

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**UMA ANÁLISE CRÍTICA DE ALGUNS
PROCESSOS EMPÍRICOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Autor: Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho

**Campinas
1999**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

UMA ANÁLISE CRÍTICA DE ALGUNS
PROCESSOS EMPÍRICOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS

Autor: Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Araken Silveira

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação.

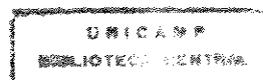
25/11/99

Prof. Dr. *Araken Silveira*

Matrícula: _____

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

Campinas
1999



010 0000501

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	02830
V.	Ex.
TOMBO BC/	39933
PROC.	278/00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	12/01/00
N.º CPD	

CM-00137829-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C253a

Carvalho, Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis
Uma análise crítica de alguns processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis / Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho.-- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Araken Silveira
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

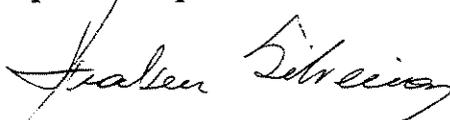
1. Pavimentos flexíveis. 2. Engenharia rodoviária.
3. Análise de regressão. I. Silveira, Araken. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**UMA ANÁLISE CRÍTICA DE ALGUNS
PROCESSOS EMPÍRICOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Autor: Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Araken Silveira

Presidente e Orientador - Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva

Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória

E.E.S.C. / USP

Campinas, junho de 1999

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô e grande admirador João Seraphico, pela credibilidade e incentivo, e aos meus pais, João e Nazaré, por todos os esforços, sacrifícios e abdições, que já enfrentaram neste mundo, a fim de que pudessem dar a mim e minhas irmãs, melhores oportunidades na vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao professor Araken Silveira, por ter confiado a mim, o desenvolvimento desta pesquisa; pela solidariedade nos momentos mais difíceis desta caminhada e acima de tudo, pelos ensinamentos transmitidos em conversas informais, que com certeza contribuirão para a minha formação futura, como profissional e principalmente como ser humano.

Externo minha gratidão ao professor Cássio pela atenção e companheirismo ao longo deste curso e, tenho a plena certeza, de que os vínculos formados, extrapolaram os limites de uma sala de aula.

Lembro aqui os amigos do laboratório de solos: Meyer, Cipriano, Reinaldo, Edson, Cleidinha, professora Maria Teresa e professor Trabanco, pelos momentos de descontração e pelo auxílio em algumas disciplinas específicas. Agradeço também aos professores Serafim e Cavicchia, integrantes desta família do laboratório, pela atenção dispensada à minha pessoa, tanto em sala de aula como nas horas vagas.

Jamais poderia esquecer nesta hora de mencionar o carinho e apoio recebido dos funcionários da FEC, todos sem exceção, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este momento acontecesse, porém, gostaria de agradecer especialmente a Paula, Natacha e Rose.

Aos novos amigos, Cavalcante, Emiliana, Maria José, Cristian, Pedro, Humberto e César, Carlos Augusto e Deborah, que fazem parte deste curso e da minha estada em Campinas, meus agradecimentos. Minha profunda gratidão e respeito à Ana Paula, por toda a sua compreensão e incentivo e, a toda sua família pelo carinho oferecido.

Ao meu primo-irmão Marcelo por todas as experiências trocadas e conselhos importantes em horas de agonia, minha profunda admiração.

Agradeço aos meus familiares próximos, Socorro, Joaquim, Amanda e André, pela acolhida e atenção em São Paulo. Porém, não posso deixar de agradecer a toda minha família, e

principalmente à Ana (minha mestra), Nilson e meus Pais (João e Nazaré), que mesmo à distância, sempre acreditaram em mim e mantiveram-me sempre perseverante.

Gostaria de agradecer ao doutor Druma, grande amigo que presenciou todos os momentos desta jornada.

Enfim, agradeço à Deus, de onde vem toda a sabedoria, por permitir que eu chegasse ao final de mais uma etapa da minha vida.

Gostaria de agradecer à FAPESP, pelo patrocínio desta pesquisa.

“Se você aceita mais riscos, tem mais espaço não só para mais fracassos como para mais sucessos, o que, em última instância, é o que constrói a confiança.”

(Susan Kleinman).

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE GRÁFICOS	v
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
RESUMO	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
3.2. PROCESSOS EMPÍRICOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	7
3.2.1. INTRODUÇÃO	7
3.2.2. O MÉTODO C.B.R.	8
3.2.3. O PROCESSO DO CORPS OF ENGINEERS	12
3.2.4. O PROCESSO DA AASHTO	25
3.2.5. O PROCESSO DO D.N.E.R.	35
4. METODOLOGIA	45
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. PROCEDIMENTO	46

5. RESULTADOS	58
5.1 INTRODUÇÃO	58
5.2 RESULTADOS OBTIDOS.....	58
6. ANÁLISES DOS RESULTADOS	83
6.1. INTRODUÇÃO	83
6.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS	83
7. CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ABSTRACT	110

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Valores padronizados de penetrações e pressões para o ensaio C.B.R.	9
TABELA 3.2 - Características dos veículos considerados para a formulação do processo do USACE.....	23
TABELA 3.3 - Relações entre operações e coberturas para os veículos considerados pelo processo do USACE.....	24
TABELA 3.4 - Coeficientes estruturais dos estudos realizados pela AASHTO.....	29
TABELA 3.5 - Valores adotados para o fator regional obtidos a partir das pistas de testes da AASHTO.....	31
TABELA 3.6 - Correlação entre os valores de índice de grupo e C.B.R.	36
TABELA 3.7 - Coeficientes estruturais para as camadas de pavimentos utilizados pelo D.N.E.R.	39
TABELA 3.8 - Espessuras necessárias para a camada de revestimento em função do número N.....	40
TABELA 4.1 - Coeficientes estruturais utilizados na pista de testes da AASHTO.....	47
TABELA 4.2 - coeficientes estruturais do D.N.E.R. utilizados nesta pesquisa.....	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Esquema demonstrativo do ensaio C.B.R.....	10
FIGURA 3.2 - Curvas obtidas no ensaio C.B.R., sem correção e com correção.	11
FIGURA 3.3 - Curva de observação do comportamento de pavimentos da década de 30.....	13
FIGURA 3.4 - Primeira curva para dimensionamento de pavimentos de aeroportos.	13
FIGURA 3.5 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento leve.....	15
FIGURA 3.6 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento médio.	15
FIGURA 3.7 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento pesado. ...	16
FIGURA 3.8 - Esquema representativo da filosofia do método C.B.R.....	17
FIGURA 3.9 - Reta que define a correlação entre cobertura e % de projeto no processo do USACE.....	20
FIGURA 3.10 - Curvas para determinação do fator equivalente de operações do processo do USACE.....	21
FIGURA 3.11 - Curvas de dimensionamento de pavimentos flexíveis do processo do USACE. 2	22
FIGURA 3.12 - Gráfico de dimensionamento de pavimentos flexíveis do processo do D.N.E.R..	42
FIGURA 3.13 - Representação genérica das camadas de um pavimento flexível para o D.N.E.R..	43

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 1.....	59
GRÁFICO 5.2- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 2.....	60
GRÁFICO 5.3- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 3.....	61
GRÁFICO 5.4- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 4.....	62
GRÁFICO 5.5- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 5.....	63
GRÁFICO 5.6- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 6.....	64
GRÁFICO 5.7- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 7.....	65
GRÁFICO 5.8- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 8.....	66
GRÁFICO 5.9- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 9.....	67

GRÁFICO 5.10- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 10.....	68
GRÁFICO 5.11- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 11.....	69
GRÁFICO 5.12- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 12.....	70
GRÁFICO 5.13- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 13.....	71
GRÁFICO 5.14- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 14.....	72
GRÁFICO 5.15- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 15.....	73
GRÁFICO 5.16- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 16.....	74
GRÁFICO 5.17- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 17.....	75
GRÁFICO 5.18- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 18.....	76
GRÁFICO 5.19- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 19.....	77
GRÁFICO 5.20- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 20.....	78
GRÁFICO 5.21- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 21.....	79
GRÁFICO 5.22- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 22.....	80

GRÁFICO 5.23- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 23.....	81
GRÁFICO 5.24- Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 24.....	82
GRÁFICO 6.1- Variação do número (N) dos processos do USACE e do DNER em função das composições de tráfegos analisadas.....	86
GRÁFICO 6.2- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 1.	87
GRÁFICO 6.3- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 2.	87
GRÁFICO 6.4- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego3.....	88
GRÁFICO 6.5- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 4.	89
GRÁFICO 6.6- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 5.	89
GRÁFICO 6.7- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 6.	90
GRÁFICO 6.8- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 7.	91

GRÁFICO 6.9- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 8.	91
GRÁFICO 6.10- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 9.	92
GRÁFICO 6.11- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 10.....	93
GRÁFICO 6.12- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 11.....	94
GRÁFICO 6.13- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 12.....	94
GRÁFICO 6.14- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 13.....	95
GRÁFICO 6.15- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 14.....	96
GRÁFICO 6.16- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 15.....	96
GRÁFICO 6.17- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 16.....	97

GRÁFICO 6.18- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 17.....	98
GRÁFICO 6.19- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 18.....	98
GRÁFICO 6.20- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 19.....	99
GRÁFICO 6.21- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 20.....	100
GRÁFICO 6.22- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 21.....	100
GRÁFICO 6.23- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 22.....	101
GRÁFICO 6.24- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 23.....	102
GRÁFICO 6.25- Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 24.....	102
GRÁFICO 6.26- Variação da espessura entre o processo do DNER e do USACE em função do número N (médio) de operações.....	103

GRÁFICO 6.27- Comparação entre a variação das espessuras entre o processo do DNER e do USACE em função do número N (médio) de operações, com a utilização da reta de regressão linear 104

LISTA DE ABREVIATURAS

a_1	- Coeficiente estrutural da camada de revestimento, no Processo de ASSHTO
a_2	- Coeficiente estrutural da camada de base, no Processo de ASSHTO
a_3	- Coeficiente estrutural da camada de sub-base, no Processo de ASSHTO
AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
B	- Espessura de camada de base
C	- Comprimento em pés, das trincas maiores, por 1000 pés ² de área, para o cálculo do ISA
CBR	- California Bearing Ratio
CBR_{IG}	- Valor do CBR corrigido
D_1	- Espessura da camada de revestimento, no Processo de ASSHTO
D_2	- Espessura da camada de base, no Processo de ASSHTO
D_3	- Espessura da camada de sub-base, no Processo de ASSHTO
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FC	- Fator de carga
FE	- Fator de eixo
FR	- Fator climático regional
FV	- Fator de veículos

h_{20}	- Espessura de camada de sub-base
H_{20}	- Espessura de pavimento para proteção da camada de sub-base
H_m	- Espessura de pavimento para proteção do subleito
h_n	- Espessura de camada de reforço do subleito
H_n	- Espessura de pavimento para proteção de camada de reforço do subleito
IG	- Índice de Grupo, utilizado no Processo do DNER
IP	- Índice de Plasticidade
IS	- Índice de Suporte
ISA	- Índice de Serventia Atual do Pavimento, pelo Processo de AASHTO
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
K	- Constante de regressão, da escala de suporte, no Processo da AASHTO
K_B	- Coeficiente estrutural para a camada de base
K_R	- Coeficiente estrutural para a camada de revestimento
K_{ref}	- Coeficiente estrutural para a camada de reforço
K_S	- Coeficiente estrutural para a camada de sub-base
LL	- Limite de liquidez
m_2	- Coeficiente de drenagem da camada de base, no Processo da AASHTO (1986)
m_3	- Coeficiente de drenagem da camada de base, no Processo da AASHTO (1986)
MR	- Módulo Resiliente do Solo
N	- Número equivalente de operações de um eixo, no Processo do DNER
N_{18}	- Aplicação da carga total para as condições do teste, no Processo da AASHTO
P	- Carga Padrão adotada para o cálculo da espessura de pavimento pelo Processo do Corps of Engineers

p	- Pressão nos pneus adotada no cálculo da espessura de pavimento pelo Processo do Corps of Engineers
P	- Manchas em pés ² para o cálculo do ISA
P	- Período de Projeto
pt	- Índice de Serventia do Pavimento, pelo Processo da AASHTO
\overline{RD}	- Profundidade média das trilhas de rodas, para o cálculo do ISA
R	- Fator regional, no Processo da AASHTO
R	- Espessura de camada de revestimento
S	- Condição inicial adotada para o subleito local, na pista de teste da AASHTO
S _i	- Suporte de solo para qualquer condição i, no Processo da AASHTO
SN	- Número estrutural do Processo de AASHTO
S _o	- Suporte de solo para as condições do teste, no Processo da AASHTO
SV	- Variância da inclinação longitudinal, para cálculo do ISA
t	- Espessura de pavimento encontrada pela Fórmula do Processo do Corps of Engineers
t	- Taxa de crescimento anual, em progressão aritmética, dada em %
USACE	- United States Army Corps of Engineers
V ₁	- Volume médio diário de tráfego no ano da abertura do pavimento e num sentido
V _m	- Volume médio diário de tráfego, num sentido, durante um período de P anos
V _t	- Volume total de tráfego, num sentido, durante o período P
W ₁₈	- Tráfego ou o número total de aplicações da carga padrão durante a vida útil do pavimento, no Processo da AASHTO
W ₁₁₈	- Aplicação da carga total para a condição i, no Processo da AASHTO
Z ₀	- Espessura total do pavimento para proteção do subleito

- Z_1 - Espessura de pavimento para proteção da camada de sub-base
- Z_2 - Espessura de pavimento para proteção da camada de base

RESUMO

Nesta pesquisa é realizado um estudo comparativo entre três processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, todos, com bases conceituais substanciadas pelo método do CBR.

São comparados os processos do Corps of Engineers (1962), da AASHTO (1972) e do DNER (1966), com o objetivo de analisar a tendência de comportamento deste último, em relação aos dois primeiros.

Primeiramente, serão estudados os procedimentos de cálculo de cada um dos processos mencionados e, posteriormente, estes, serão submetidos a uma comparação entre si. Esta comparação terá como parâmetro de observação, as espessuras de pavimentos obtidas para cada processo, quando submetidos à composições de tráfegos iguais e às mesmas condições de subleito.

Com esta comparação serão evidenciadas, quais as influências, em termos de procedimento de cálculo, que realmente ocorrem no processo do DNER, por parte dos processos do Corps of Engineers e da AASHTO. Desta forma, serão salientados todos os aspectos que podem ser desconsiderados no processo do DNER, para dimensionar pavimentos flexíveis, a fim de melhor adequá-lo às condições brasileiras e respaldá-lo cientificamente, sem comprometer entretanto, a validade de seus resultados.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis são estruturas que podem ser compostas por várias camadas, sendo que, as mesmas devem trabalhar sempre em conjunto, ou seja, cada camada deve receber e absorver parte das solicitações impostas pelo tráfego e transmitir o restante às camadas subjacentes, até que estas ações cheguem de forma bem suave ao subleito.

Para que isso ocorra de maneira segura, sem que haja comprometimento da estrutura, sem que o conjunto sofra desgastes superficiais excessivos, deformações apreciáveis ou até mesmo atinja um estado de fadiga prematuramente, ocasionando sua ruptura, é necessário que se tenha cuidados especiais no momento de sua concepção.

Então, dimensionar um pavimento flexível, significa fazer um estudo criterioso de todos os aspectos envolvidos com o problema, como por exemplo os materiais que comporão as suas camadas, o tráfego que atuará na rodovia, as condições ambientais e principalmente, deve ser dada uma atenção especial ao solo de fundação sobre o qual repousará a estrutura. Além destes aspectos deve ser dado, na fase de execução do pavimento, o tratamento devido a camada que o constitui, tanto no que diz respeito ao emprego do equipamento adequado ao material utilizado, como no tocante aos controles tecnológicos correspondentes.

O grande desafio hoje em dia, para os estudiosos desta área, está concentrado exatamente em encontrar a estrutura ideal, que seria consequência de um dimensionamento perfeito, tanto no que diz respeito aos aspectos técnicos como também aos aspectos econômicos, sendo que estes últimos quase sempre, transformam-se em limitações para os primeiros.

Existem portanto, procedimentos adotados que procuram equacionar este tipo de problema, ou seja, procuram dimensionar tais estruturas da forma mais compatível possível,

sendo estes, enquadrados em duas correntes distintas, uma que utiliza métodos mecânicos para o dimensionamento de seus pavimentos e outra que utiliza métodos empíricos para o cálculo de tais estruturas.

O método mecânico é aquele que se utiliza da teoria ou método de cálculo de esforços atuantes para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento, procurando compatibilizá-las com as tensões resistentes. Tais procedimentos têm sido utilizados também, para prever as rugosidades nos pavimentos flexíveis.

Um procedimento mecânico completo de projeto deve conter muitos fatores importantes a serem obtidos, como a caracterização adequada dos materiais, exigindo assim, equipamentos especiais para ensaios e computadores para cálculos adicionais. Além disso, é preciso que se saiba exatamente as hipóteses envolvidas no modelo para que se aplique de forma adequada as ferramentas analíticas, o que requer um treinamento específico de pessoal.

Os procedimentos empíricos se baseiam em geral em experiências repetidas várias vezes no campo e se limitam a prever espessuras adequadas para os pavimentos, a fim de garantir basicamente o critério da ruptura por deformação permanente. Entretanto, a aplicabilidade dos mesmos, torna-se bastante limitada devido a alguns aspectos, como as condições de contorno que deram origem às suas curvas experimentais de dimensionamento, os materiais utilizados em seus trechos de observação e as condições de tráfego e clima atuantes nos pavimentos testados. Não permitem portanto, uma generalização adequada para outras regiões, novos materiais e novas cargas.

Comparar as duas correntes portanto, na tentativa de saber qual é a que fornece melhores resultados, torna-se uma tarefa muito complicada, pois, ambas têm concepções próprias, além do que, até o momento, nenhuma das duas se sobressaiu em relação a outra, deixando assim, uma grande dúvida para a pessoa que irá dimensionar um pavimento flexível, uma vez que esta, ficará sem saber que corrente utilizará em seu cálculo.

“ Como até hoje nenhuma das duas correntes logrou êxito total, ou seja, como não se conseguiu ainda um processo satisfatório de aceitação geral, como consequência direta da complexidade do fenômeno, as posições tem-se mantido ” (SILVEIRA, 1993).

Porém, a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, ainda nos dias de hoje, utiliza-se muito de conceitos empíricos, pois, mesmo os métodos mecanísticos, têm algumas hipóteses simplificadoras e apresentam também uma certa calibração com dados empíricos, obtidos em ensaios de laboratório.

Nesta pesquisa será feita uma comparação entre processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, todos pertencentes a grande família do método C.B.R.. Serão analisados então, os processos do Corps of Engineers, da AASHTO e do D.N.E.R..

Os dois primeiros processos têm um embasamento conceitual muito consistente e possuem também um procedimento de cálculo bem definido, sendo estes aspectos, obtidos a partir de amplas observações e de alguns critérios de equivalências estabelecidos. Os processos do Corps of Engineers e da AAHTO, desde sua elaboração, são considerados como um avanço considerável, na área de pavimentação, sendo os mesmos, até hoje, objeto de pesquisas em nível mundial.

Com relação ao D.N.E.R., trata-se do processo em que foi e é até hoje dimensionada a maioria das rodovias brasileiras e tem como embasamento conceitual, em seu procedimento de cálculo, tanto as concepções de experiências obtidas pelo Corps of Engineers como também as observadas nas pistas de testes da AASHTO, sendo este processo, portanto, o resultado de uma fusão dos procedimentos desses dois processos mundialmente conhecidos.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo, analisar a tendência de comportamento do processo do D.N.E.R. em relação aos processos do Corps of Engineers e da AASHTO, quando todos são submetidos à composições de tráfego iguais, a fim de que se possa evidenciar, quais as influências que, de fato, o D.N.E.R. sofre por parte desses dois processos, salientando assim, aspectos que podem ser desconsiderados em seu procedimento de cálculo atual do processo, sem comprometer entretanto, a validade de seus resultados.

Nesta pesquisa serão feitos também, levantamentos dos fatores mais importantes a serem levados em conta, para uma melhor adequação dos processos investigados ao caso brasileiro, bem como quais os aspectos a serem seguidos nessa adequação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Quando é feito o dimensionamento de um pavimento flexível, tem-se as espessuras de suas camadas definidas em centímetros (cm); a largura em metros (m) e a extensão em quilômetros (Km), sendo que esta última dimensão, assume papel preponderante no que tange ao nível de complexidade que reveste o assunto, pois, quanto mais extensa for a rodovia, maiores são as possibilidades de atravessar regiões com grandes variações de materiais de subleito, condições ambientais e climáticas diversas, e ainda com ocorrência de jazidas de materiais adequados à estrutura, mais ou menos frequentes. Por outro lado, a própria definição do volume de tráfego para o projeto se torna mais complicada, em consequência das contribuições que de forma descontrolada acessam à rodovia.

Desta forma, fica evidenciado que para dimensionar um pavimento, é preciso que se faça um tipo de abordagem inicial e, a partir desta, se tenha um estudo criterioso de todos os efeitos pertinentes à mesma.

Os pavimentos flexíveis são considerados como um sistema de camadas. Então, a questão inicial do problema, está exatamente em definido um sistema, determinar o estado de tensão, deformação ou ruptura em um ponto qualquer do mesmo, ou do seu solo de fundação, quando este é solicitado por uma carga qualquer.

“ O problema geral no dimensionamento de um pavimento é considerar um ponto P qualquer do sistema, no subleito ou no pavimento e determinar, para este ponto, quando o

sistema é solicitado por uma carga Q , o estado de tensão, a deformação e se vai ou não, haver ruptura “ (SOUZA, 1980).

Com isso pode-se dizer que do ponto de vista estrutural, o pavimento pode ser analisado em seu dimensionamento, sob uma ótica de ruptura ou de deformação, sendo que no caso dos pavimentos flexíveis, o fator determinante do comportamento do sistema é exatamente a tensão vertical de compressão no subleito, ou seja, a sua capacidade de suporte.

Para determinar a resistência de um solo, pode-se lançar mão de alguns ensaios, tanto de campo como de laboratório, dentre estes, pode ser citado o ensaio de cisalhamento. Este, pode permitir a determinação do módulo de deformação, que assimilado ao módulo de elasticidade, possibilita o cálculo de deformações em um meio supostamente elástico.

A prova de carga, é um ensaio de campo, que com algumas hipóteses, pode ser utilizado também, para a determinação do módulo de deformação ou módulo de elasticidade de um solo, este ensaio é feito através do carregamento da superfície de uma massa de solo.

Por fim, existe o ensaio de penetração, que pode ser feito em laboratório ou “ in situ “ e pode ser assimilado ao ensaio de prova de carga em pequena escala, porém, a relação entre a deformação e a área solicitada é muito maior que no ensaio anteriormente citado.

Os ensaios de penetração são os mais comumente utilizados, como auxílio no dimensionamento dos pavimentos flexíveis, estando ligados principalmente à deformações permanentes, e tendo no C.B.R. (California Bearing Ratio) ou I.S.C.(Índice de Suporte Califórnia), o método mais difundido mundialmente.

3.2. PROCESSOS EMPÍRICOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.

3.2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os processos de dimensionamento do Corps of Engineers, da AASHTO e do D.N.E.R., mostrando então, a concepção e o procedimento

empregado por cada um para a obtenção de suas espessuras de pavimento. Como estes processos têm suas origens e fundamentos advindos do método C.B.R., será feita inicialmente, a apresentação deste, para melhor entendimento dos processos estudados.

3.2.2. O MÉTODO C.B.R.

O método C.B.R. teve sua origem a partir de estudos realizados pelo Departamento de Estradas da Califórnia, nos Estados Unidos, porém, a sistematização final, deste, foi feita por O. J. Porter no final da década de 30. O método foi concebido com o objetivo de definir a resistência dos materiais granulares, empregados nos serviços de pavimentação, tornando-se desta forma, uma das características mais aceitas para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de um pavimento, quer como componente das camadas desse mesmo pavimento.

O C.B.R. é um ensaio de penetração no qual um pistão padronizado, com área de $7,62\text{cm}^2$, à velocidade de $0,127\text{ cm/min}$, penetra em uma amostra de solo preparada, também, de modo padronizado, possibilitando desta forma, a determinação de pressões para cada décimo de polegada de penetração registradas até $0,76\text{ cm}$, às vezes até $1,27\text{ cm}$, fazendo-se determinações intermediárias para as penetrações de $0,063\text{ cm}$; $0,127\text{ cm}$ e $0,190\text{ cm}$.

Trata-se de um ensaio que pode ser feito tanto em laboratório, passando assim por algumas fases de execução - a) fase de preparação da amostra; b) fase de embebição da amostra e medida da expansão; c) fase de penetração da amostra; d) fase em que é traçada a curva Pressão-Penetração e calculado o valor do C.B.R. - como também, pode ser realizado no campo, devido a sua praticidade, possibilitando assim, a comparação entre os dois resultados obtidos, e conseqüentemente, dando maior segurança aos projetistas que se utilizam deste parâmetro para seus dimensionamentos.

O C.B.R. pode ser definido como a relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão, de pedra britada de alta qualidade ou material equivalente.

Com o objetivo de padronizar o ensaio, para que o mesmo pudesse ser utilizado por outros órgãos, de forma compatível com a original, evitando assim, distorções nos resultados encontrados, foram obtidos alguns valores, mostrados na tabela 3.1 a seguir, no que diz respeito a penetração e a pressão, que são utilizados como referência neste tipo de ensaio, e que correspondem a um determinado tipo de pedra britada, ensaiada anteriormente, que apresentou como característica, um C.B.R. de 100%.

Penetração (cm)	Pressão (Kg/cm ²)
0,254	70,31
0,508	105,46
0,762	133,58
1,016	161,70
1,270	182,80

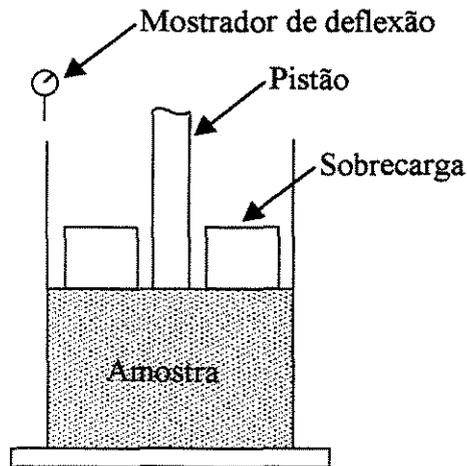
Fonte: Souza (1980); pag.217.

TABELA 3.1 - Valores padronizados de penetrações e pressões para o ensaio C.B.R..

Normalmente é adotada, como referência de cálculos para projetos de pavimentos, a unidade de carga ou pressão que impõe a um solo, a penetração de 0,254 cm, ou seja, o valor do C.B.R. de um solo, corresponde ao valor encontrado, no ponto em que uma determinada pressão, provocada pelo pistão de ensaio, no referido solo, impõe a este, uma deformação de 0,254 cm, porém, em situações especiais, podem ser usados outros valores de penetração.

Tem-se como regra geral que, o valor do C.B.R. de um solo diminui à medida que aumenta o valor da penetração neste mesmo solo, desta forma, pode-se dizer que, quanto maior for a deformação sofrida por um solo, durante o ensaio, menor será a sua capacidade de suporte. No entanto, pode acontecer em alguns casos, que o valor do C.B.R. de um determinado solo, correspondente à penetração de 0,508 cm, seja maior que o valor do C.B.R., do mesmo solo, correspondente à penetração de 0,254 cm, neste caso, adota-se como C.B.R. do referido solo, o valor correspondente à penetração de 0,508 cm.

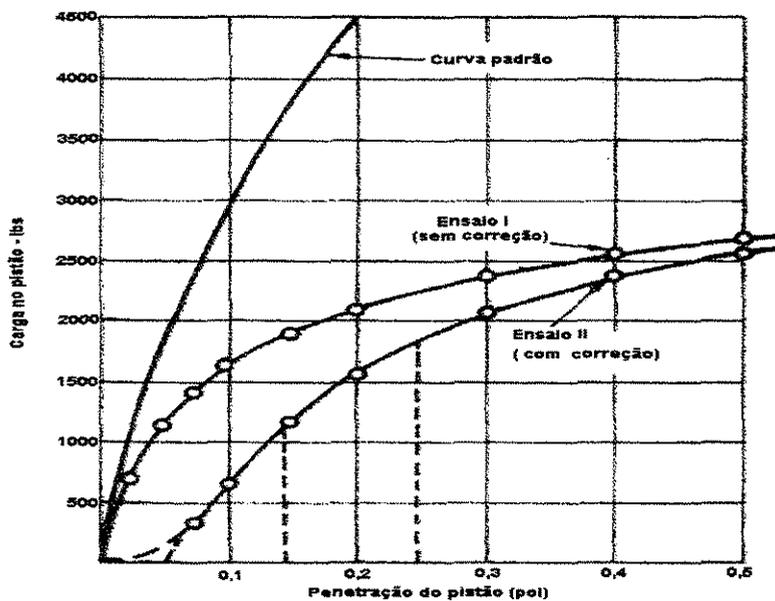
Como parte da padronização do ensaio em questão, convém lembrar que é feita uma saturação na amostra de solo ensaiada durante um período de quatro dias e, que também é colocado um disco anelar de aço dividido diametralmente em duas *partes*, *sobre essa mesma amostra*, atuando como *sobrecarga*, com a finalidade de simular o peso do pavimento sobre o solo, no referido período, e também para evitar a presença de cargas diferentes ao redor do pistão, durante o ensaio, conforme o esquema mostrado na Figura 3.1 abaixo.



Fonte: Yoder e Witezak (1975); pag. 253.

FIGURA 3.1 - Esquema demonstrativo do ensaio C.B.R..

A última parte do ensaio é exatamente a elaboração da curva Pressão-Penetração, na qual, se tomam como abcissas os valores de penetração e como ordenadas, as cargas totais ou pressões no pistão, conforme indicado na Figura 3.2 abaixo.



Fonte: Souza (1980); pag. 218.

