

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS PELOS MÉTODOS DO DNER E DA RESILIÊNCIA.

Jeanderson Rodrigues Lemos (1), Adailton Antônio dos Santos (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)eng.jeanderson@hotmail.com, (2)adailton@unesec.net

RESUMO

O desenvolvimento acentuado que presenciamos no Brasil, tem conseqüências diretas nas obras de engenharia, principalmente em obras de infraestrutura. Tomando como base esta afirmação, os projetos de pavimentos devem ser, cada vez mais, executados com a máxima precisão e velocidade possível. Neste contexto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para determinação do *California Bearing Ratio* - CBR de projeto e dimensionamento de pavimentos flexíveis, através dos métodos do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER (1979) e da Resiliência, priorizando a precisão dos resultados e agilidade, na formatação das mais diversas hipóteses possíveis no dimensionamento da obra. Para isto, estudou-se detalhadamente os métodos citados, a fim de desenvolver tal ferramenta. Os testes para validação da ferramenta computacional demonstraram, a sua funcionalidade, precisão e velocidade no dimensionamento de pavimentos flexíveis, através dos métodos supracitados.

Palavras-Chave: Método do DNER, Método da Resiliência, Ferramenta Computacional, CBR de Projeto.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico do país está diretamente atrelado a uma boa infraestrutura. Constata-se que esta, no sistema rodoviário, é insuficiente e ineficaz, necessitando constantes intervenções, para prover às rodovias condições mínimas de trafegabilidade.

A aceleração da degradação dos pavimentos ocorre, muitas vezes, pela imprecisão dos resultados obtidos, bem como pela má aplicação dos métodos utilizados no seu dimensionamento.

Buscando maior precisão e rapidez em toda a rotina de cálculo, foi desenvolvido no Microsoft® Office Excel, uma ferramenta computacional que, de fato, garanta maior agilidade no processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis, bem como, redução de possíveis erros de cálculo.

A ferramenta, objeto deste trabalho, é própria para ser utilizada, no dimensionamento de pavimentos flexíveis através do método do DNER (1979), da Resiliência e, ainda, na análise e determinação do CBR de projeto do subleito no qual será implantada a rodovia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho buscou desenvolver uma ferramenta computacional para dimensionamento de pavimentos flexíveis, através do método empírico de Murilo Lopes de Souza, denominado método do DNER (1979), que considera como base o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e, também, do Método da Resiliência, que calcula a espessura total utilizando o ISC, distribuindo as camadas através do enquadramento do material de acordo com o seu comportamento resiliente.

Para atingir o objetivo proposto de início, pesquisou-se em literatura especializada, todas as informações necessárias para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, estudando detalhadamente cada um dos métodos, a fim de permitir a elaboração da ferramenta computacional em uma interface adequada.

Tendo consolidado o conhecimento teórico, dos métodos objeto do presente trabalho, partiu-se para a elaboração da ferramenta de dimensionamento, de forma que a mesma fosse de fácil assimilação por parte dos usuários, e que a introdução dos dados, bem como dos resultados obtidos, fosse claro e preciso. O desenvolvimento desta ferramenta foi realizado no software Microsoft® Office Excel.

A ferramenta computacional é constituída de uma página de inserção de dados, que pode ser alimentada com os mesmos para obtenção dos resultados do CBR de projeto; uma para o método do DNER e uma para o da Resiliência.

De posse desta ferramenta finalizada foram realizados testes para verificar a eficácia e o ganho real de tempo obtido no dimensionamento.

2.1 DETERMINAÇÃO DO CBR DE PROJETO (CBR_P)

Para estarmos 90% confiantes de que não ocorrerão valores de CBR menores que o CBR de projeto (CBR_P), teremos que calcular o mesmo conforme equação 1:

$$CBR_P = CBR_M - \left[\frac{S \times t_{0,90}}{\sqrt{(n-1)}} \right] \quad (1)$$

Onde: CBR_M – Média aritmética dos CBRs das “n” amostras ensaiadas;
S – Desvio padrão;
t_{0,90} – Coeficiente relativo ao intervalo de confiança de 90%;
n – Número de amostras ensaiadas.

