apenas dos resultados de ensaios de granulometria e índices físicos, limite de liquidez e o índice de plasticidade.

A Figura 2.4 representa o ábaco de dimensionamento pelo método do IG.

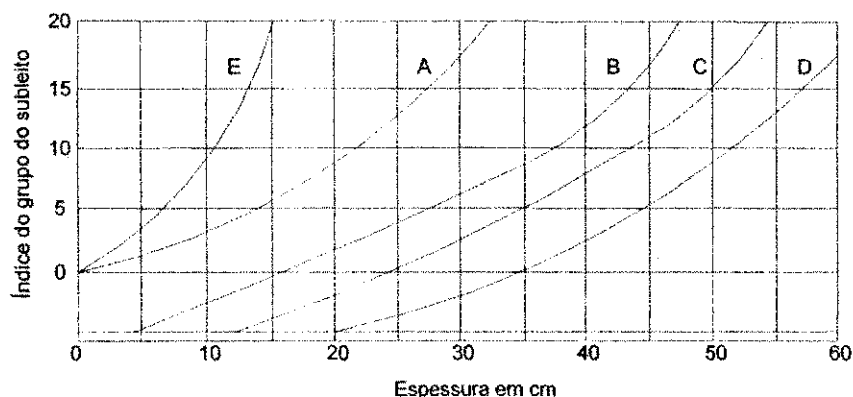


Figura 2.4 – Curva de dimensionamento: IG x espessura do pavimento (SENÇO, 1997).

Sendo: Curva A – espessura necessária de sub-base;

Curva B – espessura total de revestimento, base e sub-base para tráfego leve;

Curva C – espessura total de revestimento, base e sub-base para tráfego médio;

Curva D – espessura total de revestimento, base e sub-base para tráfego pesado;

Curva E – espessura adicional de base que pode substituir a sub-base da Curva A.

2.2.2.2 Método do Highway Research Board (HRB)

Tem como base os resultados de ensaios de caracterização dos solos. O método relaciona propostas de espessuras e materiais de camadas com os grupos de solos de classificação da PRA (Public Roads Administration), que em resumo são divididos em solos finos e granulares.

Na Tabela 2.2 estão inseridas as recomendações do HRB para as espessuras das camadas do pavimento, com base na classificação de solos.

Tabela 2.2 – Espessuras recomendadas – carga máxima de 10.000 lb (4095 kg).

Grupo	A-1-b NP	A-1-a PL	A-3	A-1-b NP	A-2-b PL	A-4 A-4-7	A-5 A-5-7	A-6	A-7
Espessura recomendada em cm									
Revestimento	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Base	0	13	13	15	20	20	20	20	20
Sub-base	0	0-30	0	0	0-30	5-40	10-40	0-34	0-35
Total	5	18-48	18	18	20-50	30-65	35-65	25-60	25-65

Sendo: PL – plástico e NP – não plástico

2.2.2.3 Método do CBR

Constitui um método de dimensionamento empírico, baseado no ensaio de penetração CBR (Califórnia Bearing Ratio); foi idealizado por O. J. Porter no Estado da Califórnia Estados Unidos (EUA), e implementado pelo U S Corps of Engineers dos EUA. É, ainda hoje, um dos métodos de dimensionamento mais utilizados em todo mundo.

Esse método tem servido de base para diversos outros, que, embora não adotem os mesmos parâmetros para o tráfego e qualidade dos materiais das camadas, adotam o CBR para identificar a "qualidade estrutural" da fundação do pavimento (subleito), relacionando-o com a espessura total do pavimento. A Figura 2.5 ilustra o ábaco de dimensionamento utilizado nesse método.

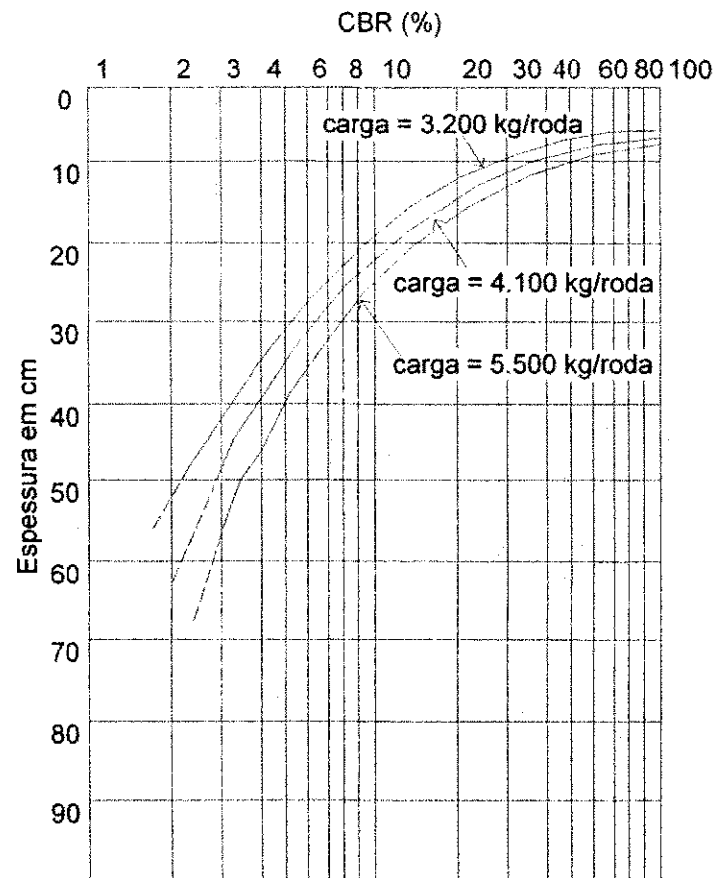


Figura 2.5 – Curvas para dimensionamento de rodovias, método do CBR (JORDÃO, 2004).

2.2.2.4 Método de Hveem

Tem como autor Francis Hveem que depois de estudar os métodos de construção e acompanhamento do desempenho de pavimentos, idealizou equipamentos especiais que melhor reproduzissem a compactação no campo e que melhor avaliassem a resistência de cada camada de um pavimento (SENÇO, 1997). Este método baseia-se em três fatores principais: efeito destrutivo ou de deformação do tráfego; resistência à deformação plástica do solo do subleito e a resistência à tração das camadas constituintes do pavimento. É relacionado à coesão dos materiais (solos) e o número de passagens equivalentes de um veículo padrão, referente à passagem de um veículo qualquer, com a espessura total necessária ao pavimento. O Quadro 2.1 e a Figura 2.6 ilustram um resumo do método.

Quadro 2.1 – Resumo das etapas do método de Hveem.

$IT = \frac{\log EWL - 2}{3} + \log EWL$	Índice de tráfego
$R = 100 - \frac{100}{\frac{2.5}{D} \left(\frac{P_v}{P_h} - 1 \right) + 1}$	Resistência do subleito
$C_m = C_1 + \left(\frac{e_2}{e_1 + e_2} \right)^2 (C_2 - C_1)$	Coesão
$e = \frac{0,095(IT)(90 - R)}{\sqrt[5]{C_m}}$	Espessura do pavimento

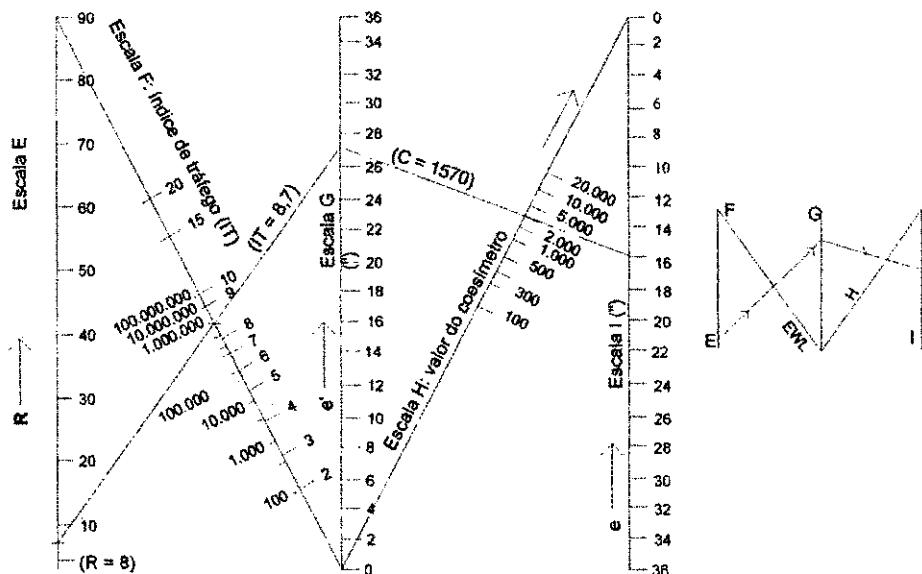


Figura 2.6 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos, método de Hveem (SENÇO, 1997).

2.2.2.5 Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER)

Trata-se de um método de dimensionamento proposto pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, com base no ensaio de CBR de O. J. Porter, no Índice de Grupo, de Steelee e no que se refere ao tráfego, nos trabalhos do U. S. Corps of Engineers, apresentados por J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Alvin. Os dados correspondentes aos coeficientes de equivalência estrutural são baseados nos resultados do The AASTHO Road Test.

O método relaciona as condições do subleito, tais como, índices de consistência, distribuição dos tamanhos de grãos, com a capacidade de suporte, denominado de índice de suporte (IS) ou CBR. Relacionado ao tráfego, o pavimento é dimensionado em função de N - número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 ton durante um período de projeto.

O valor de N é calculado pela fórmula:

$$N = 365V_m P(FC)(FE)(FR) \quad [2.1]$$

Sendo: V_m – volume diário médio de tráfego no sentido mais solicitado, no ano médio de projeto (veículos/dia/faixa mais solicitada);

P – período de projeto (anos);

FC – fator de carga;

FE – fator de eixo;

FR – fator climático regional.

A Figura 2.7 ilustra o ábaco de dimensionamento pelo método do DNER, a partir do valor de N e do CBR, com a espessura do pavimento.

A espessura do pavimento é dada pela equação:

$$E_q = K_i(h_i)$$

[2.2]

Sendo: E_q – espessura equivalente a h_i , de material padrão;

h_i – espessura do material que vai compor a camada;

e K_i – o coeficiente de equivalência estrutural. O K varia com as propriedades do material que constituem o pavimento.

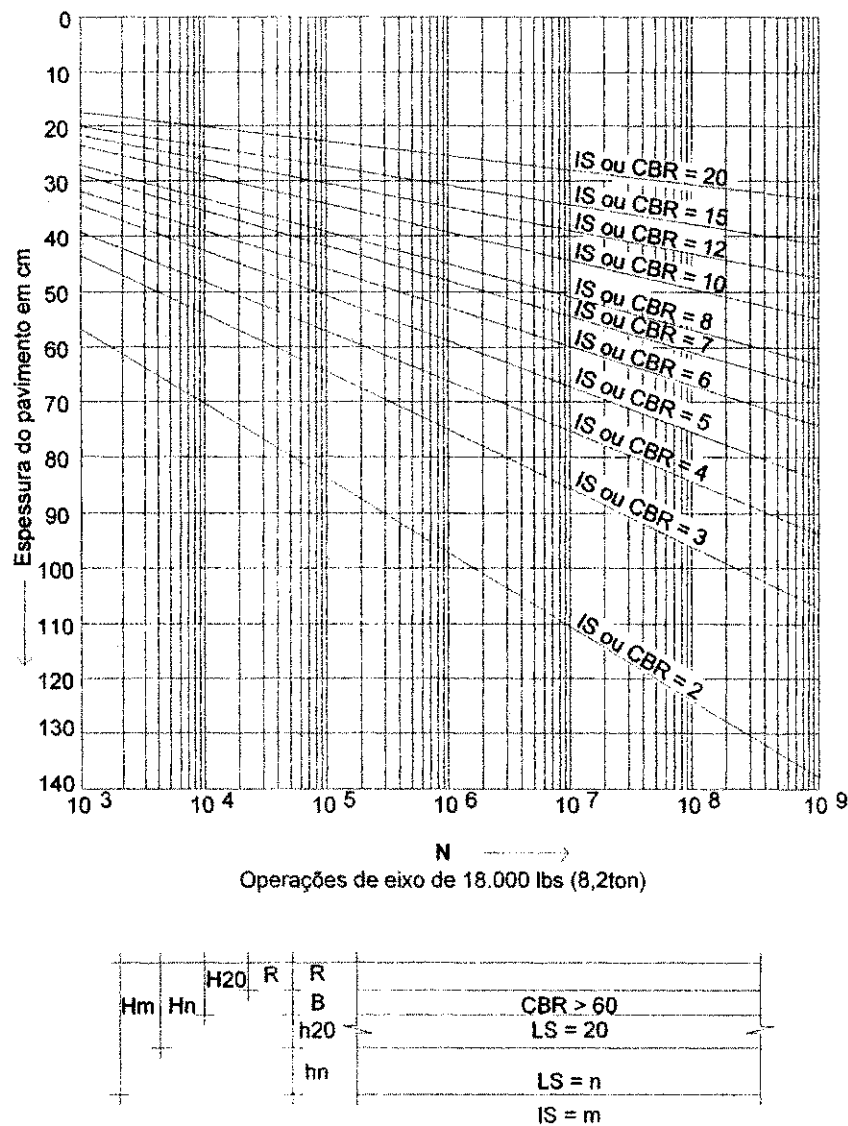


Figura 2.7 – Ábaco para dimensionamento pelo método do DNER (JORDÃO, 2004).

2.2.2.6 Método da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP)

É baseado no método do DNER, sendo o tráfego considerado de forma semelhante ao método do Índice de Grupo, do Highway Research Board, ou seja, a faixa de volume de tráfego representada pelo tráfego diário médio de veículos comerciais.

São relacionados neste método as características do subleito ao seu CBR. O tráfego é admitido com uma considerável variação de solicitações, incluindo o leve e o muito leve. As camadas do pavimento são analisadas em função de um coeficiente de equivalência estrutural nos mesmos moldes do método do DNER. A Figura 2.8 representa, em forma de esboço, o ábaco para dimensionamento do pavimento.

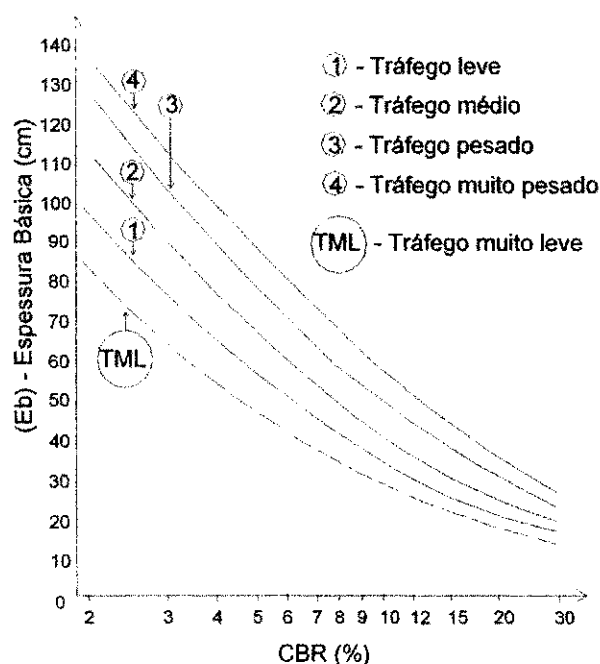


Figura 2.8 – Ábaco de dimensionamento (SENÇO, 1997).

2.3 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)

O desenvolvimento do DCP teve como objetivo estabelecer um equipamento simples e versátil para caracterizar estruturalmente, "in situ", solos do subleito. Nos últimos anos, algumas organizações mostraram considerável interesse no uso do DCP, por ser um equipamento ajustável e flexível a vários tipos de avaliações e a não existência, atualmente, de nenhuma técnica rápida disponível.

2.3.1 Breve histórico

Segundo Amini (2003), o Cone de Penetração Dinâmica (DCP) foi desenvolvido em 1956 na África do Sul como uma técnica "in situ" de avaliação da resistência das camadas do pavimento, sendo desde então, usado extensivamente na África do Sul, no Reino Unido, nos Estados Unidos, na Austrália, e em muitos outros países em todo o mundo.

Para Trichês e Cardoso (1998), o uso do DCP teve início em 1956 por Scala na Austrália, desenvolvendo um DCP portátil que se chamou Scala penetrometer. Desde então, devido a sua simplicidade e mobilidade, este equipamento vem sendo utilizado em vários países do mundo.

Em 1969, Van Vuuen, no Zimbábwe, modificou o DCP e obteve correlações entre o DCP e o CBR "in situ" (TRICHÊS e CARDOSO 1998).

Desde 1973, na Província de Transvaal, na África do Sul, o DCP foi extensamente aplicado para medidas rápidas de resistência "in situ" de camadas de pavimentos pelo Departamento de Estradas de Transvaal.

Em 1975 o DCP foi introduzido pelo Laboratório de Pesquisas de Estradas e Transporte no Reino Unido e extensamente utilizado por Kleyn na África do Sul, desde 1975 e posteriormente por Harison em 1987 na Indonésia.

Por volta do ano de 1984, Livneh e Isahai realizaram vários trabalhos de investigação de substratos e de avaliação da capacidade de suporte de pavimentos, como foi o caso do aeroporto de Ren Gurion (LIVNEH e ISAHAI, 1988).

Kleyn; Maree e Savage (1982), na África do Sul e Angelone et. al. (1991) na Argentina (TRICHÊS e CARDOSO, 1999), realizaram estudos para desenvolver um método de projeto de pavimentos com baixo volume de tráfego baseado em informações obtidas com o ensaio do DCP.

O Departamento de Transporte de Minnesota (Mn/DOT - Minnesota Department of Transportation) a partir de 1991, nos Estados Unidos, introduziu ao programa de avaliações de pavimentos, o cone de penetração dinâmica; posteriormente, foram obtidas correlações

com o valor do CBR, assim como, desenvolvidas técnicas para análise da compactação das próprias camadas de pavimentos no momento da construção.

No Brasil seu uso ainda é bastante limitado, devido a pouca divulgação de sua viabilidade entre as instituições; entretanto, o DCP tem sido estudado, pelas seguintes instituições:

- DNER (HEYN, 1986)

- Escola de Engenharia de São Carlos, da USP (ROHM e NOGUEIRA, 1990);

- Instituto de Tecnológico de Aeronáutica – ITA (VERTAMATTI e OLIVEIRA, 1997 e 1998);

- Universidade de Brasília (REZENDE, 1999);

- Universidade Federal de Santa Catarina (TRICHÉS e CARDOSO, 1998, 1999 e 2000; e TRICHÉS, DAL PAI e FONTES, 2004);

- UNICAMP (PAIVA e BERTI, 2004).

2.3.2 Cone de penetração dinâmica – o equipamento

O DCP é constituído de duas lanças metálicas acopladas por meio de um batedor (Figura 2.9). A lança inferior possui uma ponta cônica, a qual é introduzida ao solo por meio de impactos dinâmicos no colar inferior a partir da queda livre de um peso de uma altura pré-estabelecida (golpes do martelo). O diâmetro do cone é ligeiramente maior que o da lança para assegurar que a resistência à penetração seja exercida pelo cone, devido ao golpe. A resistência do material é medida pela penetração (geralmente em milímetros ou em polegadas) por golpes do martelo (CHUA, 1988; HENAU, 1982).

Em geral, para o uso na Engenharia, o projeto básico do DCP não foi alterado, significativamente, desde a sua origem. Contudo, a massa do peso do martelo foi alterada diversas vezes, assim como a ponta do cone sofreu modificações do seu projeto base (TRRL, 1986). Atualmente existem dois tipos de pontas cônicas, com 30° ou 60°. A maioria

dos equipamentos de penetração dinâmica tem um peso deslizante ("martelo") de 8 kg (aproximadamente 78 N).

Existem estudos, utilizando o ensaio do DCP, relacionados com avaliação de desempenho/compactação de solos solicitados por fundações rasas (tipo sapatas, blocos, entre outros), como também na avaliação de compactação em solos destinados a agricultura. O equipamento é ajustável à essas análises modificando-se o peso do martelo e altura de queda deste.