FIGURA 3.2 - Curvas obtidas no ensaio C.B.R., sem correção e com correção.

Geralmente obtém-se uma curva convexa, que pode apresentar uma parte inicial retilínea, embora, em alguns casos, possa haver uma parte inicial côncava, que pode ser atribuída a irregularidade existente no contato da superfície da amostra com o pistão durante o ensaio. Neste caso, é necessário fazer uma correção (mostrada na Figura 3.2), que consiste em traçar uma tangente à curva, no ponto de máxima inflexão. A curva corrigida fica, então, constituída por esta tangente mais a parte original convexa, sendo apenas alterada, a origem das penetrações, que passa a ser o ponto em que a referida tangente corta o eixo horizontal. O valor tomado como C.B.R. final do ensaio, conforme comentário já feito neste item, é aquele correspondente ao maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,254 cm e 0,508 cm.

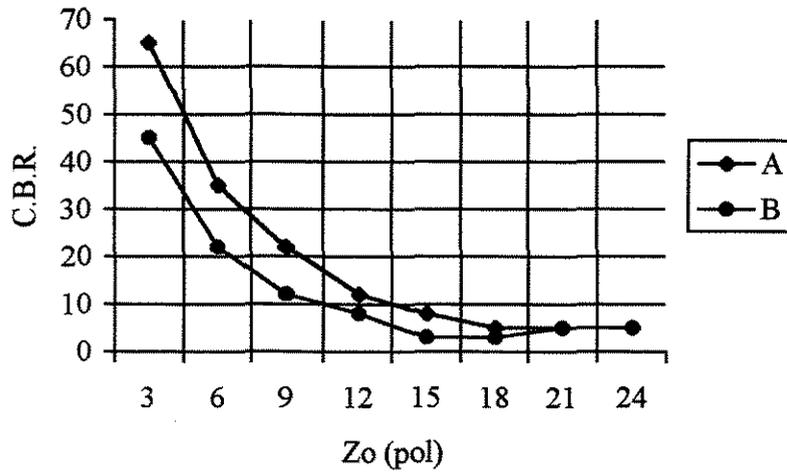
O método o C.B.R. ou Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.), como também é conhecido, baseia-se no ensaio de penetração mais difundido em todo o mundo, sendo que este, dá suporte aos processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e, vem sendo empregado também, com algumas adaptações, por alguns órgãos rodoviários, através da sua correlação com outros parâmetros de cálculo, como por exemplo, o módulo resiliente (MR), na linha teórica de dimensionamento de pavimentos, que não pertence ao escopo desta pesquisa.

Embora este método tenha aceitação em nível mundial, o seu caráter empírico deve ser sempre considerado, para situações, diferentes da original. “Qualquer variação do método, ou seja, qualquer outro processo dele derivado, é válido desde que essas variações reflitam uma experiência real, que devido ao caráter fortemente empírico do método, exige uma cuidadosa observação do comportamento dos pavimentos e é de difícil extrapolação para situações diferentes” (SILVEIRA, 1993).

3.2.3. O PROCESSO DO CORPS OF ENGINEERS

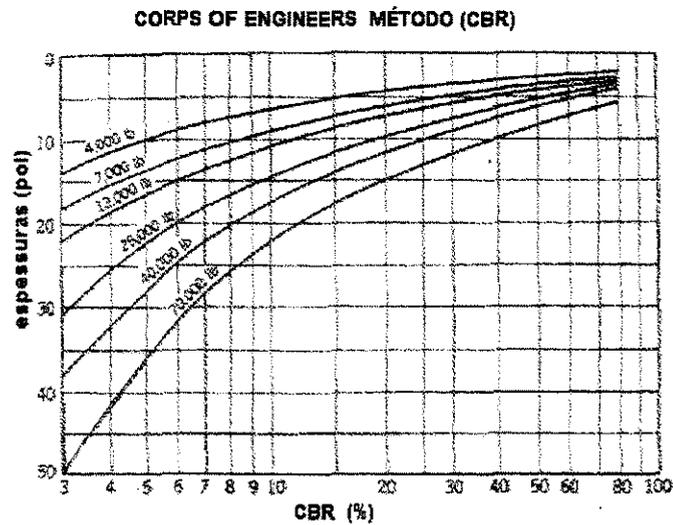
A partir da Segunda Guerra Mundial, o Corps of Engineers, preocupado com a construção de aeroportos, devido a entrada dos Estados Unidos na Grande Guerra, realizou uma extensa pesquisa, sobre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis existentes, visando encontrar um método de rápida execução que não exigisse equipamento muito sofisticado, para sua aplicação no próprio canteiro de obras e cujos os resultados atingidos, fossem praticamente os mesmos exigidos no campo. Desta forma, foi adotado pelo referido órgão, o método C.B.R. que, a partir daquele momento, passou a calcular as espessuras que compunham um pavimento, através da capacidade de suporte dos solos, medida pelo referido método.

O corps of Engineers, considerando as particularidades específicas dos aeroportos e das estradas, mais as condições particulares do momento e, fazendo-se valer das primeiras curvas de Porter, sendo estas, o resultado de uma extensa observação, sobre o comportamento real dos pavimentos, na década de 30, realizada pela Divisão de Estradas da Califórnia e, que relacionavam a espessura de pavimento necessária, em função do valor do C.B.R., como mostra a FIGURA 3.3, assimilou à curva A uma carga de roda de avião de 12000 libras e à curva B uma roda de 7000 libras. Porém, com o desenvolvimento das aeronaves, houve a necessidade de serem criadas novas curvas de dimensionamento para outras cargas de roda, sendo adotado para este fim, pelo Corps of Engineers, o princípio da equivalência, que teve como critério adotado, a obtenção da mesma tensão de cisalhamento ao nível da interface pavimento-subleito. a partir deste princípio, surgiram as primeiras curvas de dimensionamento de aeroportos, do Corps of Engineers, como mostra a Figura 3.4.



Fonte: Silveira (1993); pag. 62.

FIGURA 3.3 - Curva de observação do comportamento de pavimentos da década de 30.



Fonte: Silveira (1993); pag. 65.

FIGURA 3.4 - Primeira curva para dimensionamento de pavimentos de aeroportos.

Utilizando o mesmo critério de equivalência, foram desenvolvidas curvas análogas para estradas, onde a curva de partida foi a mesma curva A (Figura 3.3), assimilada porém a uma

carga de roda de 9000 libras. Durante muito tempo, um gráfico para estradas, idêntico ao da Figura 3.4, foi utilizado em todo o mundo como básico para os processos que utilizam o C.B.R. como ensaio de referência. Gráficos deste tipo ou variações em torno deles foram desenvolvidos e continuaram sendo adaptados pelo Corps of Engineers, para que fossem levadas em conta, as seguintes considerações: aumento do tráfego, do peso das aeronaves e das variações nas configurações dos trens de pouso.

A partir de 1956, alguns estudos indicaram que as espessuras de um pavimento flexível estariam relacionadas com uma determinada carga de roda e a pressão desta mesma roda, sendo esta relação mostrada através da seguinte equação:

$$t = \sqrt{P \left(\frac{1}{8,1\text{CBR}} - \frac{1}{p\pi} \right)} \quad (3.1)$$

onde:

P → carga padrão (Kg)

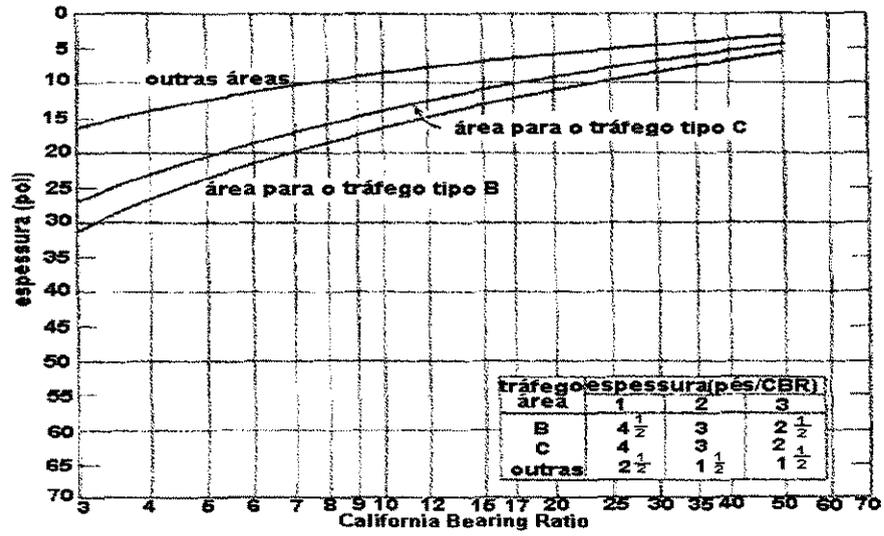
p → pressão nos pneus (Kg/cm²)

CBR → valores escolhidos

t → espessura encontrada (cm)

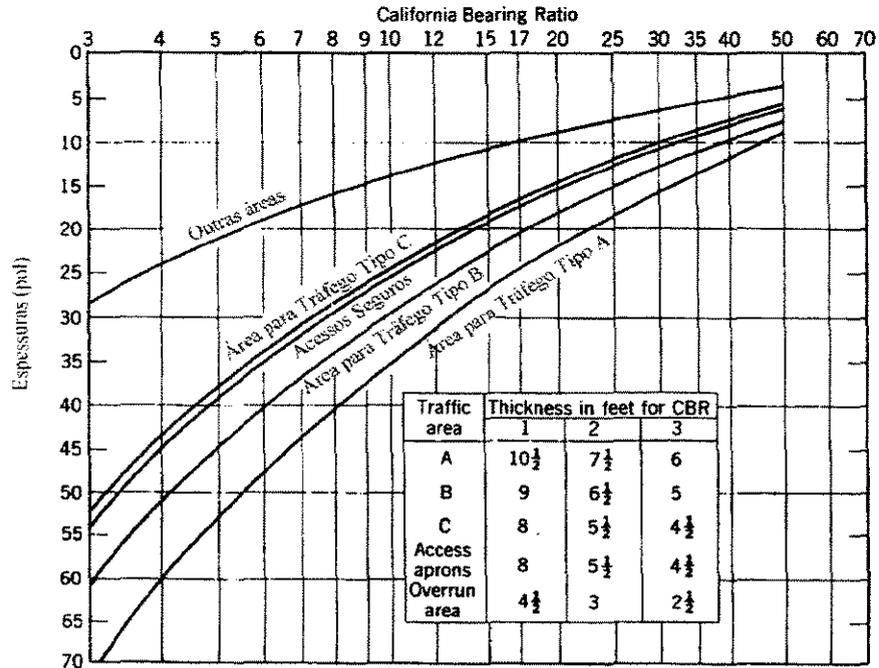
Em 1958 o Corps of Engineers publicou manuais de projeto, contendo curvas de dimensionamento, baseadas em várias cargas de roda, pressão de pneus, configuração de rodas e áreas de atuação do tráfego, sendo que estas curvas, foram desenvolvidas de acordo com a equação (3.1).

A partir daquele momento, dimensionar um aeroporto, passou a depender apenas da escolha de uma determinada categoria de carregamento: leve, médio e pesado. Para cada uma destas categorias, foi estabelecido um conjunto de carga crítica e parâmetros de configurações, que seriam utilizados para estabelecer as espessuras de projeto. Algumas curvas de projeto desta época são mostradas a seguir, nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7.



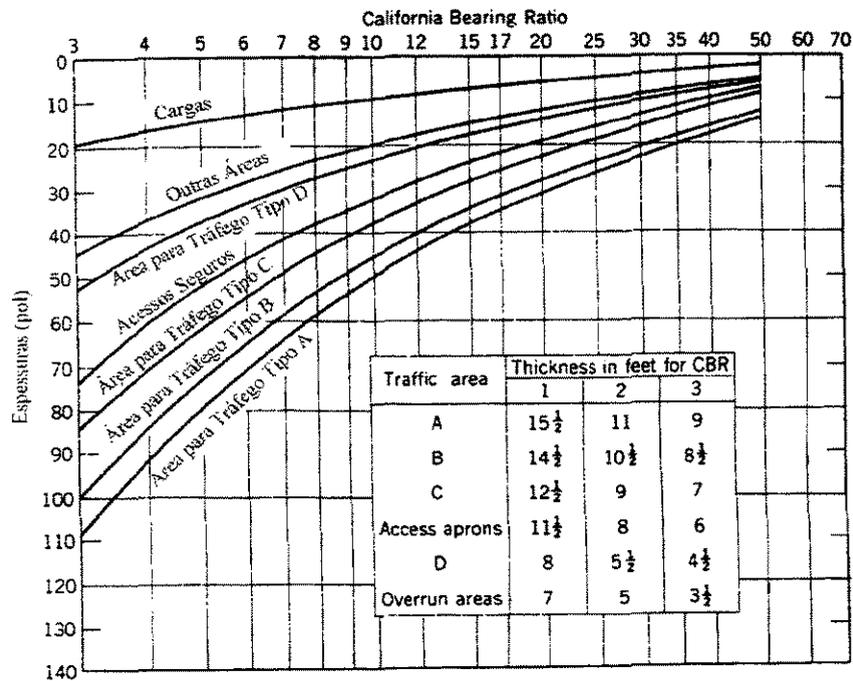
Fonte: Yoder e Witczac (1975); pag. 453.

FIGURA 3.5 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento leve.



Fonte: Yoder e Witczac (1975); pag. 454

FIGURA 3.6 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento médio.



Fonte: Yoder e Witczac (1975); pag. 455.

FIGURA 3.7 - Curva para dimensionar pavimentos de aeroportos com carregamento pesado.

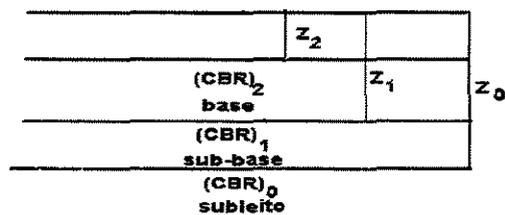
O projeto do ajuste de carga para cada categoria foi feito da seguinte forma: 25, 100 e 265 Kips, para aeroporto leve, médio e pesado, respectivamente. Essas curvas passaram a fornecer o valor necessário da espessura do pavimento sobre o material de um C.B.R. dado, sendo que as mesmas se estendem até o valor de C.B.R. 50.

Em virtude disso, espessuras que pudessem ser determinadas por valores de C.B.R. maiores que 50, deveriam ser aumentadas, para que fossem atendidas assim, as espessuras mínimas exigidas para a base e o revestimento, conforme os valores indicados nas Tabelas de cada uma das curvas de dimensionamento.

A filosofia inicial do método C.B.R., para o Corps of Engineers seria a seguinte, dado um material de subleito, determina-se o seu C.B.R., através do ensaio padronizado e, com esse valor mais o auxílio das curvas de dimensionamento em função da carga de roda de projeto. Seria determinada a espessura de um novo material, que protegeria o subleito, contra a ação do tráfego.

Esta seria portanto, a espessura total necessária do pavimento, obviamente que este material deveria ser mais nobre que o subleito.

Portanto, pela filosofia do método apresentada, a espessura de cada uma das camadas de um pavimento, é dada em função dos seus respectivos valores de C.B.R. e pela diferença de espessura entre uma camada inferior e a outra imediatamente superior, até que se encontre um material que não mais precise de cobertura de proteção, como pode ser observado na Figura a seguir.



Fonte: Silveira (1993); pag. 63.

FIGURA 3.8 - Esquema representativo da filosofia do método C.B.R.

Uma modificação relevante no método, introduzida pelo Corps of Engineers, foi a substituição da compactação por pressão original, pela compactação dinâmica tipo Proctor.

“O método C.B.R. foi mais tarde adotado pelo Corps of Engineers, que o sistematizou diferindo em alguns pontos do desenvolvido originalmente na Califórnia, mas continuando empírico em sua natureza “ (SILVEIRA, 1993).

Convém lembrar que até aquele momento, o referido órgão, dimensionava os pavimentos levando em consideração apenas uma carga, escolhida como padrão, deixando assim, de considerar o efeito que diferentes composições de tráfego, poderiam causar a um pavimento e, além do mais, seus gráficos de dimensionamento, para estradas, eram baseados, nas mesmas hipóteses utilizadas para o dimensionamento de aeroportos.

Apesar de, em ambos os casos, os principais fatores a serem considerados em suas respectivas análises, serem os mesmos, assim como, são iguais os princípios fundamentais em que elas se baseiam, existem algumas diferenças, relacionadas principalmente com os valores a

serem considerados por estes fatores e a preponderância com que atuam, fazendo com que o comportamento dos dois tipos de pavimentos (quanto a funcionalidade) difiram.

As diferenças apontadas, podem ser facilmente identificadas, pois, de início, o peso das aeronaves é maior que o peso dos veículos rodoviários, considerados para o dimensionamento de pavimentos. Entretanto, o número de repetições das solicitações no caso dos aeroportos é menor do que no caso das estradas, porém, a pressão dos pneus das aeronaves também é maior do que a dos veículos comerciais rodoviários, mas em compensação, as cargas nas estradas são aplicadas muito mais próximas das bordas dos pavimentos do que nos aeroportos e, as diferenças de solicitação nas várias partes dos aeroportos (pátios, pistas de rolamento, cabeceiras e parte central da pista de decolagem) são mais pronunciadas que as verificadas nas diferentes regiões das estradas (curvas, rampas, reta e nível).

Portanto, houve uma necessidade por parte do Corps of Engineers, em repensar na concepção adotada para seus dimensionamentos rodoviários, pois, conforme as últimas considerações feitas acima, os fatores que podem ser críticos para um caso, podem ser menos importantes para o outro, apesar de suas análises serem conduzidas de forma semelhante.

O Corps of Engineers, principal divulgador do método C.B.R., a partir de um trabalho de revisão, elaborado por seus engenheiros Turnbull e Ahlvin (*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, 1962), com a intenção de aprimorar as suas curvas de dimensionamento e estendê-las de forma mais compatível às estradas, deixou de utilizar em seu processo a corrente do tráfego fixo e passou a considerar então o efeito do tráfego, no dimensionamento, utilizando para este fim, a corrente do veículo fixo.

A corrente do tráfego fixo é aquela em que a fixação do tráfego é implícita e não entra diretamente na análise, ou seja, neste procedimento, escolhe-se um veículo de projeto com a sua configuração de rodas, reduzindo-se essa configuração (geralmente múltipla) a uma única roda representativa do conjunto e em função dessa roda são feitas as análises. Desta forma, todos os demais veículos são desprezados, partindo-se do princípio que a roda reduzida, do veículo criteriosamente escolhido, conduza às condições mais críticas. Por outro lado, a corrente do veículo fixo, procura considerar os números de solicitações de cada carregamento correspondente aos vários veículos previstos. Para isso, procura reduzir tudo a um denominador comum, fixando

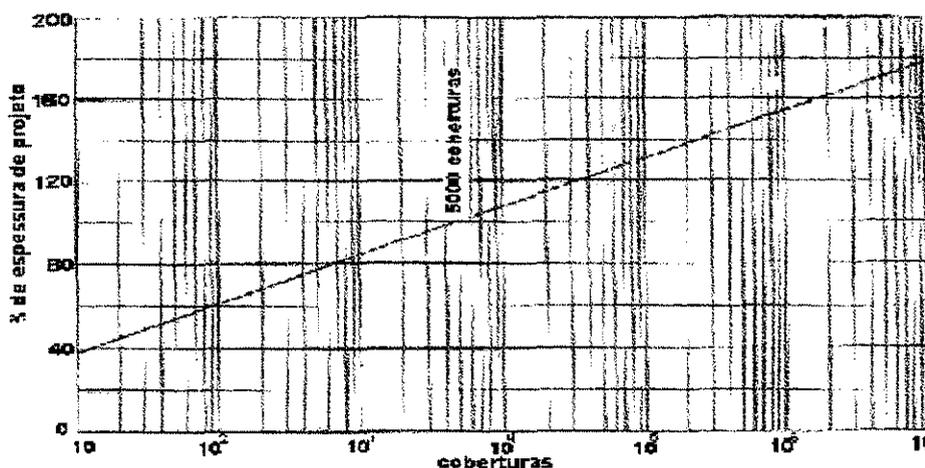
um veículo padrão ao qual todos os demais carregamentos devem referir-se com suas respectivas solicitações.

Desta forma, com a utilização da corrente do veículo fixo, o Corps of Engineers passou a considerar os vários tipos de veículos previstos como solicitadores do pavimento durante a sua vida útil, bem como os seus respectivos números, procurando assim, estabelecer uma equivalência entre cargas e números de repetição.

“O Corps of Engineers desenvolveu um método para o dimensionamento das espessuras do pavimento, de uma estrada, que permitiu a abordagem do assunto, sobre o tratamento direto de qualquer tipo de carga ou qualquer grau de intensidade de uso da mesma” (TURNBULL et al, 1962).

Desta forma, fixada uma carga padrão, cada carga diferente poderia ser reduzida àquela, através de um certo número de solicitações, que produziria o mesmo efeito, ou seria equivalente, a uma solicitação da carga padrão. Portanto, o trabalho desenvolvido pelo Corps of Engineers, foi realizado, com o objetivo de explicar os elementos essenciais do novo processo, demonstrando assim, seu uso e a sua versatilidade.

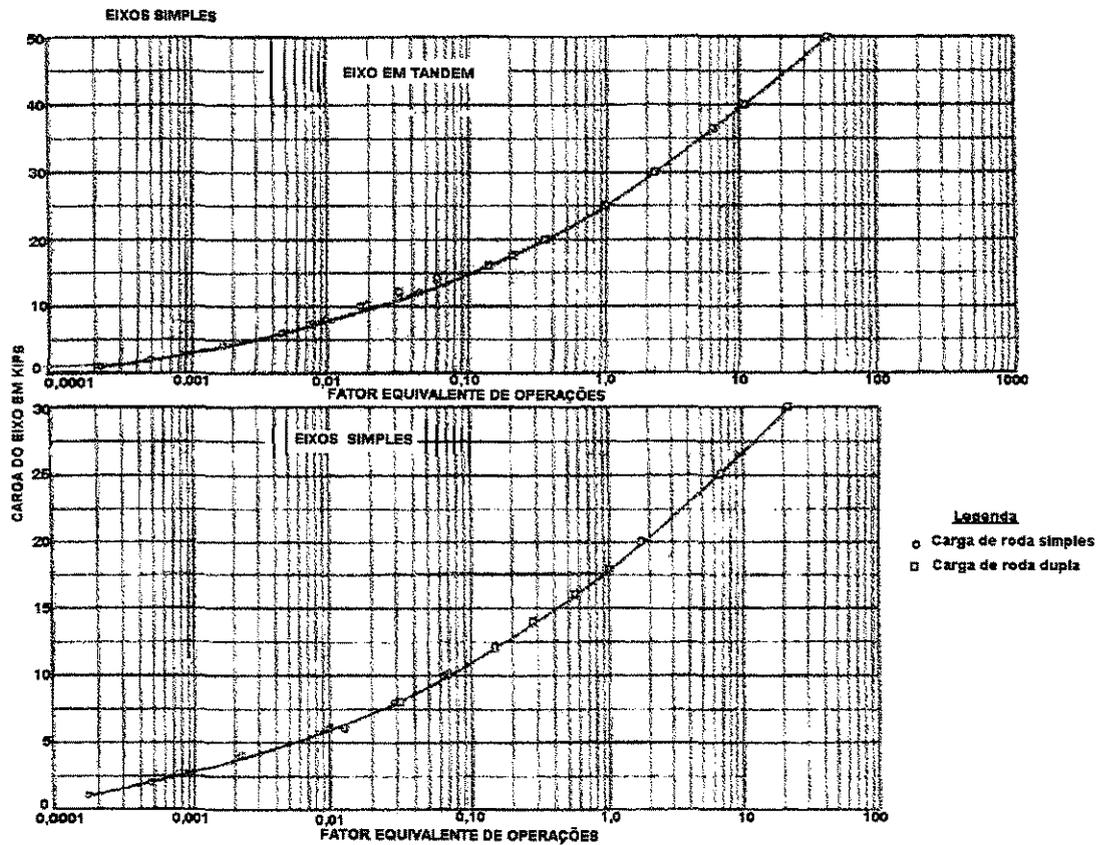
Porém, para se chegar a composição final do novo processo de dimensionamento, alguns conceitos precisaram ser estabelecidos, como o de cobertura e porcentagem de projeto. Sabe-se que uma cobertura corresponde a um número de repetições da carga suficiente para que todos os pontos da seção do pavimento sejam solicitados pelo menos uma vez, e que porcentagem de projeto, é exatamente a porcentagem da espessura de projeto necessária para 10 a 15 anos de vida útil do pavimento. Convém ressaltar que a carga escolhida como padrão, a partir da qual seriam feitas as demais conversões foi de 8,2 ton, que 100 % de projeto corresponde a 5.000 coberturas e 15 % de projeto a 1 cobertura, conforme a Figura 3.9. A relação entre a porcentagem de projeto e o número de coberturas é considerada linear em escala logarítmica.



Fonte: Turnbull, Foster e Ahlvin (1962); pag 131.

FIGURA 3.9 - Reta que define a correlação entre cobertura e % de projeto no processo do USACE (United States Army Corps of Engineers)

Portanto, para cada valor de C.B.R., cada carga define uma espessura de pavimento e uma porcentagem de projeto em relação à referência estabelecida e cada porcentagem de projeto, através do critério definido pela reta da Figura 3.9, resulta no respectivo número de coberturas, que dividido pelo número de coberturas de referência, 5000, no caso, fornece o respectivo fator de carga, para cada carga analisada. Aplicando-se então, o mesmo procedimento a várias cargas, obtém-se os fatores de carga, apresentados em forma de gráficos, indicados na Figura 3.10, sendo esta conversão, considerada, a base principal do novo processo.

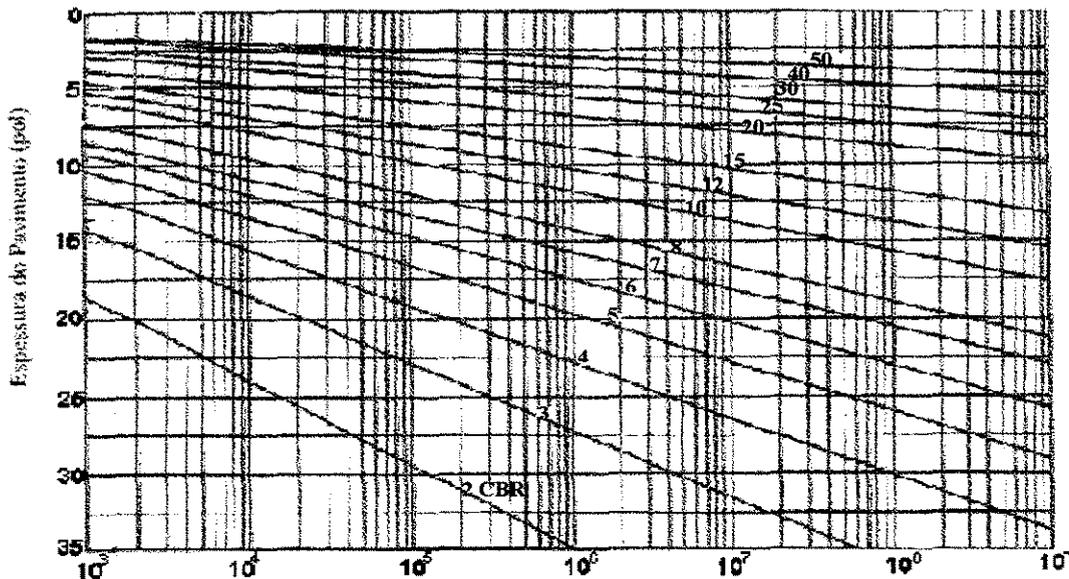


Fonte: Tumbul, Foster e Ahlvin (1962); pag 131.

FIGURA 3.10 - Curvas para determinação do fator equivalente de operações do processo do USACE.

Com este procedimento, descrito acima, pôde-se redefinir as curvas de dimensionamento em função do tráfego previsto e não mais em função de uma determinada carga de projeto, pois, uma vez reduzidos, através dos fatores de carga, todos os efeitos das diferentes cargas ao efeito de uma única carga de referência, no caso de 18.000 lbs, tem-se, para esta carga a relação entre a espessura Z_0 do pavimento e o C.B.R., seja através da curva de dimensionamento respectiva obtida como já foi comentado anteriormente, pelo critério de equivalência de tensões cisalhantes, seja pela fórmula empírica estabelecida pelo Corps of Engineers, mostrada na equação (3.1). As várias espessuras assim determinadas, em função de cada C.B.R., correspondem a 5000 coberturas e 100 % de projeto e definem 1 (um) ponto de cada nova curva de dimensionamento para cada valor de C.B.R., respectivamente. Então, para quaisquer outras porcentagens de projeto, a Figura 3.9 define o respectivo número de coberturas e essas porcentagens aplicadas a

Z_0 , fornecem as novas espessuras de pavimento correspondentes, e novos pontos das curvas de dimensionamento. Portanto, admitida a linearidade com o logaritmo do número de coberturas, basta apenas mais um ponto de cada C.B.R., para definir a respectiva reta de dimensionamento, que constitui o novo Gráfico de dimensionamento do processo do Corps of Engineers, mostrado na Figura 3.11.



Fonte: Turnbull, Foster e Ahlvin (1962); pag 132.

FIGURA 3.11 - Curvas de dimensionamento de pavimentos flexíveis do processo do USACE. 2

“ O método permite a conversão de uma carga, para o número de repetições da carga padrão, portanto, o critério de projeto pode ser expresso em termos de repetição, desta carga” (TURNBULL et al, 1962).

Com este trabalho pode-se fazer uma avaliação coletiva dos efeitos de qualquer composição de tráfego para qualquer vida útil desejada de um pavimento, bem como determinar espessuras de projeto para as operações totais equivalentes de uma carga tomada como padrão.

“ Os estudos do Corps of Engineers envolvem várias equivalências, tais como as que se referem à redução a uma roda simples, as que definem o conceito de cobertura, as que definem a carga de roda ou eixo equivalente, etc.” (SILVEIRA, 1993).