2.1.1 Determinação do CBR médio (CBR_M)

O CBR_M é determinado através da equação 2:

$$CBR_M = \frac{\sum CBR}{n} \quad (2)$$

Onde: CBR_M – Média aritmética dos CBR's das “n” amostras ensaiadas;
n – Número de amostras ensaiadas.

2.1.2 Determinação desvio padrão (s)

O desvio padrão “S” será calculado através da equação 3:

$$S = \sqrt{\frac{\sum f \times (CBR - CBR_M)^2}{\sum f}} \quad (3)$$

Onde: CBR_M – Média aritmética dos CBRs das “n” amostras ensaiadas;
S – Desvio padrão;
f – Freqüência com que ocorrem os valores de CBR.

2.1.3 Determinação de $t_{0,90}$

Os valores de $t_{0,90}$ são extraídos da Tabela 1:

Tabela 1 - Distribuição “t” de *Student* – Valores do Percentil $t_{0,90}$ em função dos valores de n-1.

n-1	$t_{0,90}$	n-1	$t_{0,90}$	n-1	$t_{0,90}$	n-1	$t_{0,90}$
1	3,08	10	1,37	19	1,33	28	1,31
2	1,89	11	1,36	20	1,32	29	1,31
3	1,64	12	1,36	21	1,32	30	1,31
4	1,53	13	1,35	22	1,32	40	1,3
5	1,48	14	1,34	23	1,32	60	1,3
6	1,44	15	1,34	24	1,32	120	1,29
7	1,42	16	1,34	25	1,32	∞	1,28
8	1,4	17	1,33	26	1,32		
9	1,38	18	1,33	27	1,31		

Fonte: SANTOS (2012) - Determinação do CBR (ISC) de projeto

2.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Para garantir que o pavimento não sofra ruptura precoce, o método exige que os materiais utilizados na sua construção apresentem as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características mínimas admissíveis para utilização dos materiais.

Camadas	CBR(%)	EXP(%)	IG(%)	LL(%)	IP (%)
Subleito	≥ 2,0	≤ 2,0	-	-	-
Sub-base	≥ 20,0	≤ 1,0	0	-	-
Base	≥ 80,0	≤ 0,5	-	≤ 25,0	≤ 6,0

Fonte: DNIT: Manual de pavimentações, 2006

No caso da ocorrência de materiais de subleito com $CBR < 2\%$, é recomendável a substituição do mesmo, na espessura mínima de 0,60m, por um material de $CBR \geq 2,0\%$. Para execução de um reforço de subleito, os materiais devem, obrigatoriamente, apresentar capacidade de suporte maior que ao do subleito (recomenda-se $CBR \geq 10\%$) e expansão $\leq 1\%$.

Os materiais para a camada de base devem ser enquadrados em uma das faixas granulométricas, descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Faixa Granulométrica dos materiais

Tipos de peneiras	Percentagem que passa (%)					
	I			II		
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100	---	---	---	---
1"	---	75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	---	---
nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
nº 200	2-8	5-20	5-20	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT: Manual de pavimentações, 2006

Para um número de repetições do eixo padrão (N) menor ou igual a 5×10^6 podem ser empregados materiais com $\text{CBR} \geq 60\%$ nas faixas granulométricas E e F, para um número de repetições do eixo padrão $N > 5 \times 10^6$, podem ser empregados as faixas granulométricas A, B ou C.

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO - MÉTODO DO DNER (1979)

O método elaborado pelo Eng. Murilo Lopes de Souza, tem sua fundamentação nas características de suporte do subleito, nos materiais que constituem a estrutura do pavimento, e no número "N", para um eixo padrão de 8,2tf, durante a vida útil de projeto.

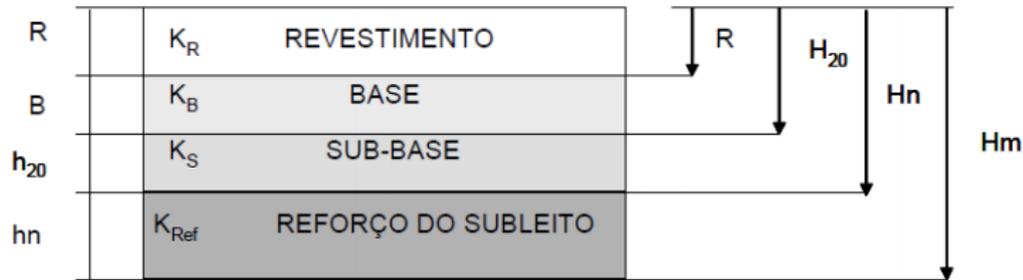
Neste método, a estrutura do pavimento é concebida para proteger o subleito quanto à ruptura por cisalhamento ou por acúmulo de deformações permanentes.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é medida pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido por *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente seca e umidade ótima.