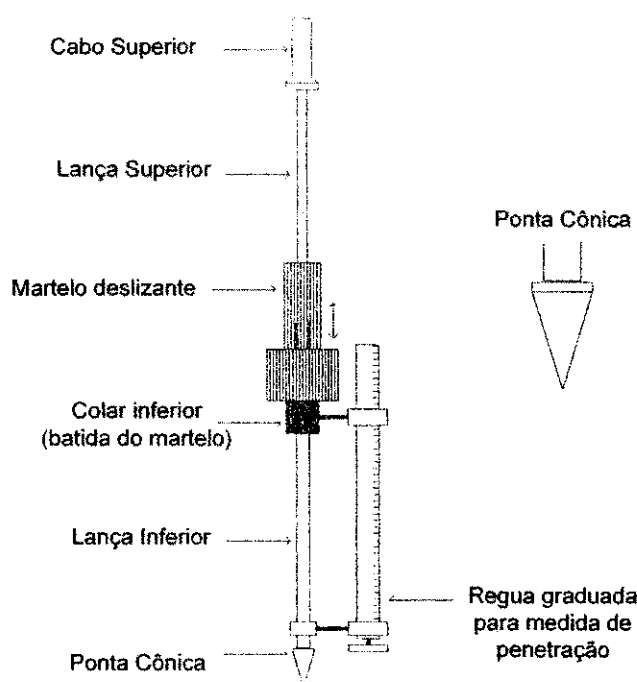


Figura 2.9 – Esboço esquemático do cone de penetração dinâmica.

Recentemente, Parker e Hammons (1998) sugeriram um cone de penetração dinâmica automatizado como forma de maximizar as suas operações durante a aquisição de dados e nos procedimentos de análise dos resultados.

2.3.3 Penetração do DCP

O DCP não tem velocidade constante de penetração no solo, bem como não é necessária a aplicação de forças contínuas. É fornecida uma quantidade conhecida de energia cinética, que faz com que ocorra a penetração a certa distância através do solo, a qual depende da energia aplicada, da geometria da ponta, e da resistência à penetração do solo.

O equipamento não está sujeito às variações do operador desde que não dependa de velocidade constante de penetração, e a energia aplicada, por estes dispositivos, é mecanicamente controlada (isto é, massa e altura de queda do martelo são fixas).

Segundo Herrick e Jones (2001), o DCP pode ser usado para calcular a resistência à penetração média do solo. Esta resistência é definida como a força aplicada pelo cone no solo que faz com que retarde a velocidade inicial de penetração, resultante do golpe do martelo, à velocidade zero. A resistência pode ser calculada como o trabalho realizado pelo solo para cessar ou impedir o movimento de penetração, dividido pela distância penetrada pelo cone.

$$R_s = \frac{W_s}{P_d} \quad [2.3]$$

Sendo: R_s = a resistência do solo (N);

W_s = o trabalho feito pelo solo (J);

P_d = a distância de penetração do solo (m).

Quando o cone é cravado no solo pelo martelo, a energia cinética do martelo é transferida ao cone. Quando o movimento do cone é impedido pela resistência do solo, sua energia cinética é nula, conseqüentemente, o trabalho feito pelo solo se iguala à energia cinética transferida ao cone de penetração quando o martelo atinge a placa de batida. Os cálculos supõem que toda a energia cinética do martelo é transferida ao cone.

A velocidade de queda do peso pode ser calculada pela seguinte equação:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a(x)} \quad [2.4]$$

Sendo: ' v_0 ' = a velocidade no tempo 0, em m/s;

' a ' = a aceleração da gravidade (9,8 m/s²);

'x' = a altura de queda, em m.

A energia cinética (KE) é obtida pela equação 2.5:

$$KE = W_s = \frac{1}{2}mv^2 \quad [2.5]$$

Sendo: 'v' = a velocidade de queda, em m/s;

'm' = a massa do martelo, em kg.

As medidas do cone de penetração podem ser expressas como o número de golpes por milímetro de penetração, ou como a resistência média do solo por profundidade do solo penetrado. Esta aproximação não supõe uniformidade do solo. Isto gera uma resistência média através da profundidade penetrada pelo cone. Estes números médios são mais informativos para os solos, os quais são relativamente uniformes dentro do avanço na profundidade penetrada a cada golpe (HERRICK e JONES, 2001).

A repetibilidade das medidas depende da uniformidade da altura de queda máxima do martelo. O erro pode ser reduzido sempre levantando o martelo até o colar superior (cabo), para em seguida permitir a queda (KLEYN e VAN ZYL, 1988).

2.3.4 Cone de penetração dinâmica automatizado

Em um esforço para automatizar a operação, o levantamento e a análise de dados, um cone de penetração dinâmica automatizado (ADCP - automated dynamic cone penetrometer) foi sugerido pelo Mn/DOT (PARKER e HAMMONS, 1998). O ADCP, projetado e construído para instalações rápidas e de simples operação, em um sistema pneumático para elevar o peso do DCP, uma armação vertical com rodas para carregar o mecanismo de elevação e de liberação do martelo, e a lança de penetração. O ADCP eleva e provoca a queda do peso, registra o número de golpes e a penetração correspondente e extrai a haste após a conclusão do teste. Nesta aproximação, a penetração é medida tipicamente por um codificador giratório e emitida a um computador.

2.3.5 Índice de penetração (DN)

O Departamento de Transporte do Estado de Minnesota (Mn/DOT – Estados Unidos) monitorou os níveis de compactação do subleito e de camadas de base do pavimento por meio de testes de densidade “in situ”. Em consequência disto, estudos foram conduzidos para estimar se há uma correlação entre o índice de penetração (DN – relação entre a profundidade penetrada e o número de golpes necessários para atingi-la) do DCP e a densidade “in situ”. A maioria dos resultados em materiais coesivos e granulares mostrou dispersões significativas entre eles. Entretanto, para os materiais granulares compactados as correlações exibem valores uniformes e com dispersões apropriadas de DN (THOMAS, 1997).

Em estudos recentes sobre a determinação de um valor limite do DN, Amini (2003) inferiu que poderia fazê-lo. Os resultados desses estudos permitiram a criação de um procedimento de teste do DCP para compactação de camadas de base granular. O objetivo, a longo prazo, foi o de reduzir ou eliminar procedimentos laboriosos e que destroem a estrutura do pavimento.

Durante a última pesquisa do Mn/DOT a partir de testes com o DCP em materiais granulares, foram observados que a falta de confinamento perto da superfície gera valores de DN não representativos e que deveriam ser descartados durante o processo de análise. Entretanto, nesse mesmo estudo, os autores sugeriram que: para materiais de bases granulares adequadamente compactados este descarte seria evitado.

2.3.6 Correlações de resultados do DCP com o CBR

Várias organizações do mundo têm algum tipo particular de DCP, e uma correlação própria entre medidas de penetração (Índice de Penetração - DN) e medidas de resistência do solo. Essas correlações foram estabelecidas com resultados obtidos em campo e em laboratório, utilizando cones de penetração de 30° e 60° e ensaios de CBR “in situ”.

Os autores desses estudos, em geral, justificam as determinações dessas correlações a partir dos seguintes argumentos: a avaliação estrutural do subleito ou de camadas de pavimentos existentes através da determinação do CBR “in situ” é trabalhosa e demorada,

dificultando a realização desse processo na maioria das situações em que o tráfego de veículos está liberado.

Segundo Trichês e Cardoso (1998), o ensaio de CBR em laboratório pode gerar uma dispersão de até 40% de variação em seus resultados. Vertamati e Oliveira (1997) concluíram que os resultados de ensaios com o DCP apresentam menor grau de dispersão dos seus resultados, comparados aos valores obtidos no ensaio de CBR.

Em laboratórios os ensaios de penetração do cone são realizados no próprio corpo-de-prova, moldado em um cilindro com as mesmas características dos moldados para a realização do ensaio de CBR. Em alguns casos, o corpo-de-prova é utilizado para ambos os ensaios. Este procedimento não é aconselhável, pois a compressão do pistão do equipamento de CBR, causa uma sobre-compactação do solo, alterando as características estruturais do material e, conseqüentemente, alterando os resultados do DCP executado em seguida.

Thomas (1997) para verificar se os valores limites do DN eram adequados, utilizando um cone de 30° de ponta, correlacionou a valores de CBR e comparou aos limites recomendados pelo Departamento de Transporte de Illinois. O autor estabeleceu a relação entre DN, espessura da estrutura do pavimento e o CBR esboçado na Figura 2.10.

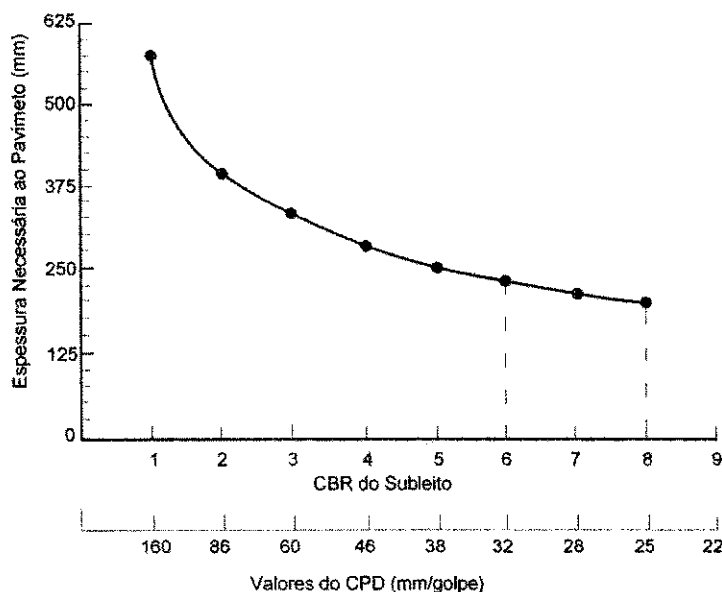


Figura 2.10 – Relação entre o DN e CBR, espessura necessária a estrutura do pavimento (THOMAS, 1997).

Em pesquisas realizadas para desenvolver uma relação empírica entre a resistência à penetração do DCP e as medidas de CBR, vários autores obtiveram correlações entre estes dois ensaios. Algumas delas são apresentadas no Quadro 2.2.

O modelo matemático adotado pelos vários autores foi o de potência linearizada com o CBR como variável dependente e o DN como variável independente (Equação 2.6).

$$\log(\text{CBR}) = a + b\log(\text{DN}) \quad [2.6]$$

Sendo: DN = Índice de penetração do DCP (mm/golpe); e 'a' e 'b' = constantes que podem variar conforme o autor da pesquisa.

Quadro 2.2 – Autores e correlações estabelecidas para CBR versus DN.

Autores	Correlação
Kleyn (1982)	$\log(\text{CBR}) = 2,62 - 1,27\log(\text{DN})$
Heyn (1986)	$\text{CBR} = 443,45/(\text{DN})^{1,30}$
Livneh (1987)	$\log(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16\log(\text{DN})$
Harison (1987)	$\log(\text{CBR}) = 2,55 - 1,14\log(\text{DN})$
Rohn e Nogueira (1990)	$\log(\text{CBR}) = 2,034 - 1,1147\log(\text{DN})$
Livneh et al. (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,45 - 1,12\log(\text{DN}_0)$
Webster et al. (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,46 - 1,12\log(\text{DN})$
Ese (1995)	$\log(\text{CBR}) = 2,44 - 1,07\log(\text{DN})$
Thomas (1997)	$\text{CBR} = 292/(\text{DN})^{1,12}$
NCDOT – North Carolina Department Of Transportation (1998, apud AMINI (2003))	$\log(\text{CBR}) = 2,60 - 1,07\log(\text{DN})$
Vertamatti e Oliveira (1998)	$\log(\text{CBR}) = 2,49 - 1,057\log(\text{DN})$
Coonse (1999)	$\log(\text{CBR}) = 2,53 - 1,14\log(\text{DN})$
Cardoso e Trichês. (2000)	$\text{CBR} = 512,64/(\text{DN})^{1,25}$ "in situ" $\text{CBR} = 151,58/(\text{DN})^{1,03}$ após imersão
Paiva e Berti (2004)	$\log(\text{CBR}) = 2,61 - 1,02\log(\text{DN})$, "in situ" $\log(\text{CBR}) = 2,59 - 1,01\log(\text{DN})$, em laboratório

2.3.7 Aplicação do DCP no controle de qualidade da compactação

2.3.7.1 Materiais de reaterro

Os níveis de compactação do subleito e das camadas de base do pavimento são determinados por meio de ensaios de densidade "in-situ". Em um esforço para determinar se há uma correlação entre o índice de penetração (DN) do DCP e a densidade "in-situ" na

compactação de materiais de reaterro, alguns testes foram executados recentemente. A maioria dos resultados dos testes indica demasiada variação com os resultados do DCP para se aplicar apenas uma correlação (BURNHAM e JOHSON, 1993; SIEKMEIER, BURNHAM E BEBERG, 1998)

Siekmeier, Young e Beberg (1999), como parte do estudo do Departamento de Transporte de Minnesota (Mn/DOT), investigaram a correlação entre resultados do DCP e a compactação dos solos que consistem na mistura de areia argilosa e siltosa. Correlacionaram primeiramente o DN do DCP ao CBR, e compararam com relações publicadas anteriormente. Concluíram que não existe uma boa correlação entre os resultados do DCP e grau de compactação. Os autores justificaram tais resultados, em parte, devido a falta de uniformidade da mistura do solo no local.

2.3.7.2 Camada de base granular

O Mn/DOT sugere esta aplicação para reduzir o tempo de ensaio e ao mesmo tempo obter um controle de qualidade mais consistente na compactação de camadas de base. Segundo Amini (2003), usando este procedimento, imediatamente depois da compactação de cada camada de base com material granular, os testes com o DCP são conduzidos para assegurar que o DN seja inferior a 19 milímetros por golpe (0,75 polegada por golpe).

O DN diminui significativamente com o aumento no tempo de compactação dos materiais e com a oscilação do carregamento do tráfego. Usando este método, o teste com o DCP fornece resultados coerentes das camadas de base que foram adequadamente compactadas a partir das penetrações inferiores ao limite estabelecido. Em caso de penetrações acima do limite pré-estabelecido, são necessários outros tipos de ensaios.

Siekmeier, Burnham e Beberg (1998), baseados nas relações do Mn/DOT, revisou a taxa de penetração limitando aos seguintes valores:

- 15 mm/golpe nos 75 milímetros superiores (3.0 in);

- 10 mm/golpe em profundidades entre 75 e 150 milímetros (3 e 6 in);

- 5 mm/golpe em profundidades abaixo de 150 milímetros (6 in).

A taxa de penetração é influenciada pela umidade, pelo tempo de instalação e pelo tráfego na construção. Os testes dependem da correta colocação da ponta do cone no solo e da severidade das medidas no início do teste. Recomenda-se que:

- o teste deve ser executado após a compactação e quando o material da base não esteja com um teor de umidade alto;
- o tráfego na construção deve ser distribuído uniformemente;
- pelo menos dois testes do DCP devem ser conduzidos em locais selecionados dentro de cada 800 metros cúbicos ao longo da base construída.

2.3.7.3 Reaterros de trincheiras nos drenos do pavimento

O Mn/DOT indica que o teste com o DCP é confiável e eficaz com relação à compactação destas trincheiras, imediatamente após a instalação das obras de saneamento do pavimento. O teste é conduzido para assegurar que o índice de penetração seja inferior a 75 mm/golpe. O material compactado deve ser testado a cada 150 mm para verificar a qualidade de execução da obra (SIEKMEIER, BURNHAM E BEBERG, 1998).

2.3.7.4 Avaliação do desempenho das camadas do pavimento no processo de reabilitação

Segundo Amini (2003), o DCP foi projetado originalmente para ser usado como uma ferramenta de avaliação das condições do pavimento e das espessuras das suas camadas no estudo de reabilitação. Entretanto, esta ferramenta tem sido pouco utilizada pois não são estabelecidos valores limites de DN, que possam ser usados na análise da resistência do solo compactado. O Mn/DOT - Estados Unidos, com base em uma pesquisa realizada com diversos solos, estimou limites para o DN. Durante este estudo, foram realizados, aproximadamente, 700 testes com o DCP no subleito, na sub-base, e em camadas de base durante os processos de construção de pavimentos.

Baseado na análise dos testes do DCP do Mn/DOT, os seguintes valores limites de DN foram sugeridos para o uso na Engenharia Geotécnica, ao analisar os resultados do teste do DCP realizado durante um estudo de reabilitação:

Material Silte/Argila - $DN < 25 \frac{\text{mm}}{\text{golpe}}$

Material granular - $DN < 7 \frac{\text{mm}}{\text{golpe}}$

Estes valores supõem confinamento adequado perto da superfície em análise. Uma observação especial deve ser dada aos valores acima, os quais foram determinados independentes dos efeitos da umidade. Os efeitos da umidade são muitas vezes responsáveis pela grande variação dos resultados de teste de DCP.

2.3.8 Fatores que afetam os resultados do DCP

Os resultados do ensaio com o DCP, assim como qualquer tipo de ensaio destinado a medir propriedades dos solos, podem ser influenciados por alguns fatores, em maior ou menor grau. A seguir serão descritos alguns destes fatores.

2.3.8.1 Efeitos dos materiais

Diversos autores estudaram a influência dos fatores no Índice de Penetração (DN) no DCP. Kleyn (1975) indicou que a umidade, a distribuição dos tamanhos de grãos, a densidade, e a plasticidade são importantes propriedades dos materiais que exercem influência sobre a obtenção do DN.

Hassan (1996) realizou um estudo sobre os efeitos de diversas variáveis no DN. O autor conclui que, para solos de granulometria fina, a umidade, a classificação do solo, a densidade seca e as tensões de confinamento exercem influência significativa sobre o DN. Para solos de granulometria grossa, o DN é influenciado, principalmente, pela uniformidade e pelas tensões de confinamento.

Quando é usado em materiais da camada de base, o DCP produz, em geral, a elevação de resultados e, às vezes, errôneos. O tipo, a espessura e a compactação das partículas granulares afetam a penetração da ponta do cone. Quando o DCP é usado em superfícies de material asfáltico e na camada da base recomenda-se que os resultados destes materiais sejam vistos com cautela.

2.3.8.2 Efeito do confinamento lateral

Livneh, et al. (1995) executaram um estudo do efeito do valor da tensão de confinamento lateral com o DCP nas camadas do pavimento e na avaliação do subleito. Os resultados indicam que não há nenhum efeito do confinamento lateral na estrutura dos pavimentos. Há, entretanto, um efeito do confinamento lateral das camadas de asfalto. A causa destes efeitos geralmente é uma diminuição no valor do DN.

Segundo os autores, toda dispersão entre valores obtidos para materiais confinados e não confinados da estrutura rígida, ou no caso de materiais granulares, é devido ao atrito desenvolvido na lança do DCP pela penetração inclinada ou por um colapso do material granular na superfície da lança durante a penetração.

2.3.8.3 Efeito do atrito lateral

Devido o nivelamento do DCP não ser completamente vertical, ao penetrar através do solo, a resistência à penetração é aparentemente mais elevada devido ao atrito lateral. Essa resistência aparentemente mais elevada pode também ser causada ao penetrar em um material granular articulado. Este efeito é geralmente pequeno em solos coesivos. Livneh (2000) sugere o uso de um fator da correção para os valores de DCP/CBR para o efeito do atrito lateral, como forma de considerar os resultados os mais representativos possíveis.

2.3.9 Vantagens do DCP

O DCP é uma ferramenta extremamente versátil de avaliação no projeto e na construção do pavimento. Algumas de suas principais vantagens são:

- uma larga variedade de aplicações incluindo determinação de CBR, módulo de resiliência, resistência à compressão não confinada, e resistência ao cisalhamento, assim como, seu uso na avaliação de desempenho das camadas do pavimento, controle de qualidade de compactação de camadas de base granular, subleito, extremidades de drenos no pavimento, entre outras;

- é relativamente rápido na obtenção de resultados e efetivamente econômico, comparado aos demais ensaios convencionalmente usados. O próprio custo para aquisição do equipamento é baixo;
- os resultados, na maioria das vezes, quando não é necessária velocidade constante de aplicação de golpes, não são influenciados pelo operador;
- a execução do ensaio é relativamente simples, podendo ser realizado por apenas dois operadores;
- é um equipamento portátil, de fácil manuseio e transporte;
- o ensaio com o DCP pode ser conduzido e os resultados analisados pelo pessoal com treinamento relativamente simples.

Algumas das limitações do DCP incluem:

- a elevada variação dos resultados no caso de grandes extensões com materiais granulares;
- o uso de DCP para materiais com diâmetro nominal das partículas de agregados superior a 2 polegadas é questionável;
- algumas das relações existentes de resistência são somente aplicáveis a determinados tipos de materiais e circunstâncias, e não a todos os casos.