Com relação ao tráfego neste novo trabalho do Corps of Engineers, foram admitidas algumas configurações de veículos típicos da época, em termos de tamanho de roda, distância entre centros, cargas atuantes, sendo desconsiderados eixos triplos, devido a inexistência dos mesmos.

As configurações representativas da carga, foram selecionadas por grupos típicos de veículos da época, de variadas características de carregamento. O tamanho dos pneus e o espaçamento entre rodas, variavam relativamente em função do tipo de carga. Os carregamentos característicos selecionados pelo método, para representar todas as cargas de eixos foram os seguintes:

Configuração Representativa para Carros de Passageiros, Caminhões, ônibus, etc.			
Configuração	Carga (ton)	Largura Média das Rodas (cm)	Espaçamento Médio das Rodas (pol)
Eixo simples	0-2,3	19,05	157,48
Roda simples	2,3-4,6	24,13	182,88
Eixo simples	0-4,6	19,05	177,80
Roda dupla	4,6-9,2	24,38	182,88
	9,2-13,8	26,67	182,88
Eixo em tandem	0-4,6	19,05	182,88
Roda simples	4,6-6,9	25,40	198,12
Eixo em tandem	4,6-6,9	19,05	171,45
Roda dupla	6,9-9,2	27,94	182,88
	9,2-23	30,48	182,88

Fonte: Turnbull, Foster e Ahlvin (1962); pag 133.

TABELA 3.2 - Características dos veículos considerados para a formulação do processo do USACE.

As coberturas que foram usadas como uma medida de repetição de carga na fig 3.9, foram relacionadas para operações ou passagens de um eixo simples ou um eixo em tandem,

através de um estudo de suas características operacionais e geométricas, sendo utilizadas como referências, as cargas da tabela 3.2.

Como as operações necessárias para produzir uma cobertura, podem variar de, um, para diferentes carregamentos de um eixo em tandem com rodas duplas, para, nove, para um eixo simples com rodas simples, então, através do espaçamento das rodas, largura das mesmas e informações obtidas, sobre o posicionamento lateral dos veículos, foram feitas as seguintes relações, mostradas na tabela 3.3, que apresenta o quadro, entre passagens de eixo ou operações e coberturas, em relação às configurações adotadas pelo processo.

Configuração Representativa para Carros de Passageiros, Caminhões, ônibus, etc.		
Configuração	Carga Kips	Operações por Cobertura
Eixo simples	0-2,3	8,58
Roda simples	2,3-4,6	8,25
Eixo simples	0-2,3	2,95
Roda dupla	4,6-9,2	2,64
	9,2-13,8	2,37
Eixo em tandem	0-4,6	4,05
Roda simples	4,6-6,9	2,73
Eixo em tandem	4,6-6,9	1,83
Roda dupla	6,9-9,2	1,13
	9,2-23	1,03

Fonte: Turnbull, Foster e Ahlvin (1962); pag 134.

TABELA 3.3 - Relações entre operações e coberturas para os veículos considerados pelo processo do USACE.

Estas comparações entre quaisquer cargas e uma carga, tida como padrão, foram necessárias para reduzir todas as rodas duplas e cargas de eixos em tandem, para as cargas de roda simples equivalente.

Quando é feito o dimensionamento de um pavimento pelo Corps of Engineers, o fator de equivalência de carga é utilizado de modo simples, conhecendo-se apenas o valor das cargas utilizadas em relação a uma carga padrão. A partir daí, determina-se o número de operações equivalentes por dia e posteriormente para o tempo de vida da rodovia. Com esse número e conhecido o C.B.R. do subleito, encontra-se a espessura necessária do pavimento, através do seu gráfico de dimensionamento, mostrado na Figura 3.11.

As curvas obtidas a partir dos estudos realizados pelo Corps of Engineers, constituíram um avanço, no campo rodoviário, pois, estas, passaram a considerar o tráfego diferenciado bem como a repetição das cargas.

3.2.4. O PROCESSO DA AASHTO

O procedimento de dimensionamento de pavimentos recomendado pela AASHTO, foi baseado em cima dos resultados de extensivos testes, realizados em Ottawa, Illinois entre os anos de 1950 e 1960. Em 1961 foi criado um guia para projeto de estruturas de pavimento, pelo corpo técnico da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), tendo este sofrido uma revisão em 1972. Dos processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, este é o mais respeitado, pois, as conclusões obtidas para projeto mostraram-se muito significativas, uma vez que, pavimentos reais foram submetidos a vários tipos de carregamentos, também reais, até a sua ruptura ou até um número suficientemente grande de solicitações, correspondente ao de um período de projeto.

A AASHTO introduziu o processo, considerando principalmente, dois aspectos, sendo que, o primeiro, observava que o transporte do fluxo veicular, em um pavimento, deveria ser feito de forma segura e confortável de um lugar para outro da estrutura e, o segundo aspecto considerado, foi sobre o problema da perda da funcionalidade do pavimento, baseada em alguns conceitos estritamente estruturais, relacionados à ruptura da estrutura.

Para dar suporte a esta análise funcional, foram desenvolvidos conceitos importantes, como, o de serventia, que é a capacidade de um pavimento servir de forma confortável e segura o tráfego para o qual foi projetado, e o conceito de desempenho, que é a capacidade de um

pavimento servir satisfatoriamente o tráfego sobre um período de tempo, portanto, o desempenho pode ser interpretado, como a perda da serventia com o tempo, em função da repetição das cargas impostas ao pavimento.

Para determinar o desempenho das seções dos vários tipos de pavimentos construídos, recorreu-se à medida de serventia dos mesmos. Com este propósito, foi selecionado um grupo de pessoas, com conhecimento no assunto, para analisar cada pavimento, segundo uma escala arbitrária com valores de 0 a 5, sendo o maior valor da escala, correspondente a um pavimento de excelentes condições.

A medida da serventia através dessas avaliações, foi definida como, Avaliação da Serventia Presente (ASP). Porém, concomitantemente a esta análise, foi desenvolvido um estudo estatístico para correlacionar o (ASP), com as várias medidas físicas do pavimento, ou seja, seus defeitos. A determinação dessas medidas foi definida como o Índice de Serventia Atual (ISA) ou simplesmente p_t na equação geral de dimensionamento do processo.

A equação de correlação desenvolvida na pista de teste da AASHTO para pavimentos flexíveis, que permite o cálculo do ISA foi a seguinte:

$$ISA = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38 \overline{RD}^2 - 0,01(C + P)^{1/2} \quad (3.1)$$

SV → variância da inclinação longitudinal

\overline{RD} → profundidade média das trilhas de rodas (cm)

C → comprimento em pés, das trincas maiores, por 1000 pés² de área

P → manchas em pé² de área

Os valores recomendados pela AASHTO para p_t , são 2,5 e 2,0 respectivamente para estradas principais e secundárias. Este valor, entretanto, poderá ser fixado em outros níveis, dependendo das condições gerais e dos aspectos econômicos em jogo.

A pista experimental da AASHTO pode ser considerada como um marco na história da pavimentação, pois, nela surgiu o conceito de desempenho e serventia que norteia hoje os projetos. A grande diferença deste processo para os demais é que ele, constituiu-se de um experimento em verdadeira grandeza, onde foram construídas seções de pavimento com várias

espessuras e materiais, com o objetivo de definir uma relação entre a repetição da carga e a perda de serventia, para diversas estruturas.

Neste processo, a espessura do pavimento, é obtida através da determinação do Número Estrutural (SN), que é um índice, derivado de algumas considerações, como, análise de tráfego, condições do subleito da estrada e fator regional. Este número estrutural pode ser convertido para as várias espessuras de camadas que compõe um pavimento flexível, através do uso apropriado de coeficientes de camadas ou coeficientes estruturais, relacionados com o tipo de material naturalmente utilizado em cada camada da estrutura do pavimento.

Portanto, o processo de dimensionamento da AASHTO criou os coeficientes estruturais, que multiplicados pela espessura de suas respectivas camadas, resultam em números estruturais parciais, que quando somados, fornecem o número estrutural total (SN) do pavimento, que representa a sua capacidade de suporte.

“Os coeficientes estruturais, podem ser considerados como uma relação empírica entre o número estrutural (SN) para a estrutura de um pavimento e as espessuras das camadas, que expressa a relativa capacidade, de um respectivo material, funcionar como componente estrutural do pavimento “ (YODER e WITCZAK, 1975).

“O número estrutural tem por objetivo indicar a resistência estrutural de cada pavimento como sendo uma ponderação das espessuras das camadas através de pesos, que representam um coeficiente estrutural dos diversos materiais ” MOTTA (1991).

O número estrutural (SN) é representado analiticamente pela seguinte equação:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 \quad (3.2)$$

onde:

D_1 , D_2 e D_3 → representam as espessuras das camadas de revestimento, base e subbase, respectivamente, que compõe o pavimento.

a_1 , a_2 e a_3 → representam os coeficientes estruturais das camadas de revestimento, base e subbase, respectivamente, que compõe o pavimento.

Portanto, para determinar os valores dos coeficientes estruturais utilizados nos testes, a fim de determinar a resistência relativa de um material utilizado para uma determinada camada, a AASHTO, passou a fazer estudos em cima de algumas combinações de pavimentos, estudando por exemplo, a seguinte combinação: revestimento formado por concreto asfáltico; base composta por pedra britada e subbase composta de pedregulho arenoso, sendo o estudo desta composição feito, para as condições locais do teste, no que diz respeito ao tráfego e meio ambiente.

Como auxílio à determinação dos valores dos coeficientes estruturais, a AASHTO, procurou determinar relações significantes entre o número de repetições de um eixo especificado, sobre a serventia de diferentes espessuras dimensionadas e construídas uniformemente sobre um solo de características conhecidas.

Para esse objetivo, foram feitos vários dimensionamentos, visando estudar o efeito de cargas diferentes sobre pavimentos, com estruturas semelhantes e com estruturas diferentes, sendo então, considerado como estudo fundamental para essa análise, o do tipo de material de base utilizado no pavimento.

Desta forma, foram analisados quatro tipos diferentes de materiais: pedra britada; pedregulho; pedregulho tratado com cimento e pedregulho tratado com asfalto. Então, com base nos resultados alcançados nesses estudos, a AASHTO estabeleceu os valores dos seus coeficientes estruturais, para os diferentes tipos de materiais analisados. Coeficientes para bases, constituídas por outros materiais, foram estimados através dos resultados de um estudo, sobre uma base especial, na pista de testes ou através da experiência dos engenheiros envolvidos no processo. Esses valores podem ser observados na tabela 3.4.

Componente do Pavimento	Coefficiente Estrutural
Revestimentos	
Mistura no local (baixa estabilidade)	0,20
Mistura em usina (alta estabilidade)	0,44
Areia-asfalto	0,40
Bases	
Pedregulho arenoso	0,07
Pedra britada	0,14
Brita tratada com cimento	
Resistência à compressão simples a 7 dias:	
4,48 MPa ou mais	0,23
2,76 MPa a 4,48 Mpa	0,20
2,76 Mpa ou menos	0,15
Tratamento Betuminoso	
Agregado Grosso	0,34
Areia-asfalto	0,30
Tratamento com cal	0,15-0,10
Sub-bases	
Pedregulho arenoso	0,11
Areia ou argila arenosa	0,05-0,10

Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials (1972);
pag.77)

TABELA 3.4 - Coeficientes estruturais dos estudos realizados pela AASHTO.

Convém ressaltar que os valores dos coeficientes estruturais foram obtidos de forma totalmente empírica, ou seja, os valores determinados a partir dos resultados da pista de testes da AASHTO, são representativos e válidos apenas para materiais semelhantes aos que foram utilizados nas seções testes, quando usados na mesma posição do pavimento, compactado na mesma densidade e tendo relativamente as mesmas espessuras. Outros valores podem também ser considerados válidos, apenas para as condições gerais sob as quais eles foram determinados.

Portanto, para que possa ser feita uma extrapolação do método a outras realidades, sem que o mesmo perca a sua representatividade, é aconselhável, determinar coeficientes, que variam

com o tipo de material ou propriedades dos materiais e com as suas respectivas posições na estrutura do pavimento.

Desta forma, uma peculiaridade importante, que deve ser levada em consideração, para a extrapolação do método a outras situações, é o valor de suporte do subleito sob o pavimento que se quer dimensionar, pois este, deve apresentar o mesmo valor do subleito do local da pista de teste.

Então, para aplicar o método a outras condições de subleito, com capacidades de suporte diferentes, houve a necessidade de ser elaborada, uma escala de suporte de solo, para representar a variedade de solos que podem ser encontrados em outros locais.

Para a elaboração dessa escala de suporte de solo, usou-se o seguinte procedimento; para as condições de teste, foi adotado um valor de $S=3$, como sendo um ponto de partida da escala, para as condições do subleito local. Um segundo ponto, foi desenvolvido, com base na avaliação da serventia de uma família de bases selecionadas, de pedra britada, para minimizar o efeito do tráfego sobre o leito natural da estrada, sendo esse valor, igualado a 10, ou seja, $S=10$. Logo os valores intermediários desta escala, foram baseados sobre uma relação linear entre dois pontos, como mostra a equação 3.3:

$$\log W_{t18} = \log N_{t18} + K (S_i - S_0) \quad (3.3)$$

onde:

S_i → suporte de solo para qualquer condição i

S_0 → suporte do solo para as condições do teste

W_{t18} → aplicação da carga total para a condição i

N_{t18} → aplicação da carga total para as condições do teste

K → constante de regressão ($K = 0,372$)

Portanto, outros órgãos, que desejem utilizar este método, para dimensionar os pavimentos, de suas respectivas regiões, deverão estabelecer, antes de mais nada, uma relação

entre o valor de suporte do solo e o método utilizado para determinar a resistência do mesmo, como por exemplo, C.B.R., Índice de Grupo, etc.

Outro ajuste feito pela AASHTO, para levar em conta os diferentes efeitos climáticos encontrados na pista de teste, foi a introdução de um fator regional (R) ao processo, que pudesse então, ajustar o número estrutural com o meio ambiente local. Esse fator foi relacionado de forma inversa com as aplicações totais de carga, podendo ser representado pela seguinte equação 3.4.

$$W_{t18} = N_{t18} (1/R) \quad (3.4)$$

onde:

W_{t18} → aplicação da carga total para a condição i

N_{t18} → peso total da aplicação de carga

R → fator regional.

Os valores de (R), foram baseados nas análises dos resultados, obtidos, para os procedimentos adotados na pista de teste, ou seja, para a menor taxa de serventia durante a variação climática ocorrida no ensaio. Esses valores podem ser observados na tabela 3.5.

Condição	Valor (R)
Estradas sujeitas a congelamento à profundidade de 13 cm ou mais	0,2 - 1,0
Estradas secas	0,3 - 1,5
Estradas sujeitas a fortes chuvas	4,0 - 5,0

Fonte: Yoder e Witczac (1975); pag. 510.

TABELA 3.5 - Valores adotados para o fator regional obtidos a partir das pistas de testes da AASHTO.

Pelo guia, é recomendado que o menor valor de (R) não seja inferior a 0,5 e, o maior valor, não exceda a 4,0. O fator regional foi incluído na equação de dimensionamento da AASHTO, para que a mesma, pudesse ser utilizada no dimensionamento de pavimentos, em áreas com condições climáticas e ambientais diferentes das apresentadas na pista de teste.

O último aspecto apresentado aqui, porém, de grande relevância, para a elaboração do método, diz respeito, à forma como foram conduzidos os estudos do tráfego, que provocaria a perda de serventia do pavimento, nas seções testes.

Para o processo de dimensionamento da AASHTO, foi realizada uma composição do tráfego, dentro de um determinado período de tempo, ou seja, período de análise de tráfego, sendo que esta, considerou todas as combinações de tráfego, que realmente ocorriam nas estradas àquela época. Foram considerados então, veículos com diferentes cargas de eixo, bem como veículos com diferentes números de eixos. O procedimento da AASHTO era de converter toda essa variação existente, para um denominador comum e expressar o tráfego, como resumo, das cargas de eixo convertido, que provocaria danos ao pavimento. O denominador comum utilizado, foi uma carga de eixo simples de 18 Kips.

Desta forma, segundo o guia da AASHTO, a equação geral, básica, para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é a seguinte:

$$\log W_{18} = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log(4,2 - P) - 0,43}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 0,372(S_i - 3,0) + \log\left(\frac{1}{R}\right) \quad (3.5)$$

O principal valor a ser encontrado, para que se tenha o dimensionamento do pavimento é o de SN (número estrutural), sendo que este fica dependendo de W_{18} (tráfego), p_t (critério de projeto), S_i (condição de suporte do subleito) e R (fator regional).

O valor W_{18} é número total de aplicações da carga padrão durante a vida útil do pavimento. Sua determinação depende da distribuição do tráfego previsto para essa vida útil, ou seja, depende do número de aplicações de cargas dos vários tipos de veículos e dos fatores de carga equivalentes. Os fatores de equivalência de carga estão em função do número estrutural do pavimento (SN) e do valor terminal de serventia adotado no projeto.

Portanto o processo da AASHTO é de natureza interativa, pois, uma vez conhecidos os valores de p_t , S_i e R , deve ser fixado um valor para (SN), para a determinação dos fatores de equivalência de carga e, a partir desses valores obtidos, faz-se a determinação do W_{18} , que juntamente com outras variáveis fornece o valor de (SN). O objetivo é que o (SN) calculado fique

próximo ou coincida com o estabelecido anteriormente. Depois de alcançado este valor, faz-se a composição do pavimento, através da equação 3.2.

Sabe-se que hoje em dia, devido a versões mais recentes da AASHTO (1986 e 1993), através da análise da posição da camada na estrutura, sua condição de compactação e também em relação a outros materiais presentes, o coeficiente estrutural passou a ser um elemento mais flexível de se avaliar. Os coeficientes estruturais são estabelecidos através de correlação com o módulo resiliente (M_r) das camadas, obtidos de análises de tensão-deformação de sistemas de camadas. Procura-se então ajustar o coeficiente estrutural de forma a manter um valor constante de tensões atuantes, para que se tenha um bom desempenho do pavimento.

Com as mudanças recentes o coeficiente estrutural passou a ser avaliado de acordo com a posição da camada na estrutura, sua condição de compactação e também em relação a outros materiais presentes e, o número estrutural final incorporou à sua expressão um coeficiente m , para avaliar o sistema de drenagem da estrutura, conforme mostra a equação 3.6.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (3.6)$$

Onde:

m_2 e m_3 → coeficientes de drenagem das camadas de base e sub-base, respectivamente.

Não se considera portanto, o efeito de drenagem nos revestimentos, somente na base (m_2) e subbase (m_3) e, este coeficiente é tanto menor quanto melhor for a qualidade da drenagem, e quanto menor o tempo em que o pavimento ficará exposto à umidade próxima a de saturação, em correlação com a precipitação anual. Este procedimento substitui o adotado nas outras versões do guia, que considerava um fator regional para englobar as diferenças climáticas de cada local.

Outra inovação, apresentada pelo guia da AASHTO, foi o conceito de confiabilidade. “ A confiabilidade de um processo de projeto-desempenho de um pavimento é a probabilidade que uma seção de pavimento projetada usando este processo terá um desempenho satisfatório sob as condições de tráfego e ambiente durante o período de projeto “ (AASHTO, 1986).

A confiabilidade é um conceito baseado em estudos de estatística e probabilidade, usada para otimizar um sistema e no caso de pavimentos, pode ser aplicada para determinar a vida útil

do mesmo, desta forma, os custos com a manutenção de tais estruturas, podem ser previstos para um período pré-estabelecido.

A concepção de um pavimento, abrange estudos muito complexos, pois além das repetições de cargas, deverão também ser consideradas as condições ambientais. Através da confiabilidade, tenta-se reduzir o máximo possível esta complexidade, gerando projetos alternativos que são analisados e comparados entre si de maneira econômica; porém devido a flexibilidade com que são tratadas estas questões, corre-se o risco de ter uma espessura de pavimento menor do que a necessária.

Pode-se dizer então, que a confiabilidade está intimamente ligada a serventia do pavimento, uma vez que, esta, é medida em função dos danos provocados pelas repetições do tráfego ao pavimento. A escolha do nível de confiabilidade para cada projeto é uma função do tipo de rodovia, do volume de tráfego e de suas características; das possibilidades de desvio de tráfego caso necessite de reparos, dos recursos disponíveis e da confiança no procedimento de dimensionamento.

Esta escolha está na associação de um custo e um benefício com cada nível de confiabilidade de um dado projeto, e que se pode estabelecer uma função objetiva entre esses valores, o que dará um critério para a seleção do nível de confiabilidade. Convém lembrar que um acréscimo de confiabilidade implica em aumento de custos, e por sua vez os benefícios devido a este aumento incluem maior segurança e maior tempo de vida do pavimento.

Os conceitos sobre Módulo Resiliente e Confiabilidade, não serão estudados nesta pesquisa, pois, pretende-se neste estudo, fazer uma análise de consistência de cada processo, ou seja, há a preocupação até o momento, de se estudar as raízes básicas contidas nas origens destes processos, sendo assim, não serão envolvidos de imediato os novos aportes e os desenvolvimentos ulteriores dos mesmos, para não envolver de início, muitos parâmetros que poderiam dificultar as análises ou mesmo encobrir fatos ainda pouco nítidos. Desta forma, nesta pesquisa será adotado o processo anterior da AASHTO (1986), ou seja, a versão de 1972, ou seja, não será levado em conta método da resiliência.

3.2.5. O PROCESSO DO D.N.E.R.

O processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis do D.N.E.R. foi concebido com base no trabalho realizado pelo Corps of Engineers e por conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO, sendo este, introduzido no Brasil em 1966, pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, sofrendo algumas adaptações em 1971, no que diz respeito às características dos materiais que constituem o pavimento, coeficientes estruturais, tráfego, fator climático regional e espessura mínima do revestimento betuminoso em função do tráfego.

O processo tem como prática normal o dimensionamento de pavimentos em função do C.B.R. do subleito e pela ação do tráfego, que solicitará a estrutura e, que é representada pelo número equivalente (N) de operações de um eixo, tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido.

Neste processo, é necessário que se faça uma avaliação sobre a capacidade de suporte, do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento. O método utilizado para este fim, é o C.B.R., podendo este ensaio, ser realizado em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, nas condições de massa específica e umidade especificadas para o serviço no campo e submetidos a embebição de quatro dias.

O processo, neste sentido, faz também, uma correlação entre o C.B.R. e o Índice de Grupo, ou seja, quando houver um motivo justo, em vez da avaliação da capacidade de suporte dos materiais ser feita apenas pelo valor do C.B.R., pode-se utilizar um C.B.R. corrigido em função do Índice de Grupo (IG), que é denominado índice de Suporte (IS), representado pela equação 3.7.

$$IS = \frac{C.B.R. + C.B.R. \cdot IG}{2} \quad (3.7)$$

onde:

C.B.R. → valor determinado no ensaio respectivo e nas condições já citadas no 2º parágrafo deste capítulo.

C.B.R._{IG} → valor dado pela tabela 3.6

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R.
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: Método de projeto de Pavimento Flexíveis (DNER, 1981)

TABELA 3.6 - Correlação entre os valores de índice de grupo e C.B.R..

Quando não se dispõe do valor do C.B.R., pode-se adotar o valor do C.B.R._{IG}, deste modo, o dimensionamento de pavimento, por este método, que leva em consideração a capacidade de suporte do subleito, pode ser realizado em função do C.B.R., do IS e em função do C.B.R._{IG}. Porém, o valor que se utiliza com mais frequência é o C.B.R..

Neste método é importante também que se faça uma avaliação cuidadosa do tráfego que irá operar na rodovia, adotando-se inclusive uma taxa de crescimento para o mesmo, em função da vida útil pré-estabelecida para o pavimento. Em virtude disso, são utilizados ábacos, semelhantes ao do Corps of Engineers, contendo os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em tandem, com diferentes cargas, bem como o eixo simples padrão com carga de 8,2 t (18000 lbs), para que possa ser feita a devida conversão das demais cargas em relação a este. Para efeito de projeto, o tráfego, será sempre o da faixa mais solicitada.

A taxa de crescimento do tráfego pode ser calculada, considerando o crescimento anual deste, de forma aritmética, conforme a expressão (3.8) abaixo:

$$V_m = \frac{\left\{ V_1 \left[2 + \frac{(P-1)t}{100} \right] \right\}}{2} \quad (3.8)$$

onde:

V_1 → volume médio diário de tráfego no ano de abertura do pavimento e num sentido

t → taxa de crescimento anual, em progressão aritmética (dada em %)

V_m → volume médio diário de tráfego, num sentido, durante um período de P anos.

P → período de projeto

Então, o volume total de tráfego (V_t), num sentido, durante o período P será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (3.9)$$

A mesma taxa (t) pode ser determinada considerando um crescimento do tráfego em progressão geométrica, neste caso, a expressão para a determinação do volume total de tráfego (V_t), durante o período de projeto será:

$$V_t = \frac{\left\{ 365 V_1 \left[\left(\frac{1+t}{100} \right)^P - 1 \right] \right\}}{\frac{t}{100}} \quad (3.10)$$

Com relação ao tráfego, o D.N.E.R., incrementou em seu processo três novos fatores, para o cálculo do número (N) de operações. Então foram acrescentados ao processo: o fator de eixos (FE), que é um número que multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes; o fator de carga (FC), que é um número que multiplicado pelo número de eixos que atuam no pavimento, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão; e o fator de veículo (FV), que é um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. Para o cálculo desses fatores, é necessário conhecer a composição de tráfego, que é determinada, com auxílio de cálculos estatísticos.

Portanto, o número (N), que é o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto e o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento, pode ser calculado pela expressão abaixo.

$$N = V_t \times FE \times FC \quad (3.11)$$

considerando ainda que:

$$FV = FE \times FC \quad (3.12)$$

$$V_t \times FV \quad (3.13)$$

A influência da pista de testes da AASHTO começa a aparecer no método em questão, quando é feita uma alusão ao fator climático regional (FR), cujo o objetivo, é levar em consideração as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (significando variações na capacidade de suporte dos materiais), portanto a simples multiplicação do parâmetro de tráfego (N) pelo (FR), solucionaria esse tipo de efeito climático.

Outra influência da pista experimental da ASSHTO neste método é a presença de coeficientes estruturais nas camadas que compõe o pavimento, chamados de coeficientes de equivalência estrutural, sendo designados genericamente por K_R , K_B , K_S e K_{ref} , para as camadas de revestimento, base, subbase e reforço respectivamente, estando a diferença de valores destes coeficientes ligada ao tipo de material construtivo utilizado no pavimento. Os valores dos coeficientes estruturais dos diferentes tipos de materiais que constituem o pavimento, são dados pelo D.N.E.R, conforme a tabela 3.7.

Componentes do Pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas Granulares	1,00
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,70
Idem, com resistência a compressão a 7 dias, entre 45 e 28 kg/cm ²	1,40
Idem, com resistência a compressão a 7 dias, entre 28 e 21 kg/cm ²	1,20
Bases de solo - cal	1,20

Fonte: Souza (1981); pag.15..

TABELA 3.7 - Coeficientes estruturais para as camadas de pavimentos utilizados pelo D.N.E.R..

O método estabelece também espessuras mínimas para a camada de revestimento, em função do número equivalente (N) de operação de eixo padrão durante o período de projeto, com a intenção de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, como também para preservar o revestimento de uma possível ruptura, devido aos esforços repetidos de tração na flexão. Convém destacar que as espessuras recomendadas pelo método, são voltadas para bases de comportamento puramente granular. Essas espessuras podem ser observadas na tabela 3.8.

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5 cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N < 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Souza (1981); pag.16..

TABELA 3.8 - Espessuras necessárias para a camada de revestimento em função do número N.

Algumas considerações no que diz respeito ao controle tecnológico, são sugeridas pelo autor (Souza, 1981), para que o processo seja aplicado com sucesso, sendo estas:

Quando se deseja e for justificável uma segurança maior, em vez do C.B.R., pode-se utilizar o C.B.R. corrigido em função do índice de grupo (I.G.), que é denominado índice de suporte (I. S.).

A compactação do subleito e demais camadas do pavimento, por especificações gerais, devem apresentar um grau nunca inferior a 100 % em relação ao ensaio AASHTO normal. A expansão dos materiais do subleito, medidos no ensaio C.B.R., deverão ser menor ou igual a 2 %.

Com relação aos materiais granulares empregados no pavimento, as especificações do autor são as seguintes:

- material para reforço do subleito:

IS ou CBR > CBR Subleito ; expansão ≤ 2 %

- material para sub-base

IS ou CBR ≥ 20 ; IG = 0 ; expansão ≤ 1 % (medida com sobrecarga de 10 lbs)

- material para base

$\text{CBR} \geq 80$; expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lbs) ; $\text{LL} \leq 25$; $\text{IP} \leq 6$

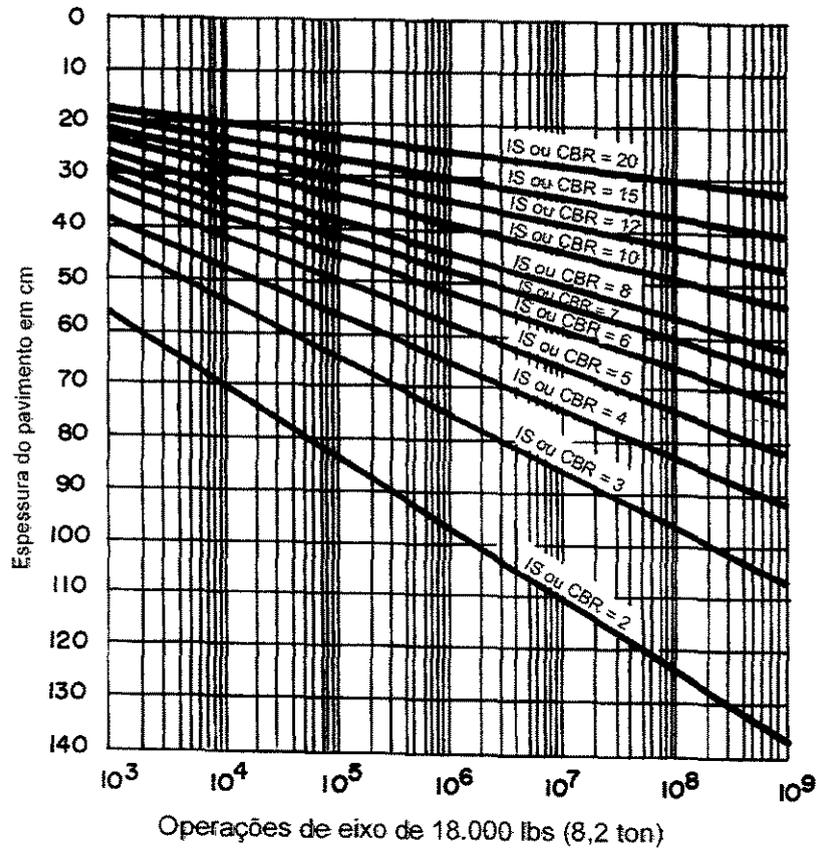
Segundo o próprio autor, o processo do D.N.E.R., também chamado, por alguns autores, de método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis, traz ainda algumas observações, como:

- caso $\text{LL} > 25$ e/ou o $\text{IP} > 6$, o material pode ser empregado em base (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30 %.