2.3.1 Determinação das espessuras das camadas do pavimento

Para a definição das espessuras de cada camada do pavimento, são adotadas as simbologias da Figura 1.

Figura 1 - Camadas do Pavimento.



Fonte: DNIT: Manual de pavimentações, 2006

Onde: K_R - Coeficiente de equivalência estrutural do pavimento;

R - Espessura do revestimento;

K_B - Coeficiente de equivalência estrutural da base;

B - Espessura da base;

H₂₀ - Espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S - Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h₂₀ - Espessura da sub-base;

H_n - Espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

K_{Ref} - Coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

h_n - Espessura do reforço do subleito;

H_m - Espessura total de pavimento necessária para proteger o subleito.

As espessuras da base (B), sub-base (h₂₀) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução das seguintes inequações:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (\text{inequação 1})$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (\text{inequação 2})$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (\text{inequação 3})$$

Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na inequação 1, H₂₀ por H₂₀ x 0,8 e para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na mesma inequação, H₂₀ por H₂₀ x 1,20.

2.3.1.1 Determinação dos tipos e espessuras mínimas dos revestimentos

Para proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego e, também, para evitar a ruptura do próprio revestimento, por esforços repetidos de tração na flexão, adota-se, em função do número "N", de acordo com as especificações do

método do DNER, (1979) as espessuras e tipos de revestimentos constantes na Tabela 4.

Tabela 4 - Espessuras mínimas de revestimento betuminoso.

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamento superficial
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento betuminoso com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	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 12,5cm de espessura

Fonte: DNIT: Manual de pavimentações, 2006

2.3.1.2 Coeficiente de equivalência estrutural (K)

No método do DNER (1979), a capacidade de suporte dos materiais constituintes do pavimento é confrontada com uma base granular padrão, que definirá o comportamento estrutural dos mesmos através de um coeficiente estrutural. O coeficiente (K), denominado de Equivalência Estrutural, determinará as espessuras das camadas constituintes em função do material padrão, que constam na Tabela 5, esta tabela foi desenvolvida com os parâmetros do Manual de dimensionamento de pavimentos flexíveis do município de São Paulo (IP-04/2004) e do DNIT: Manual de pavimentações (2006).

Tabela 5 - Coeficiente de Equivalência Estrutural (K).

Componentes do pavimento	K
Revestimento de concreto betuminoso - CBUQ	2,00
Revestimento pré misturado a quente, de graduação densa - PMQ	1,80
Revestimento pré misturado a frio, de graduação densa - PMF	1,40
Revestimento betuminoso por penetração - PMAF, MB, TSS, TSD, TST	1,20
Camada de materiais granulares - BGS, MH, BC, SB	1,00
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, superior a 45kg/cm ²	1,70
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, entre 45kg/cm ² e 28kg/cm ²	1,40
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, entre 28kg/cm ² e 21kg/cm ²	1,20
Material estabilizado com cimento, resistência à compressão a 7 dias, menor de 21kg/cm ²	1,00
Material estabilizado com cal - Solo-Cal	1,20

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

A espessura total mínima adotada para as camadas granulares, quando utilizadas, é de 15 cm.

2.3.1.3 Determinação das espessuras H_{20} , H_N e H_M .

A determinação das espessuras de H_{20} , H_N e H_M do pavimento, é em função no número “N” e do CBR da camada que se quer proteger da ruptura, através equação 4.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (4).$$

Onde: H_t – Espessura total do pavimento por camada granular (cm), H_{20} , H_N e H_M ;
N – Número acumulado de repetições do eixo padrão;
CBR - CBR da camada a ser protegida da ruptura.