2.4 Ensaio Califórnia Bearing Ratio (CBR)

O ensaio para a determinação do CBR foi idealizado por O. J. Porter, Diretor da Divisão de Materiais do California Highway Department, em 1929, para avaliar a capacidade de suporte relativa dos subleitos, comparado a de uma brita. O CBR pode ser definido como a relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada, ou

material equivalente, exigindo a pressão de 1.000 psi para a penetração de 0,1 " ou 1.500 psi para a penetração de 0,2 ", sendo adotado o maior entre estes dois valores (SENÇO, 1997).

Os resultados obtidos com o ensaio de CBR, além da penetração, incluem o cálculo da expansão da amostra, durante o período de saturação por imersão do corpo-de-prova.

Sendo um ensaio padronizado, o mesmo possui muitas limitações, devido a sua natureza empírica. Logo, é de fundamental importância que todos os procedimentos estabelecidos, tais como velocidade de aplicação de penetração, tamanho do pistão, dimensões da amostra, sejam obedecidos.

2.4.1 Ensaio de CBR "in situ"

Os ensaios de CBR "in situ" são apropriados para a avaliação de pavimentos, uma vez que refletem as condições reais de compactação e umidade de equilíbrio em que se encontram os materiais das camadas sob ensaio. Vieira Filho (1993) afirma que o comportamento do subleito dos pavimentos de estradas e aeroportos é influenciado diretamente pelas condições climáticas. Logo, análises conclusivas, baseadas em resultados obtidos em laboratórios, podem ter significado contraditório.

O ensaio de CBR "in situ" foi desenvolvido pelo "U. S. Corps of Engineers"- Road Research Laboratory em 1952 (VIEIRA FILHO, 1993). A sua realização, após a preparação da superfície, com o nivelamento do solo para assentamento do pistão, é feita de maneira análoga ao procedimento executado em laboratório, com exceção ao que se refere submersão do solo em água, uma vez que sua realização se faz nas condições de umidade existentes (umidade de equilíbrio).

CAPÍTULO 03

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Método

Como método de trabalho, procurou-se estabelecer, a partir de análise de regressão, uma correlação entre os valores do Índice de Penetração (DN), obtidos com o ensaio do DCP, e os valores do CBR do subleito na profundidade penetrada do material estudado. Aliado a isto, realizaram-se estudos preliminares, a partir de resultados obtidos com o Cone de Penetração Dinâmica (DCP), que pudessem subsidiar a sugestão de um processo empírico para o dimensionamento de pavimentos flexíveis urbanos, com baixo volume de tráfego, assim como, para os pavimentos cujo revestimento seja constituído de paralelepípedos.

A seguir serão relatados aspectos, considerados importantes, sobre materiais e métodos dos ensaios realizados em laboratório e em campo (DCP e CBR), utilizados nesta pesquisa, e que serviram de subsídios para a metodologia proposta.

3.2 Materiais

O subleito do pavimento do Aeroporto de Parnaíba/PI-BR constituiu o principal foco de observações para coleta de informações que serviram de subsídios para a realização da proposta contida neste trabalho. Para isso, foram realizados ensaios em campo e coletadas amostras, julgadas representativas, para ensaios em laboratório, obtidos através de abertura de poços de inspeção (PIs - Figura 3.1), em pontos aleatórios, na pista de pouso/decolagem, acessos e pátios do aeroporto.

Os dados foram levantados:

Em laboratório com amostras de solos dos Poços de Inspeções que foram caracterizadas e submetidas a ensaios de CBR.

A opção por estudar o subleito do aeroporto de Parnaíba deu-se por:

Posição – O subleito encontra-se confinado na vertical e na horizontal, condições de confinamento adequadas para a penetração do DCP;

Granulometria – A granulometria dos materiais do subleito facilitaram a execução dos furos para inserção da haste do DCP;

Umidade – O subleito está menos sujeito à variações bruscas do teor de umidade e devido a infiltrações por capilaridade, ou à percolação através de trincas superficiais no revestimento.

Representatividade – A fundação escolhida é constituída de material comum a grande parte das rodovias da região Nordeste.

A realização dos ensaios em campo e a obtenção de amostras do material do subleito foram feitas a partir das seguintes etapas:

- retirada da camada de revestimento (concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ) da pista de pouso/decolagem e acessos aos pátios, e do revestimento em concreto de cimento Portland (pavimento rígido) nos pátios (Figura 3.2);
- retirada das camadas de base e sub-base, com equipamentos tipo picareta e pás (Figura 3.3);
- nivelamento da superfície do subleito e realização dos ensaios "in situ" (Figura 3.4);
- coleta de amostras do material do subleito para ensaios em laboratório (Figura 3.5).

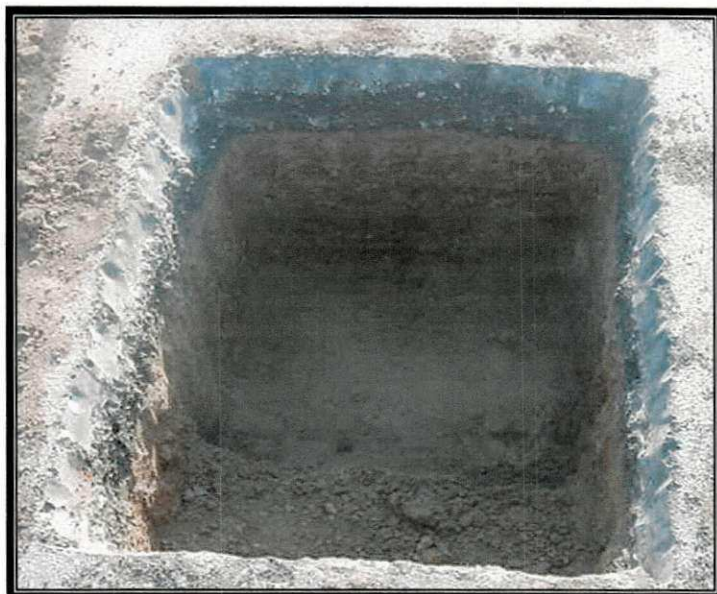


Figura 3.1 – Poço de inspeção da pista de pouso/decolagem (PI – 104).



Figura 3.2 – Abertura dos poços de inspeção (PI - 101) - retirada do revestimento em CBUQ.



Figura 3.3 – Poço de inspeção (PI - 105) - retirada da camada de base e sub-base, e coleta de amostras do material do subleito para ensaios em laboratório.



Figura 3.4 – Poço de inspeção (PI - 201) - realização dos ensaios “in situ”.



Figura 3.5 – Poço de inspeção (PI - 103) - realização de coleta de amostra de material do subleito.

Na análise dos resultados foram considerados dados e amostras contidas em dez poços de inspeção: (PIs): cinco na pista de pouso/decolagem, quatro nos acessos (“Táxi way”) e um no pátio 2 (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Localização dos furos.

Furo	Localização
PI – 101	pista de pouso
PI – 102	pista de pouso
PI – 103	pista de pouso
PI – 104	pista de pouso
PI – 105	pista de pouso
PI – 201	acesso
PI – 202	acesso
PI – 203	acesso
PI – 205	pátio
PI – 206	acesso

A localização dos furos na pista, nos acessos e pátios do aeroporto, encontra-se em planta (Anexo AA).

As espessuras das camadas do revestimento, base e sub-base foram obtidas por meio de reconhecimento visual e medição “in situ”. Dados referentes à essas informações encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Espessuras das camadas do pavimento acima do subleito estudado.

Furo	Espessuras das Camadas (cm)					
	Revestimento CBUQ	Revestimento Rígido	Colchão de Areia	Base	Sub-base	Subleito
PI – 101	0 – 15	-	-	15 – 75	-	> 75
PI – 102	0 – 15	-	-	15 – 55	-	> 55
PI – 103	0 – 17	-	-	17 – 70	-	> 70
PI – 104	0 – 20	-	-	20 – 45	45 – 70	> 70
PI – 105	0 – 10	10 – 28	28 – 33	33 – 53	53 – 78	> 78
PI – 201	0 – 20	-	-	20 – 60	-	> 60
PI – 202	0 – 17	-	-	17 – 57	-	> 57
PI – 203	0 – 20	-	-	20 – 65	-	> 65
PI – 205	-	0 – 30	30 – 35	35 – 65	-	> 65
PI – 206	0 – 17	-	-	17 – 67	-	> 67

3.2.1 Características geotécnicas do local de realização dos ensaios

Para a determinação das características do terreno foram realizados ensaios de sondagens à percussão, SPT (“standard penetration test”), no terreno do subleito, localizado nas laterais da pista de pouso/decolagem e pátios.

Os poços de sondagens (PVs) encontram-se com sua localização na planta da pista do aeroporto no Anexo AA, assim como, os perfis obtidos no subsolo são apresentados no Anexo AB.

3.3 Ensaios em campo

Os ensaios em campo foram constituídos de: ensaio do cone de penetração dinâmica (DCP); determinação da massa específica aparente seca (“densidade in situ”, NBR - 7185), determinação do teor de umidade do solo (DNER – ME 052/94, “SPEEDY”), e CBR “in situ”.

A localização para realização dos ensaios nos PIs foi feita segundo o croqui ilustrado na Figura 3.6.

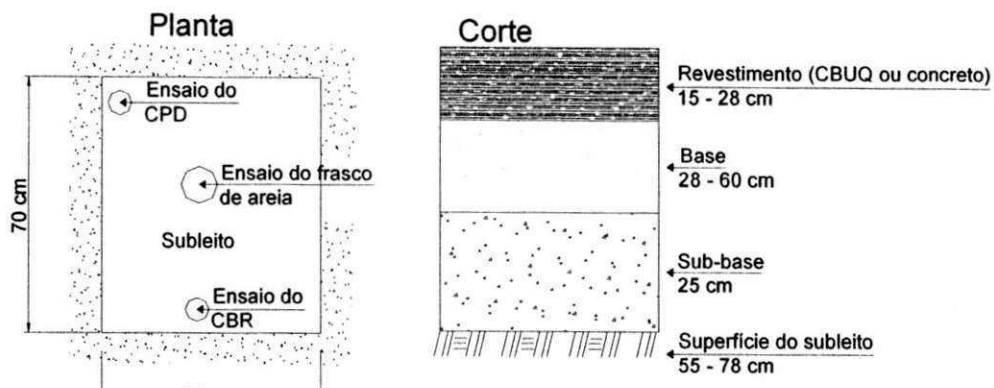


Figura 3.6 – Localização dos pontos de ensaios realizados nos PIs.

A realização dos ensaios nos PIs foi feita a partir da seguinte ordem:

- densidade "in situ" e unidade natural;
- cone de penetração dinâmica (DCP);
- CBR "in situ".

3.3.1 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)

3.3.1.1 Equipamento

Como representado nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9, o equipamento é constituído dos seguintes componentes:

- duas lanças de aproximadamente 20 mm de diâmetro;
- uma ponta cônica de 30° na lança inferior, responsável pela penetração do equipamento ao solo;
- um martelo com peso de 8 kg (78N), caindo livremente de uma altura de 575 mm;

- um batedor, para receber os impactos do martelo, transferindo a energia cinética de queda do peso ao cone, provocando a penetração;
- uma régua graduada, para medida da profundidade de penetração;
- um colar superior da lança, para que o operador possa segurar o equipamento na vertical durante a realização do ensaio.

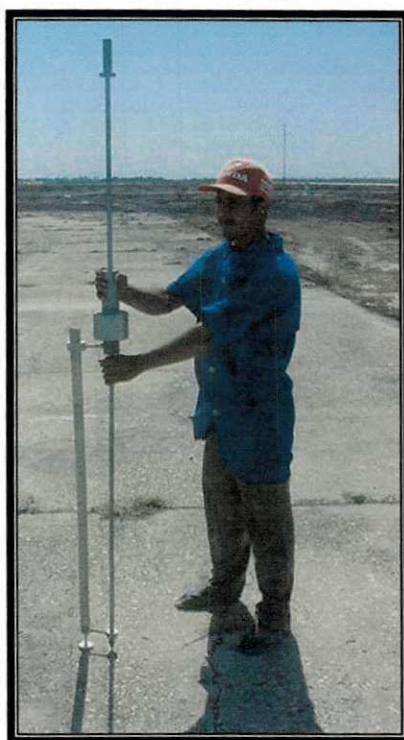


Figura 3.7 – Cone de Penetração Dinâmica – DCP.

O batedor é rosqueável para o encaixe superior e inferior das duas lanças. O equipamento pode ser desmontado (Figura 3.8). As peças constituintes possuem roscas para facilitar o encaixe umas nas outras, podendo ser transportadas com facilidade.



Figura 3.8 – DCP (desmontado).

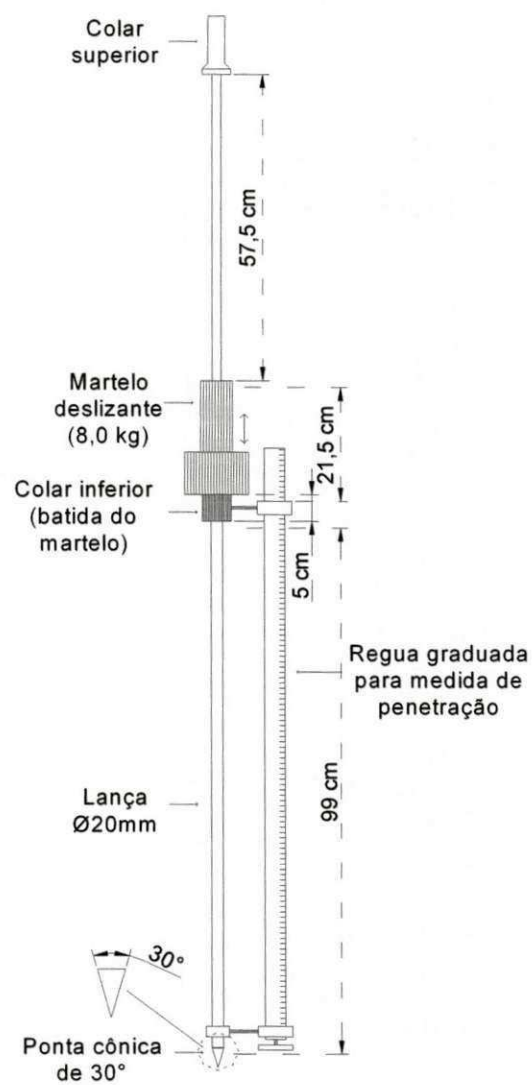


Figura 3.9 – Esboço do DCP utilizado no trabalho.

3.3.1.2 Ensaio do DCP

O método para a realização do ensaio com o DCP é baseado nas especificações do Departamento de Transportes de Minnesota dos Estados Unidos (Mn/DOT). Anteriormente à realização do ensaio optou-se em fazer:

- o nivelamento da superfície do subleito para torná-la mais uniforme possível. Para essa atividade, procurou-se observar que as condições de resistência do solo não tinham sido alteradas por algum processo de perfuração manual ou mecânico;
- a retirada de possíveis camadas superficiais que não representavam o subleito.

Após as atividades descritas acima, o equipamento do DCP foi colocado na superfície do subleito para que o seu peso próprio provocasse uma penetração inicial (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Posicionamento do DCP para início do ensaio.

A realização do ensaio, propriamente dito, foi alcançada a partir das seguintes etapas:

- posicionamento do DCP, mantido sempre na vertical, para que o peso caísse sempre livremente e não houvesse atrito lateral durante o processo de penetração da ponta cônica;

- nivelamento da régua graduada com a superfície do solo, para efetivação das medidas exatas de penetração;
- registro da penetração inicial, obtida com o assentamento peso próprio do equipamento;
- elevação do peso (martelo) até altura máxima de queda;
- liberação do martelo em queda livre;
- registro das penetrações, em milímetro, correspondentes a cada golpe do martelo ou somente a penetração final correspondente ao golpe de número 7 (sete).

3.3.1.3 Processamento dos dados

A penetração total foi obtida subtraindo da penetração final, correspondente ao último golpe aplicado, a penetração obtida com o assentamento do próprio peso do equipamento (inicial). As penetrações foram registradas em milímetros, para o cálculo do Índice de Penetração (DN). Para efeito deste cálculo, alguns autores desconsideram o primeiro golpe do martelo, para evitar que as condições de resistência da camada superficial, que por ventura tenham sido alteradas, possam conduzir a resultados não representativos.

Para efeito de cálculo do DN, neste trabalho, foram consideradas ambas as condições, com e sem a utilização do valor correspondente ao primeiro golpe do martelo. Tal procedimento teve como objetivo verificar a possível variação e/ou influência nos resultados finais para o cálculo do CBR "in situ".

O Índice de Penetração, em mm/golpe, foi obtido dividindo-se a penetração total pelo número de golpes. O número de golpes adotado para realização deste trabalho foi de 7 (sete), considerando que Thomas (1997) adotou 5 (cinco) golpes em seu trabalho de pesquisa, para análise das correlações do cone com a compactação dos solos.

3.3.2 CBR “in situ”

3.3.2.1 Equipamento

O equipamento utilizado para realização do ensaio de CBR “in situ” foi formado por uma estrutura de reação a partir de um macaco acoplado ao conjunto do pistão padronizado, um anel e deflectômetro. A aplicação da força de reação foi feita através da alavanca do martelo quando acionada (Figura 3.11).

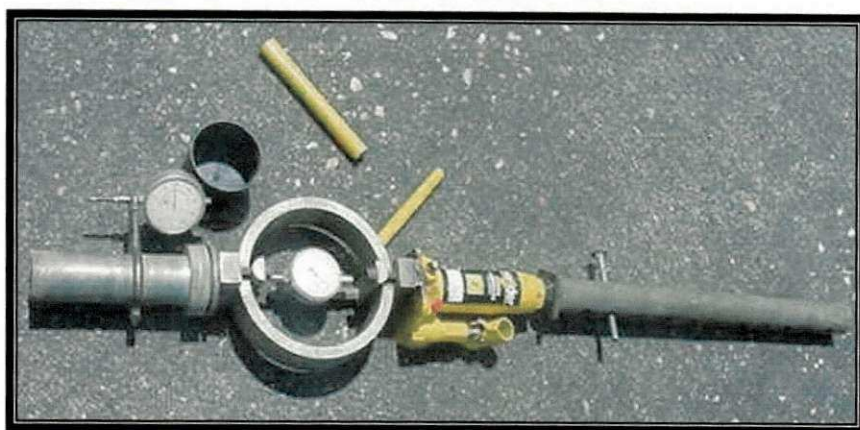


Figura 3.11 – Aparelho do ensaio de CBR.

3.3.2.2 Ensaio de CBR “in situ”

O ensaio de CBR “in situ” foi realizado segundo procedimento adaptado, baseado na metodologia sugerida para sua realização em laboratório (DNER-ME 49/94).

Em síntese, o procedimento de ensaio de CBR “in situ” consistiu em:

- aplicação de carga ao pistão padronizado, até que o conjunto macaco e acoplamento de cano, atingisse a estrutura de reação;
- realização da leitura de referência (zero) no deflectômetro;
- aplicação das cargas procurando-se estabelecer uma velocidade constante de penetração de 1,27 mm/minuto;

- determinações intermediárias para penetrações de 0,63; 1,27; 1,90; 2,54 e 5,08 mm, com medidas respectivas de força no deflectômetro.

A Figura 3.12 ilustra a execução do ensaio.



Figura 3.12 – Realização do ensaio de CBR “in situ”.

3.4 Ensaio em laboratório

O material coletado em cada poço de inspeção (PI) foi condicionado em sacos, identificado e transportado ao laboratório. As amostras foram preparadas para os ensaios de caracterização conforme o método DNER-ME 41/94 e classificados segundo a HRB (Highway Research Board) e o Sistema Unificado de Classificação (Unified Soil Classification System - SUCS). Os procedimentos para análise da distribuição dos tamanhos dos grãos e índices de consistência (LL e LP) foram baseados nos métodos NBR 7181/84, DNER-ME 122/94 e DNER-ME 82/94, respectivamente. O teor de umidade foi realizado segundo o método DNER-ME 213/94.

CAPÍTULO 04

4.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental do trabalho nas etapas em laboratório e em campo.

Inicialmente são relatados os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório (granulometria por peneiramento, limites de liquidez e de plasticidade e compactação), bem como, as classificações dos materiais segundo a HRB e o SUCS. Em seguida, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios com o cone de penetração dinâmica (DCP), CBR "in situ", e as determinações da densidade "in situ" e do teor de umidade natural.

4.1 Características do material ensaiado (subleito)

4.1.1 Ensaio em laboratório

4.1.1.1 *Granulometria, índices de consistência e classificação dos solos*

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão apresentadas as distribuições dos tamanhos dos grãos, os índices de consistência (LL e LP) e as classificações das amostras do material do subleito, segundo o que preconizam os métodos de classificação SUCS e HRB.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento.