Para um número de repetições do eixo-padrão, durante o período de projeto $N \leq 10^6$, podem ser empregados materiais com $\text{CBR} \geq 60$, e as faixas granulométricas E e F da AASHTO.

A fração que passa na peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 de fração que passa na peneira nº 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles inferior a 50. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material.

Para dimensionar o pavimento pelo método do D.N.E.R., basta utilizar o gráfico da fig. 3.12. Este gráfico dá a espessura total do pavimento, em função de (N) e de IS ou C.B.R.; a espessura fornecida por este gráfico é em termos de material com $K = 1,0$, isto é, em termos de base granular. Entrando-se em abcissas, com o valor de (N), procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte em causa e, procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas, a espessura total do pavimento.



Fonte: Souza (1981); pag.18..

FIGURA 3.12 - Gráfico de dimensionamento de pavimentos flexíveis do processo do D.N.E.R..

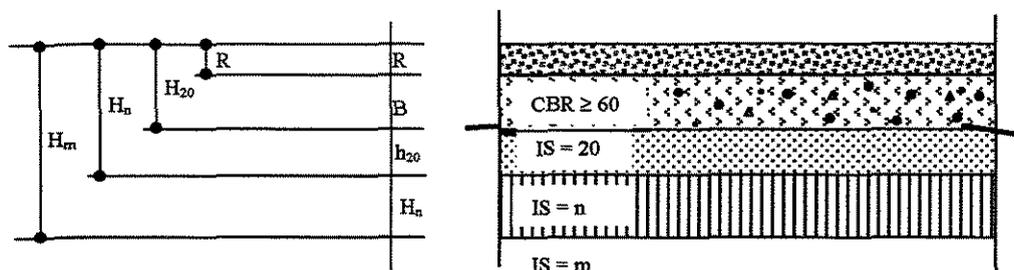
Supõe-se sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol de água subterrâneo foi rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de regularização.

Uma vez determinadas as espessuras H_m ; H_n ; H_{20} , representadas na fig 3.13; pelo gráfico da fig. 3.12 e (R), pela tabela 3.8, as espessuras da base (B); sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RK_r + BK_b \geq 20 \quad (3.14)$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_s \geq H_n \quad (3.15)$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_s + h_nK_{ref} \geq H_m \quad (3.16)$$



Fonte: Souza (1981); pag.18

FIGURA 3.13 - Representação genérica das camadas de um pavimento flexível para o D.N.E.R..

Portanto para fazer o dimensionamento de um pavimento por este método, basta utilizar um ábaco, contendo a espessura total do pavimento em função do número de operações (N) e em seguida resolver simples inequações, para obtenção da espessura de cada uma das camadas componentes da estrutura.

Sabe-se que nos dias atuais, o D.N.E.R., através do seu manual de pavimentação, tem utilizado o método da resiliência para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Este método é um procedimento baseado em modelos de resiliência, tendo em vista a necessidade de um método de análise mecânica que calcule a deflexão máxima prevista de uma estrutura proposta para uma determinada expectativa de vida de fadiga.

Neste processo recente, considera-se o valor estrutural da camada betuminosa em função do tipo de subleito e do tráfego futuro, leva-se em conta o comportamento elástico não-linear dos solos e materiais granulares. Toma-se partido da boa qualidade dos solos argilosos de comportamento laterítico, diminuindo-se consideravelmente a parcela da espessura total do pavimento que corresponde a camada granular.

Porém, como já foi esclarecido no item 3.2.4 desta pesquisa, o escopo deste trabalho, é exatamente analisar as origens de alguns processos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, que têm como embasamento o método C.B.R., portanto as considerações posteriores, que aparecerão neste trabalho, sobre o método do D.N.E.R., não levarão em conta o método da resiliência.

Acrescente-se às últimas considerações, que esta pesquisa visa um confronto entre métodos empíricos e não mecanísticos, tornando-se assim, extremamente complicado, fazer-se comparações entre métodos de dimensionamento com concepções diferentes, pois, quando se utiliza o método C.B.R. de dimensionamento de pavimentos flexíveis, desenvolvido pelo Corps of Engineers, como é o caso corrente no Brasil, não há como considerar explicitamente a resiliência. Pode-se quando muito, estabelecer restrições específicas a determinados materiais e estruturas de pavimentos, e isto de modo totalmente empírico.

4. METODOLOGIA

4.1. INTRODUÇÃO

Até o presente momento foram mostrados nesta pesquisa, três processos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, de caráter totalmente empírico e que tiveram seus conceitos básicos, fundamentados pelo método C.B.R.. São muitos os processos de dimensionamento derivados dessa corrente (C.B.R.), porém, para efeito de análise, procurou-se nesta pesquisa, concentrar esforços, para analisar os processos de dimensionamento da AASHTO (1972), do Corps of Engineers (1962) e do D.N.E.R. (1966).

O processo da AASHTO, além de possuir uma linha clara de raciocínio e procedimentos, é substanciado em experimentos reais e, somado a este fato, relacionou a perda de funcionalidade do pavimento com o número de repetição das cargas provenientes do tráfego, permitindo assim, uma previsão da vida útil do pavimento.

O processo do Corps of Engineers semelhantemente ao da AASHTO, introduziu novos conceitos, como o de cobertura e porcentagem de projeto que permitiram então, reduzir qualquer carga de tráfego a uma carga considerada padrão. A partir de então, em seus dimensionamentos, as repetições do tráfego passaram a ser traduzidas em função da carga padrão. Portanto, os dois processos representaram um avanço considerável nessa área e possuem bases conceituais bem fundamentadas e esclarecidas.

Exatamente da união desses dois processos, foi elaborado o processo do D.N.E.R. para dimensionar pavimentos, que foi e tem sido muito empregado na grande maioria das nossas estradas, sendo este, tema de muitos estudos no meio rodoviário brasileiro, servindo até como

base para que algumas localidades do nosso país, formulem seus próprios métodos para dimensionar pavimentos flexíveis.

Porém, como já foi comentado nesta pesquisa, o processo do Corps of Engineers, assim como o da AASHTO, têm peculiaridades diferentes e, seus resultados e procedimentos de cálculo são válidos, apenas quando as particularidades de cada um são respeitadas. Exatamente em função desse aspecto, é que o processo do D.N.E.R., deixa pouco clara a forma de como foi feita a adaptação dos conceitos e fatores, oriundos do Corps of Engineers e da AASHTO, para as condições brasileiras, levantando suspeitas quanto ao superdimensionamento e subdimensionamento dos seus resultados.

Pelo exposto acima, torna-se necessária uma comparação entre os três processos de dimensionamento abordados nesta pesquisa, ou mais precisamente, uma comparação entre o processo do D.N.E.R., separadamente, com os outros dois, pois, uma vez que, estes, possuem um embasamento conceitual mais consistente, há a possibilidade de se fazer ajustes no processo do D.N.E.R., através de coeficientes de segurança, em relação aos outros dois processos, adaptando assim, a sua utilização às nossas realidades.

4.2. PROCEDIMENTO

Para fazer as comparações entre os processos, tornou-se importante, a consideração de aspectos relevantes, relacionados às condições de subleito, aos tipos de materiais utilizados na composição da estrutura dos pavimentos e às composições de tráfegos elaboradas.

Com relação a variação de suporte do subleito, esta, teve seus valores escolhidos aleatoriamente, procurando-se apenas, abranger nos gráficos de dimensionamento dos processos, o maior número de curvas possível, a fim de poder detectar melhor os desvios apresentados, dos processos analisados. Desta forma, Os valores de C.B.R. do subleito, considerados neste estudo, foram os seguintes: 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12; 15 e 20, portanto, os valores encontrados para o Si AASHTO foram os seguintes: Si; 3,20; 3,70; 4,00; 4,30; 4,60; 4,80; 5,10; 5,40; 5,60; 6,20 respectivamente.

Com relação a composição dos pavimentos, adotou-se para os mesmos, camadas compostas por materiais semelhantes, no que diz respeito ao tipo de material utilizado por cada processo e seus respectivos coeficientes estruturais. Esta medida permite uma comparação melhor entre os processos e, conseqüentemente, proporciona uma sensibilidade maior às conclusões futuras, bem como a possíveis ajustes.

Convém destacar aqui, que dos processos ora comparados, os que apresentam em seus procedimentos, considerações sobre coeficientes estruturais para os diferentes materiais empregados nas camadas de um pavimento, são os da AASHTO e do D.N.E.R., em função disso, neste trabalho foi mantida a composição original do pavimento da AASHTO, ou seja, foram utilizados para efeito de comparações, os mesmos materiais que compuseram os pavimentos das suas pistas de testes, com os seus respectivos coeficientes estruturais e, na composição do pavimento do D.N.E.R., fez-se o ajuste necessário, para que as estruturas ficassem semelhantes.

Os materiais empregados nas camadas dos pavimentos, com os seus respectivos coeficientes estruturais, utilizados nesta pesquisa, para efeito de comparação entre os processos da AASHTO e do D.N.E.R., são mostrados nas tabelas abaixo .

Processo da AASHTO:

Camada	Material utilizado	Coefficiente estrutural
Revestimento	mistura em usina, alta qualidade	0,44
base	Pedra britada	0,14
Sub-base	Pedregulho arenoso	0,11

Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials (1972);
pag.77)

TABELA 4.1 - Coeficientes estruturais utilizados na pista de testes da AASHTO.

Processo do D.N.E.R.:

Camada	Material utilizado	Coefficiente estrutural
Revestimento	pré-misturado à quente de graduação densa	1,70
Base	Material granular	1,00
Sub-base	Material granular	1,00

Fonte: Souza (1981); pag.15.

TABELA 4.2 - coeficientes estruturais do D.N.E.R. utilizados nesta pesquisa.

As composições de tráfegos feitas nesta pesquisa, têm um caráter acadêmico, pois, o objetivo maior é ressaltar as discrepâncias existentes entre os processos, em termos de espessuras de pavimentos, quando a estes, são considerados os mesmos tipos de tráfegos, sob as mesmas condições de subleito. Por isso, o fato de ter-se adotado tráfegos fictícios, contendo algumas simplificações, não põe em questão, os resultados da pesquisa, pois, a metodologia empregada por cada um dos processos em análise, é consistente, portanto, para qualquer outra composição de tráfego, os processos apresentarão também, número de operações (N) divergentes.

Foram estabelecidas, então, composições de tráfegos, iguais, para o cálculo do número (N) de operações, através da particularidade

de cada processo, a fim de que ocorressem quatro variações dentro de cada faixa exponencial de operação, da curva de dimensionamento, compreendidas aproximadamente nos seguintes intervalos: 10^3 ; 3×10^3 ; 6×10^3 e 9×10^3 . Os mesmos intervalos foram respeitados para as demais potências, contidas no gráfico de dimensionamento, para que fossem atingidas as seguintes categorias de tráfego: muito leve, leve, médio, meio pesado, pesado e muito pesado, a fim de permitir entre os processos, uma comparação baseada em um número maior de combinações, entre os valores de C.B.R. do subleito e do número (N) de operações, denotando assim, maior confiabilidade aos resultados da pesquisa.

As composições de tráfego utilizadas na pesquisa foram numeradas, para efeito de identificação futura. Estas composições estão mostradas nos quadros a seguir.

Tráfego 1

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	3	1							
N	USACE			AASHTO		DNER			
	1,06 x 10 ³			1,19 x 10 ³		2,13 x 10 ³			

Tráfego 2

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	10	3							
N	USACE			AASHTO		DNER			
	3,33 x 10 ³			3,50 x 10 ³		6,93 x 10 ³			

Tráfego 3

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	17	6							
N	USACE			AASHTO		DNER			
	6,30 x 10 ³			6,90 x 10 ³		3,3 x 10 ⁴			

Tráfego 4

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	22	9							
N	USACE			AASHTO		DNER			
	9,40 x 10 ³			9,50 x 10 ³		1,6 x 10 ⁴			

Tráfego 5

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	20	10							
N	USACE			AASHTO		DNER			
	1,03 x 10 ⁴			1,43 x 10 ⁴		1,6 x 10 ⁴			

Tráfego 6

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	8	5	4	1					
N	USACE			AASHTO		DNER			
	3,40 x 10 ⁴			3,95 x 10 ⁴		8,15 x 10 ⁴			

Tráfego 7

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	13	10	6	2					
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$6,06 \times 10^4$			$6,90 \times 10^4$		$1,32 \times 10^5$			

Tráfego 8

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	20	16	10	3					
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$9,50 \times 10^4$			$1,10 \times 10^5$		$2,08 \times 10^5$			

Tráfego 9

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	19	13	9	5					
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$1,15 \times 10^5$			$1,28 \times 10^5$		$2,57 \times 10^5$			

Tráfego
10

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	33	23	16	9	4				
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$3,02 \times 10^5$			$3,12 \times 10^5$		$6,34 \times 10^5$			

Tráfego
11

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	48	32	24	13	8	3	2	1	
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$6,24 \times 10^5$			$5,50 \times 10^5$		$1,39 \times 10^6$			

Tráfego
12

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	68	45	34	19	12	5	3	2	
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$9,50 \times 10^5$			$8,12 \times 10^5$		$2,00 \times 10^6$			

Tráfego
13

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	120	80	60	32	20	8	4	2	
N	USACE			AASHTO		DNER			
	1,49 x 10 ⁶			1,35 x 10 ⁶		3,3 x 10 ⁶			

Tráfego
14

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	204	136	102	55	34	14	7	4	4
N	USACE			AASHTO		DNER			
	3,12 x 10 ⁶			2,40 x 10 ⁶		7,46 x 10 ⁶			

Tráfego
15

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	367	245	184	99	61	26	20	15	10
N	USACE			AASHTO		DNER			
	6,69 x 10 ⁶			4,49 x 10 ⁶		1,42 x 10 ⁷			

Tráfego
16

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	514	343	258	139	86	37	28	21	14
N	USACE			AASHTO		DNER			
	9,39 x 10 ⁶			6,31 x 10 ⁶		1,99 x 10 ⁷			

Tráfego
17

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	624	417	313	169	104	45	34	26	17
N	USACE			AASHTO		DNER			
	1,47 x 10 ⁷			7,60 x 10 ⁶		2,42 x 10 ⁷			

Tráfego
18

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	1186	793	595	322	198	200	150	100	90
N	USACE			AASHTO		DNER			
	3,54 x 10 ⁷			1,76 x 10 ⁷		7,35 x 10 ⁷			

Tráfego
19

Eixo	Simples					em tandem			
	Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34
Veic/dia	2254	1507	1131	612	377	380	285	190	171
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$6,74 \times 10^7$			$3,30 \times 10^7$		$1,39 \times 10^8$			

Tráfego
20

Eixo	Simples					em tandem			
	Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34
Veic/dia	3155	2109	1583	856	527	532	399	266	239
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$9,42 \times 10^7$			$4,60 \times 10^7$		$1,95 \times 10^8$			

Tráfego
21

Eixo	Simples					em tandem			
	Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34
Veic/dia	4283	2864	2149	1163	717	722	542	361	325
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$1,28 \times 10^8$			$6,2 \times 10^7$		$2,65 \times 10^8$			

Tráfego
22

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	3000	2000	1700	900	500	1500	1000	500	1600
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$3,11 \times 10^8$			$9,00 \times 10^7$		$7,60 \times 10^8$			

Tráfego
23

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
veic/dia	5100	3400	2890	1530	850	2550	1700	850	2720
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$6,70 \times 10^8$			$1,60 \times 10^8$		$1,55 \times 10^9$			

Tráfego
24

Eixo	Simples					em tandem			
Carga (Kips)	4	10	14	18	20	18	30	34	39
Veic/dia	1000	1000	1700	900	500	3000	3000	1000	5800
N	USACE			AASHTO		DNER			
	$9,66 \times 10^8$			$2,22 \times 10^8$		$2,25 \times 10^9$			

Como pode-se observar, todas as cargas de eixos consideradas foram expressas com as unidades em Kips, obviamente que estas, sofreram transformações, de acordo com a metodologia do processo em que foram analisadas, no caso por exemplo do D.N.E.R., as unidades destas cargas foram tratadas em toneladas. Ainda com relação a este processo, considerou-se em seu procedimento de cálculo, para efeito de simplificação nesta pesquisa, veículos com apenas dois eixos (ambos simples ou um simples e outro em também), ou seja, adotou-se o valor 2 como fator de eixo para este processo.

A partir das composições de tráfegos apresentadas, foram calculados os números (N) de operações, considerando-se uma taxa de crescimento do tráfego de 5 %, para os processos da AASHTO, do Corps of Engineers e do D.N.E.R., de acordo com as respectivas metodologias de cada processo, conforme já comentado nesta pesquisa. Para cada valor de (N), determinou-se uma espessura de pavimento, em função da variação do valor de C.B.R. contido no intervalo admitido desta pesquisa, obtendo-se assim, uma curva de variação de espessura do pavimento em função de um valor de C.B.R., para um mesmo número (N), de cada processo analisado.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, são mostrados em forma de gráficos, sendo que estes, apresentam nas abcissas, valores de C.B.R. e, nas ordenadas, os valores das espessuras do pavimento (em cm) e, cada um desses gráficos, contém três curvas, referentes a variação citada no parágrafo anterior, ocorrida para cada processo.

As curvas contidas nos gráficos serão analisadas para que possam ser detectadas as divergências existentes entre os processos e suas respectivas causas. A curva referente ao processo do D.N.E.R. será analisada especialmente, em relação as outras duas, para que se possa ter uma visão mais crítica deste, a fim de que possam ser definidos alguns fatores de ajustes deste processo.

5. RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentadas como resultados desta pesquisa, as curvas obtidas para a espessura do pavimento em função da variação do C.B.R., para uma mesma composição de tráfego, utilizando-se as respectivas metodologias dos processos da AASHTO, do Corps of Engineers e do D.N.E.R., com seus respectivos comentários e análises comparativas, a fim de esclarecer melhor o comportamento dos três processos sob a ação de carregamentos semelhantes.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

O gráfico 5.1, apresenta grandes diferenças entre as espessuras de pavimento encontradas pelos três processos. A curva representativa do processo da AASHTO manteve-se constante, pois, conforme a consideração feita nesta pesquisa, ou seja, para o pavimento da AASHTO composto por sub-base, base e revestimento, procurou-se respeitar o mínimo valor de espessura para cada uma dessas camadas, independentemente das variações dos valores de si com o CBR adotado. Esta situação pode ser observada também no gráfico 5.2. O número de operações (N) da AASHTO para o gráfico 5.1 foi de $1,4 \times 10^3$ e, apesar dos valores constantes dessa curva, a partir do C.B.R. 6 seus valores se mantêm em média 66% maiores dos obtidos pelo processo do Corps of Engineers. O valor de (N) para o Corps of Engineers foi de $1,06 \times 10^3$, para esta composição de tráfego. A curva da AASHTO, a partir do C.B.R. 8, apresenta em média, seus valores 35 % maiores que os da curva do D.N.E.R.. O valor do número (N) para esta composição de tráfego calculado pelo processo do D.N.E.R. foi de $2,13 \times 10^3$, portanto, aproximadamente 1,52

vezes maior que o da AASHTO e 2 vezes maior que o do Corps of Engineers. A curva do D.N.E.R. mantém suas espessuras sempre maiores que as espessuras do Corps of Engineers, em média, 32 %, mas, apesar das diferenças, apresentadas por esses dois últimos processos, observa-se um comportamento semelhante entre as suas curvas, sugerindo que ambas tenham a mesma inclinação.

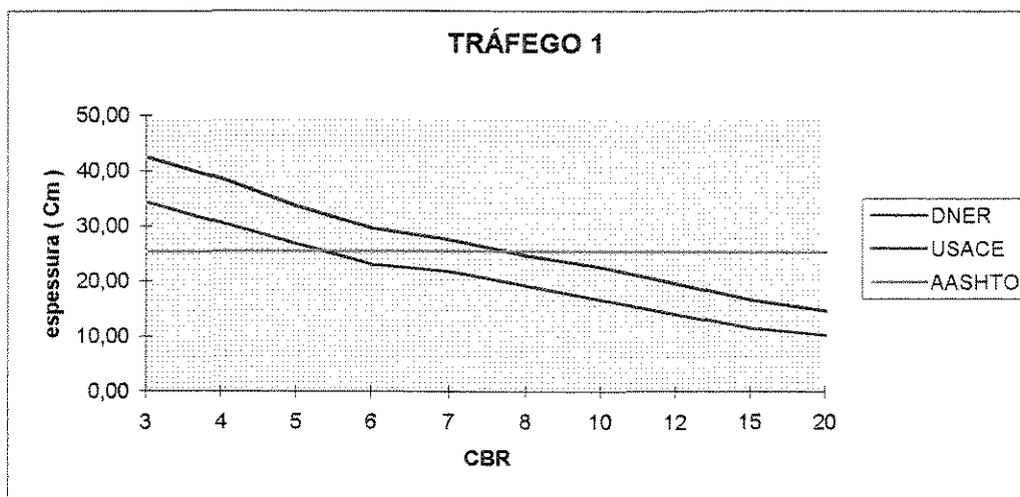


GRÁFICO 5.1 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 1.

O gráfico 5.2, em linhas gerais apresenta o mesmo comportamento do primeiro gráfico, ou seja, a curva representativa da AASHTO continuou mantendo suas espessuras constantes. As curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantiveram, perceptivelmente, o mesmo comportamento do gráfico anterior, no que diz respeito as suas inclinações e as variações de suas espessuras, ou seja, os valores do D.N.E.R. continuaram, em média, 35 % acima dos apresentados pelo Corps of Engineers, caracterizando um acréscimo em relação ao gráfico anterior. O número (N) do D.N.E.R. continuou, para esta composição, maior, 1,54 vezes em relação a AASHTO e 2,08 vezes em relação ao Corps of Engineers. A curva da AASHTO, continua a partir de um determinado C.B.R., no caso 7, apresentando espessuras maiores que as do Corps of Engineers, em média 10 %. A superioridade de espessuras da AASHTO em relação ao D.N.E.R. começa a partir do C.B.R. 10. Os valores da AASHTO nesses pontos são 27 % maiores que o do D.N.E.R.

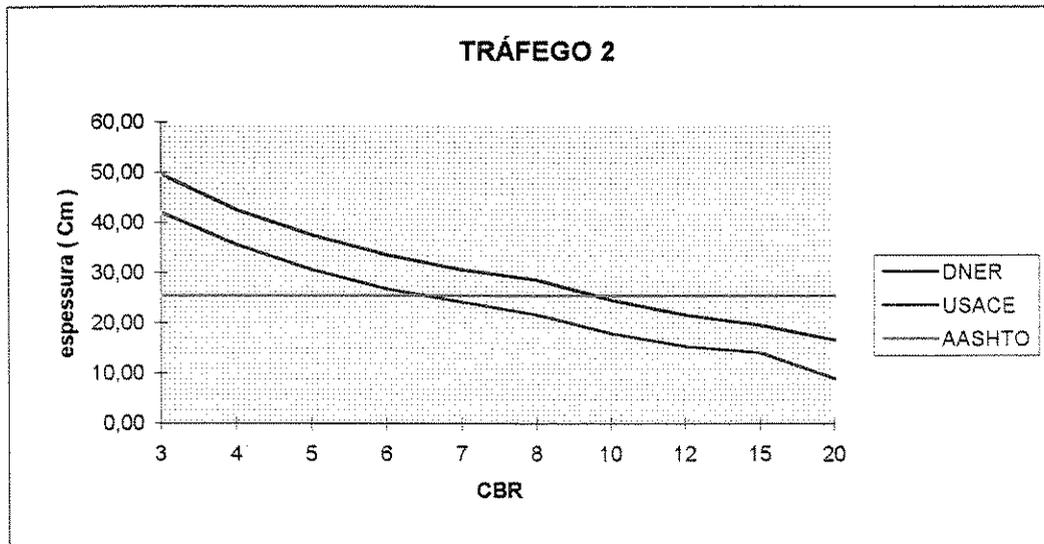


GRÁFICO 5.2 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 2.

Pode-se dizer que o gráfico 5.3, tem as mesmas características dos dois primeiros, com uma diferença, os valores iniciais das espessuras da AASHTO começam a aumentar, ou seja, a composição do seu pavimento para este tráfego, já não apresenta mais os valores constantes, apenas para os C.B.R. 3 e 4. A curva da AASHTO, continua apresentando valores maiores, em termos de espessuras, a partir de determinados valores de C.B.R., no caso, 8 para o Corps of Engineers e 12 para o D.N.E.R.. As diferenças de espessuras entre a AASHTO e o Corps of Engineers ficou em média, 63 %, e da AASHTO para o D.N.E.R. ficou em média, 22 %.

O comportamento das curvas do Corps of Engineers e do D.N.E.R., mantiveram-se da mesma forma, porém, houve um aumento na taxa de variação das suas espessuras. As espessuras do D.N.E.R. ficaram, em média, 39 % acima das do Corps of Engineers. O valor do número (N), obtido para o D.N.E.R., nesta composição de tráfego, foi maior, correspondendo a 3,75 vezes o (N) da AASHTO e 5,23 vezes o do Corps of Engineers. As curvas do Corps of Engineers e do D.N.E.R. continuam sugerindo inclinações semelhantes.

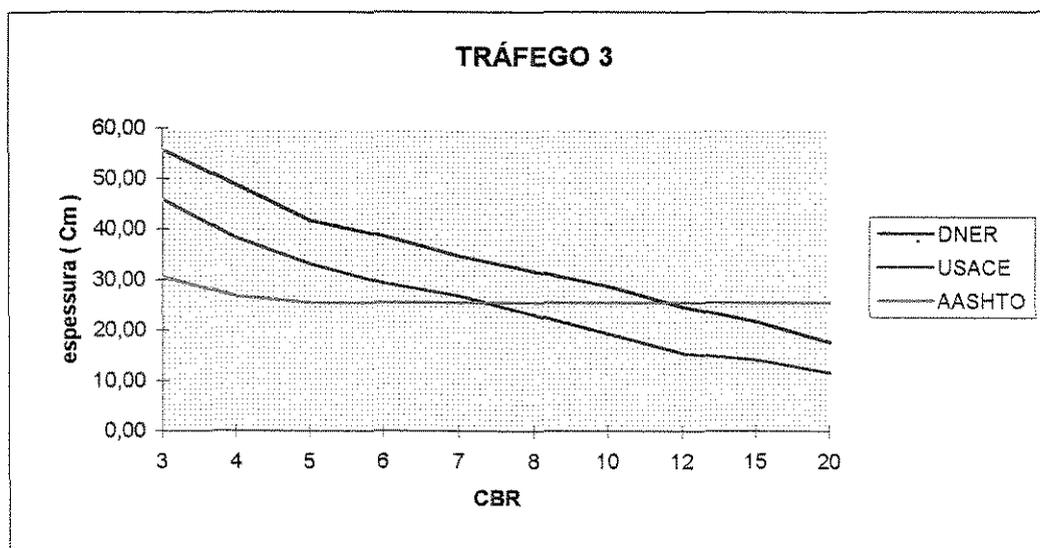


GRÁFICO 5.3 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 3.

Conforme o gráfico 5.4, a curva da AASHTO demonstra que aos poucos, como já observado no gráfico 5.3, a sua composição de pavimento exige espessuras maiores que as constantes, porém, até um certo valor de C.B.R. (6). Sendo suas espessuras 59 % maiores, em média, que as do Corps of Engineers e 30 % acima das espessuras do D.N.E.R.. Seu comportamento em relação as curvas do Corps of Engineers e do D.N.E.R., continua apresentando valores maiores, em termos de espessuras, a partir de determinados valores de C.B.R., no caso, 8 para o Corps of Engineers e 12 para o D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, porém as espessuras apresentam uma diferença de 27 %, havendo portanto uma redução em relação ao tráfego 3. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 1,23 vezes o (N) da AASHTO e 1,70 vezes o (N) do Corps of Engineers. Houve portanto uma queda do número (N) do D.N.E.R., em relação ao tráfego 3.