Mesmo que o CBR da camada de sub-base seja superior a 20%, a espessura necessária para protegê-la é determinada como se este valor fosse igual a 20%. Cabe ressaltar que esta fórmula apresenta valores superdimensionados para N muito pequenos ($N \leq 10^5$), sendo seu uso recomendado para $N > 10^6$.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO - MÉTODO DA RESILIÊNCIA

No dimensionamento de pavimentos flexíveis através do método da resiliência é levado em consideração a deformação elástica recuperável do subleito e das camadas constituintes do pavimento, que estão sob a ação de cargas repetitivas.

Este método foi desenvolvido com base em pesquisas, realizadas pela COOPPE/IPR entre 1978 e 1985, e tem como base a análise mecânica, calculando a deflexão máxima prevista, para uma estrutura ao longo de sua vida útil. A deflexão na superfície, a deformação de tração na fibra inferior do revestimento e as tensões e deformações verticais no subleito são os quatro indicadores mais importantes no comportamento estrutural de um pavimento.

Os materiais granulares podem contribuir com mais de 50% na deflexão total de um pavimento, sendo assim, esta espessura granular é limitada em um valor máximo,

evitando, desta forma, uma deformação excessiva. Também é limitada a espessura mínima do reforço, para a proteção de um subleito de má qualidade.

Para projetos de pavimentos, deve-se considerar o CBR do subleito, as camadas granulares e suas características elásticas ou resilientes. Através de ensaios dinâmicos, se determina estas características resilientes e o seu comportamento quanto à fadiga dos materiais, para a aplicação na estrutura do pavimento.

2.4.1 Classificação da camada de subleito quanto à resiliência.

As camadas de subleito e reforço deste são classificadas, a partir de parâmetros de resiliência, determinados em ensaios triaxiais dinâmicos e são classificadas como:

a) Solos Tipo I: Solos com baixo grau de resiliência, apresentando bom comportamento como subleito e reforço de subleito, com possibilidade de utilização em camadas de sub-base.

b) Solos Tipo II: Solos com grau de resiliência intermediário, apresentando um comportamento regular como subleito, e necessitam de estudos e ensaios especiais para serem utilizados como reforço de subleito.

c) Solos Tipo III: Solos com elevado grau de resiliência, não sendo aconselhável a sua utilização nas camadas do pavimento. Como subleito, requer estudos e cuidados especiais.

A Tabela 6 permite classificar o solo quanto ao comportamento resiliente em função do seu percentual de silte (S) na fração fina, que passa na peneira nº 200, e do valor do CBR correspondente.

Tabela 6 - Classificação dos solos finos quanto à resiliência

CBR (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: Steiner (2008) *apud* Hotmix, washigton, 2004

2.4.2 Dimensionamento

2.4.2.1 Determinação de espessura total do pavimento:

A espessura total do pavimento (H_t), em termos de material granular com coeficiente de equivalência estrutural $K=1,00$, é obtida em função do número “N” e do CBR do subleito, através da equação 6.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (6)$$

Onde: H_t – Espessura total do pavimento por camada granular (cm);
N – Número acumulado de repetições do eixo padrão;
CBR - CBR do subleito.

2.4.2.2 Determinação de espessura mínima do revestimento betuminoso:

$$H_{CB} = -5,737 + \left(\frac{807,961}{D_P} \right) + 0,972 \times I_1 + 4,101 \times I_2 \quad (7)$$

Onde: H_{CB} – Espessura mínima da camada betuminosa em cm;
 D_P – Deflexão de projeto, 10^{-2} mm;
A deflexão de projeto D_P deve satisfazer a condição $D_P \leq D$.

I_1 e I_2 são constantes relacionadas ao tipo de solo do subleito (Tabela 6)

Onde: Solo tipo I: $I_1=0$ e $I_2=0$;
Solo tipo II: $I_1=1$ e $I_2=0$;
Solo tipo III: $I_1=0$ e $I_2=1$.

Partindo dos estudos de Preussler, Pinto & Medina, foi possível estabelecer uma equação que quantificasse o número acumulado de repetição do eixo padrão (N), da deflexão (D), que provoca a ruptura por fadiga da camada betuminosa, que é determinada pela equação 8.

$$\log D = 3,148 - 0,188 \log N \quad (8)$$

Onde: D – Deflexão (10^{-2} mm);

N – Número acumulado de repetições do eixo padrão.