	# Pen.	PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
P (%)	1"	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	3/8"	97	99	98	99	100	97	100	100	98	100
	n° 4	93	98	95	96	99	93	95	96	93	99
	n° 10	91	97	90	92	93	91	92	93	90	96
	n° 40	79	82	79	79	80	76	78	75	77	78
	n° 200	11	13	15	17	16	13	14	15	13	12

Sendo: P (%) = Porcentagem que passa

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de índices de consistência e classificação dos solos.

Furo	PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
LL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
IP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
HRB	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4
SUCS	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM

Os resultados dos ensaios indicam que o solo do subleito é, predominantemente, constituído de uma areia fina e siltosa (SM). Isto faz indicar que, o trecho, até a profundidade estudada, é constituído de um mesmo material.

4.1.1.2 Compactação e CBR

Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de compactação realizados com amostras coletadas do subleito nos poços de inspeções.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor modificado.

Furo	PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
Comp. 55 golpes	γ_d^{max} (g/cm ³)	1,755	1,756	1,757	1,755	1,755	1,875	1,876	1,876	1,875
	$W_{ótima}$ (%)	4,1	4,1	4,0	4,2	4,1	5,0	5,0	5,0	5,0

Com a umidade ótima obtida no ensaio de compactação na energia do Proctor modificado, molda-se o material em corpos-de-prova, nesta umidade e nas energias do Proctor normal, intermediário e modificado para a determinação dos respectivos CBRs

Nas Tabela 4.4, 4.5 e 4.6 estão mostrados os resultados obtidos através dos ensaios de CBR com amostras coletadas no subleito (PIs).

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor normal.

Furo		PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
12	γ_d (g/cm ³)	1,657	1,659	1,662	1,660	1,661	1,782	1,781	1,780	1,781	1,782
golpes	CBR (%)	8	9	8	9	8	10	11	12	11	12
	Exp (%)	0	0	0	0	0	0,04	0,03	0	0,03	0

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor intermediário.

Furo		PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
26	γ_d (g/cm ³)	1,687	1,687	1,692	1,689	1,690	1,823	1,823	1,822	1,821	1,823
golpes	CBR (%)	10	11	11	12	12	15	15	15	16	15
	Exp (%)	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0,01	0,01

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de CBR para a energia do Proctor modificado.

Furo		PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
55	γ_d (g/cm ³)	1,755	1,756	1,757	1,755	1,755	1,875	1,876	1,876	1,876	1,875
golpes	CBR (%)	17	17	17	18	19	21	21	21	19	22
	Exp (%)	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0	0,01

Os resultados apresentados na Tabela 4.7 correspondem ao CBR “final” que equivale a 95% da massa específica aparente máxima seca obtida no ensaio de compactação de Proctor modificado, na curva que relaciona o CBR e a massa específica, para as três energias.

Tabela 4.7 – Valores do CBR obtidos na curva de CBR, para 95 % da densidade obtida com 55 golpes [Método DIRENG-01-87].

Furo		PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
Final	CBR (%)	8,7	9,7	8,8	9,8	9,2	10	11,3	12,3	12	12,1

Os resultados dos ensaios de CBR indicam que o solo do subleito apresenta, em média, um CBR de 10%; 13%; e 19%, para as energias normal, intermediária, e modificada, respectivamente. Pelo Método DIRENG – 01-87, o CBR obtido, em média, foi de 10%. Esses valores indicam que a capacidade de suporte do subleito é relativamente boa, quando se considera esses dados para o dimensionamento de pavimentos rodoviários.

4.1.2 Ensaio em campo

4.1.2.1 Massa específica aparente seca e CBR "in situ"

As determinações da massa específica aparente seca "in situ", do teor de umidade natural e do CBR "in situ" obtidos em poços de inspeção com profundidades que variaram entre 58 e 81 cm abaixo da cota de revestimento, são apresentados na Tabela 4.8.

Os valores do CBR "in situ" apresentaram uma média de 18%, com um desvio padrão de 7%, entre os diversos PIs ensaiados. Esta variação, relativamente alta no valor do CBR, pode ser interpretada como uma dificuldade inerente ao procedimento de ensaios "in situ", traduzidas pela heterogeneidade no grau de compactação, nas condições de umidade do subleito e pela dificuldade de operação desses ensaios.

Os valores médios e os desvios padrão do teor de umidade natural e de massa específica aparente seca de 5,92%; 0,91% e 1,676 g/cm³; 0,11 g/cm³, respectivamente, corroboram as observações feitas no parágrafo anterior sobre uma possível indicação das causas da variação dos valores do CBR "in situ".

Tabela 4.8 – Valores do teor de umidade, densidade e CBR "in situ" obtidos em campo.

FURO	Profundidade do Ensaio (cm)	Densidade "in situ" (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)	CBR "in situ" (%)
PI-101	78	1,553	4,70	10
PI-102	58	1,698	4,70	25
PI-103	73	1,829	5,80	20
PI-104	73	1,585	5,80	12
PI-105	81	1,662	6,40	15
PI-201	78	1,898	6,40	32
PI-202	60	1,612	7,50	14
PI-203	68	1,637	6,90	25
PI-205	68	1,644	5,80	12
PI-206	70	1,646	5,20	16

Na Figura 4.1 estão inseridos os valores de suporte estrutural (CBR) obtidos para as diferentes energias de compactação, incluindo os valores do CBR "in situ".

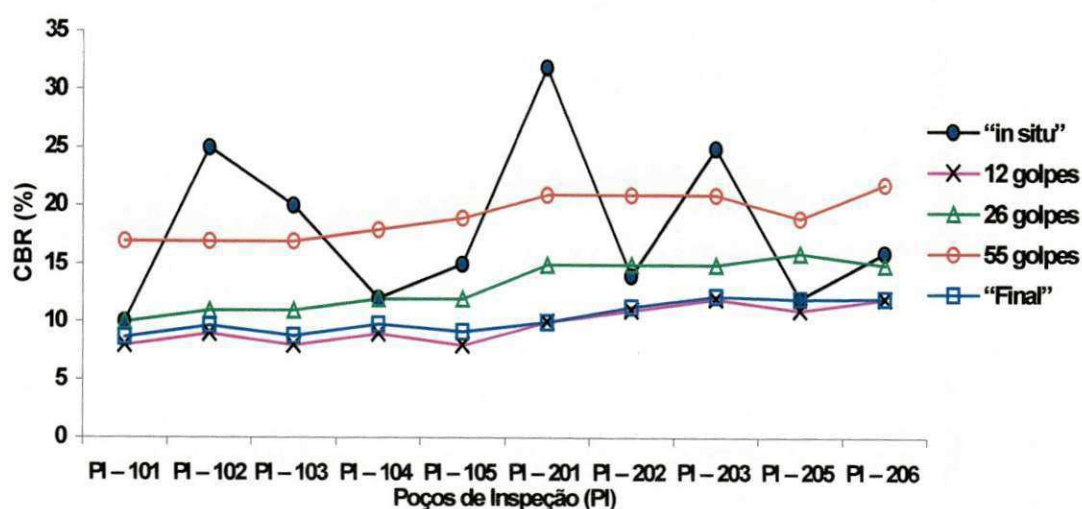


Figura 4.1 – Gráfico da variação entre os CBRs, obtidos para as várias energias, para cada poço de inspeção.

Os valores dos CBRs obtidos para as energias de 12, 26, e 55 golpes não apresentaram variação significativa em seus resultados. Isto é justificado pelo controle que é feito em laboratório durante a execução dos ensaios. Já para os valores do CBR "in situ" é visível a variação, esperada, deste parâmetro para todos os PIs.

Os dados contidos na Figura 4.1 indicam que, para o dimensionamento de pavimentos é aconselhável adotar os valores de CBR (em laboratório) obtidos para energia do Proctor normal. Isto seria justificável pela adoção das piores condições de suporte do material e estaria a favor da segurança.

Ao mesmo tempo, para adoção do CBR "in situ" no dimensionamento da estrutura do pavimento, seria necessário garantir boas condições de drenagem para evitar variações significativas no teor de umidade de equilíbrio do subleito.

4.1.2.2 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)

Na Tabela 4.9 estão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio com Cone de Penetração Dinâmica (DCP). Com esses resultados, foi lançado em gráfico, para todos os PIs, a relação entre a profundidade penetrada e o número de golpes necessários para atingi-la (Figura 4.2).

As inclinações da curva de ajuste da seqüência dos pontos ilustradas na Figura 4.2 representam os índices de penetração para todos os PIs, uma mudança nestas, significa mudança no tipo de material, na capacidade de suporte à penetração, ou de camada no avanço da penetração. Para os resultados obtidos, observa-se que não houve mudança “significativa” na inclinação das curvas, a não ser com relação a profundidade obtida com o primeiro golpe, o que pode representar uma uniformidade do material ou das camadas ao longo da profundidade do ponto de ensaio.

Tabela 4.9 – Resultados da penetração no ensaio com o DCP

Furo	PI-101	PI-102	PI-103	PI-104	PI-105	PI-201	PI-202	PI-203	PI-205	PI-206
Penetração a cada golpe										
P_{inicial} (cm)	8,5	8,9	9,1	9,1	9	9	11	10,3	7,5	7,6
1º golpe (cm)	13,3	11,8	12,1	14	11,5	11,3	14,5	12	11,1	10,7
2º golpe (cm)	15,6	13,3	14,1	16,1	14	12,6	16,7	13,2	13,2	12,3
3º golpe (cm)	17,5	14,5	15,6	18	16	13,6	18,5	14,2	15	13,7
4º golpe (cm)	19,1	15,4	16,9	19,4	17,5	14,6	20	15	16,2	15
5º golpe (cm)	20,4	16,3	17,9	20,8	19	15,4	21,4	15,7	17,4	16
6º golpe (cm)	21,8	17,2	19,2	22,1	20,4	16,1	22,6	16,4	18,5	17
7º golpe (cm)	23,2	17,9	20,3	24,3	22,3	16,8	23,7	17	19,6	17,7
P_{penetrada} (cm)	14,7	9	11,2	15,17	13,3	7,8	12,7	6,7	12,1	10,1

Sendo:

P_{penetrada} = a profundidade penetrada em cm;

P_{inicial} = profundidade penetrada com o peso do equipamento.

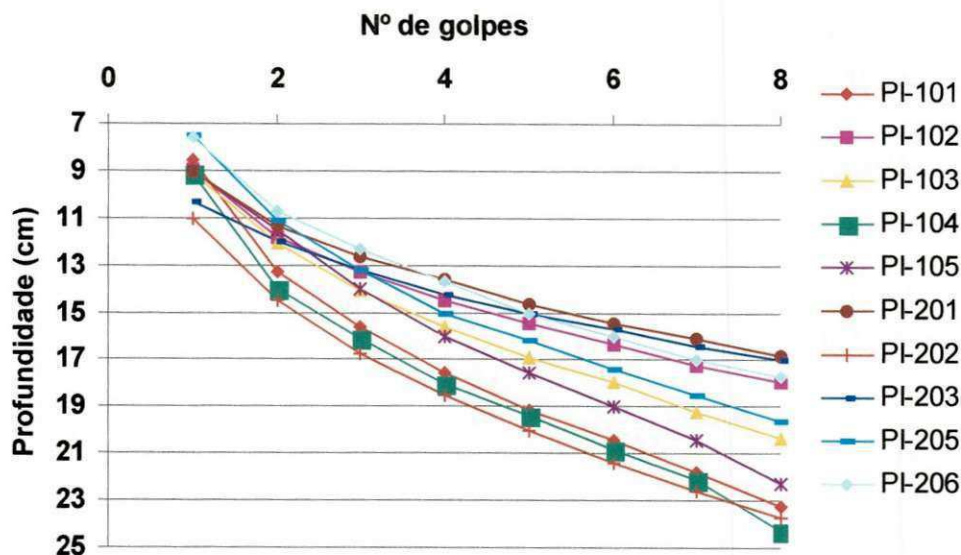


Figura 4.2 – Gráfico representativo da variação número de golpes/penetração.

4.1.2.2.1 Índice de penetração (DN)

Para o índice de penetração 'DN' há autores que não consideram o primeiro golpe do "martelo"; já outros, adotam uma redução na profundidade penetrada inicialmente para o referido cálculo. O procedimento adotado foi o de realizar cálculos simultâneos considerando e desconsiderando o primeiro golpe, para o cálculo de DN. Este procedimento teve como objetivo verificar a variação do primeiro golpe sobre os resultados finais dos valores dos CBRs estimados.

Na Tabela 4.10 estão mostrados os resultados dos índices de penetração em mm/golpe, segundo o procedimento descrito no parágrafo anterior.

Na Figura 4.3 estão representadas as variações dos valores do índice de penetração, DN em mm/golpe, assim como os valores do CBR "in situ".

Tabela 4.10 – Resultados obtidos com o DCP: índices de penetração (DN), considerando e desprezando o primeiro golpe do martelo.

Considerando o 1º golpe										
DN (mm/golpe)	21,00	12,86	16,00	21,67	19,00	11,14	18,14	9,57	17,29	14,43
Desconsiderando o 1º golpe										
DN (mm/golpe)	16,50	10,17	13,67	17,12	18,00	9,17	15,33	8,33	14,17	11,67

Os resultados dos índices de penetração (DN), apresentados na Tabela 4.10, indicam uma menor resistência do material na profundidade ensaiada, para os cálculos onde foram considerados os primeiros golpes.

Na Figura 4.3 são apresentadas às linhas de tendências em que a resistência do solo, representada pelo CBR “in situ”, se contrapõe ao valor do índice de penetração (DN). Com isso, à medida que há um incremento no valor do CBR “in situ”, o valor do DN tende a ser menor. Observa-se também, que a variação entre os valores de DN, considerando e desconsiderando o primeiro golpe, seguem esta mesma tendência.

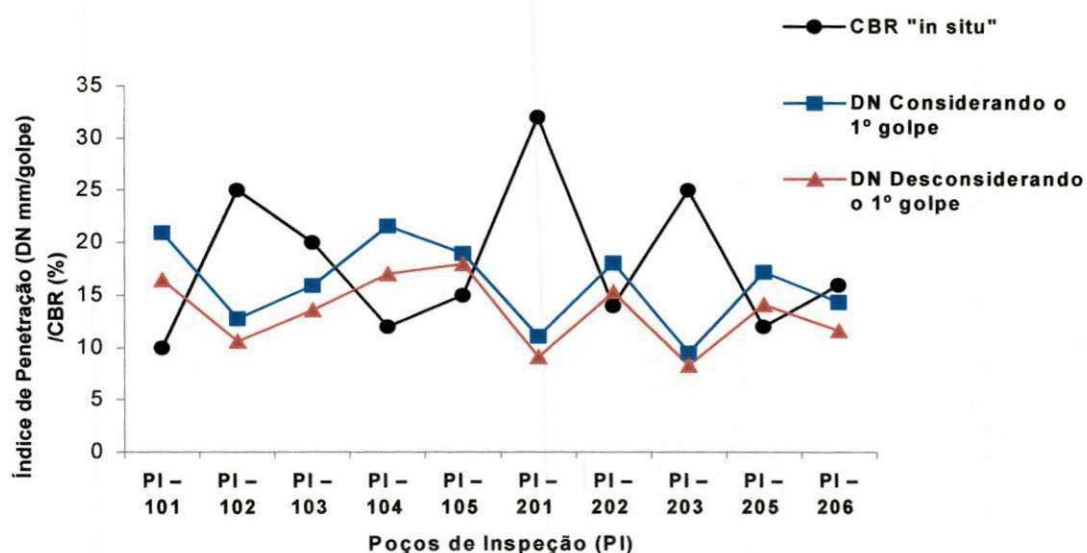


Figura 4.3 - Variação dos valores do DN para os PIs, considerando e desconsiderando o primeiro golpe do peso, e o valor do CBR “in situ”.

4.2 Correlação entre DCP e o CBR "in situ"

Os resultados de DN, em mm/golpe, obtidos com o DCP, foram correlacionados com os valores dos CBRs "in situ" obtidos em cada PI. Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores de DN e os respectivos CBRs.

Tabela 4.11 – Valores de DN para os respectivos CBRs "in situ".

Furo	DN (mm/golpe)	DN (mm/golpe)	CBR "in situ"
	considerando o primeiro golpe	desconsiderando o primeiro golpe	
PI - 101	21,00	16,50	10
PI - 102	12,86	10,70	25
PI - 103	16,00	13,67	20
PI - 104	21,67	17,12	12
PI - 105	19,00	18,00	15
PI - 201	11,14	9,17	32
PI - 202	18,14	15,33	14
PI - 203	9,57	8,33	25
PI - 205	17,29	14,17	12
PI - 206	14,43	11,67	16

Os valores constantes da Tabela 4.11 foram lançados em gráfico, DN versus CBR "in situ". As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as linhas de tendências destas correlações em conjunto com os valores observados para cada parâmetro.

O modelo matemático adotado para relacionar o índice de penetração com o CBR "in situ", segundo critérios baseados em referências bibliográficas, foi: $CBR = a(DN)^b$ (modelo em forma de potência). Para o cálculo dos parâmetros da equação foram utilizados o método dos mínimos quadrados a partir da linearização do modelo original (Equação 4.1).

$$\text{Log}(\text{CBR}) = \text{Log}(a) + b\text{Log}(\text{DN}) \quad [4.1]$$

Sendo:

DN = índice de penetração do DCP (mm/golpe);

'a' e 'b' = constantes.

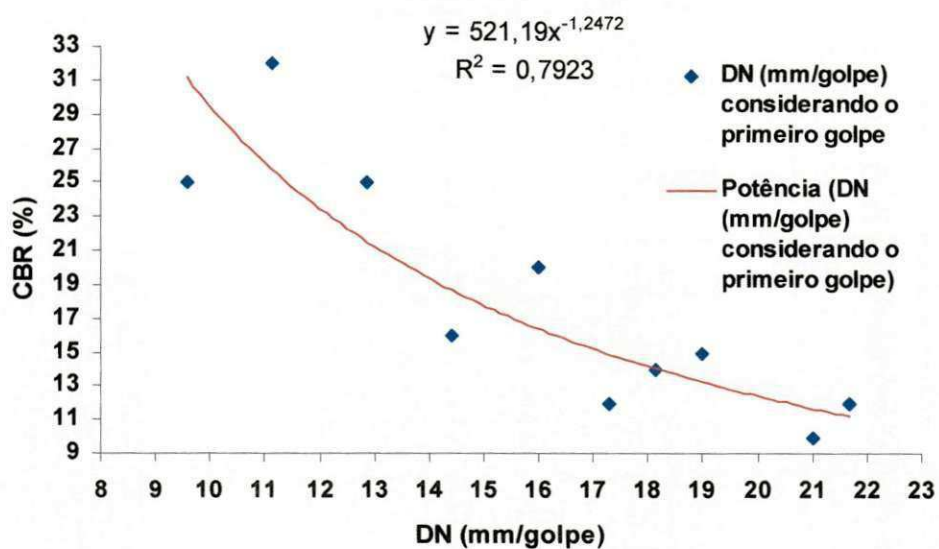


Figura 4.4 – Relação DN/CBR “in situ” considerando o 1º golpe.

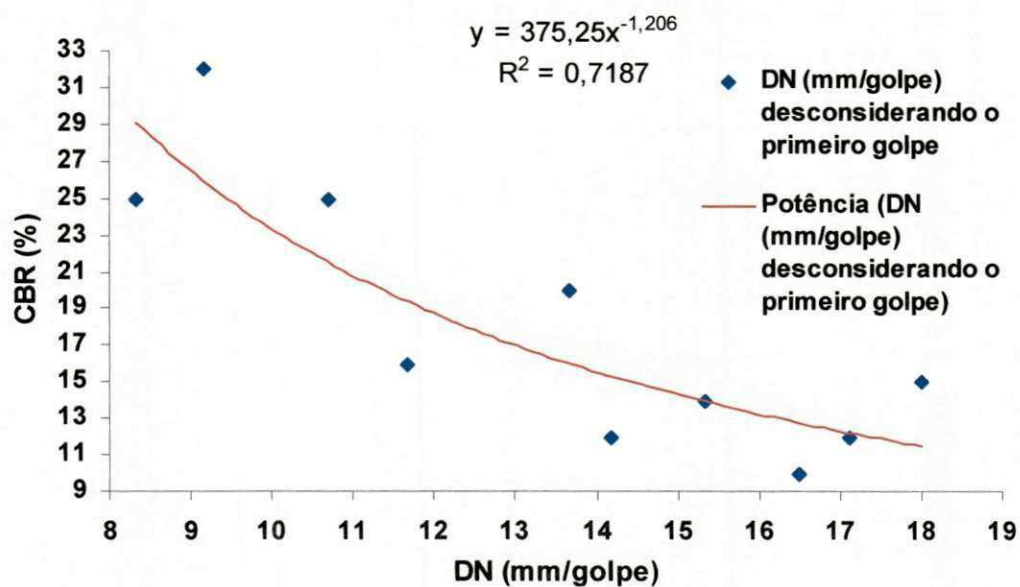


Figura 4.5 – Relação DN/CBR “in situ” desconsiderando o 1º golpe.