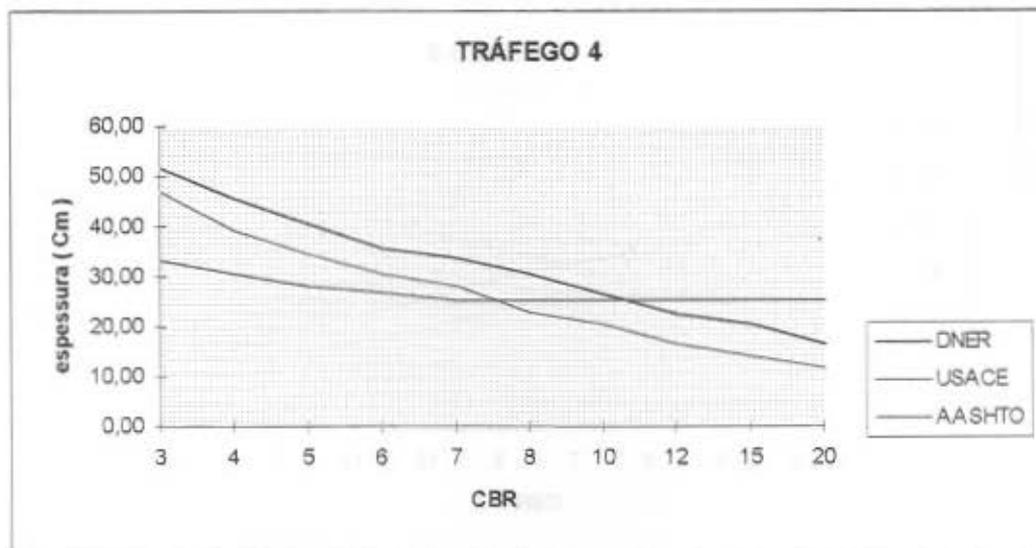


GRÁFICO 5.4 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 4.

Pelo gráfico 5.5, observa-se que o processo da AASHTO também apresentou combinações de pavimento maiores que as anteriores, até o C.B.R. 6, sendo que estas, geraram espessuras de pavimento, em média, 28 % menores que as do Corps of Engineers e 38 % menores que as espessuras do D.N.E.R.. A partir dos valores de C.B.R. 8 e 12, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. Essas diferenças são de 15 % em relação ao Corps of Engineers e de 30 % em relação ao D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, porém as espessuras apresentam uma diferença de 23 %, havendo portanto uma redução em relação ao tráfego 4. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 1,11 vezes o (N) da AASHTO e 1,55 vezes o (N) do Corps of Engineers. Houve portanto uma queda do número (N) do D.N.E.R., em relação ao da AASHTO e do Corps of Engineers.

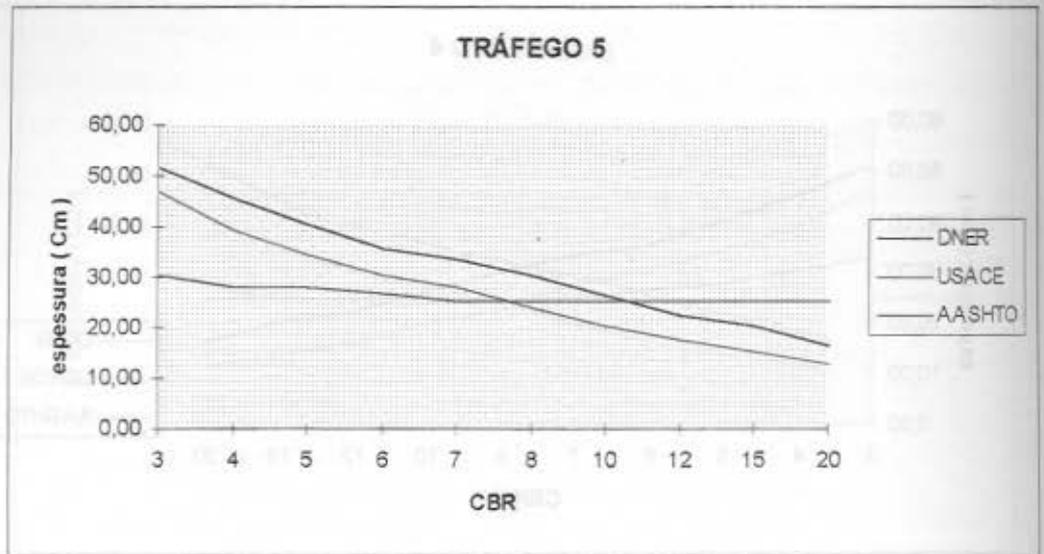


GRÁFICO 5.5 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 5.

Pelo gráfico 5.6, observa-se que o processo da AASHTO só apresentou as combinações mínimas exigidas (de acordo com o processo proposto em 1972), para o C.B.R. 20, havendo portanto, uma variação média, de 14 % de suas espessuras, em relação a composição de tráfego. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 15 % menores que as do Corps of Engineers e 31 % menores que as espessuras do D.N.E.R.. A partir dos valores de C.B.R. 8 e 12, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. Essas diferenças são de 41 % em relação ao Corps of Engineers e 17 % em relação ao D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, porém as espessuras apresentam uma diferença média de 26 %, havendo portanto um aumento em relação ao tráfego 5. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2,06 vezes o (N) da AASHTO e 2,39 vezes o (N) do Corps of Engineers. Houve portanto um aumento também do número (N) do D.N.E.R. em relação ao da AASHTO e do Corps of Engineers.

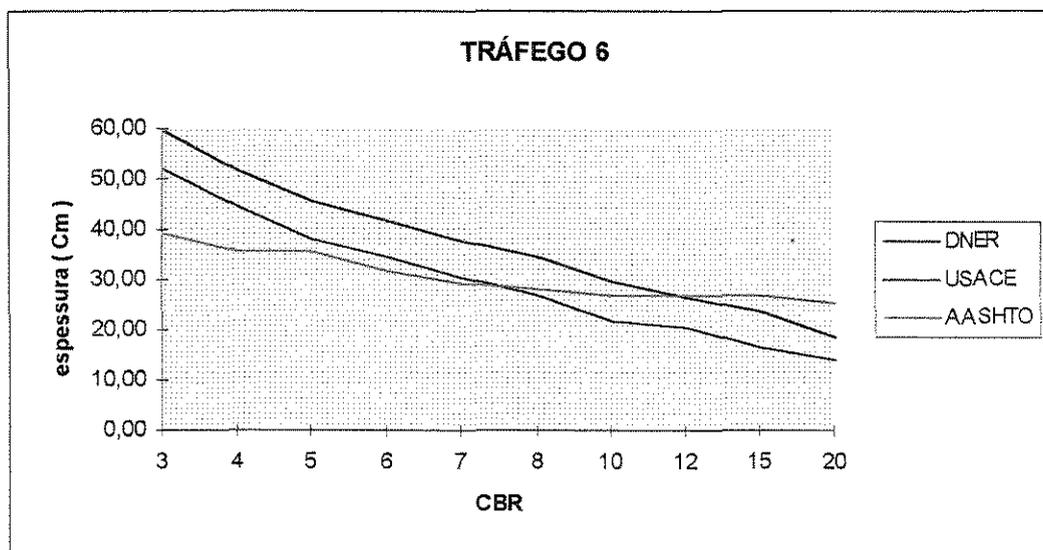


GRÁFICO 5.6 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 6.

Pelo gráfico 5.7, observa-se que o processo da AASHTO não apresentou mais as combinações mínimas exigidas (de acordo com o processo proposto em 1972), ou seja, devido ao seu número (N), houve um acréscimo médio em suas espessuras de 12 % em relação a composição de tráfego 6. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 15 % menores que as do Corps of Engineers e 23 % menores que as espessuras do D.N.E.R.. A partir dos valores de C.B.R. 7 e 8, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente, sendo que para o C.B.R. 10, o número estrutural da AASHTO (SN) teve uma diminuição de 10 % em relação ao obtido para o C.B.R. 8, conseqüentemente, neste ponto a espessura da AASHTO foi menor. As espessuras da AASHTO superaram nesses pontos citados, em média, 38 % as do Corps of Engineers e de 15 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, porém as espessuras apresentam uma diferença média de 22 %, havendo portanto uma certa aproximação entre as curvas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 1,91 vezes o (N) da AASHTO e 2,17 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 64 %, em relação a composição de tráfego 6, o (N) do Corps of Engineers aumentou 78 % e o da AASHTO 74 %.

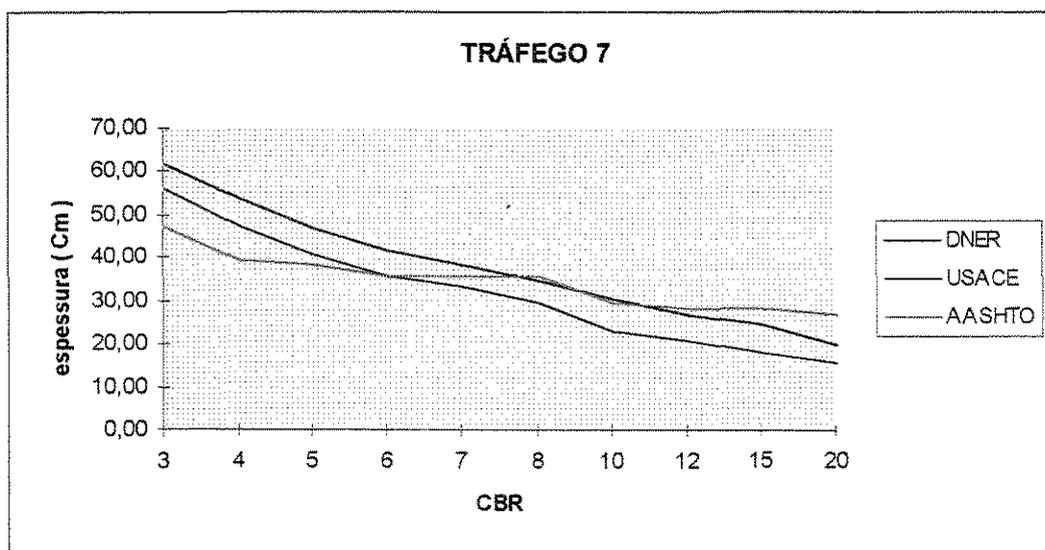


GRÁFICO 5.7 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 7.

Pelo gráfico 5.8, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO continuaram aumentando, houve um acréscimo médio em suas espessuras de 10 % em relação a composição de tráfego 7. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 8 % menores que as do Corps of Engineers e 13 % menores que as espessuras do D.N.E.R.. A partir dos valores de C.B.R. 5 e 10, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. As espessuras da AASHTO superaram nesses pontos citados, em média, 32 % as do Corps of Engineers e de 22 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, porém as espessuras apresentam uma diferença média de 21 %, indicando ainda uma certa aproximação entre as curvas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 1,89 vezes o (N) da AASHTO e 2,18 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 60 %, em relação a composição de tráfego 7, o (N) do Corps of Engineers aumentou 56 % e o da AASHTO 59 %.

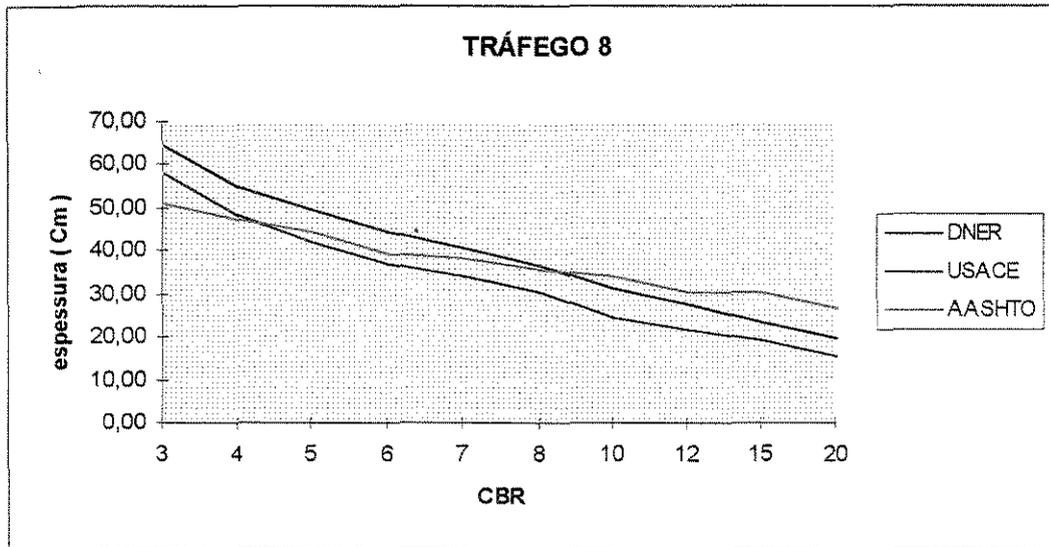


GRÁFICO 5.8 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 8.

Pelo gráfico 5.9, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO continuaram aumentando, houve um acréscimo médio em suas espessuras de 5 % em relação a composição de tráfego 8. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 12 % menores que as do Corps of Engineers, só no ponto de C.B.R. 3 e, 10 % menores que as espessuras do D.N.E.R.. A partir dos valores de C.B.R. 5 e 8, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. As espessuras da AASHTO superaram nesses pontos citados, em média, 38 % as do Corps of Engineers e de 19 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação, e também a taxa de variação de suas espessuras continuou a mesma, indicando ainda uma certa aproximação entre as curvas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2 vezes o (N) da AASHTO e 2,23 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 23 %, em relação a composição de tráfego 8, o (N) do Corps of Engineers aumentou 21 % e o da AASHTO 16 %.

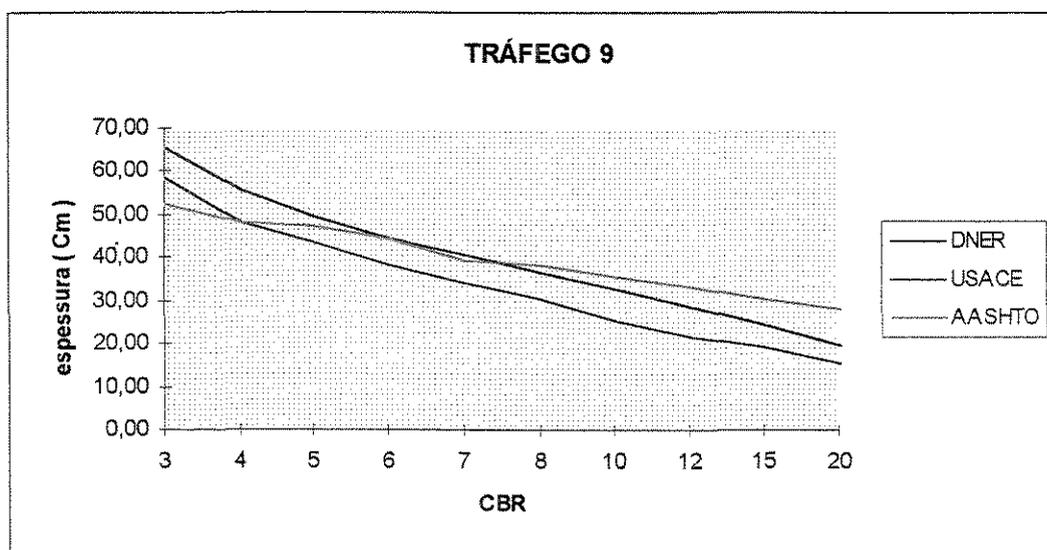


GRÁFICO 5.9 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 9.

Pelo gráfico 5.10, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO continuaram aumentando, houve um acréscimo médio em suas espessuras de 21 % em relação a composição de tráfego 9. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 4 % menores que as do Corps of Engineers, só no ponto de C.B.R. 3 e, 11 % menores que as espessuras do D.N.E.R., apenas nos pontos de C.B.R. 3 e 4. A partir dos valores de C.B.R. 4 e 5, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. As espessuras da AASHTO superaram nesses pontos citados, em média, 51 % as do Corps of Engineers e de 28 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, e a taxa de variação de suas espessuras diminuiu, assumindo um valor de 19 %, indicando que as duas curvas continuam se aproximando. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2,03 vezes o (N) da AASHTO e 2,09 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 146 %, em relação a composição de tráfego 9, o (N) do Corps of Engineers aumentou 162 % e o da AASHTO 143 %.

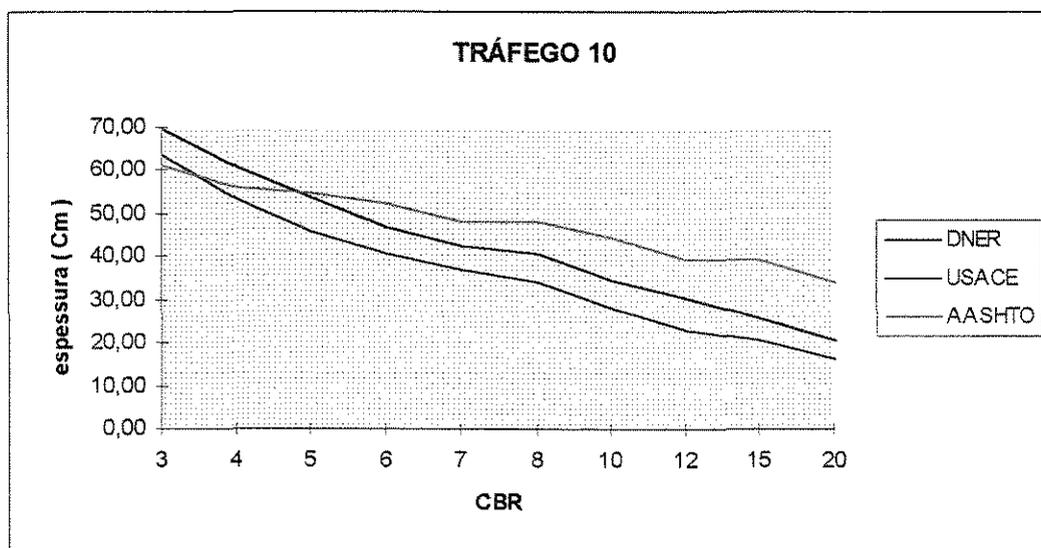


GRÁFICO 5.10 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 10.

Pelo gráfico 5.11, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO continuaram aumentando, houve um acréscimo médio em suas espessuras de 12 % em relação a composição de tráfego 10. Por isso a curva da AASHTO apresentou espessuras de pavimento, em média, 2 % menores que as do Corps of Engineers, só no ponto de C.B.R. 3 e, 6 % menores que as espessuras do D.N.E.R., apenas nos pontos de C.B.R. 3 e 4. A partir dos valores de C.B.R. 4 e 5, as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., respectivamente. As espessuras da AASHTO superaram nesses pontos citados, em média, 62 % as do Corps of Engineers e de 40 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, e a taxa de variação de suas espessuras diminuiu, assumindo um valor de 18 %, indicando que as duas curvas continuam se aproximando. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2,52 vezes o (N) da AASHTO e 2,22 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 119 %, em relação a composição de tráfego 10, o (N) do Corps of Engineers aumentou 106 % e o da AASHTO 76 %.

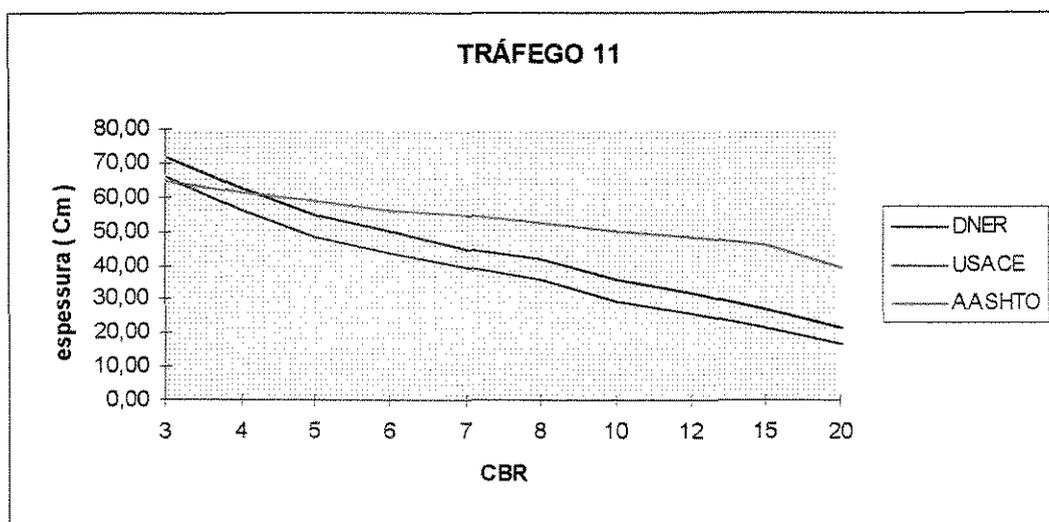


GRÁFICO 5.11 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 11.

Pelo gráfico 5.12, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO continuaram aumentando, devido ao seu número (N), houve um acréscimo médio em suas espessuras de 9 % em relação a composição de tráfego 11. Por isso a curva da AASHTO não apresentou espessuras de pavimento menores que as do Corps of Engineers como nas composições de tráfegos anteriores e, apresentou suas espessuras apenas 7 % menores que as espessuras do D.N.E.R., somente no ponto de C.B.R. 3. A partir dos valores de C.B.R. 4 as espessuras da AASHTO, tornam-se maiores que as do D.N.E.R.. As espessuras da AASHTO superaram, em média, 64 % as do Corps of Engineers e de 43 % as do D.N.E.R.. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, e a taxa de variação de suas espessuras se manteve constante, com valor de 18 %, indicando que as duas curvas continuam equidistantes. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2,46 vezes o (N) da AASHTO e 2,10 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 43 %, em relação a composição de tráfego 11, o (N) do Corps of Engineers aumentou 52 % e o da AASHTO 47 %.

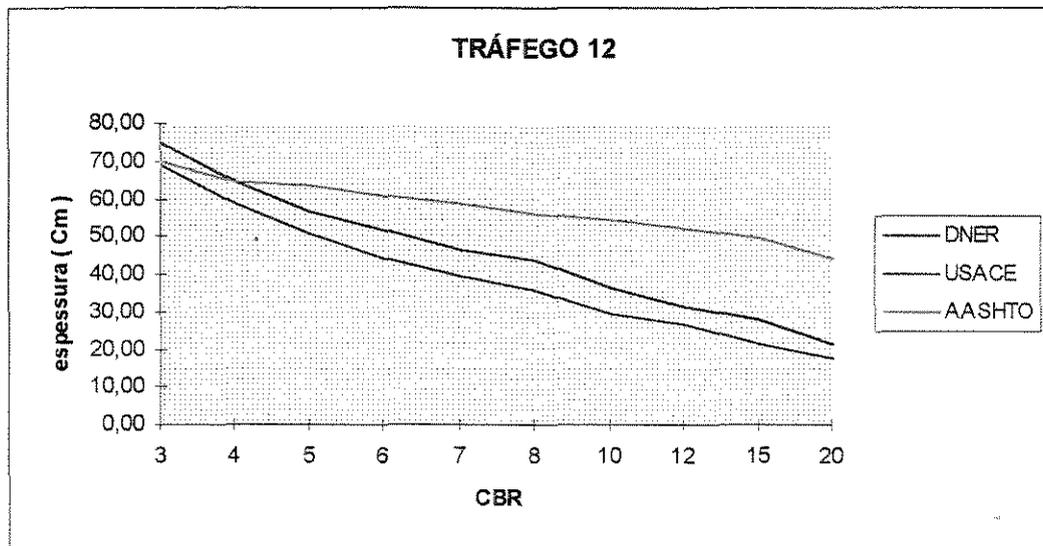


GRÁFICO 5.12 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 12.

Pelo gráfico 5.13, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO cresceram, em média, 9 % em relação a composição de tráfego 12, superando em todos os pontos de C.B.R. as espessuras do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 75 % e 43 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que a taxa de variação de suas espessuras aumentou para 21 %, havendo portanto um ligeiro afastamento entre ambas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 2,44 vezes o (N) da AASHTO e 2,21 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 65 %, em relação a composição de tráfego 12, o (N) do Corps of Engineers aumentou 56 % e o da AASHTO 66 %.

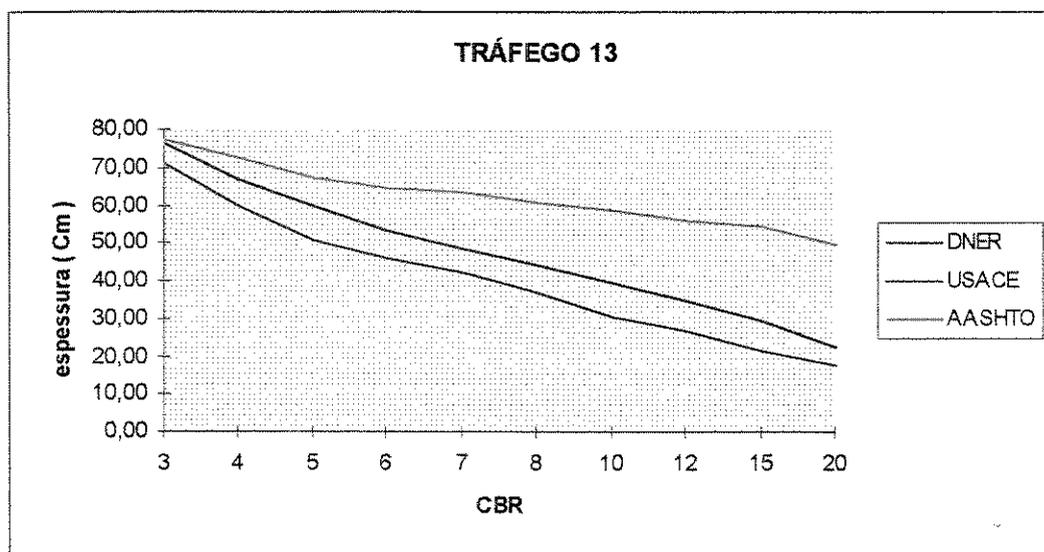


GRÁFICO 5.13 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 13.

Pelo gráfico 5.14, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO cresceram, em média, 10 % em relação a composição de tráfego 13, superando em todos os pontos de C.B.R. as espessuras do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 82 % e 60 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que a taxa de variação de suas espessuras diminuiu para 13 %, havendo portanto uma boa aproximação entre ambas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 3,10 vezes o (N) da AASHTO e 2,39 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 126 %, em relação a composição de tráfego 13, o (N) do Corps of Engineers aumentou 109 % e o da AASHTO 77 %.

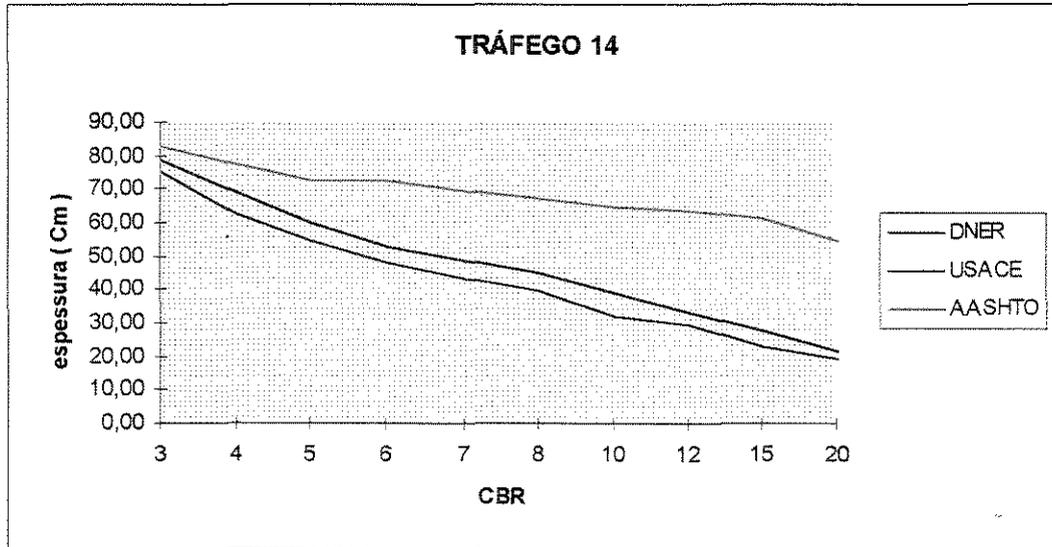


GRÁFICO 5.14 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 14.

Pelo gráfico 5.15, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram algumas oscilações em relação aos gráficos passados, ou seja, cresceram, em média, 3 % em relação a composição de tráfego 14, nos pontos de C.B.R. 3 e 5, mantiveram-se iguais aos valores da composição 14, nos pontos de C.B.R. 4, 6, 7, 8 e 10, tiveram seus valores reduzidos de 2 % em relação ao tráfego 14, para os valores de C.B.R. 12, 15 e 20. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, mantém a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que a taxa de variação de suas espessuras diminuiu para 7 %, havendo portanto uma aproximação maior entre ambas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 3,16 vezes o (N) da AASHTO e 2,12 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, enquanto o (N) do D.N.E.R. aumentou 90 %, em relação a composição de tráfego 14, o (N) do Corps of Engineers aumentou 114 % e o da AASHTO 87 %.

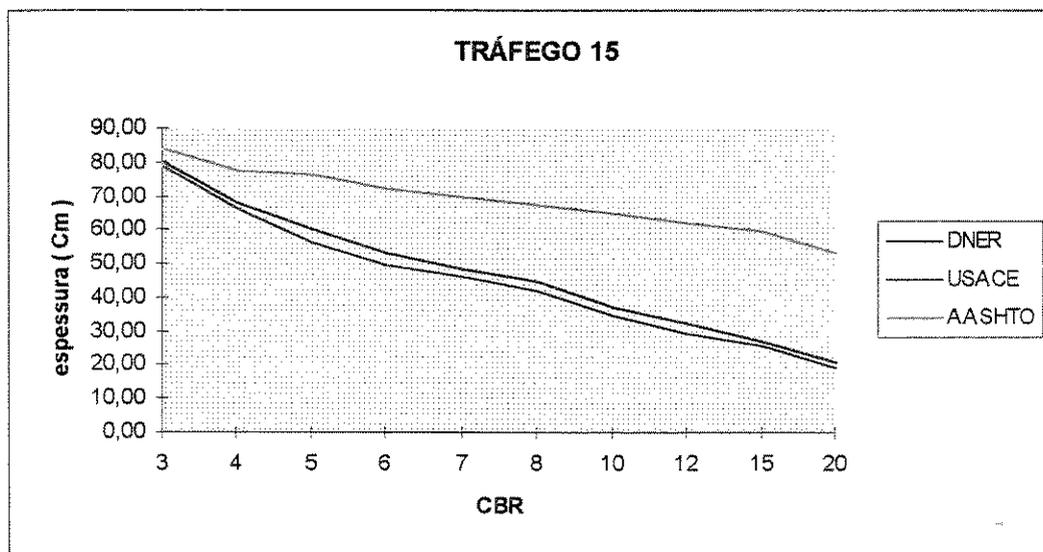


GRÁFICO 5.15 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 15.

Pelo gráfico 5.16 observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 15, crescendo, em média, 6 % em relação àquela. As espessuras da AASHTO mantiveram-se sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 78 % e 68 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que a taxa de variação entre as suas espessuras diminuiu para 6 %, havendo portanto uma aproximação maior entre ambas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 3,15 vezes o (N) da AASHTO e 2,11 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, o (N) do D.N.E.R., do Corps of Engineers e da AASHTO, cresceram 40 % em relação a composição de tráfego 15.

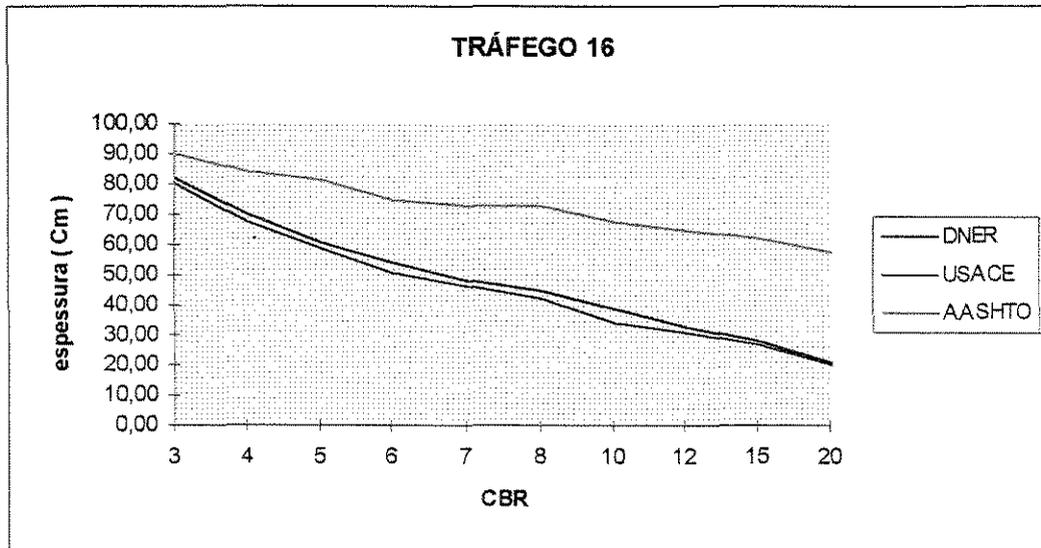


GRÁFICO 5.16 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 16.

Pelo gráfico 5.17, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 16, crescendo, em média, 4 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 82 % e 70 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que a taxa de variação entre as suas espessuras aumentou um pouco para 7 %, mostrando portanto uma certa oscilação na aproximação entre ambas. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 3,18 vezes o (N) da AASHTO e 2,12 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 21 % do (N) do D.N.E.R., 21 % do Corps of Engineers e 20 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 16.

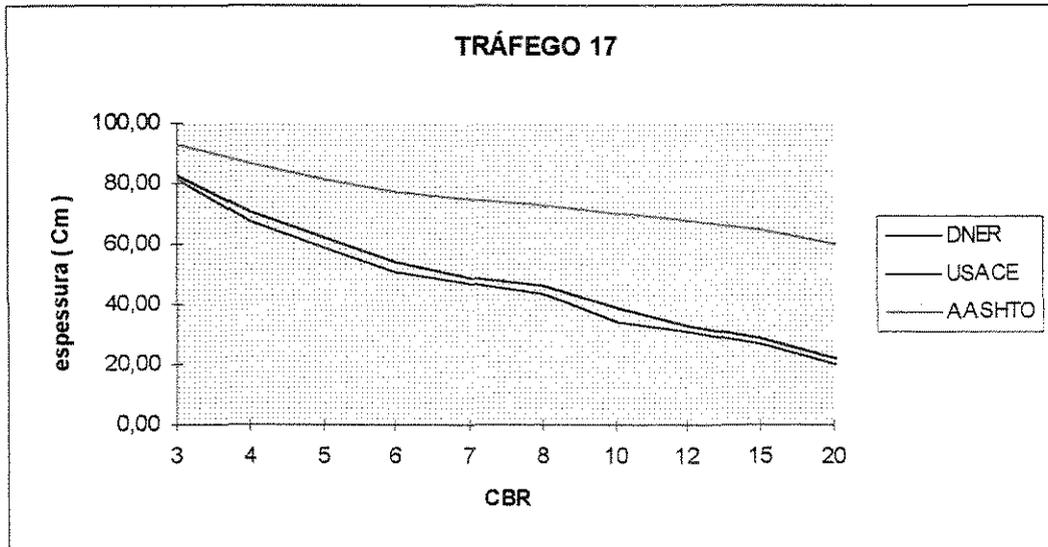


GRÁFICO 5.17 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 17.

Pelo gráfico 5.18, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 17, crescendo, em média, 15 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 97 % e 93 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para o valor de C.B.R. 3, as espessuras encontradas foram as mesmas, para os valores de C.B.R. de 4 a 12, as espessuras do D.N.E.R mantiveram-se, em média, 4 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 15 e 20, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 4,17 vezes o (N) da AASHTO e 2,07 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 203 % do (N) do D.N.E.R., 210 % do Corps of Engineers e 131 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 17.

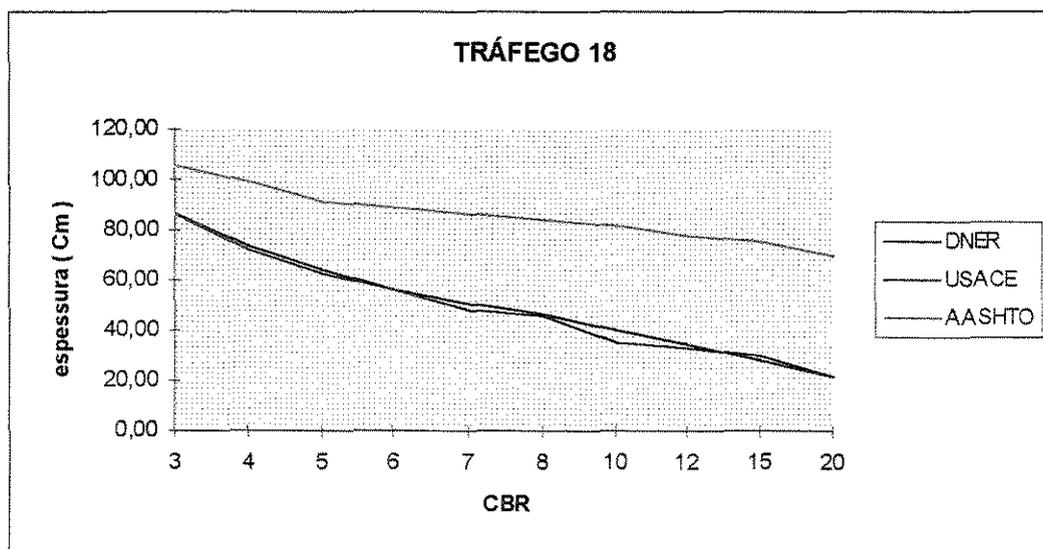


GRÁFICO 5.18 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 18.

Pelo gráfico 5.19, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 18, crescendo, em média, 10 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 111 % e 107 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. 4 e 15, as espessuras encontradas foram as mesmas, para os valores de C.B.R. de 5 a 12, as espessuras do D.N.E.R mantiveram-se, em média, 4 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3 e 20, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 4,21 vezes o (N) da AASHTO e 2,06 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 89 % do (N) do D.N.E.R., 90 % do Corps of Engineers e 87 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 18.

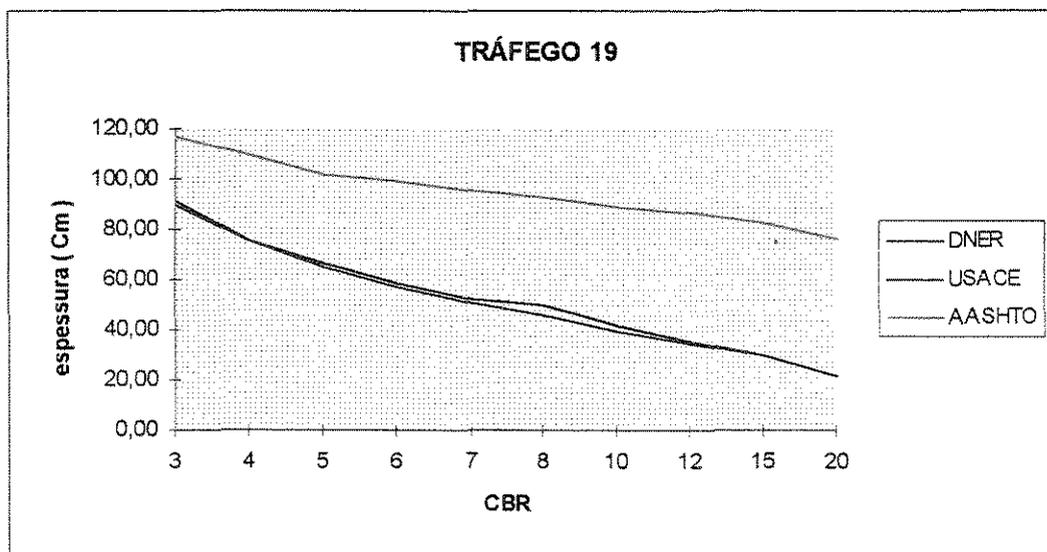


GRÁFICO 5.19 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 19.

Pelo gráfico 5.20, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 19, crescendo, em média, 4 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 113 %. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. 5, 7 e 8, as espessuras encontradas foram as mesmas, para os valores de C.B.R. de 4, 12 e 20, as espessuras do D.N.E.R mantiveram-se, em média, 2 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3, 6, 10 e 15, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 4,23 vezes o (N) da AASHTO e 2,07 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 40 % do (N) do D.N.E.R., 39 % do Corps of Engineers e 39 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 19.

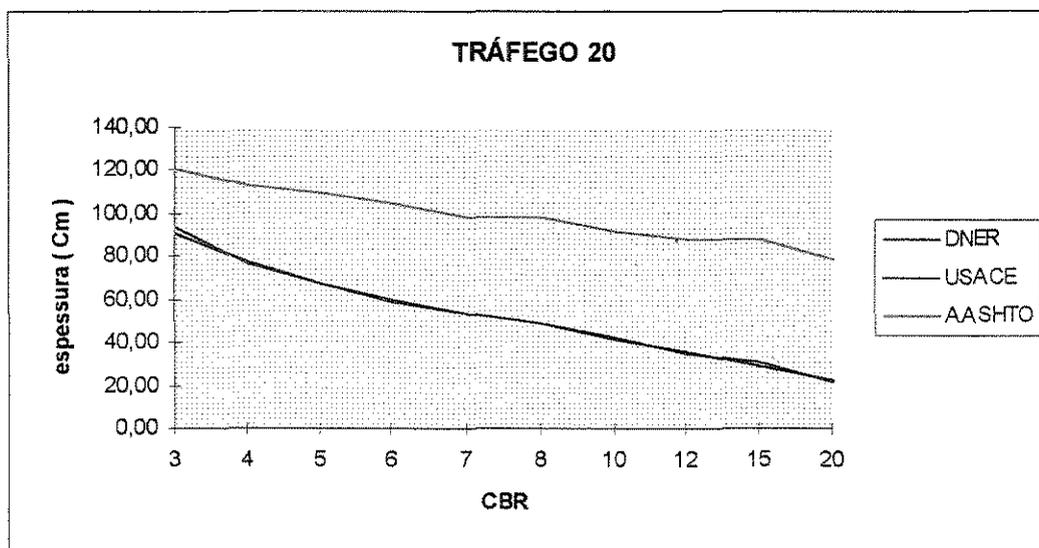


GRÁFICO 5.20 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 20.

Pelo gráfico 5.21, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 20, crescendo, em média, 5 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 122 % e 120 %. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. de 5, 6, 8, 10 e 20, as espessuras do D.N.E.R. mantiveram-se, em média, 3 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3, 4, 7, 12 e 15, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 4,27 vezes o (N) da AASHTO e 2,07 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 35 % do (N) do D.N.E.R., do Corps of Engineers e da AASHTO em relação a composição de tráfego 20.

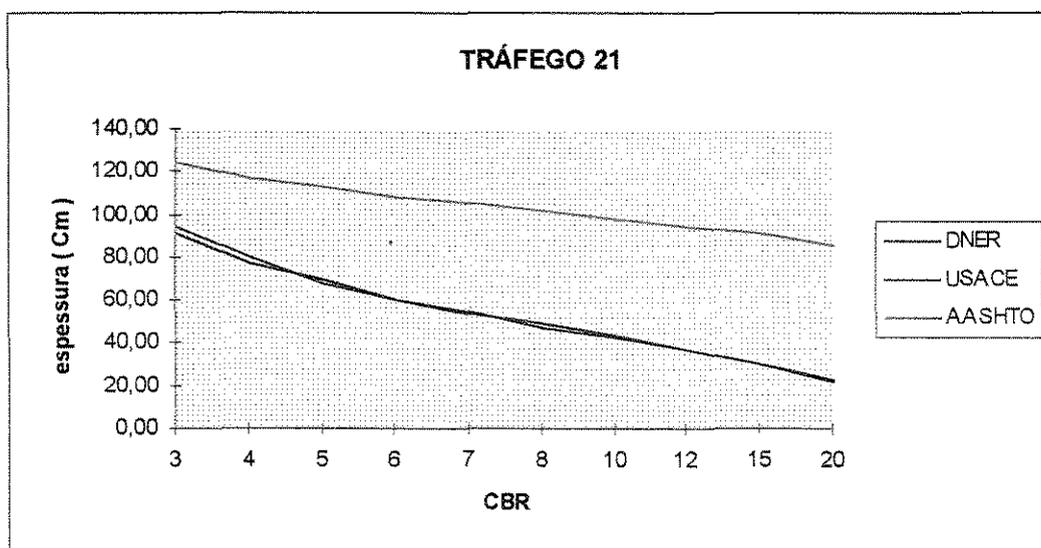


GRÁFICO 5.21 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 21.

Pelo gráfico 5.22, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 21, crescendo, em média, 6 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 128 % e 122 %. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. de 5, 6, 7, 8, 10, 12 e 20, as espessuras do D.N.E.R. mantiveram-se, em média, 4 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3, 4 e 15, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 7,77 vezes o (N) da AASHTO e 2,25 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 164 % do (N) do D.N.E.R., 142 % do Corps of Engineers e 45 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 21.

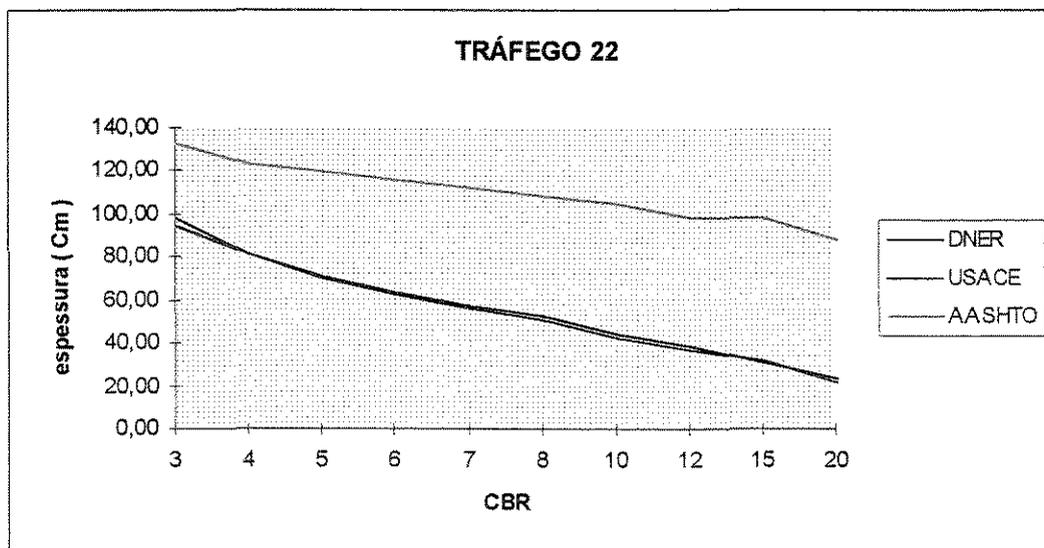


GRÁFICO 5.22 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 22.

Pelo gráfico 5.23, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 22, crescendo, em média, 8 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 134 % e 131 %, respectivamente. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. de 5, 7, 8, 10 e 12, as espessuras do D.N.E.R. mantiveram-se, em média, 4 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3, 4,6, 15 e 20, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 9,68 vezes o (N) da AASHTO e 2,31 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 121 % do (N) do D.N.E.R., 115 % do Corps of Engineers e 77 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 22.

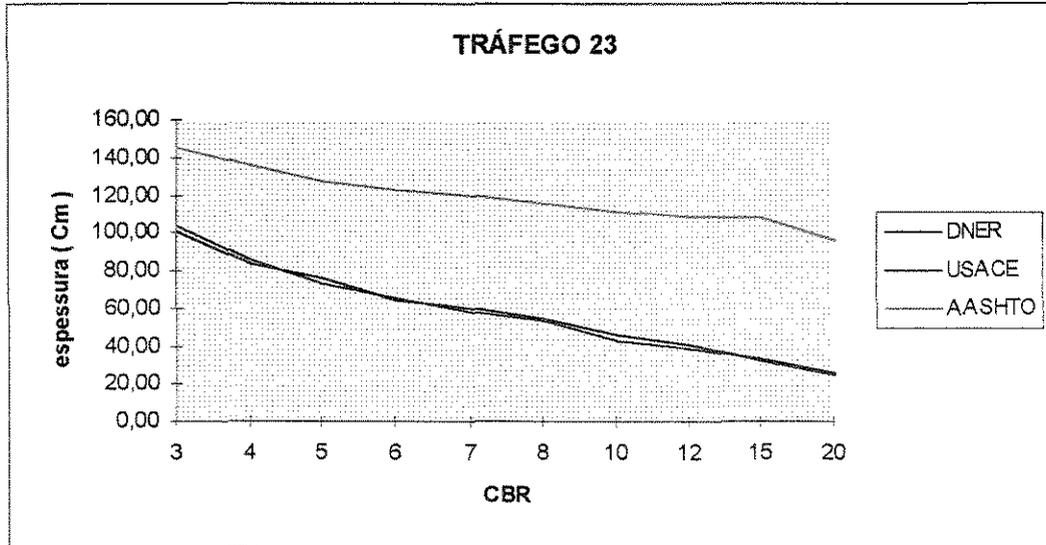


GRÁFICO 5.23 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 23.

Pelo gráfico 5.24, observa-se que as espessuras do processo da AASHTO sofreram aumentos em relação a composição de tráfego 23, crescendo, em média, 4 % em relação àquela. Com isso, as espessuras da AASHTO se mantiveram sempre superiores as do Corps of Engineers e do D.N.E.R., em média, 136 %. O comportamento das curvas do D.N.E.R. e do Corps of Engineers, manteve a mesma característica de inclinação dos gráficos anteriores, sendo que houve uma variação entre as espessuras obtidas pelos dois processos, pois, para os valores de C.B.R. de 5, 7, 10 e 12, as espessuras do D.N.E.R. mantiveram-se, em média, 4 % maiores que as do Corps of Engineers e, para os valores de C.B.R. 3, 4, 6, 8, 15 e 20, as espessuras do Corps of Engineers superaram as do D.N.E.R., em média, 2 %. O valor do número de operações do D.N.E.R. correspondeu a 10,13 vezes o (N) da AASHTO e 2,32 vezes o (N) do Corps of Engineers. Portanto, houve um aumento de 45 % do (N) do D.N.E.R., 44 % do Corps of Engineers e 38 % da AASHTO em relação a composição de tráfego 23.

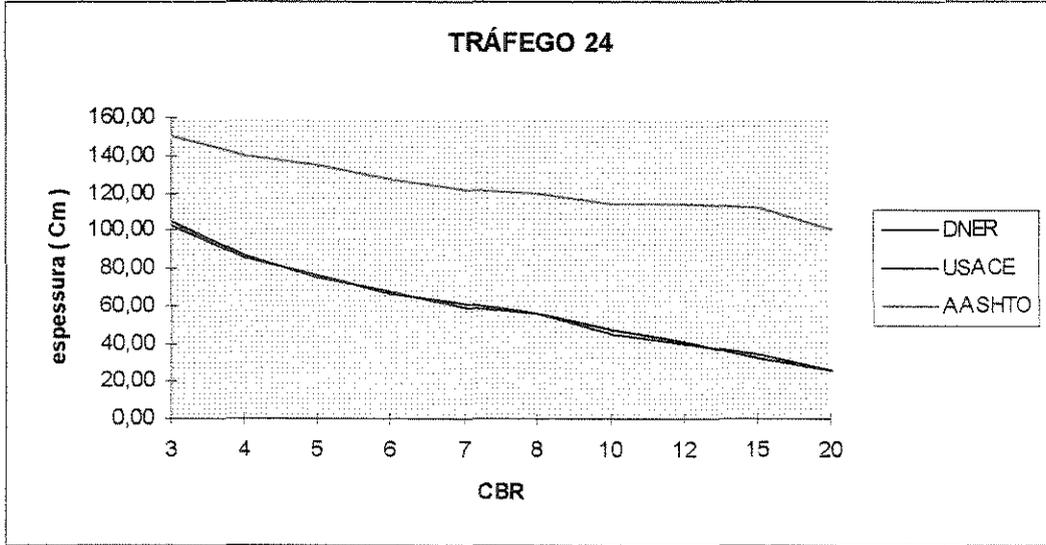


GRÁFICO 5.24 - Curvas das espessuras de pavimentos para os processos do DNER, USACE e AASHTO, quando submetidos ao tráfego 24.

6. ANÁLISES DOS RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma análise entre as curvas obtidas, no item 5.2, pelos três processos: da AASHTO, do Corps of Engineers e do D.N.E.R., com o objetivo de esclarecer ainda mais, sob que base conceitual, foi concebido o processo do D.N.E.R., bem como, a partir dessa identificação, estabelecer os possíveis ajustes para que o mesmo possa ser utilizado em nosso país, com maior segurança e respaldo científico.

6.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Os gráficos apresentados no capítulo anterior, mostraram o comportamento dos processos de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO, do Corps of Engineers e do D.N.E.R., no que diz respeito, às diferenças de espessuras de pavimentos encontradas, por cada um, para uma mesma composição de tráfego, ou seja, um mesmo tipo de carregamento.

Percebe-se que das três curvas mostradas, a da AASHTO, se distancia muito, das curvas dos outros dois processos, ora analisados, sendo que estes, por sua vez, apresentam um comportamento semelhante, chegando até, a ter seus valores superpostos, para determinados tipos de tráfego.

Sabe-se que, o processo do D.N.E.R., conforme já comentado anteriormente, sofreu influências, em sua elaboração, tanto do processo da AASHTO, quanto do processo do Corps of Engineers, mas, ao analisar os gráficos desta pesquisa, até o presente momento, torna-se nítido,

que o procedimento do D.N.E.R., para dimensionar pavimentos flexíveis, está mais substanciado, pelas concepções oriundas do processo do Corps of Engineers. Para comprovar esta última afirmação, basta analisar, cuidadosamente, a forma como são tratadas as influências da AASHTO, no cálculo de dimensionamento, feito pelo D.N.E.R..

Começando a análise pelo fator climático regional (FR), este, é considerado igual a um, ou seja, segundo afirma o manual de projetos de pavimentos flexíveis (1981) do próprio órgão, este fator, pode ser desprezado. A segunda análise, está, obviamente, concentrada nos coeficientes estruturais, das camadas que compõe a estrutura. Porém, sabe-se que, para material granular, o valor desses coeficientes, é também, igualado a um, ou seja, os coeficientes das camadas de sub-base e base, têm pouca ou nenhuma influência, no dimensionamento final da estrutura.

Portanto, o coeficiente estrutural da camada de revestimento, acaba sendo a última influência da AASHTO, presente no processo do D.N.E.R., mas, de acordo também, com o seu próprio manual de projetos, citado no parágrafo anterior, o número de operações (N), é quem define a espessura necessária da camada de revestimento, para que essa, possa dar a devida proteção à camada de base, contra as ações do tráfego. Logo, desprezando-se também, este coeficiente, retira-se do processo, definitivamente, todas as influências advindas das pistas de testes da AASHTO, tornando-se evidente, a grande influência do processo do Corps of Engineers, nos cálculos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, adotados pelo D.N.E.R..

Desta forma, como hipótese desta pesquisa e, na tentativa de realçar ainda mais as evidências apontadas, foram construídas novas curvas de espessuras de pavimentos em função dos mesmos valores de C.B.R. e para as mesmas composições de tráfegos, adotadas anteriormente nesta pesquisa, para o processo do D.N.E.R., porém, desta vez, desconsiderando-se, os coeficientes estruturais das camadas de sub-base, base e revestimento, ou seja, enquadrando totalmente o processo à filosofia do método C.B.R., para que pudesse ser feita uma comparação das novas curvas, com as do Corps of Engineers, já existentes, para as mesmas condições.

As novas curvas obtidas a partir deste procedimento, que serão mostradas a seguir, apresentaram uma variação nas espessuras de pavimentos, superiores em média 15 % das curvas calculadas pelo processo original, já mostradas nesta pesquisa. Porém, o comportamento das

curvas hipotéticas, continuou apresentando características semelhantes às do Corps of Engineers. Às curvas dos dois processos, foram traçadas retas de regressão linear simples, como artifício, para comprovar o paralelismo, já comentado anteriormente nesta pesquisa, existente entre as mesmas.

Portanto, uma vez que, o menor valor encontrado para coeficiente de correlação ficou em torno de 97 % e, os coeficientes angulares das retas são muito próximos, podendo assim, serem considerados iguais, pode-se perfeitamente aceitar as retas como paralelas, ou seja, considerar a distância entre ambas constante e, a partir daí, determinar este valor, chamando-o de delta (Δ), obtendo-se então, o valor de majoração que o processo do D.N.E.R. faz em suas espessuras de pavimentos, em relação ao processo do Corps of Engineers, para o mesmo tipo de tráfego.

Sabe-se porém, que para uma mesma composição de tráfego, o procedimento de cálculo utilizado por cada processo, conduz os mesmos, a números de operações diferentes, mas como pode ser observado no gráfico 6.1, percebe-se que há uma proximidade muito grande entre o número (N) do D.N.E.R. e do Corps of Engineers. Sendo assim, para efeito de comparação entre os dois processos e, a fim de tornar verdadeira a hipótese proposta, tomou-se como número (N) de operações comum aos processos, a média, dos seus respectivos números de operações, determinando assim, um número (N) médio ou \bar{N} .

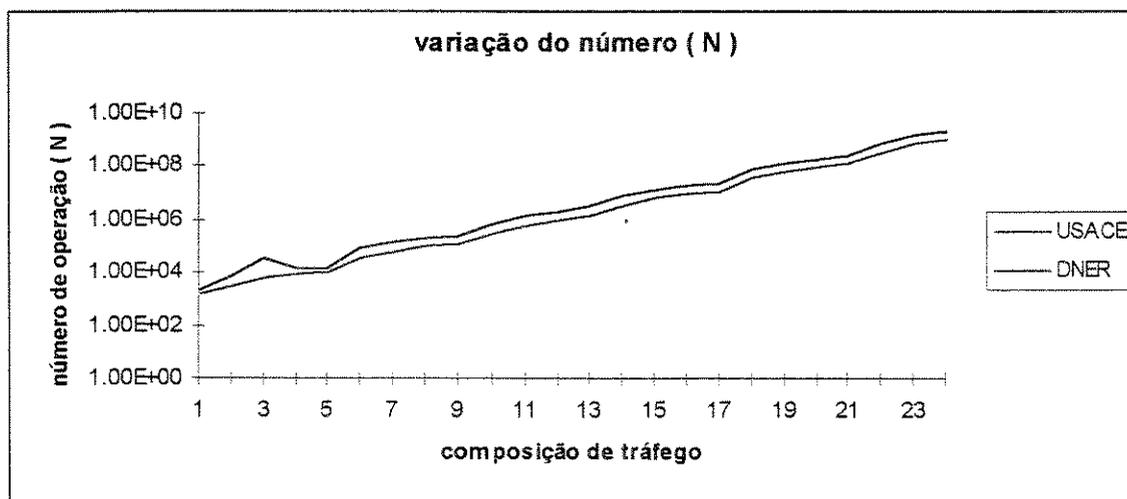


GRÁFICO 6.1 - Variação do número (N) dos processos do USACE e do DNER em função das composições de tráfegos analisadas.

A seguir, são apresentados os gráficos contendo as novas curvas obtidas para o processo do D.N.E.R., conforme a hipótese desta pesquisa, e as curvas do Corps of Engineers. Nesses gráficos estão representadas também, as retas que foram utilizadas para fazer a regressão linear entre as duas curvas, bem como, as suas respectivas equações e coeficientes de correlação.

Convém lembrar que a forma de como foram concebidos os novos gráficos, já foi explicada nos parágrafos anteriores deste item, ou seja, comentou-se, desde a concepção das mesmas até a forma de como foram tratados os novos dados, ou seja, as novas curvas de dimensionamento.

Portanto, nos gráficos mostrados a seguir, serão apenas esclarecidos, os valores assumidos pela variação (Δ) entre as retas de regressão linear, que representam os processos do D.N.E.R. e do Corps of Engineers e a porcentagem média, do aumento das espessuras do D.N.E.R., em relação ao seu processo original, em virtude do abandono dos coeficientes estruturais de suas camadas de pavimento.