Os resultados dos ajustes de curvas aos pontos, a partir do modelo adotado, são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados das análises de regressão.

Hipótese	Correlações		R ²	Equação
CBR com o 1º golpe	$\log(\text{CBR}) = 2,717 - 1,2472\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 521,19/(\text{DN})^{1,2472}$	0,7923	[4.2]
CBR sem o 1º golpe	$\log(\text{CBR}) = 2,5743 - 1,206\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 375,25/(\text{DN})^{1,206}$	0,7187	[4.3]

Sendo: R² – Coeficiente de determinação.

OBS. Pode-se inferir que as correlações estabelecidas são válidas para solos do tipo A-2-4, não necessariamente representam correlações para outros tipos de solos.

Os coeficientes de correlação, para as curvas de ajuste estabelecidas, segundo o nível de significância adotado, $\alpha=5\%$, indicam que as correlações encontradas foram consideradas estatisticamente representativas. Esses coeficientes, segundo Chase & Brown (1992), e que, pela importância, transcreve-se para a Tabela 4.13, estão dentro dos valores estatisticamente significativos.

Tabela 4.13 – Valores críticos para controle do coeficiente de correlação (R), para níveis de significância (1 – α) e N observações.

N	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	N	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
4	0,950	0,999	20	0,444	0,561
5	0,878	0,959	22	0,423	0,537
6	0,811	0,917	24	0,404	0,515
7	0,754	0,875	26	0,388	0,496
8	0,707	0,834	28	0,374	0,479
9	0,666	0,798	29	0,368	0,470
10	0,632	0,765	30	0,361	0,463
11	0,602	0,735	40	0,312	0,402
12	0,576	0,708	50	0,279	0,361
13	0,553	0,684	60	0,254	0,330
14	0,532	0,661	90	0,205	0,239
15	0,514	0,641	100	0,196	0,256
16	0,497	0,623	250	0,124	0,163
17	0,482	0,606	500	0,088	0,115
18	0,456	0,575	1000	0,062	0,081
19	0,456	0,575			

Os resultados das análises de regressão indicam que a melhor correlação foi a estabelecida para valores dos índices de penetração considerando o primeiro golpe do martelo do DCP.

4.3 CBR “calculado” a partir do índice de penetração (DN)

Com base na bibliografia consultada, foram estudadas algumas correlações entre os resultados de DN, obtido com o ensaio do DCP e o valor do CBR do material da camada penetrada. Nos Quadros 4.1 e 4.2 estão inseridas as correlações estabelecidas por esses autores, e que, serviram de base para análises dos resultados obtidos neste trabalho.

Quadro 4.1 – Referências e correlações entre os valores de DN (mm/golpe) e os CBRs da camada penetrada.

Referência	Equação de Correlação	
Livneh (1987)	$\log(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 363,08/(\text{DN})^{1,16}$
Harison (1987)	$\log(\text{CBR}) = 2,55 - 1,14\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 354,81/(\text{DN})^{1,14}$
Livneh et al. (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,45 - 1,12\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 281,84/(\text{DN})^{1,12}$
Webster et al. (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,46 - 1,12\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 288,40/(\text{DN})^{1,12}$
Kleyn (1982)	$\log(\text{CBR}) = 2,62 - 1,27\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 416,87/(\text{DN})^{1,27}$
Ese (1995)	$\log(\text{CBR}) = 2,44 - 1,07\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 275,42/(\text{DN})^{1,07}$
NCDOT (1998, apud AMINI (2003))	$\log(\text{CBR}) = 2,60 - 1,07\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 398,11/(\text{DN})^{1,07}$
Coonse (1999)	$\log(\text{CBR}) = 2,53 - 1,14\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 338,84/(\text{DN})^{1,14}$
Thomas (1997)	$\log(\text{CBR}) = 2,47 - 1,12\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 292/(\text{DN})^{1,12}$

No Quadro 4.2 estão inseridas as correlações estabelecidas por autores nacionais.

Quadro 4.2 – Referências nacionais e equações de correlação entre o valor do DN (mm/golpe) e o CBR da camada penetrada.

Referência	Equação de Correlação	
Heyn (1986)	$\log(\text{CBR}) = 2,65 - 1,30\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 443,45/(\text{DN})^{1,30}$
Rohm e Nogueira (1990)	$\log(\text{CBR}) = 2,034 - 1,1147\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 108,14/(\text{DN})^{1,1147}$
Vertamatti e Oliveira (1998)	$\log(\text{CBR}) = 2,49 - 1,057\log(\text{DN})$	$\text{CBR} = 309,03/(\text{DN})^{1,057}$
Cardoso e Trichês (2000)	$\log(\text{CBR}) = 2,71 - 1,25\log(\text{DN})$ “in situ”	$\text{CBR} = 512,64/(\text{DN})^{1,25}$ “in situ”
	$\log(\text{CBR}) = 2,18 - 1,03\log(\text{DN})$ após imersão	$\text{CBR} = 151,58/(\text{DN})^{1,03}$ após imersão
Paiva e Berti (2004)	$\log(\text{CBR}) = 2,61 - 1,02\log(\text{DN})$ “in situ”	$\text{CBR} = 407,38/(\text{DN})^{1,02}$ “in situ”
	$\log(\text{CBR}) = 2,59 - 1,01\log(\text{DN})$ em laboratório	$\text{CBR} = 389,05/(\text{DN})^{1,01}$ em laboratório

Com base nas correlações citadas foi possível estimar os valores dos CBRs, a partir do DN para as hipóteses de considerar e desconsiderar o primeiro golpe. Os resultados dos valores dos CBRs “calculados” para as correlações citadas estão apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 – Resultados dos valores dos CBRs a partir das correlações estabelecidas por autores referidos no Quadro 4.1

Furo	Penetração mm/golpe	Webster								
		Livneh (1987)	Harison (1987)	Livneh et al. (1992)	et al. (1992)	Kleyn (1975)	Ese (1995)	NCDOT (1998)	Coonse (1999)	Thomas (1997)
CBR – Considerando o 1º golpe										
PI-101	21	10,62	11,03	9,31	9,53	8,73	10,60	15,32	10,54	9,65
PI-102	12,86	18,76	19,30	16,13	16,51	16,27	17,91	25,89	18,43	16,71
PI-103	16	14,56	15,04	12,63	12,92	12,32	14,18	20,49	14,36	13,08
PI-104	21,67	10,24	10,64	8,99	9,20	8,38	10,25	14,81	10,17	9,32
PI-105	19	11,93	12,37	10,42	10,66	9,91	11,80	17,05	11,81	10,79
PI-201	11,14	22,16	22,73	18,94	19,39	19,52	20,88	30,19	21,70	19,63
PI-202	18,14	12,59	13,04	10,97	11,23	10,51	12,40	17,92	12,45	11,37
PI-203	9,57	26,43	27,02	22,46	22,98	23,67	24,57	35,52	25,81	23,27
PI-205	17,29	13,31	13,77	11,58	11,85	11,17	13,05	18,86	13,15	12,00
PI-206	14,43	16,42	16,92	14,18	14,51	14,05	15,83	22,89	16,16	14,69
CBR – Desconsiderando o 1º golpe										
PI-101	16,5	14,05	14,52	12,20	12,49	11,85	13,72	19,83	13,87	12,64
PI-102	10,7	23,22	23,80	19,82	20,28	20,54	21,80	31,52	22,72	20,53
PI-103	13,67	17,48	18,00	15,06	15,41	15,05	16,78	24,25	17,19	15,61
PI-104	17,12	13,46	13,93	11,71	11,98	11,31	13,19	19,06	13,30	12,13
PI-105	18	12,70	13,15	11,07	11,33	10,61	12,50	18,07	12,56	11,47
PI-201	9,17	27,77	28,37	23,56	24,11	24,99	25,72	37,18	27,10	24,41
PI-202	15,33	15,30	15,79	13,25	13,56	13,01	14,84	21,45	15,08	13,73
PI-203	8,33	31,05	31,66	26,23	26,85	28,23	28,50	41,20	30,23	27,18
PI-205	14,17	16,77	17,28	14,47	14,81	14,38	16,14	23,34	16,50	14,99
PI-206	11,67	21,00	21,55	17,98	18,40	18,40	19,87	28,72	20,58	18,63

Tabela 4.15 – Resultados dos valores dos CBRs estimados a partir das correlações de autores nacionais (Quadro 4.2)

Furo	Penetração mm/golpe	Heyn (1986)	Rohn e Nogueira (1990)	Oliveira e Vertamatti (1997)	Cardoso e Trichês (2000) "in situ"	Cardoso e Trichês (2000) após imersão	Paiva e Berti (2004) "in situ"	Paiva e Berti (2004) laboratório
CBR - Considerando o 1º golpe								
PI-101	21	8,47	3,63	12,37	11,40	6,59	18,25	17,97
PI-102	12,86	16,03	6,27	20,77	21,05	10,92	30,10	29,49
PI-103	16	12,06	4,92	16,49	16,02	8,72	24,09	23,65
PI-104	21,67	8,13	3,51	11,97	10,96	6,38	17,68	17,41
PI-105	19	9,65	4,06	13,75	12,92	7,30	20,21	19,88
PI-201	11,14	19,31	7,36	24,18	25,19	12,66	34,85	34,09
PI-202	18,14	10,25	4,28	14,44	13,69	7,66	21,19	20,83
PI-203	9,57	23,53	8,72	28,39	30,46	14,80	40,69	39,74
PI-205	17,29	10,91	4,51	15,19	14,54	8,05	22,26	21,87
PI-206	14,43	13,80	5,52	18,39	18,23	9,70	26,76	26,25
CBR - Desconsiderando o 1º golpe								
PI-101	16,5	11,59	4,75	15,96	15,42	8,45	23,34	22,93
PI-102	10,7	20,35	7,70	25,23	26,49	13,19	36,31	35,51
PI-103	13,67	14,80	5,86	19,48	19,50	10,25	28,28	27,73
PI-104	17,12	11,05	4,56	15,35	14,72	8,13	22,48	22,09
PI-105	18	10,35	4,31	14,56	13,83	7,72	21,36	21,00
PI-201	9,17	24,88	9,15	29,70	32,13	15,47	42,50	41,50
PI-202	15,33	12,75	5,16	17,25	16,90	9,11	25,16	24,69
PI-203	8,33	28,18	10,18	32,88	36,22	17,08	46,88	45,72
PI-205	14,17	14,13	5,63	18,75	18,65	9,88	27,26	26,74
PI-206	11,67	18,18	6,99	23,02	23,77	12,07	33,23	32,53

Em uma análise preliminar dos valores dos CBRs “calculados” pelas correlações de Rohm e Nogueira (1990), Paiva e Berti (2004), e Cardoso e Trichês (2000) após imersão, é possível observar que estes valores são “discrepantes” quando comparados aos valores dos CBRs “in situ”, como também aos valores calculados pelas demais correlações.

Pode-se inferir que, para estas correlações, os resultados do ensaio com o DCP “in situ” geram determinações de CBRs não compatíveis com os valores de suporte do subleito representado pelo CBR “in situ”, obtidos em condições mais realísticas possíveis.

Isto retifica que as relações ou correlações, teoricamente mais racionais, são aquelas em que as variáveis e os parâmetros são obtidos em condições semelhantes de confinamento, teor de umidade, massa específica aparente seca, tipo de solo, etc.

O ensaio com o DCP é estritamente um ensaio “in situ” e, portanto, é de extrema importância a efetiva observação desta característica durante a realização de estudos comparativos com equipamentos outros de mesmos fins.

Essa afirmativa esta de acordo com os estudos de Kleyn (1975) que indicou que a umidade, a distribuição dos tamanhos de grãos, a densidade, e a plasticidade, são importantes propriedades dos materiais que exercem influência sobre a obtenção do DN.

Na Tabela 4.16 são apresentados as estatísticas das médias e desvios padrão, relativos aos valores dos CBRs “calculados” para as referências inseridas nos Quadros 4.1 e 4.2, com exceção das correlações de Rohm e Nogueira (1990), Paiva e Berti (2004), e Cardoso (2000- após imersão).

Tabela 4.16 – Média e desvios padrão, para cada PI, considerando as duas situações.

Situação Furo	Considerando o 1º golpe		Desconsiderando o 1º golpe		CBR “in situ”
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
PI-101	10,63	1,86	14,01	2,30	10
PI-102	18,65	2,88	23,03	3,42	25
PI-103	14,51	2,36	17,38	2,72	20
PI-104	10,26	1,81	13,43	2,22	12
PI-105	11,92	2,03	12,68	2,13	15
PI-201	21,99	3,29	27,49	3,98	32
PI-202	12,57	2,11	15,24	2,45	14
PI-203	26,18	3,81	30,70	4,38	25
PI-205	13,28	2,20	16,68	2,63	12
PI-206	16,34	2,59	20,84	3,15	16

Os valores médios dos CBRs “calculados”, para a hipótese que desconsidera o primeiro golpe, são mais próximos aos valores dos CBRs “in situ”. Isto pode indicar que, o material na profundidade penetrada, pelo primeiro golpe, poderá sofrer alterações no suporte estrutural do material estudado.

4.4 Relação CBR e DCP “in situ”

Na seqüência da Figura 4.6 até a Figura 4.15 são apresentados os valores dos CBRs “calculados” versus DN, lançados em gráficos com suas respectivas linhas de tendência e seus coeficientes de determinação.

Os ajustes estabelecidos para os valores de DN com o CBR “in situ” foram, estatisticamente, os melhores segundo o coeficiente de determinação. Para a condição em que são considerados os primeiros golpes, obteve-se o mais alto coeficiente de determinação ($R^2=0,79$). Portanto, para os casos estudados neste trabalho, o ajuste que melhor representa a relação entre o DN e o CBR “in situ” é representado pelo modelo:

$$\text{CBR} = 521,19 (\text{DN})^{-1,2472} \quad [4.2]$$

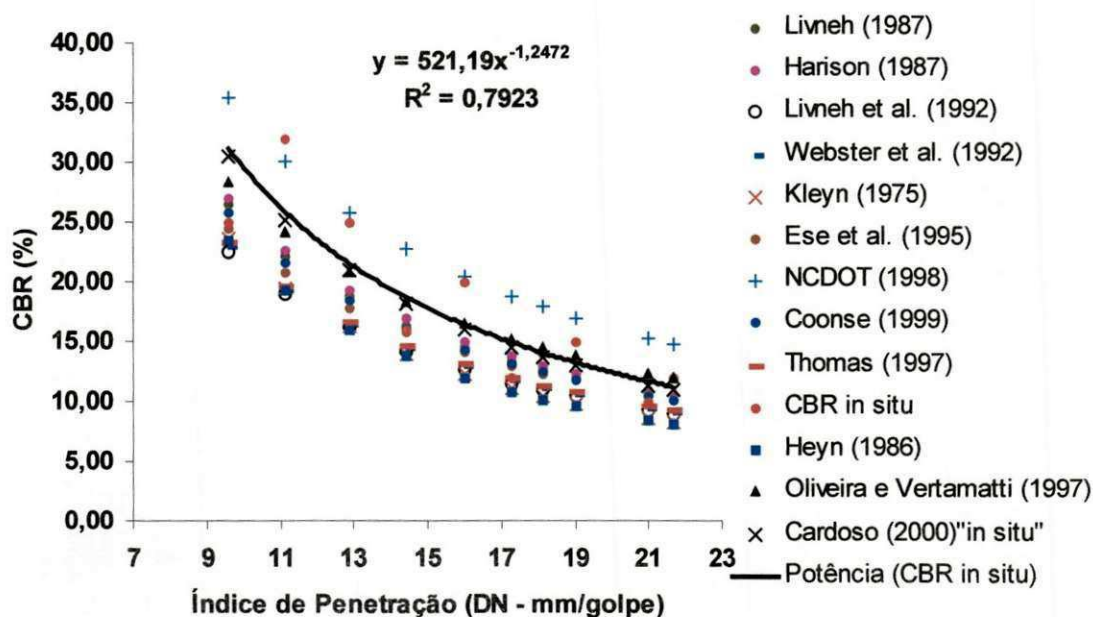


Figura 4.6 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR “in situ”, com o índice de penetração DN.

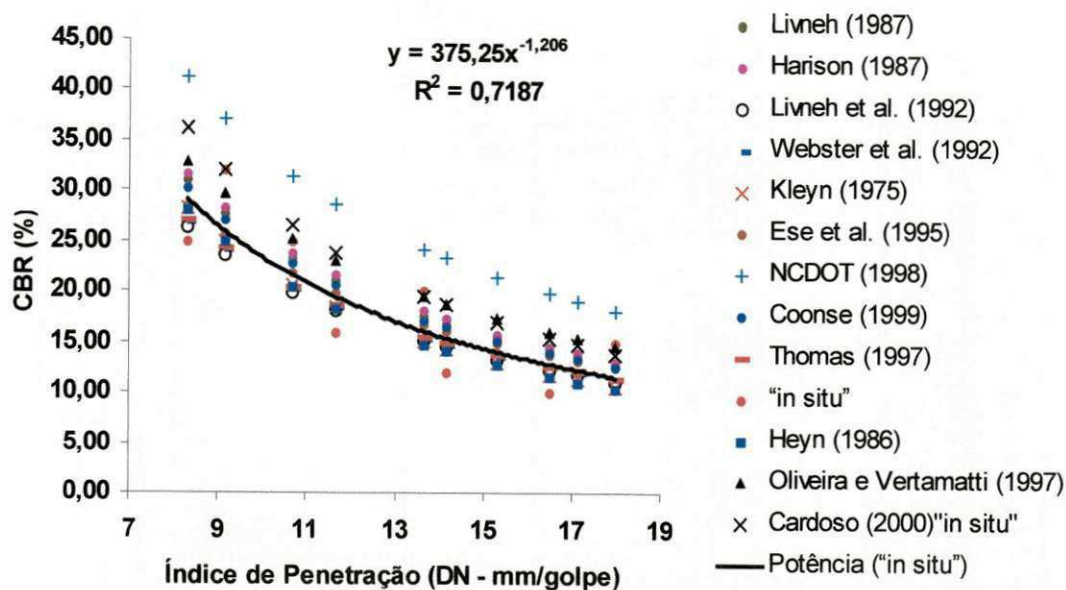


Figura 4.7 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR "in situ", com o índice de penetração DN.

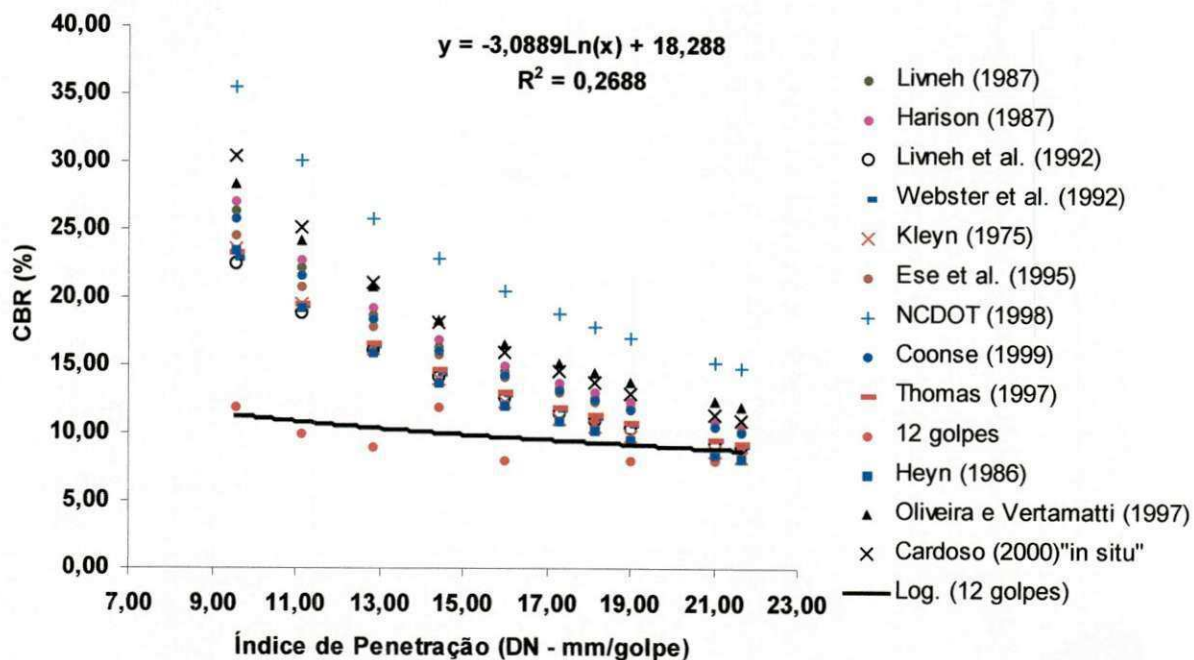


Figura 4.8 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para energia de 12 golpes, com o índice de penetração DN.