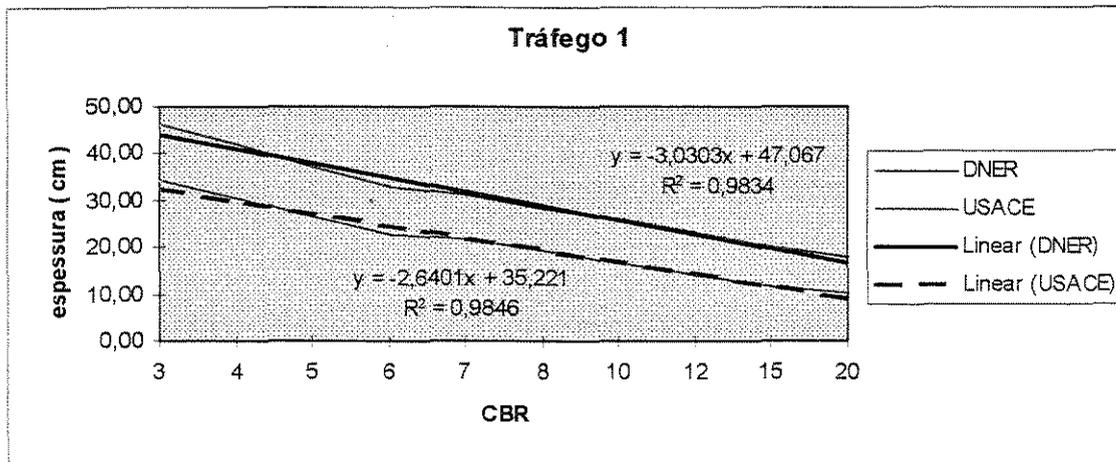


GRÁFICO 6.2 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 1.

Para o gráfico 6.2, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 15 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 11,84 cm.

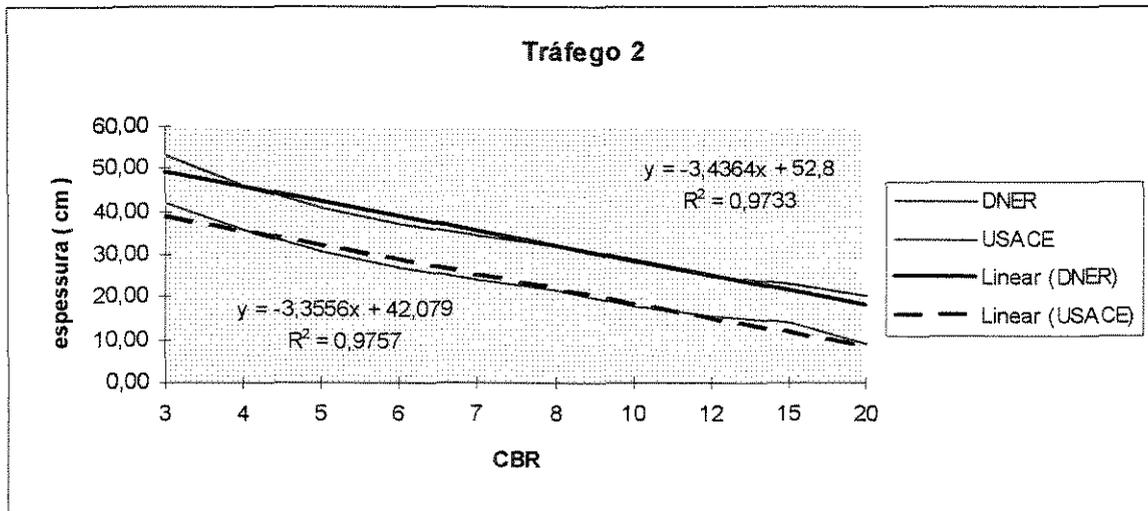


GRÁFICO 6.3 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 2.

Para o gráfico 6.3, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 13 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,73 cm.

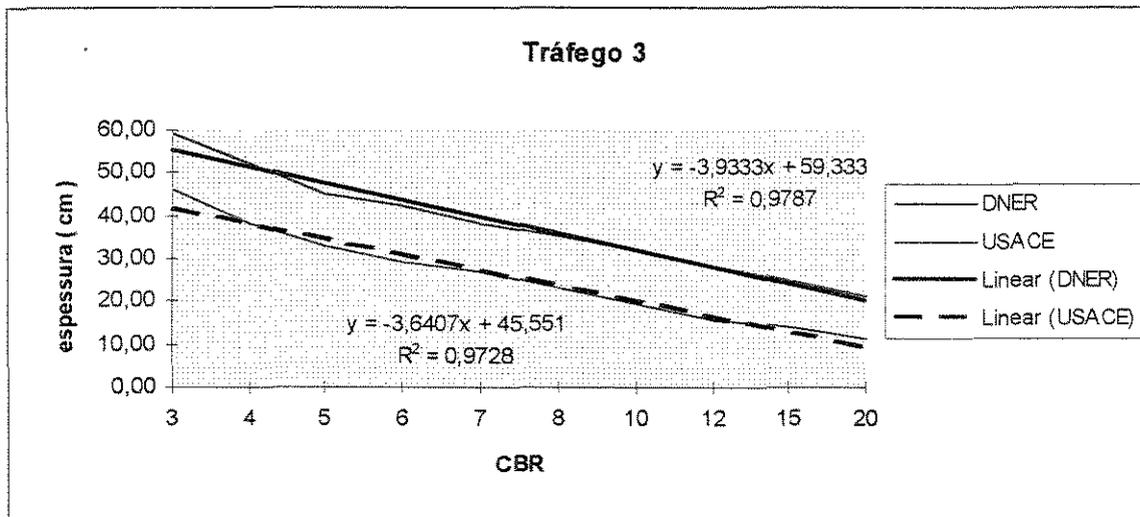


GRÁFICO 6.4 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego3.

Para o gráfico 6.4, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 12 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 13,78 cm.

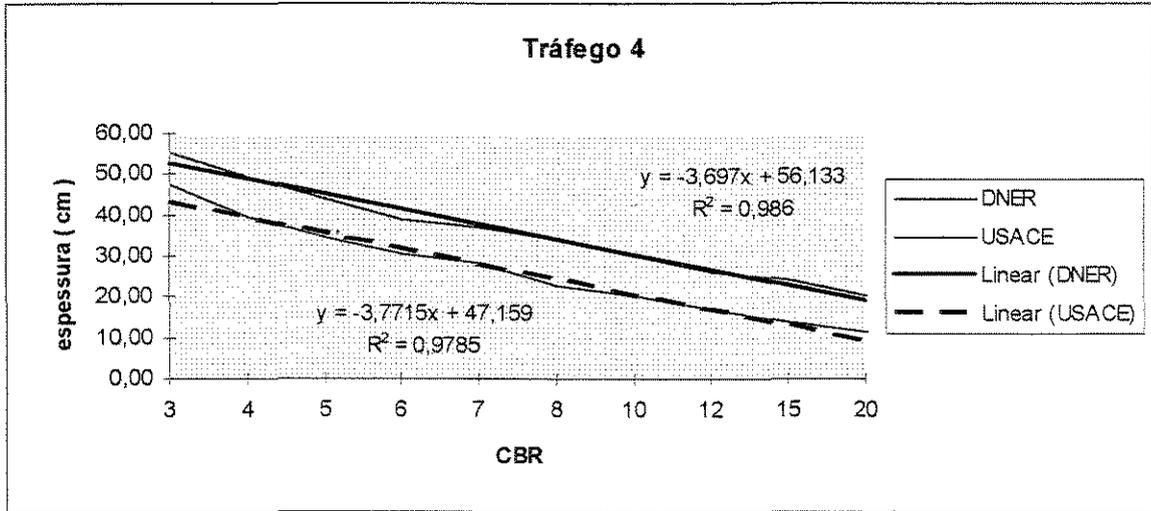


GRÁFICO 6.5 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 4.

Para o gráfico 6.5, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 12 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 8,98 cm.

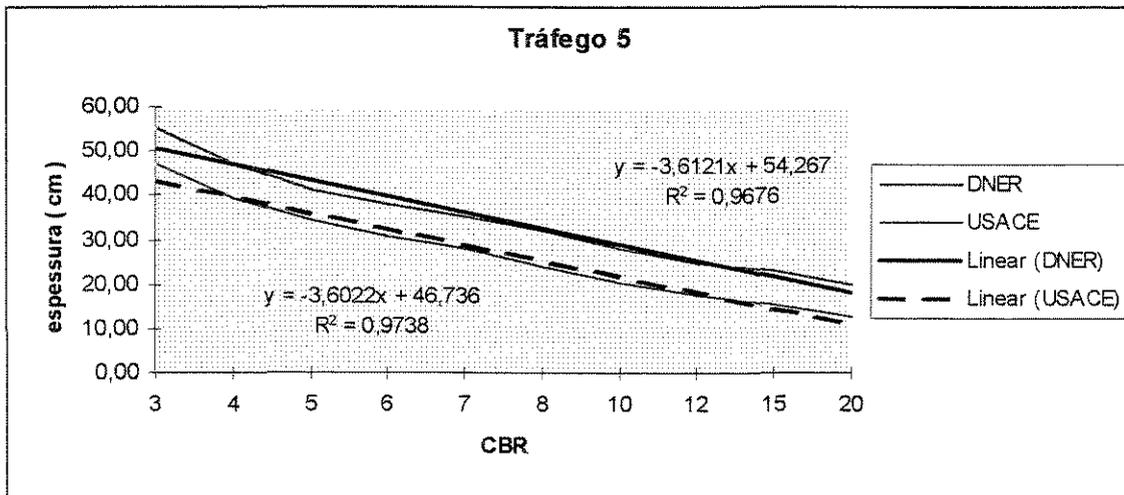


GRÁFICO 6.6 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 5.

Para o gráfico 6.6, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 8 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 7,53 cm.

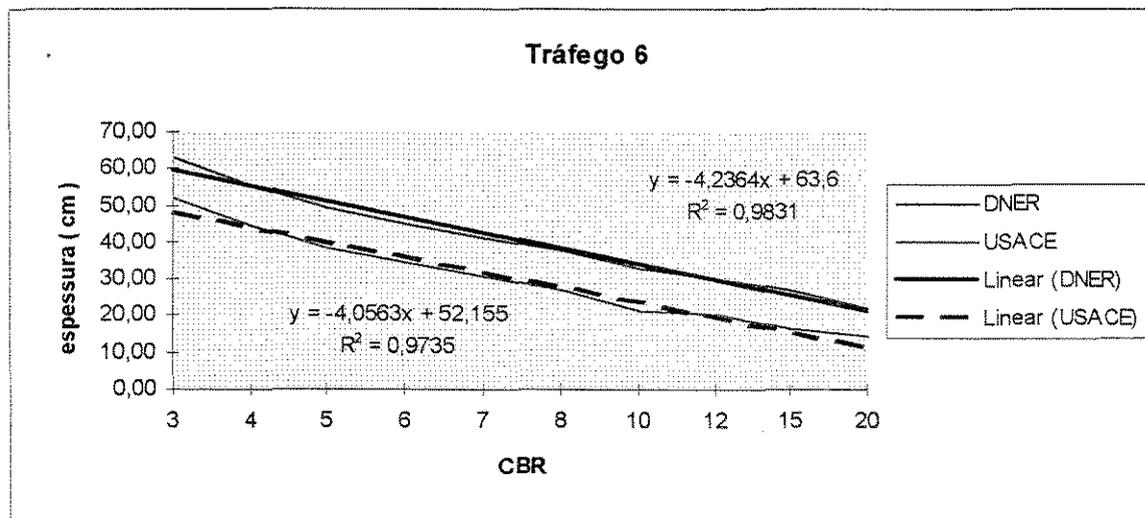


GRÁFICO 6.7 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 6.

Para o gráfico 6.7, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 11 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 11,45 cm.

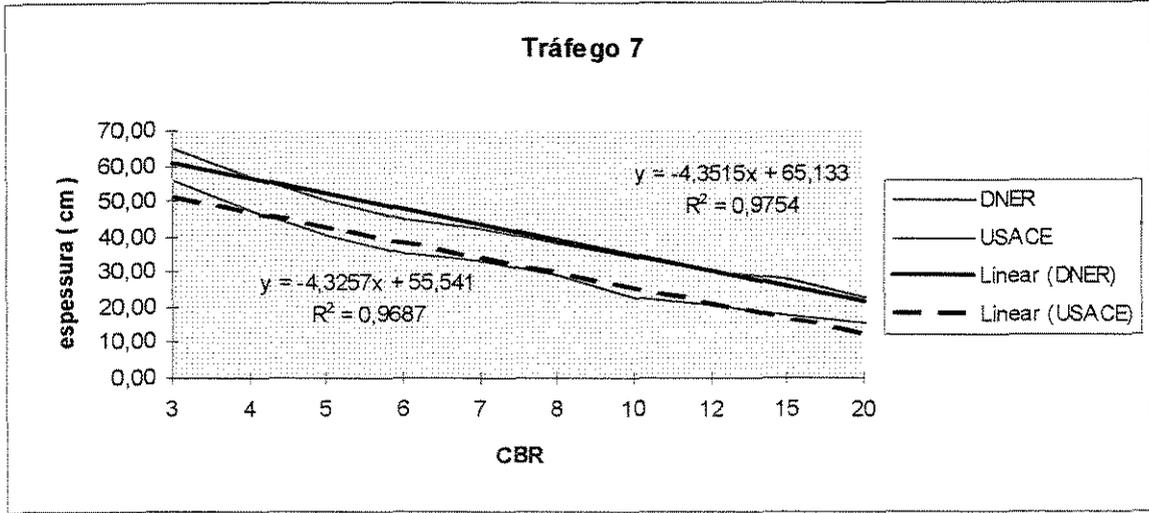


GRÁFICO 6.8 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 7.

Para o gráfico 6.8, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 10 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 9,59 cm.

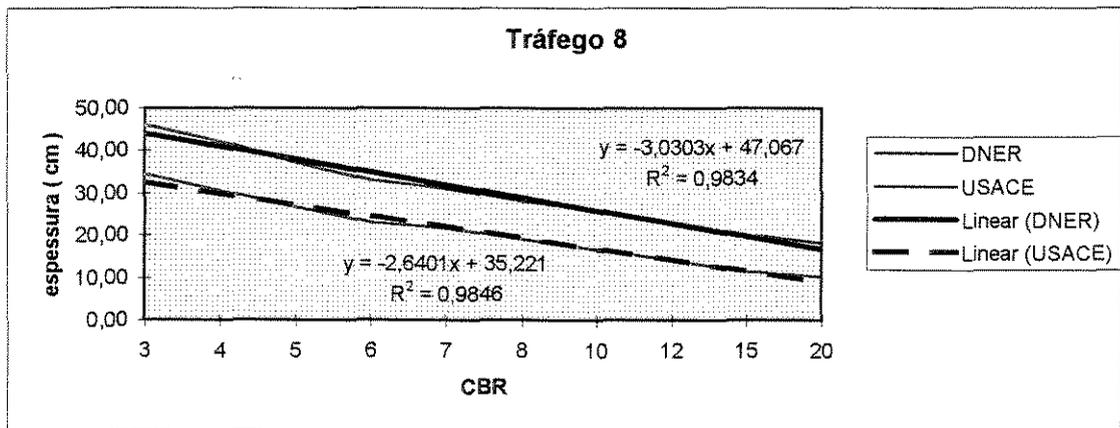


GRÁFICO 6.9 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 8.

Para o gráfico 6.9, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 10 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 11,27 cm.

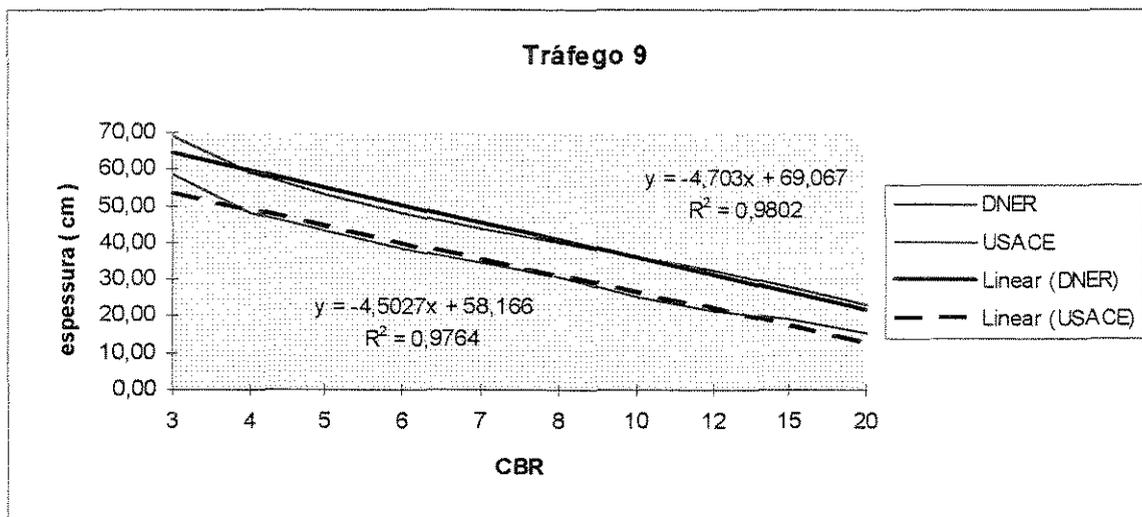


GRÁFICO 6.10 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 9.

Para o gráfico 6.10, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 10 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,90 cm.

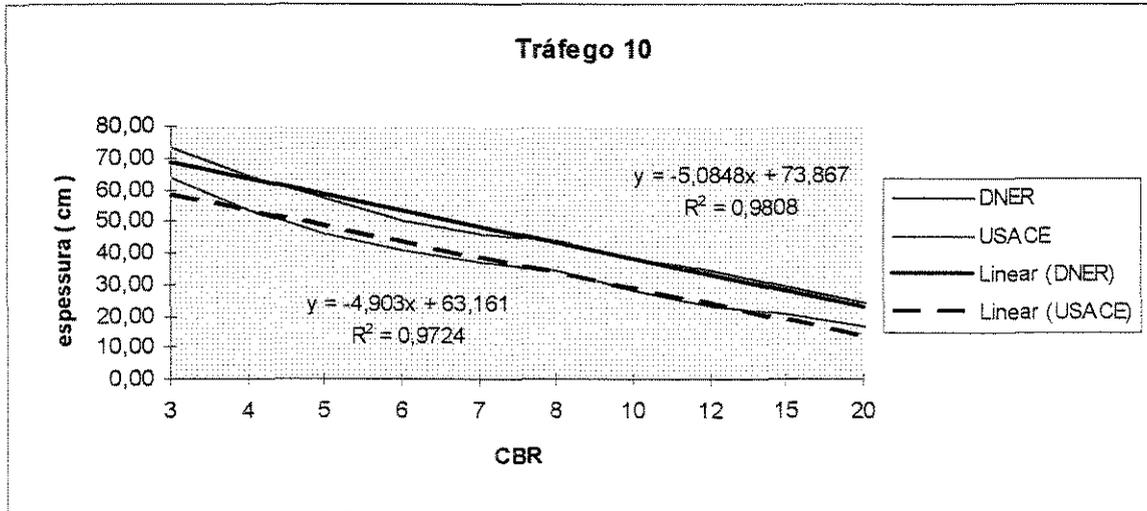


GRÁFICO 6.11 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 10.

Para o gráfico referente ao tráfego 10, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 9 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,70 cm.

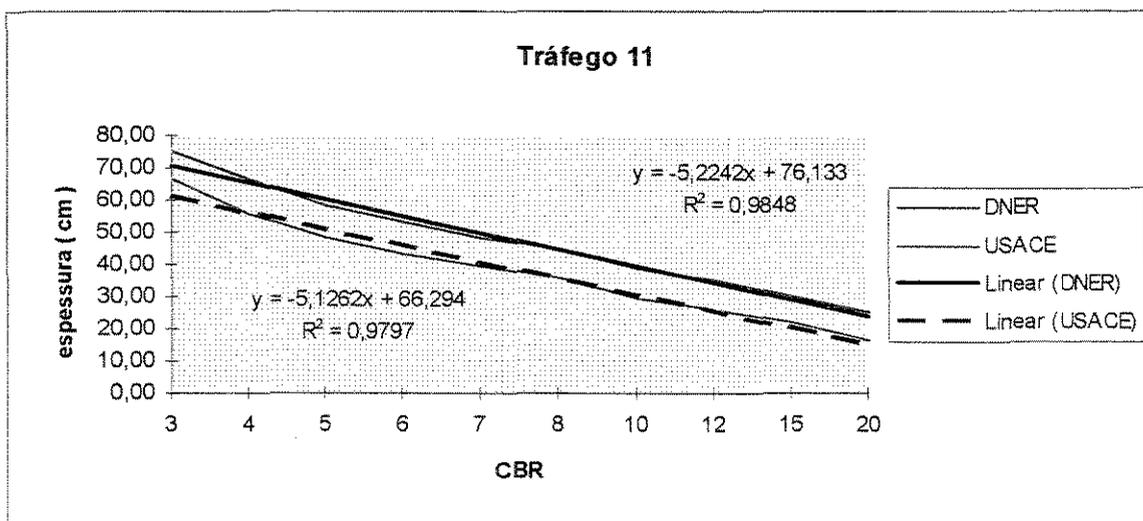


GRÁFICO 6.12 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 11.

Para o gráfico 6.12, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 9 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 9,84 cm.

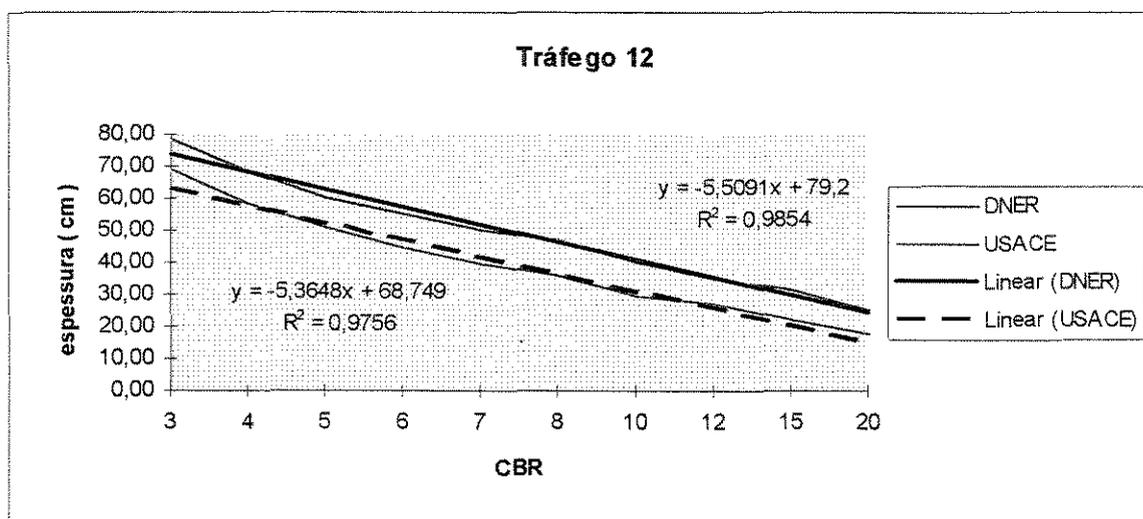


GRÁFICO 6.13 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 12.

Para o gráfico 6.13, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 9 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,46 cm.

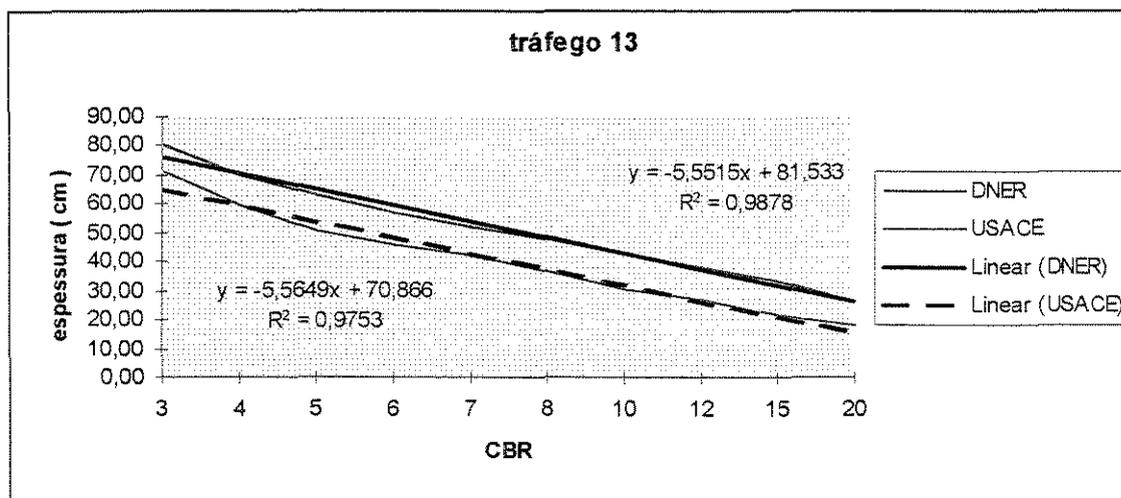


GRÁFICO 6.14 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 13.

Para o gráfico 6.14, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 8 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,67 cm.

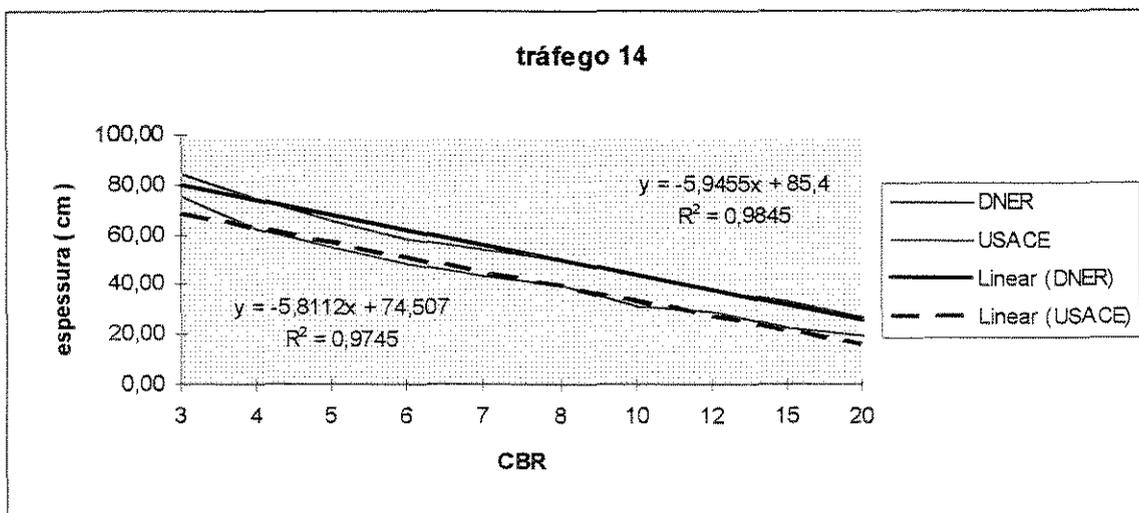


GRÁFICO 6.15 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 14.

Para o gráfico 6.15, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 13 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,90 cm.

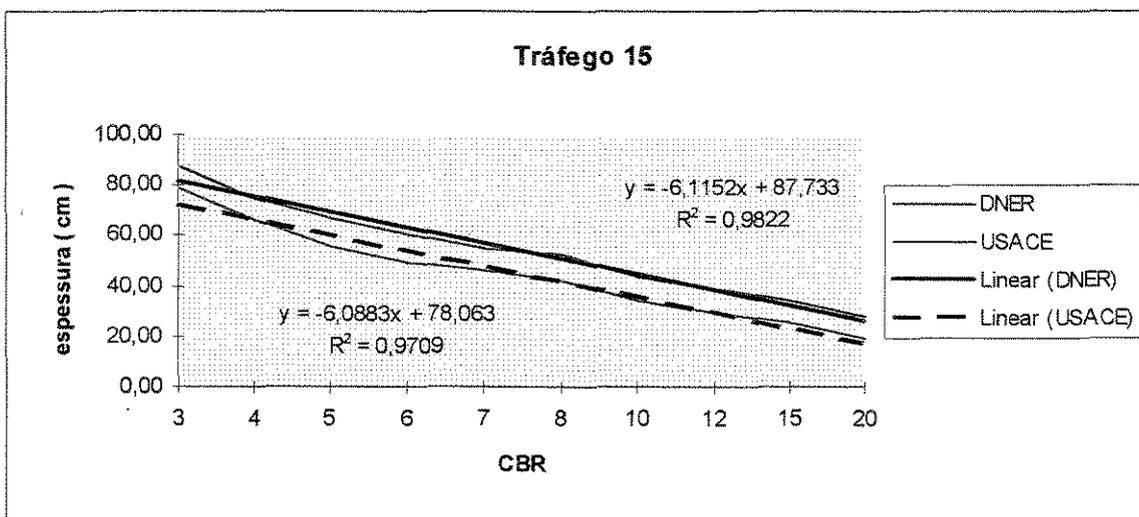


GRÁFICO 6.16 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 15.

Para o gráfico referente ao tráfego 15, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 17 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 9,67 cm.