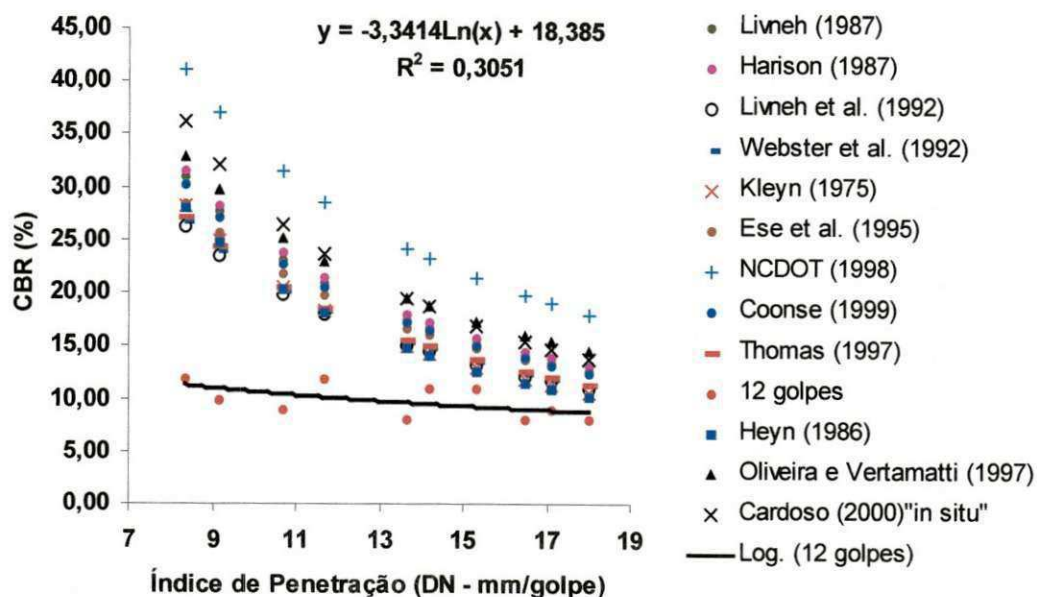


Figura 4.9 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 12 golpes, com o índice de penetração DN.

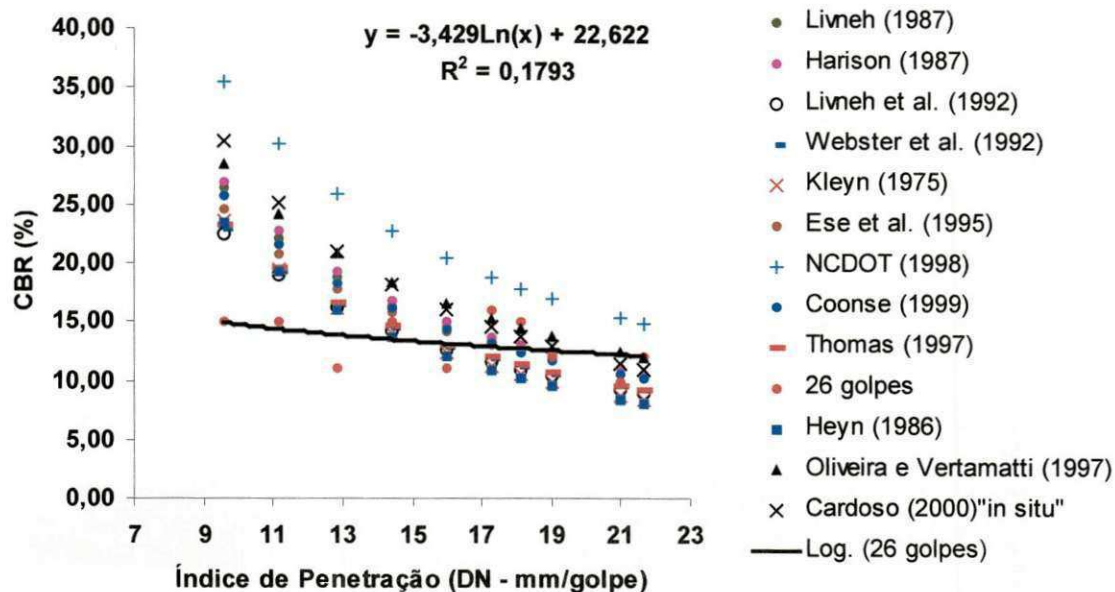


Figura 4.10 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para 26 golpes, com o índice de penetração DN.

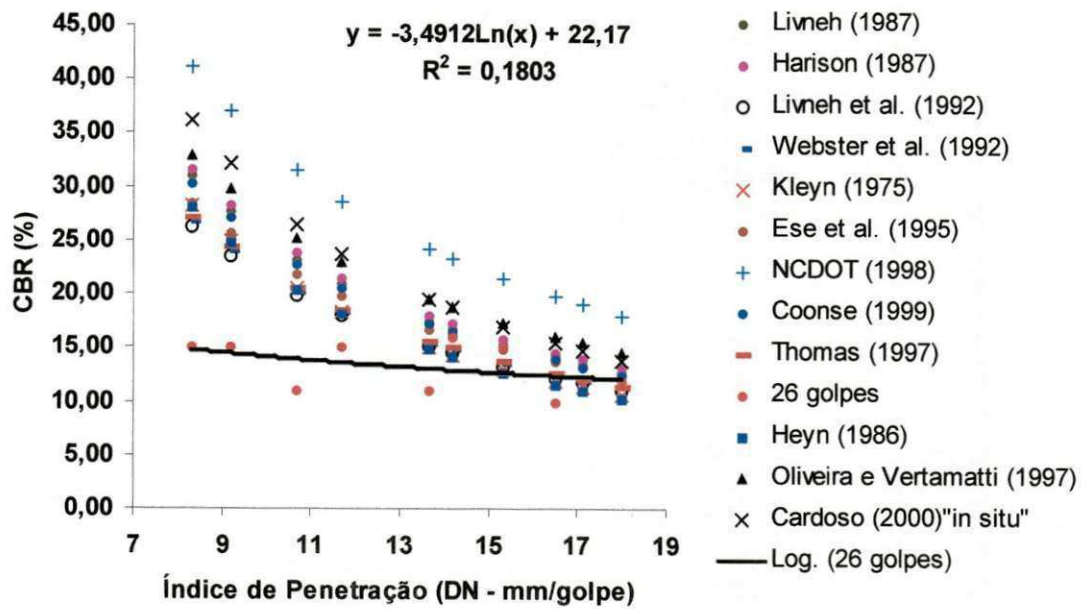


Figura 4.11 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 26 golpes, com o índice de penetração DN.

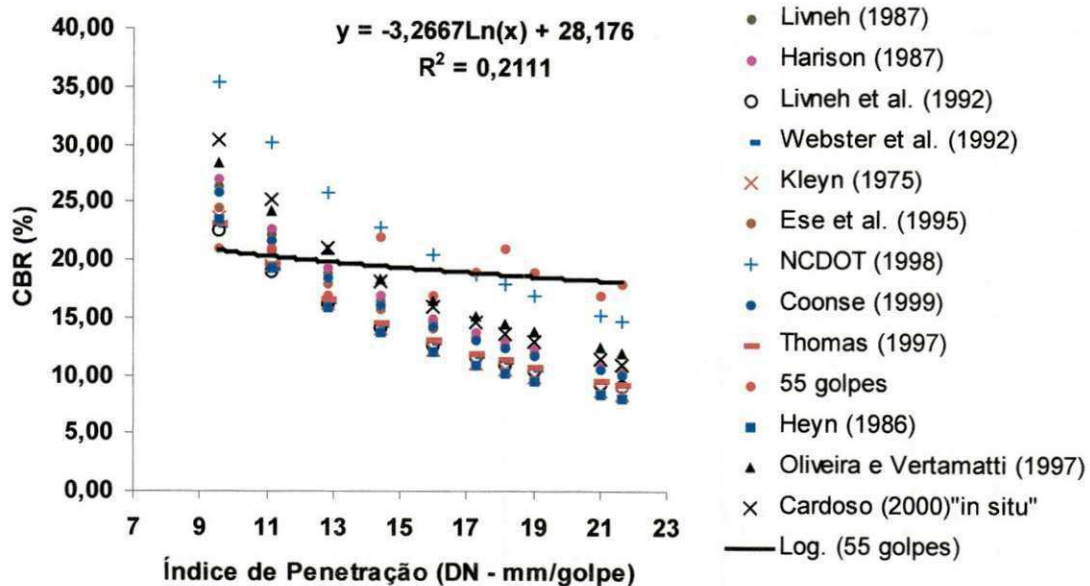


Figura 4.12 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR para 55 golpes, com o índice de penetração DN.

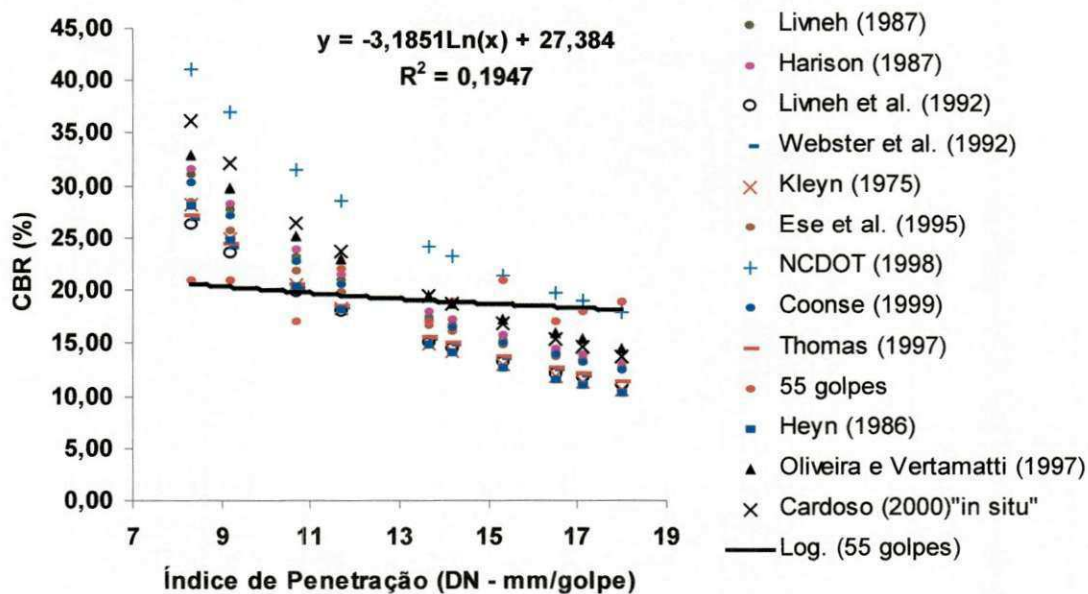


Figura 4.13 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR para 55 golpes, com o índice de penetração DN.

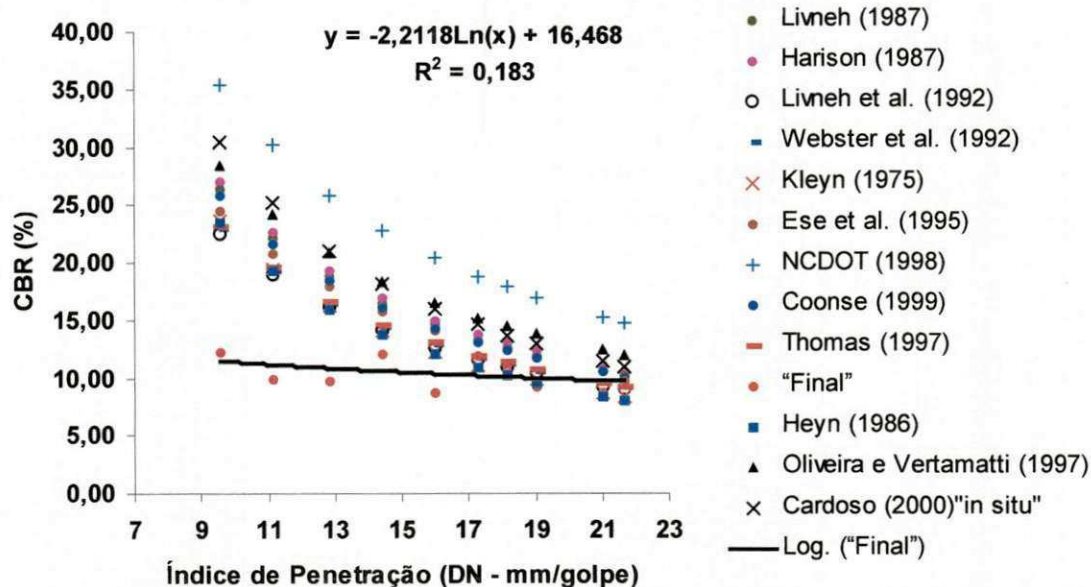


Figura 4.14 – Variação do valor do CBR calculado considerando o 1º golpe, CBR "final", com o índice de penetração DN.

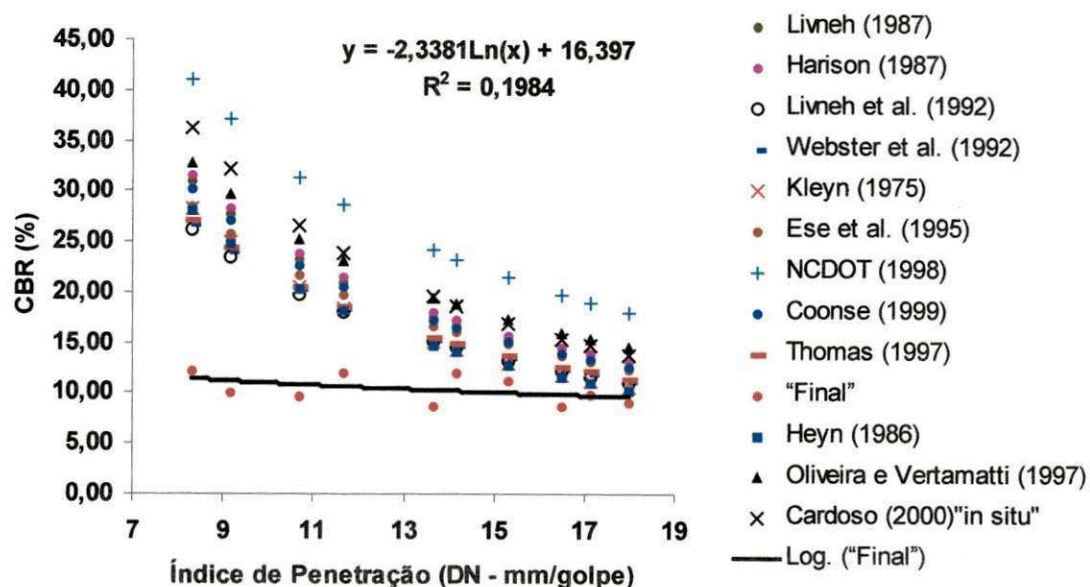


Figura 4.15 – Variação do valor do CBR calculado desconsiderando o 1º golpe, CBR "final", com o índice de penetração DN.

Para os ajustes obtidos com os valores dos CBRs obtidos em laboratório, não foi possível estabelecer um modelo estatisticamente significativo. Infere-se que, para os solos estudados nesta pesquisa e sob estas condições, as relações ou correlações estabelecidas entre o DN e CBR, em função dos valores de CBR *obtidos em laboratório*, não podem ser usadas para a determinação do CBR "in situ" do solo a partir dos resultados de ensaios com o DCP.

4.5 Relação entre CBR e DN obtidos em laboratório

Na Tabela 4.17 estão inseridos os resultados do ensaio de DCP realizado em laboratório, sobre amostras de solos moldadas em cilindros, sem imersão, e com a energia do Proctor normal.

Tabela 4.17 – Resultados da penetração do ensaio do DCP em laboratório.

Cilindro	Penetração									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P _{inicial} (cm)	10,2	9,0	8,7	8,0	8,0	9,0	8,0	9,0	8,0	9,0
1º golpe	14,0	15,0	15,6	14,5	15,0	15,0	15,0	14,4	14,0	15,0
2º golpe	16,0	18,0	18,5	17,1	18,0	18,0	17,7	17,6	17,0	17,0
3º golpe	17,3	20,3	21,1	19,0	20,3	20,5	20,0	20,2	20,0	19,5
4º golpe	19,3	22,5	24,0	21,0	22,3	22,6	22,2	22,0	22,2	21,1
5º golpe	21,0	24,7	25,5	23,0	24,5	25,0	24,2	23,1	23,5	22,6

A profundidade penetrada e o resultado de cada ensaio, DN, são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultado dos ensaios - DN para o ensaio do DCP em laboratório, considerando e desconsiderando o primeiro golpe.

Cilindro									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Profundidade Penetrada em cm									
10,8	15,7	16,8	15,0	16,5	16,0	16,2	14,1	15,5	13,6
Índice de penetração (DN – mm/golpe)									
Considerando o 1º golpe									
21,60	31,40	33,60	30,00	33,00	32,00	32,40	28,20	31,00	27,20
Desconsiderando o 1º golpe									
17,50	24,25	24,75	21,25	23,75	25,00	23,00	21,75	23,75	19,00

Em seguida foram estabelecidas as correlações entre os parâmetros DN e o CBR “em laboratório” (12 golpes). As correlações, para este estudo de caso, foram:

- considerando o 1º golpe do martelo: $CBR = 6,8462DN^{0,1018}$ ($R^2 = 0,0063$);

- desconsiderando o 1º golpe do martelo: $CBR = 5,0778DN^{0,2069}$ ($R^2 = 0,0174$).

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados dos ensaios de CBR e DCP realizados em laboratório.

Tabela 4.19 – Resultado do ensaio do DCP em laboratório.

Cilindro	Considerando o 1º golpe		Desconsiderando o 1º golpe		CBR p/ 12 golpes
	DN (mm/golpe)	CBR “calculado” (%)	DN (mm/golpe)	CBR “calculado” (%)	
1	21,60	9,36	17,50	9,18	8
2	31,40	9,72	24,25	9,82	9
3	33,60	9,79	24,75	9,86	8
4	30,00	9,68	21,25	9,56	9
5	33,00	9,77	23,75	9,78	8
6	32,00	9,74	25,00	9,88	10
7	32,40	9,75	23,00	9,71	11
8	28,20	9,62	21,75	9,60	12
9	31,00	9,71	23,75	9,78	11
10	29,00	9,65	22,15	9,64	12

Neste caso, não foi possível estabelecer um modelo estatisticamente significativo. Infere-se que, para os solos estudados em laboratório sob estas condições, as correlações estabelecidas entre o DN e CBR, em função dos valores dos CBRs e de resultados do DCP

obtidos em laboratório, não podem ser usadas para a determinação dos CBRs dos solos ensaiados.

4.6 Método proposto

Os métodos utilizados para o dimensionamento de pavimentos urbanos são, em geral, os métodos aplicados às rodovias, cujo número de solicitações do tráfego e as características físicas não são compatíveis com a realidade de vias urbanas. As vias urbanas, com características essencialmente residenciais, apresentam um baixo volume de tráfego e um menor grau de solicitação.

Propõe-se neste trabalho um método de dimensionamento de pavimentos urbanos baseado:

- na composição do tráfego;
- nas características estruturais do subleito, a partir dos resultados obtidos com o ensaio do DCP, expresso em forma de índice de penetração, DN – mm/golpe;
- e com aproximações das espessuras sugeridas pelo método da Prefeitura Municipal de São Paulo (1992) para pavimentos urbanos com baixo volume de tráfego.

A seguir, serão descritas em síntese, as etapas do método de dimensionamento proposto.

4.6.1 Análise do tráfego

Para o dimensionamento de vias urbanas, optou-se por classificar o tráfego de acordo com o previsto no período de projeto, adotando-se 10 anos, em dois tipos essenciais, a saber:

Tráfego Tipo 1 - Tráfego de ruas com características essencialmente residenciais, não sendo previsto, até o período de projeto, o tráfego de veículos comerciais, ou ônibus, podendo existir, ocasionalmente a passagem de caminhões ou ônibus urbanos em número não superior a três por dia, por faixa de tráfego mais solicitada.