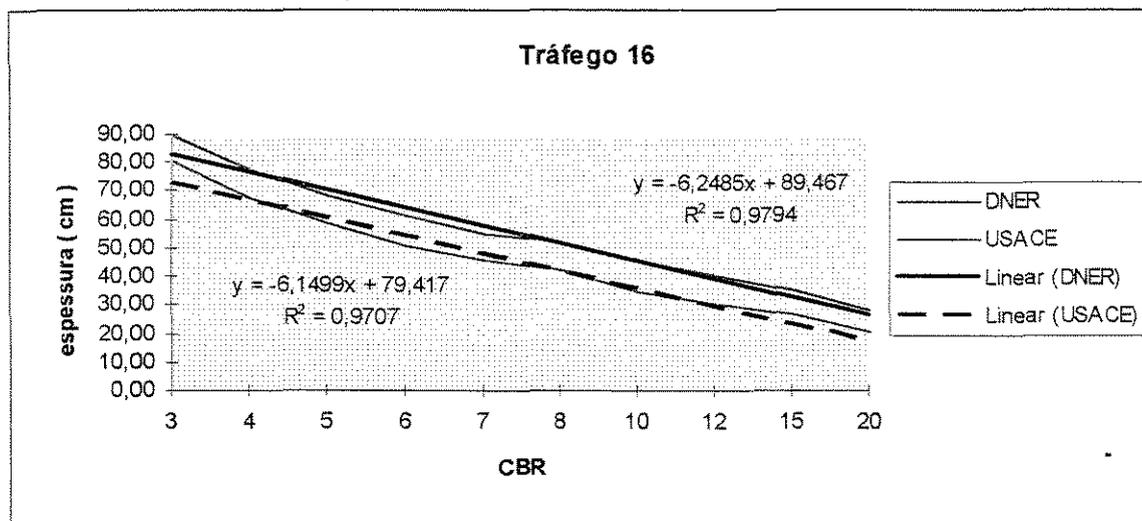


GRÁFICO 6.17 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 16.

Para o gráfico 6.17, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 17 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,05 cm.

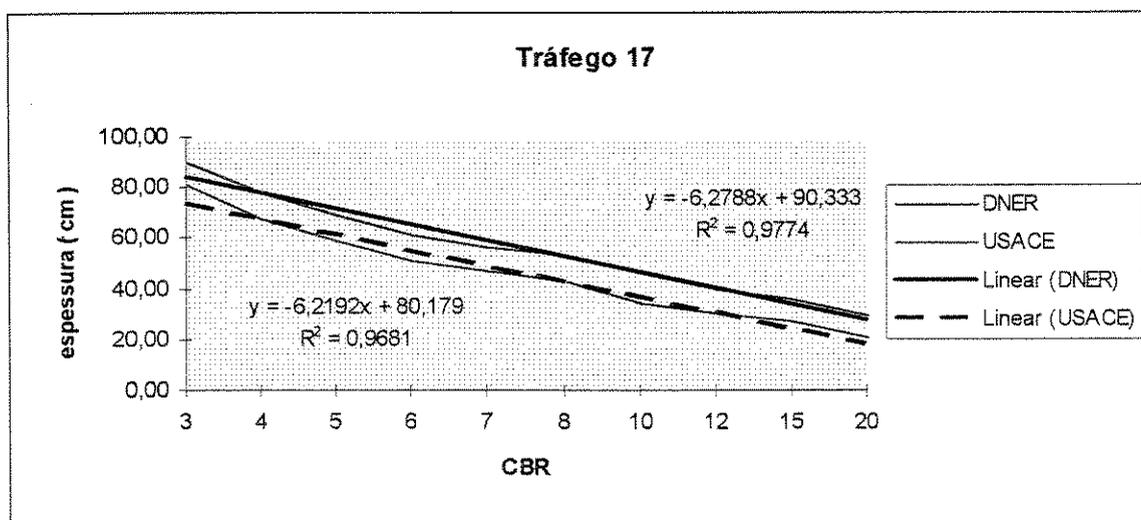


GRÁFICO 6.18 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 1'7.

Para o gráfico 6.18, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 17 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,16 cm.

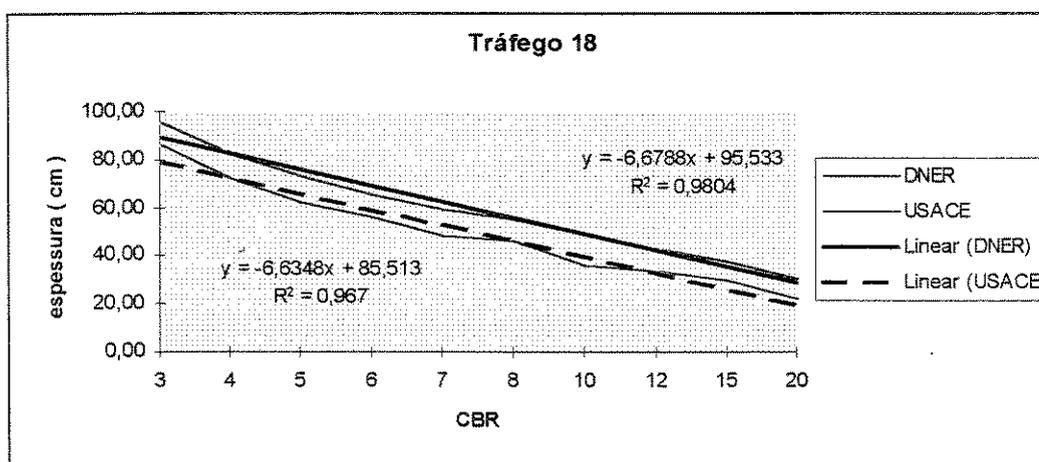


GRÁFICO 6.19 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 18.

Para o gráfico 6.19, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 21 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 10,02 cm.

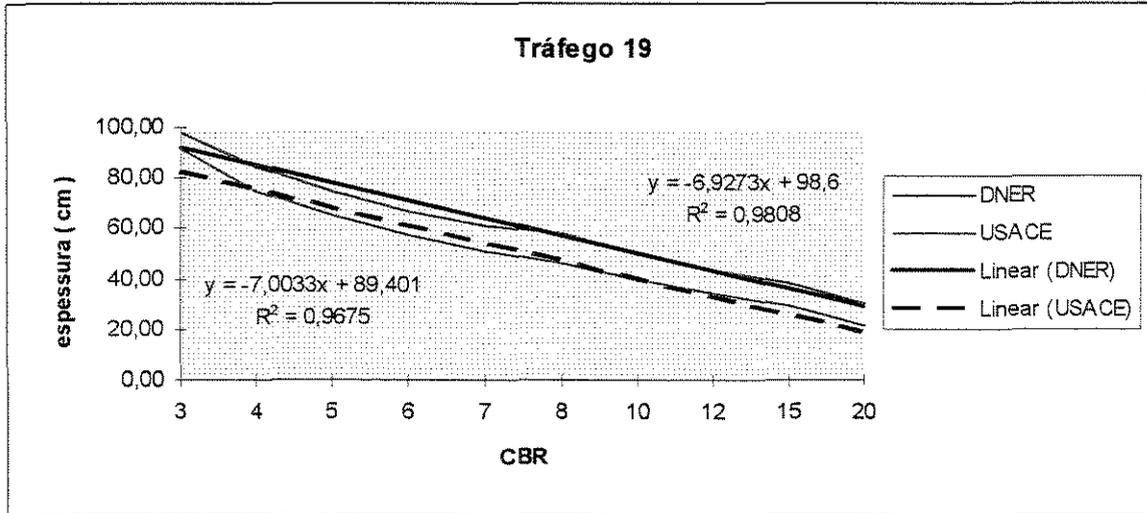


GRÁFICO 6.20 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 19.

Para o gráfico 6.20, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 20 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 9,20 cm.

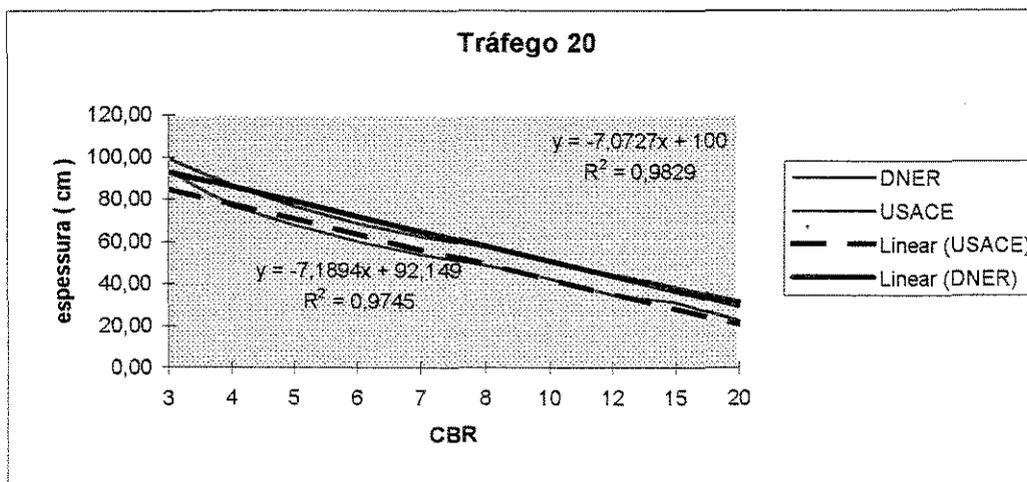


GRÁFICO 6.21 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 20.

Para o gráfico 6.21, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 20 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 7,86 cm.

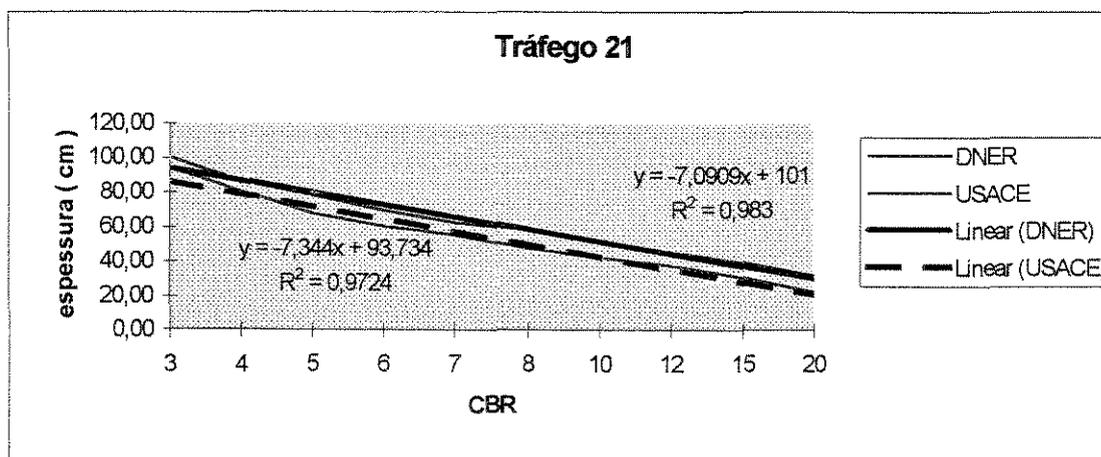


GRÁFICO 6.22 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 21.

Para o gráfico 6.22, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 19 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 7,27 cm.

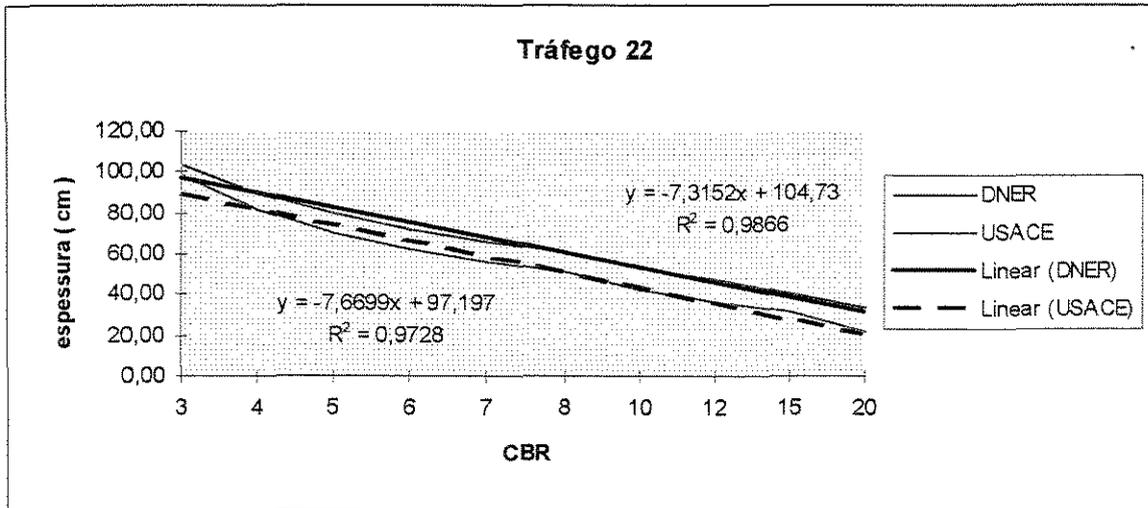


GRÁFICO 6.23 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 22.

Para o gráfico 6.23, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 19 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 7,54 cm.

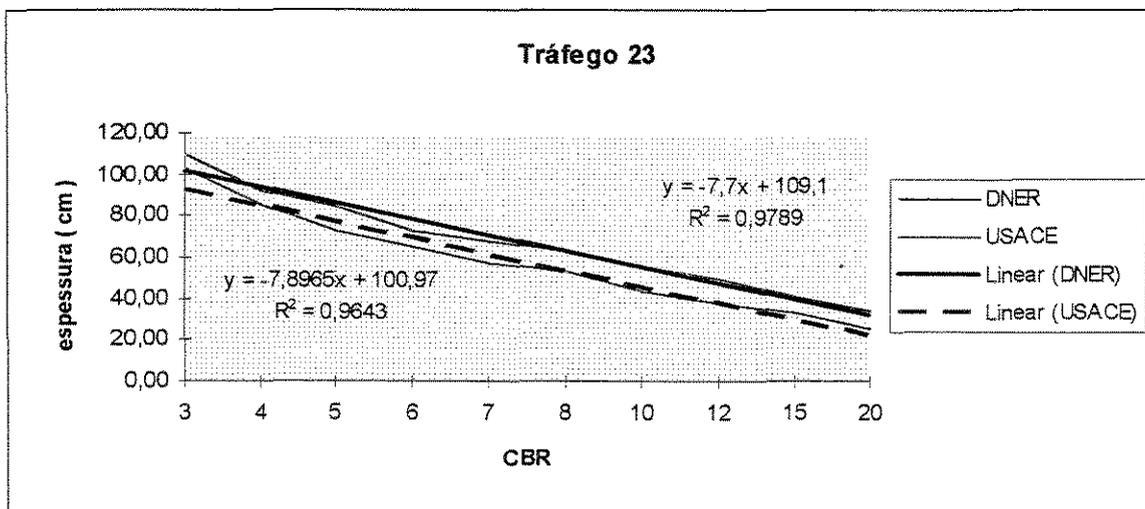


GRÁFICO 6.24 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 23.

Para o gráfico 6.24, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 18 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 8,13 cm.

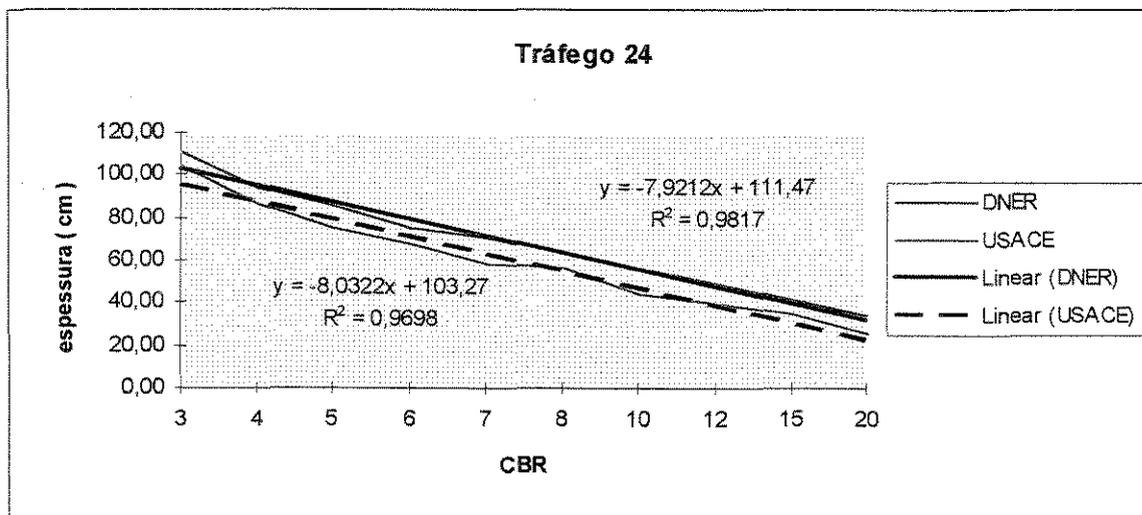


GRÁFICO 6.25 - Curvas comparativas entre os processos do DNER (proposto nesta pesquisa) e do USACE, com as suas respectivas retas de regressão linear simples, obtidas para o tráfego 24.

Para o gráfico 6.25, a curva do D.N.E.R. sofre um aumento de espessura médio de 18 % em relação a curva obtida pelo seu processo original, anteriormente mostrada nesta pesquisa, para o mesmo tráfego. A variação (Δ) entre as retas de regressão tem um valor de 8,20 cm.

No gráfico a seguir, é demonstrada a variação do delta em função do tráfego, N (médio), entre os processos do D.N.E.R. e do Corps of Engineers.

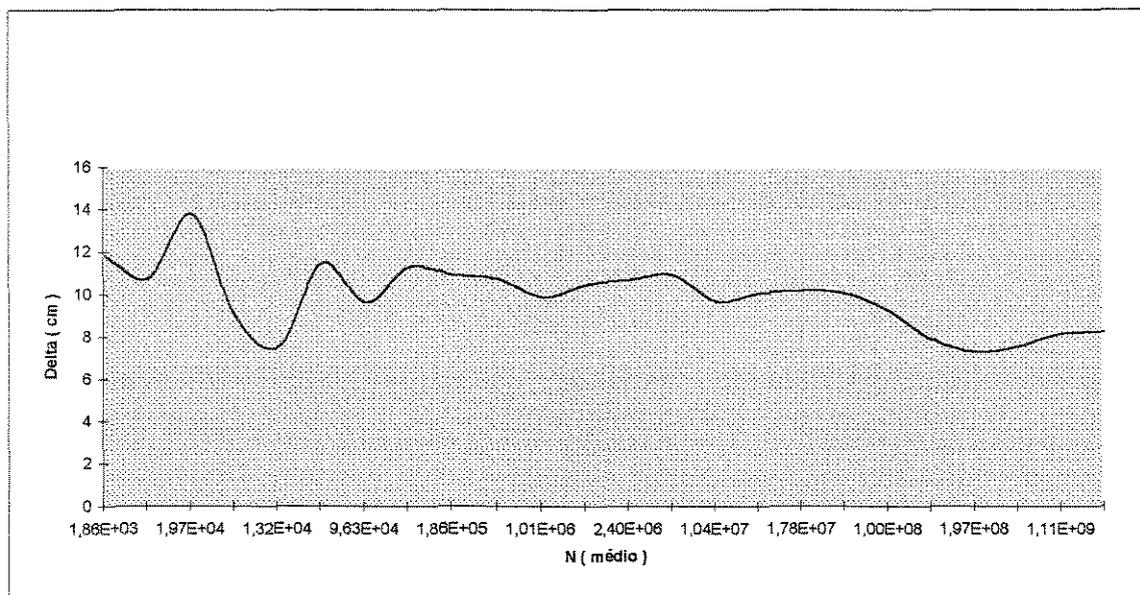


GRÁFICO 6.26 - Variação da espessura entre o processo do DNER e do USACE em função do número N (médio) de operações.

Conforme pode-se observar, aparentemente, a partir de um determinado tráfego $4,68 \times 10^5$, as diferenças de espessuras entre os processos do D.N.E.R. e do Corps of Engineers são menores, levando a crer que as mesmas poderiam ser consideradas constantes, o que facilitaria a determinação de coeficientes de segurança para um ou outro processo, em função de um determinado tipo de tráfego. Porém, ao traçar uma reta de regressão linear sobre este mesmo gráfico, de forma semelhante a utilizada nos gráficos anteriores, mostrados neste ítem, percebe-se que o coeficiente de correlação desta, é muito baixo, impossibilitando assim, a determinação desses coeficientes por esta aproximação, como mostra o gráfico abaixo.

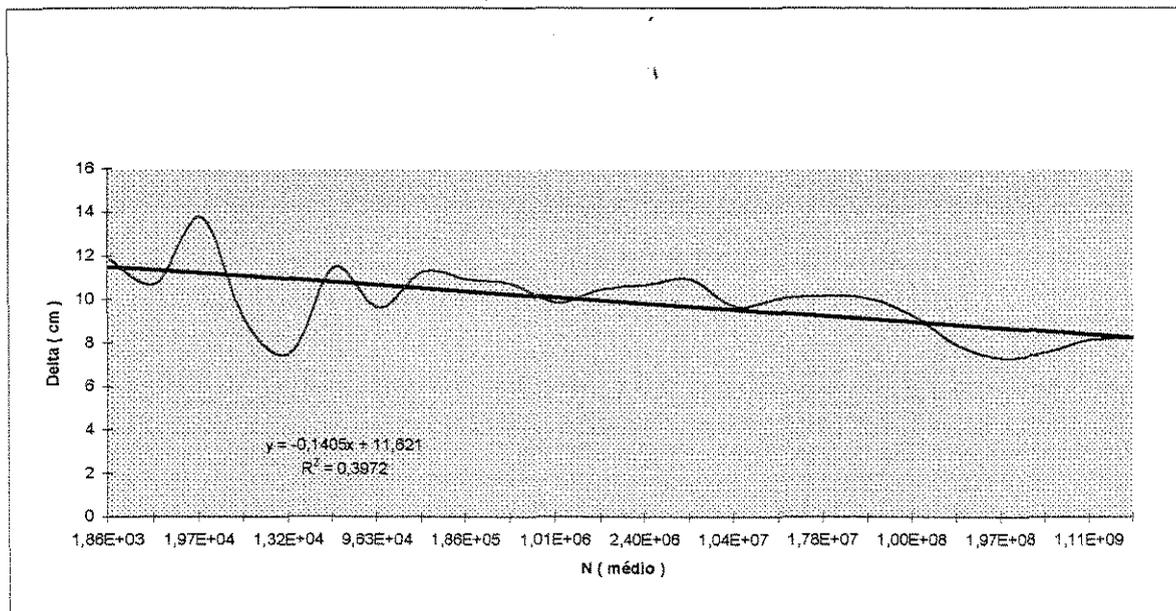


GRÁFICO 6.27 - Comparação entre a variação das espessuras entre o processo do DNER e do USACE em função do número N (médio) de operações, com a utilização da reta de regressão linear.

7. CONCLUSÕES

Com esta dissertação, pode-se ter uma visão melhor sobre os aspectos envolvidos e considerados, nos processos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, do Corps of Engineers, da AASHTO e do D.N.E.R., bem como, as simplificações adotadas por cada um, na elaboração das suas respectivas metodologias.

Os comentários individuais de cada processo, realizados durante esta pesquisa e mais as informações do item 5.2, por si só, podem ser considerados, como conclusões bastante substanciais, desta. Porém, ao analisar com maior profundidade os processos, depois de confrontá-los, diretamente, ficam evidenciados, como pontos mais relevantes desta pesquisa os seguintes aspectos:

1. Os processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis (AASHTO e Corps of Engineers), têm como sua principal e conservadora característica, as particularidades e considerações sob as quais se originaram, podendo, entretanto, apresentar extrapolações ou simplificações em seus procedimentos, desde que essas, sejam cuidadosamente analisadas, para que se possa ter uma visão antecipada de suas conseqüências. Desta forma, pode-se dizer que, o processo do D.N.E.R., que representa uma fusão do processo do Corps of Engineers e da AASHTO, foi concebido sob condições climáticas, ambientais e de tráfego, totalmente independentes, ou melhor, não condizentes com a realidade brasileira, deixando portanto, muitos pontos de sua metodologia sem qualquer explicação científica, como por exemplo, os valores de seus coeficientes estruturais, a desconsideração do fator climático regional, a majoração de suas curvas de dimensionamento, etc.

2. O processo do D.N.E.R., apresentado nesta pesquisa e, bastante utilizado em nosso país, quando comparado com os processos que lhe deram origem, realçou mais, através dos seus

resultados, seja pelo valor dos seus números de operações, seja pelo valor de suas espessuras de pavimentos, os embasamentos conceituais oriundos do processo do Corps of Engineers, deixando pouco evidente, a importância das considerações da AASHTO em sua metodologia.

3. O procedimento de dimensionamento de pavimentos flexíveis feito pelo processo do D.N.E.R., de acordo com a hipótese apresentada no item 6.2 desta pesquisa, pode ser alterado, retirando-se do mesmo, todas as influências advindas das pistas de testes da AASHTO, ou seja, extirpando-se do processo, o fator climático regional e os coeficientes estruturais das camadas que compõe a estrutura, pois, ainda assim, conforme demonstrado nesta dissertação, este, apresentará espessuras de pavimentos significativas e, continuará ratificando o que foi comentado no item 2 desta conclusão.

4. Considerando-se o procedimento do D.N.E.R., como o comentado no item 3 desta conclusão, percebe-se que, as dissenções existentes entre os processos do Corps of Engineers e do D.N.E.R., salientadas pelas suas espessuras de pavimentos, são consequências da introdução, neste último, de alguns aspectos, como por exemplo, o fator de carga (FC) e as majorações feitas em suas curvas de dimensionamento, conforme foi mostrado nesta dissertação.

Através desta dissertação, fica evidenciado, por todos os aspectos e conclusões apresentadas até o presente momento, que não são justificáveis a presença de quaisquer fatores, resultantes de conclusões obtidas nas pistas de testes da AASHTO, como por exemplo, os coeficientes estruturais e o fator regional, no processo do D.N.E.R. e, que, este, por sua vez, tem não só em seus procedimentos de cálculos, mas como também, em seus resultados, uma proximidade muito grande com o processo do Corps of Engineers. Porém, diferentemente do D.N.E.R., o Corps of Engineers, fundamentou cada passo do seu processo, ou seja, pode-se dizer que este, possui uma base conceitual consistente, totalmente amparada pelo método C.B.R., o que já não ocorre com o processo do D.N.E.R., que possui algumas interrogações em seu procedimento de cálculo. Portanto, fica como sugestão desta pesquisa, para dar um maior respaldo científico ao processo do D.N.E.R., que a partir deste momento pode-se consentir que os resultados deste, são obtidos através do processo do Corps of Engineers, com a realização de alguns ajustes.

Estudos sobre o fator de carga (FC) e sobre a majoração das curvas de dimensionamento do processo do DNER podem ser realizados, a fim de que, no futuro, possa-se ter uma visão mais clara da influência destes aspectos, no dimensionamento de suas estruturas.

Esta dissertação oferece condições para que, estudos futuros sejam realizados, com a finalidade de definir com clareza, os ajustes necessários no processo do Corps of Engineers, para melhor adaptá-lo às condições brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. *Interim Guide for Design of Structures*. Copyright, Washington, (1972).
2. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. *Interim Guide for Design of Structures*. Copyright, Washington, (1986).
3. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. *Interim Guide for Design of Structures*. Copyright, Washington. (1993).
4. BALADI, G. Y.; THOMAS, A. - *Mechanistic Evaluation of AASHTO Flexible Pavement Design Equations*. Transportation Research Record, vol.1449, (1994).
5. COREE, B. J.; WHITE, T. D. AASHTO - *Flexible Pavement Design Method: Fact or Fiction?* Transportation Research Record, vol 1286, (1990).
6. CORTE, J. F.; GOUX, M. T. - *Design of Pavement Structures: The french Technical Guide*. Transportation Research Record, vol. 1539, (1996).
7. DALEIDEN, J. F.; DARTER, M. I.; AHMAD, R. - *Evaluation of the AASHTO Design Equations and Recommended Improvements*. Transportation Research Record, vol 1449, (1994).
8. DIVINSKY, M.; ISHAI, I.; LIVNEH, M. - *Simplified Generalized California Bearing Ratio Pavement Design Equation*. Transportation Research Record, vol 1539, (1996).

9. LUHR, D. R.; MC CULLOUGH, B. F. - *Structural Analysis of AASHTO Road Test Flexible Pavements for Performance Evaluation*. Transportation Research Record, vol 888, (1982).
10. MOTTA, L. M. - *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. COPEE/UFRJ, Rio de Janeiro, (1991).
11. NOURELDIN, A. S.; SHARAF, E.; ARAFAH, A. - *Estimation of Standard Deviation of Predicted Performance of Flexible Pavements Using AASHTO Model*. Transportation Research Record, vol 1449, (1994).
12. POTTER, J. C.; ROLLINGS, R. S.; BARKER, W. R. - *Corps of Engineers Low-Volume Road Design*. Transportation Research Record, vol 1128, (1987).
13. SILVEIRA, A. - *Introdução ao Estudo do Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis*. EESC/USP, São Carlos, (1993).
14. SÓRIA, M. H. A. - *As Bases Racionais de Métodos Empíricos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Livre-Docência, São Carlos, (1996).
15. SOUZA, M. L. - *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, (1981).
16. SOUZA, M. L. - *Pavimentação Rodoviária*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, (1980).
17. THOMPSON, M. R. - *Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design: Na Overview*. Transportation Research Record, vol 1539, (1996).
18. TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R. E AHLVIN R. G. - *Design of Flexible Pavement Considering Mixed Loads and Traffic Volume*. I International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, (1962).
19. YODER, E. J. E WITCZAK, M. W. - *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons Inc., Canadá, (1975).

ABSTRACT

In this research is accomplished a comparative study between three empirical processes of flexible pavements design, all, with conceptual bases substantiated by the CBR method.

The processes of the Corps of Engineers (1962), the AASHTO (1972) and the DNER (1966) are compared, with the objective to analyze the trend of behavior of these last, in relation to the two first mentioned.

Primarily, will be studied the methodologies of each one processes and, hereafter, they will be submitted to a comparison between themselves. This comparison will have as comment parameter, the obtained thicknesses of pavements for each process, when submitted to the compositions of equal traffics and to the same subgrade conditions.

With this comparison will be evidenced, which the methodologics influences that really occur in DNER process, by the Corps of Engineers and the AASHTO processes. Thus, will be pointed out the aspects that can be disconsiderated in the methodology adopted for the DNER, to flexible pavements design, in order to adjust it to the brazilian conditions with scientific endorse, however without compromising, the validity of its results.