Tráfego Tipo 2 - Tráfego de ruas com características essencialmente residenciais, sendo previsto, até o período de projeto, o tráfego de veículos comerciais, ocorrendo a passagem de ônibus, ocasionalmente em número não superior a 40 por dia, por faixa de tráfego mais solicitada.

Para composição do tráfego propõe-se uma taxa de crescimento, com base no histórico de crescimento do tráfego da própria via, ou a contribuição das vias existentes que atendem à mesma ligação. Adota-se o tráfego de veículos do ano médio do período de projeto, na faixa mais solicitada. A taxa de crescimento também deve levar em consideração o aumento do fluxo de veículos, causado devido às melhorias impostas as vias pavimentadas.

4.6.2 Subleito

A medida da capacidade de suporte do subleito é dada pela resistência à penetração do cone em mm/golpe. Sugere-se realizar o ensaio com o DCP e considerar, para o cálculo do DN, o primeiro golpe do martelo.

Optou-se por considerar o primeiro golpe do martelo do DCP baseado em dois critérios: a) esta correlação foi estatisticamente mais significativa, e b) os valores dos CBRs estimados são em média menores e, portanto, fica estabelecido um fator de segurança para sua determinação.

A coleta de amostras e a realização dos ensaios "in situ" devem ser feitas com materiais coletados até a profundidade de 80 cm abaixo da superfície do subleito.

Para subleitos com DN superiores a 70 mm/golpe este procedimento não se aplica para o cálculo da espessura do pavimento.

4.6.3 Camadas do pavimento

As camadas do pavimento são consideradas em função do coeficiente de equivalência estrutural. Este deve corresponder a um número que relaciona a espessura necessária da camada, constituída de material padrão, com a espessura equivalente do material que realmente vai compor essa camada.

As camadas do pavimento têm uma espessura real (E_r) igual a soma das espessuras das camadas, e uma espessura equivalente (E_q), calculada pela soma do produto das espessuras reais das camadas pelos respectivos coeficientes de equivalência estrutural do material que as compõem.

Os coeficientes de equivalência estrutural (K) propostos são baseados nos expostos pelo método do DNER e pelo método de dimensionamento da Prefeitura Municipal de São Paulo. Os valores são mostrados no Quadro 4.3.

Deve-se adotar $K = 1$ para sub-base ou reforço do subleito, quando necessário.

Para bases granulares, o material deve satisfazer um DN mínimo de 5,0 mm/golpe, e sua compactação deve ser realizada com a energia do Proctor intermediário.

Quadro 4.3 – Coeficiente de equivalência estrutural –K, para diversos materiais.

Tipo de Material	Coefficiente - K
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento de concreto magro	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,8
Base de solo-cimento	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Revestimento asfáltico de penetração	1,2
Pavimento articulado de concreto	1,2
Base de macadame betuminoso	1,2
Base granular	1,0
Base de macadame hidráulico	1,0
Revestimento tipo calçamento em paralelepípedo	1,0
Areia	1,0

4.6.4 Dimensionamento da espessura do pavimento

O valor do CBR “calculado” é obtido pela expressão de correlação, estabelecida neste trabalho, para a hipótese que considera o primeiro golpe do martelo (Equação 4.2):

$$\text{CBR} = 521,19 (\text{DN})^{-1,2472}$$

[4.2]

O método da Prefeitura Municipal de São Paulo relaciona as espessuras necessárias ao pavimento, com a capacidade de suporte do subleito, em termos de CBR. Com a correlação

estabelecida [4.2] estima-se o valor do DN, correspondente a cada CBR, com isso pode-se correlacionar as espessuras necessárias (sugeridas) ao pavimento com o valor de DN, do subleito, obtido por meio do ensaio com DCP.

A espessura total do pavimento (E_{TOTAL}) pode ser obtida a partir da Tabela 4.20 ou o ábaco da Figura 4.16, onde as curvas A e B, representam as condições de tráfego Tipo 1 e Tipo 2, respectivamente.

As espessuras sugeridas pelo método de dimensionamento proposto neste trabalho são aproximações as espessuras recomendadas pelo método de dimensionamento da Prefeitura Municipal de São Paulo, para pavimentos, urbanos com baixo volume de tráfego, não necessariamente os mesmos valores.

Tabela 4.20 – Espessuras recomendadas dependendo do tipo de tráfego.

DN (mm/golpe)	CBR "calculado" (%)	Espessura do pavimento (cm)	
		Tráfego Tipo 1	Tráfego Tipo 2
≥ 70,00	≤ 2	60	70
62,51	3	52	63
49,63	4	41	50
41,5	5	34	42
35,86	6	30	37
31,69	7	27	33
28,47	8	24	30
25,9	9	22	27
23,81	10	20	25
20,57	12	17	22
17,2	15	15	18
13,66	20	11	14
9,87	30	8	10

No método de dimensionamento proposto são relacionadas as condições de tráfego, para vias essencialmente urbanas com características residenciais e capacidade de suporte do subleito, com projetos-tipo específicos. Nestes projetos-tipo são sugeridas a composição do material, as espessuras do revestimento, e as espessuras da base (E_{RB} = espessura do revestimento + espessura da camada de base).

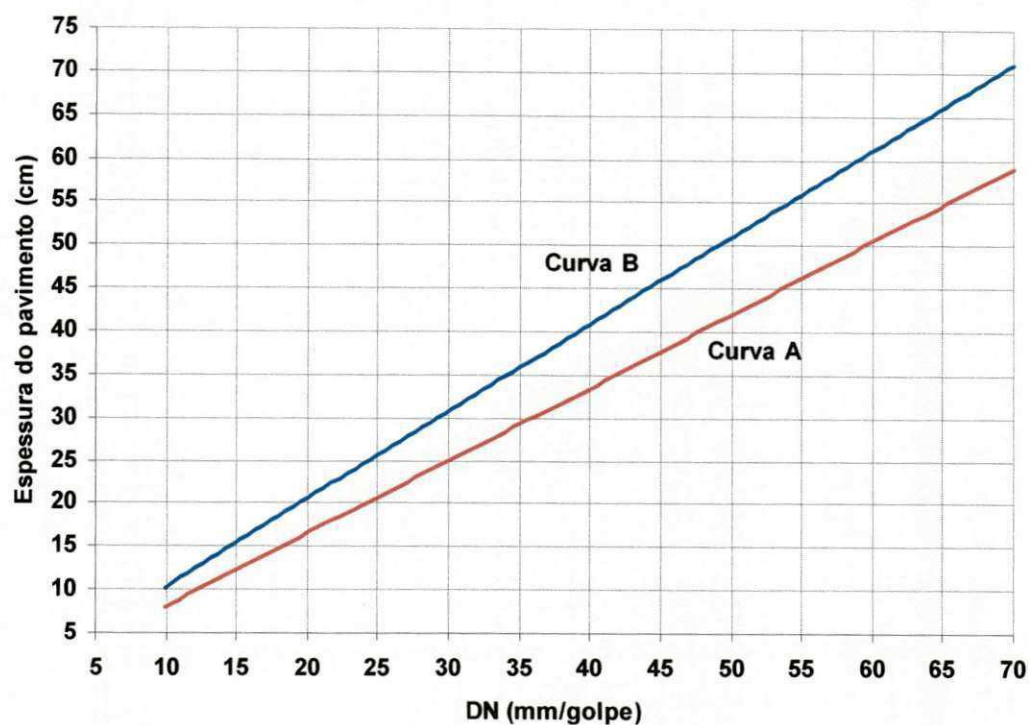


Figura 4.16 – Ábaco de dimensionamento da espessura da estrutura do pavimento em função de DN, e do tráfego (T), para o método proposto

A espessura total da estrutura do pavimento, (E_{TOTAL}), é obtida a partir do número DN (mm/golpe) do subleito e do tráfego, (T), relacionados no ábaco da Figura 4.16. Admite-se para este ábaco que todos os materiais das camadas do pavimento possuem coeficiente de equivalência estrutural igual a um ($K=1$).

Com a espessura total ou necessária ao pavimento (E_{TOTAL}), de acordo com o tráfego (T), opta-se por uma das alternativas de dimensionamento propostas nas Figuras 4.17 e 4.18 (Projetos-tipo). Onde é obtida a espessura do revestimento + espessura da base (E_{RB} ou E_q). A espessura da sub-base corresponde à diferença entre a espessura total e a espessura equivalente ($E_{SUB} = E_{TOTAL} - E_q$), admitindo-se um coeficiente de equivalência estrutural $K = 1$.

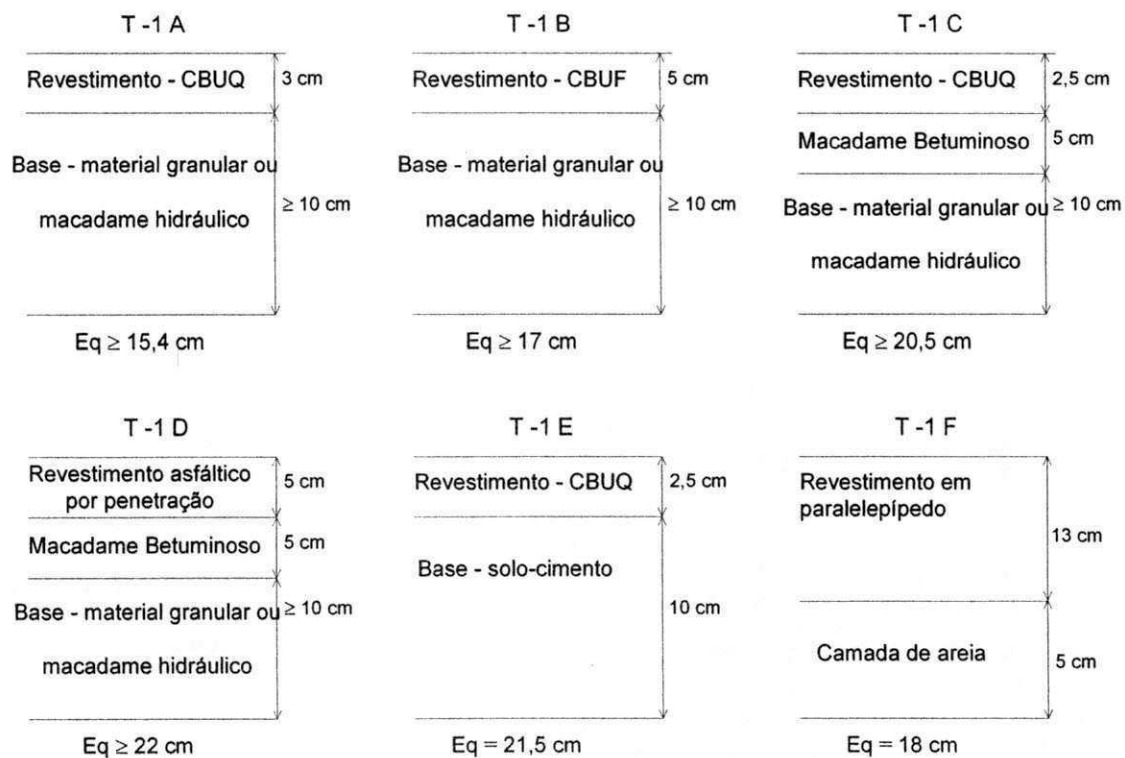


Figura 4.17 – Projetos-tipo de pavimentos para o Tráfego Tipo – 1, método proposto.

As características estruturais do material, que irá compor a camada de sub-base, compactada na energia do Proctor normal, são obtidas em termos de valores de DN (mm/golpe). Estas, por sua vez, são estimadas a partir do ábaco de dimensionamento da Figura 4.16.

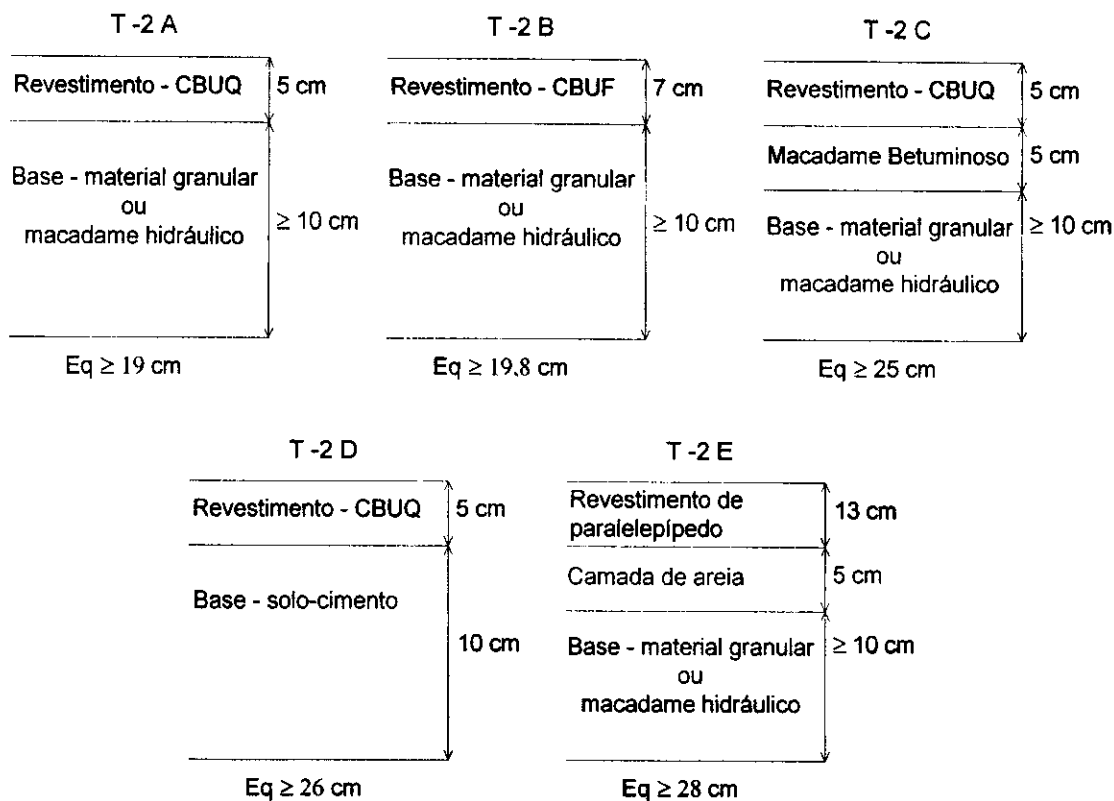


Figura 4.18 – Projetos-tipo de pavimentos para o Tráfego Tipo – 2, método proposto.

Sendo o pavimento destinado a uma via urbana, a espessura do projeto a ser executada deve estar compreendida entre o nivelamento das guias e sarjetas e a profundidade das canalizações de serviços públicos.

Sugere-se, neste método, para que sejam construídas os equipamentos de drenagem adequados, que o nível do lençol freático, quando existir, deverá ser rebaixado pelo menos em 1,50 metros da cota do greide da terraplenagem.

Dependendo das condições de suporte do subleito, e especificamente para o tráfego Tipo - 1, a espessura total estimada para a estrutura do pavimento pode vir a ser menor que a espessura equivalente ($E_{TOTAL} < E_q$). Nestes casos, sugere-se adotar uma regularização do subleito, no qual serão executadas apenas as camadas de base e de revestimento. Ao se adotar um revestimento em paralelepípedo, será considerada, como camada de base, o colchão de areia de cinco centímetros de espessura (5 cm).

Em anexo (Anexo AC) são expostos dois exemplos de dimensionamento de pavimentos, utilizando o método proposto neste trabalho.

O número de solicitações do tráfego, para pavimentos do Tipo 1 e do Tipo 2, representa um valor do eixo padrão (eixo simples de 8,2 toneladas) em torno de $N=10^4$ e $N=10^5$, respectivamente.

Na Figura 4.19 e 4.20 são ilustradas as curvas de dimensionamento das estruturas do pavimento estimadas segundo o método: proposto neste trabalho, para tráfego Tipo - 1 ($N = 10^4$) e Tipo - 2 ($N = 10^5$), e o método do DNER, respectivamente. Os valores calculados segundo os dois métodos citados estão apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Espessuras recomendadas pelo método proposto neste trabalho e pelo método do DNER, em função do DN.

DN (mm/golpe)	Espessura do pavimento para o método proposto (cm)		Espessura do pavimento para o método do DNER (cm)	
	Tipo 1	Tipo 2	$N = 10^4$	$N = 10^5$
≥ 70,00	60	70	70	83
62,51	52	63	56	66
49,63	41	50	48	57
41,5	34	42	42	50
35,86	30	37	39	45
31,69	27	33	35	41
28,47	24	30	33	39
25,9	22	27	32	36
23,81	20	25	29	34
20,57	17	22	27	30
17,2	15	18	24	28
13,66	11	14	20	23
9,87	8	10	18	20

A espessura total do pavimento, recomendada pelo método proposto, é em média de dez centímetros (10 cm) menor, quando comparada com a espessura estimada a partir do método do DNER, sob condições de solicitações do tráfego e suporte de subleitos semelhantes.

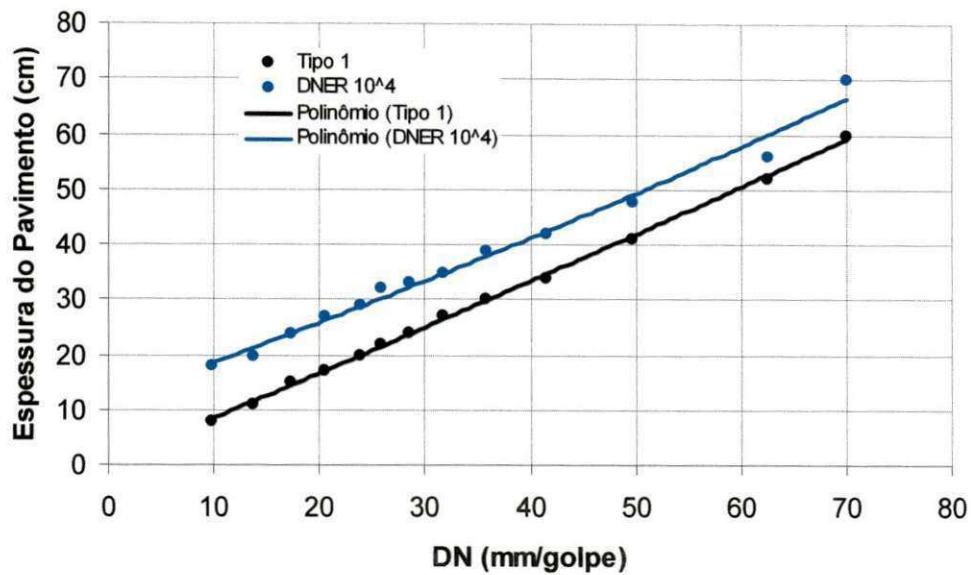


Figura 4.19 – Gráfico da variação das espessuras recomendadas pelo método proposto (Tipo – 1), com o método do DNER ($N = 10^4$), variando o DN do subleito.

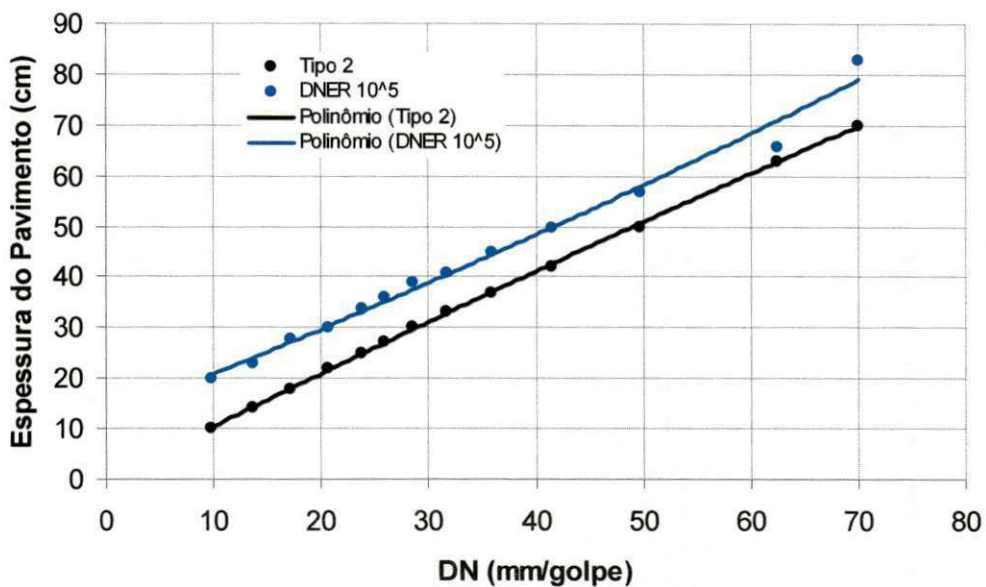


Figura 4.20 – Gráfico da variação das espessuras recomendadas pelo método proposto (Tipo – 2), com o método do DNER ($N = 10^5$), variando o DN do subleito.

5.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O DCP é um ensaio relativamente rápido, versátil e efetivamente econômico quando comparado aos demais ensaios convencionalmente usados para os mesmos fins. Pode ser considerado um ensaio semi-destrutivo, pois, a estrutura das camadas penetradas fica praticamente inalterada após sua realização.

As limitações do DCP incluem: variação, especificamente no caso de grandes extensões de materiais granulares; uso questionável para solos com diâmetro nominal das partículas de agregados superior a duas polegadas (2 pol – 5 cm).

A correlação estabelecida neste trabalho pode ser usada para correlacionar os valores do DN (mm/golpe), obtidos no ensaio do DCP, com os valores de suporte (CBR), para um solo do tipo A-2-4 ou SM. Esta correlação não é necessariamente válida para os demais tipos de solos ou condições diferentes. O modelo matemático estabelecido para correlação do DN e do CBR "in situ", a partir dos resultados no estudo de caso, foi:

$$\text{CBR} = 521,19/(\text{DN})^{1,2472} \quad [4.2]$$

O ajuste que melhor representa a correlação é aquele onde é considerado o primeiro golpe do martelo para o cálculo do Índice de Penetração ($\text{DN} - R^2 = 0,79$). O coeficiente de correlação (R) da curva de ajuste, segundo Chase & Brown (1992), está dentro dos valores estatisticamente representativos indicando que foi considerada satisfatória.

As correlações sugeridas por Rohm e Nogueira (1990), Paiva e Berti (2004), e Cardoso e Trichês (2000) após imersão, não são compatíveis com os valores de suporte do subleito (CBR "in situ") representativos do objeto da pesquisa (A-2-4 – SM). Estas correlações foram estabelecidas em condições e materiais diferentes.

Não foi possível estabelecer um modelo, estatisticamente significativo, para ensaios realizados em laboratório. Infere-se que: "o ensaio com o DCP é estritamente um ensaio "in situ" e, portanto, é de extrema importância a efetiva consideração dessa característica durante a realização de estudos comparativos com outros equipamentos."

A proposta de dimensionamento para pavimentos de vias urbanas, resultado desta pesquisa, sugere uma espessura menor para uma estrutura de pavimento, comparada às obtidas pelo método convencional do DNER. Esta estrutura será mais delgada e implicará em custos mais baixos de execução.

5.2 Sugestões

Realizar ensaios em outros tipos de solos e sob condições diferentes às que foram estabelecidas nesse trabalho.

Realizar ensaios com DCP em solos "saturados" ou em subleitos em épocas chuvosas, e correlacionar com valores dos CBRs "in situ".

Estudar, de forma compatível, os resultados dos ensaios convencionais, usados no controle de compactação das camadas do pavimento, com os resultados de ensaios realizados com o DCP.

Realizar estudos visando propor um método para o controle de compactação das camadas de pavimentos, no período de construção, utilizando os resultados do ensaio do DCP.

Realizar um estudo de repetibilidade dos resultados obtidos com o ensaio do DCP.

Avaliar o desempenho do pavimento dimensionado pelo método proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 06

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT MB-32/84 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7181/84: Solos – Análise Granulométrica. Registrada no SINMETRO, 1984.

ABNT MB-238/86 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7185/84: Solos – Determinação da Massa Específica Aparente, “in situ”, com Emprego do Frasco de Areia. 1986.

AMINI, F.. Potential Applications of Dynamic and Static Cone Penetrometers in Pavement Design and Construction. Final Report. Department of Civil Engineering Jackson State University In Cooperation with Mississippi Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 2003. Disponível em: <<http://www.mdot.state.ms.us/research/pdf/DynConPn.pdf>, > Acesso em: 21 abr. 2004.

BURNHAM, T. R.; JOHNSON, D. In: Situ Foundation Characterization Using the Dynamic Cone Penetrometer,. Final Report, Minnesota Department of Transportation Maplewood, MN, 1993.

CARDOSO, A. B.; TRICHÊS, G. Proposição de uma Metodologia para Utilização do Penetrômetro Dinâmico de Cone no Controle da Execução da Camada Final de Terraplenagem. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, p. 661-673, 2000.

CHASE, W.; BOWN, F. General Statistics. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1992.

CHUA, K. M.. Determination of CBR and Elastic Modulus of Soils Using a Portable Pavement Dynamic Cone Penetrometer. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, USA. In: Penetration Testing 1988, ISOPT-1, ed Ruiter . Balkema, ISBN 90 6191 8014. p. 407 – 414. 1988

COONSE, J.. Estimating California Bearing Ratio of Cohesive Piedmont Residual Soil using the Scala Dynamic Cone Penetrometer. Master's Thesis (MSCE), North Carolina State University, Raleigh, N.C, 1999.

CURTY, M. G.; CRUZ, A. da C.; MENDES, M. T. R. Apresentação de Trabalhos Acadêmicos, Dissertações e Teses: NBR 14724/2002. Ed. Dental Press. Maringá, 2002.

DIRENG – Diretório de Engenharia da Aeronáutica. Método de Ensaio - 01-87. Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras não Trabalhadas, 1987.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Manual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 1996.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODOS E INSTRUÇÕES DE ENSAIOS. DNER-ME 52/94. Solos e Agregados Miúdos – Determinação da Umidade com emprego do "Speedy", 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODOS E INSTRUÇÕES DE ENSAIOS. DNER-ME 49/94. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras não Trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODO DE ENSAIO. DNER-ME 122/94. Solos – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expedido. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODO DE ENSAIO. DNER-ME 82/94. Solos – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODO DE ENSAIO. DNER-ME 213/94. Solos – Determinação do Teor de Umidade. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - MÉTODO DE ENSAIO. DNER-ME 41/94. Solos – Preparação de Amostras para Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

ESE, D.. The Use of Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for Road Strengthening Design in Norway. Proc. Int. Conf. on Bearing Capacity of Rd. and Airfield, 1995.

HARISON, J. R. Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils. Proc. Instn. of Civ. Engrs., London, Part 2, p. 83-87, 1987.

HASSAN, A. The Effect of Material Parameters on Dynamic Cone Penetrometer Results for Fine-Grained Soils and Granular Materials Ph.D. Dissertation, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1996.

HENAU, A. de. The Use of a Light Percussion Sounding Apparatus. Belgian Road Research Center, Brussel. In: Proceedings of Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, p 271 – 275, 1982. .

HERRICK & JONES 66 (4) ... A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance ... The Hammer-type, Dynamic Cone Penetrometer Described here Cone Used to Calculate a Soil Penetration Resistance, 2001 ... Disponível em: <<http://www.intl-soil.scijournals.org/cgi/content/full/66/4/1320>> Acesso em: 22 abr. 2004.

HEYN, A.T. Aplicações do Penetrômetro Dinâmico de Ponta Cônica na Avaliação de Estruturas de Pavimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21.,1986, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, p. 139-149, 1986.

JORDÃO, L. P., Avaliação Estrutural das Pistas de Pouso e decolagem, Pátios e Acessos do Aeroporto Presidente Castro Pinto de João Pessoa. 1, 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, , Campina Grande, 2004.

KLEYN, E. G. The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP). Rep.No. 2/74. Transval Roads Department, South Africa, 1975.

KLEYN, E. G.; MAREE, J. H.; SAVAGE, P. F. The Application of a Portable Pavement Dynamic Cone Penetrometer to Determine in situ Bearing Properties of Road Pavement Layers and Sugrades in South Africa. In: Proceedings of Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, p 277 – 281, 1982.

KLEYN, E. G.; VAN ZLY, G. D. Application of Dynamic Cone Penetrometer (DCP) to Light Paviment Design. Roads Branch, Transvaal Provincial Administration, Pretoria, RSA. In: Penetration Testing 1988, ISOPT-1, ed Ruiters. Balkema, ISBN 90 6191 8014. p. 435 – 443. 1988.

LIVNEH, M. Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests. Transp. Res. Rec. 1219. Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 56-67, 1987.

LIVNEH, M.; ISHAI, I.; LIVNEH, N. A. Automated DCP Device Versus Manual DCP Device. [S.l.] Rd. and Transport Res., Vol. 1, No. 4, 1992.

LIVNEH, M.; ISHAI, I.; LIVNEH, N. A. Effect of Vertical Confinement on Dynamic Cone Penetrometer Strength Values in Pavement and Subgrade Evaluations. Transp. Res. Rec. 1473, p. 1-9, 1995.

LIVNEH, M. Friction Correction Equation for the Dynamic Cone Penetrometer in Subsoil Strength Testing. Paper Presented at the 79th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C, 2000.

LIVNEH, M.; ISHAI, I. The Relationship between in-situ CBR Test and Various Penetration Tests. Transportation Research Institute, Technion, Haifa, Israel. Penetration Testing 198, ISOPT-1, ed Ruiter. Balkema, ISBN 90 6191 8014. p. 445 – 452. 1988.

PARKER, F.; HAMMONS, M.; HALL, J. Development of an Automated Dynamic Cone Penetrometer for Evaluating Soils and Pavement Materials. Final report, Project No. FLDOT-ADCP-WPI #0510751, Florida Department of Transportation, Gainesville, Florida, 1998.

PAIVA, C. E. L. de; BERTI, C. Estudo do Uso do Cone de Penetração Dinâmica em Via não Pavimentada no Campus da Universidade Estadual de Campinas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 1. Anais... Artigo 014 35 RAPv 2004, pdf, Rio de Janeiro, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. Pavimentação Urbana. Secretaria de Vias públicas, Superintendência de Projetos. 1, São Paulo, 1992.

RESENDE, L. R. Técnica Alternativa para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1999.

ROHM, S. A.; NOGUEIRA, J. B. Determinação de Mini-CBR Através do Ensaio de Penetração Dinâmica. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21. Anais, Rio de Janeiro ABPv, p. 61 – 73, 1990.

SENÇO, WLASTERMILER de. Manual de Técnicas de Pavimentação, 1, ed. PINI, São Paulo, 1997.

SIEKMEIER, J. A.; YOUNG, D.; BEBERG, D. Comparison of the Dynamic Cone Penetrometer with Other Tests During Subgrade and Granular Base Characterization in Minnesota. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third VI. ASTM 1375, S. D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, 1999.

SIEKMEIER, J.; BURNHAM, T.; BEBERG, D. Mn/DOT's New Base Compaction Specification Based on the Dynamic Cone Penetrometer,. 46th Geotechnical Engineering Conference, University of Minnesota, Feb, 1998.

THOMAS R. 1997. MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Application of the Dynamic Cone Penetrometer to Minnesota Department of Transportation Pavement Assessment Procedures, 1997. Disponível em: <<http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/MnROADProject/MnRoadOnlineReports> > Acesso em: 20 abr. 2004.

TRICHÊS, G.; CARDOSO, A.B. Avaliação da Capacidade de Suporte de Aterros e Subleito de Rodovias Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fundações, 1. Anais... p 649-656, Brasília 1998.

TRICHÊS, G.; DAL PAI, C. M.; Fontes, L. P. T. da L. Procedimentos Técnicos para o Emprego do Cone de Penetração Dinâmica na Construção e Investigação dos Pavimentos Urbanos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35. 1. Anais... Artigo 096 35 RAPv 2004, pdf, Rio de Janeiro, 2004.

TRICHÊS, G.; CARDOSO, A.B. Avaliação da Capacidade de Aterros e Subleito de Rodovias Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone e a Viga Benkelman. In: TRANSPORTE EM TRANSFORMAÇÃO, IV. Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT – Produção Acadêmica 1999. Anais... Makron Books, p. 35-49, 1999.

TRRL – Transport and Road Research Laboratory. Information Note. Operating Instructions for the TRRL Dynamic Cone Penetrometer. Crowthorne Berkshire United Kingdom. Ed Crown Copyright, 1986.

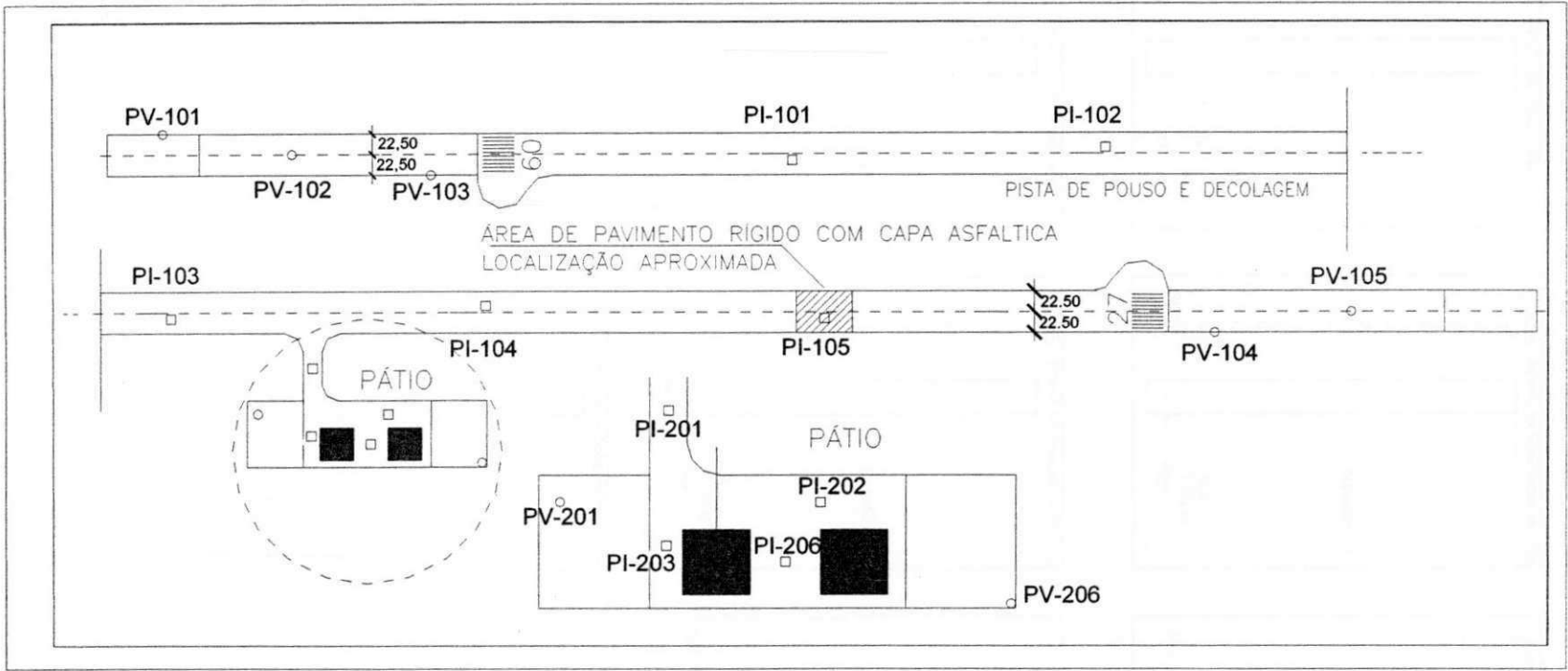
VERTAMATTI, E.; OLIVEIRA, L.E.de. Análise de Pavimento de Baixo Volume de Tráfego Executado com Solos Transicionais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO, 1., Rio de Janeiro. Anais... p. 326-344, 1997.

VERTAMATTI, E.; OLIVEIRA, L.E.de. Comportamento de Solos Tropicais de Natureza Transicional em Camadas Estruturais de Pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1. Anais... p 657-664, Brasília, 1998.

VIEIRA FILHO, J. O., Avaliação Estrutural de um Pavimento Rígido em Via Urbana do Recife. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Pós-Graduação/UFPB, MSc.. 400 p, 29 cm, Campina Grande, 1999.

WEBSTER, S. L., GRAU, R. H., AND WILLIAMS, T. P. (1992). Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer. Final Report, Department of Army, Waterways Expe

ANEXOS



ANEXO AA – Localização dos Pis e Pvs no Aeroporto de Paraitiba

ANEXO AC – Exemplos de Dimensionamento

Exemplo 01

⇒ Dados:

Composição de tráfego: Tráfego Tipo - 1

Material do subleito: DN = 29 mm/golpe

⇒ Marcha de Cálculo:

No Ábaco da Figura 4.19 é estimada a espessura total do Pavimento - $E_{TOTAL} = 25$ cm

⇒ Escolha do Projeto Tipo (Figura 4.17)

T - 1A

Base de material granular B = 10 cm (K = 1)

Revestimento em CBUQ R = 3 cm (K = 1,8)

⇒ Cálculo da espessura equivalente (E_q)

$$E_q = 3 \cdot 1,8 + 10 \cdot 1 = 15,4 \text{ cm}$$

⇒ Cálculo da espessura da sub-base (E_{SUB})

$$E_{SUB} = E_{TOTAL} - E_q = 25 - 15,4 = 9,6, \text{ adotar } 10 \text{ cm};$$

⇒ Características do material da sub-base

O valor máximo de DN para este material é obtido no ábaco da Figura 4.16 a partir da espessura encontrada para sub-base (10 cm).

$E_{SUB} = 10 \text{ cm}$ & Tráfego do Tipo - 1 (ábaco da Figura 4.16) \rightarrow DN - 12 mm/golpe

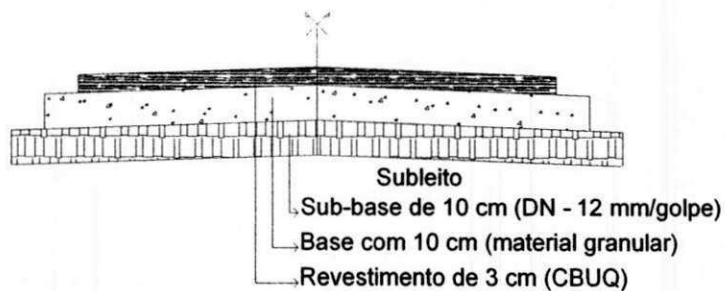


Figura AC.1 – Estrutura do pavimento para o exemplo 01

Exemplo 02

\Rightarrow Dados:

Composição de tráfego: Tráfego Tipo - 2

Material do subleito: DN = 40 mm/golpe

\Rightarrow Marcha de Cálculo:

No Ábaco da Figura 4.16 - $E_{TOTAL} = 41 \text{ cm}$

\Rightarrow Escolha do Projeto Tipo (Figura 4.18)

T - 2E

Revestimento em paralelepípedo R = 13 cm (K = 1)

Camada de areia (colchão de areia) C = 5 cm (K = 1)

Base de material granular $B = 10 \text{ cm}$ ($K = 1$)

⇒ Cálculo da espessura equivalente (E_q)

$$E_q = 13 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 10 \cdot 1 = 28 \text{ cm}$$

⇒ Cálculo da espessura da sub-base (E_{SUB})

$$E_{SUB} = E_{TOTAL} - E_q = 41 - 28 = 13 \text{ cm}$$

⇒ Características do material da sub-base

$E_{SUB} = 13 \text{ cm}$ & Tráfego do Tipo – 2 (ábaco da Figura 4.16) → DN - 13 mm/golpe

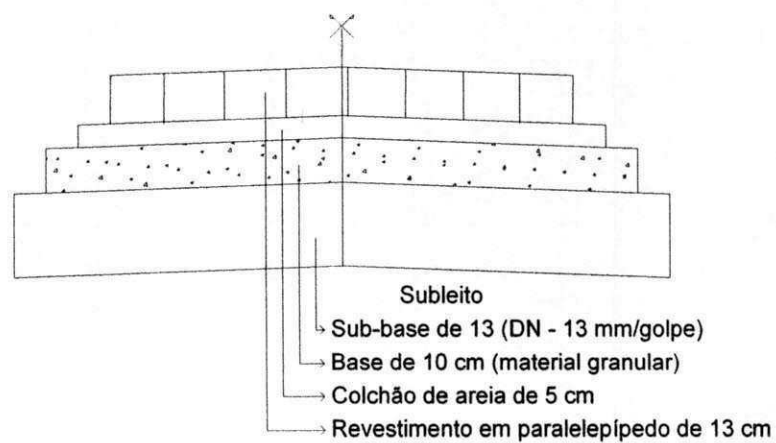


Figura AC.2 – Estrutura do pavimento para o exemplo 02