2.4.2.3 Valor estrutural do revestimento betuminoso (VE)

O valor estrutural (VE) da camada betuminosa (H_{CB}) é estabelecido conforme Tabela 7, e depende da qualidade da mistura betuminosa, bem como da constituição da estrutura do pavimento, como um todo.

Tabela 7 - Coeficiente estrutural para camadas betuminosas.

Tipo de Subleito	N				
	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
I	4,0	4,0	3,4	2,8	2,8
II	3,0	3,0	3,0	2,8	2,8
III	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fonte: UFSM, 2008.

2.4.2.4 Espessura da camada granular

A espessura da camada granular (H_{CG}) é determinada pela equação 9.

$$H_{CB} \times VE + H_{CG} = H_t \quad (9)$$

Onde: H_{CB} – Espessura mínima da camada betuminosa em cm;

VE – Valor estrutural da camada granular;

H_{CG} – Espessura da camada granular;

H_t – Espessura total do pavimento em termos de material granular (em cm).

Considerando os estudos da deformação resiliente nos pavimento flexíveis, os valores de H_{CG} devem estar entre 10,00 e 35,00 cm, quando este valor foi maior que 35,00 cm, deve ser redimensionada a espessura da camada betuminosa (H_{CB}), considerando $H_{CG}=35$ cm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo sempre em vista a aplicabilidade desta ferramenta computacional, para pessoas que não possuem um conhecimento apurado na área, a inserção de dados buscou a simplificação da linguagem, tornando, assim, o dimensionamento e o re-dimensionamento mais atrativos, sem que haja perda de tempo para realização dos cálculos mecanizados. A preocupação com a usabilidade só não foi maior que a primícia da qualidade e confiança dos resultados apresentados pelo mesmo, sempre levando em consideração os métodos aplicados, no dimensionamento do pavimento desejado.

3.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para validar a eficácia e o ganho de tempo real na obtenção dos resultados, através da ferramenta computacional, comparando-os com os obtidos através do dimensionamento manual, escolheu-se os dados de trabalho realizado na disciplina de pavimentação, para medir a eficácia da mesma. Para tal, temos os dados identificados na Tabela 8:

Tabela 8 - Dados para o dimensionamento

Camada	CBR _(P) (%)	Expansão (%)	S (%)
Base	100,0	0,4	-
Sub-base	40,0	0,8	-
Subleito	-	1,0	61,3
Numero "N" do trecho		6,45x10 ⁷	

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

A Tabela 9 apresenta os resultados do estudo do subleito, adotado no referido trabalho.

Tabela 9 - Dados para o dimensionamento do CBR de Projeto.

Estudo do Subleito			Estudo do Subleito		
Km	CBR	Expansão (%)	Km	CBR	Expansão (%)
0+200	11,50	1,00	2+800	11,40	1,00
0+400	10,40	1,00	3+000	14,30	1,00
0+600	19,40	1,00	3+200	10,90	1,00
0+800	8,90	1,00	3+400	11,70	1,00
1+000	11,30	1,00	3+600	9,60	1,00
1+200	13,20	1,00	3+800	9,00	1,00
1+400	12,70	1,00	4+000	13,20	1,00
1+600	13,60	1,00	4+200	15,00	1,00
1+800	15,40	1,00	4+400	10,00	1,00
2+000	7,90	1,00	4+600	12,30	1,00
2+200	14,60	1,00	4+800	14,60	1,00
2+400	13,00	1,00	5+000	7,80	1,00
2+600	20,30	1,00			

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

3.1.1 Determinação do CBR de projeto (CBR_P)

A determinação do CBR_P é o ponto de partida para o bom dimensionamento do pavimento, já que a espessura total do mesmo depende significativamente dele.

A determinação deste parâmetro foi feita estatisticamente, com base nos dados da Tabela 9, de acordo com o item 2.1. A Tabela 10 apresenta o valor do CBR_P obtido no cálculo manual e, a Figura 2, no cálculo através da ferramenta computacional.

Tabela 10 - Valores do CBR_P obtidos manualmente

S	t ₀₉₀	CBR(m)	CBR(p)
3,0467	1,32	12,48	11,7

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 2 - Valores do CBR_P obtidos através da ferramenta computacional

TRECHOS	S	T ₀₉₀	CBR(m)	CBR(p)	SUBIST.
Unico	3,05	1,32	12,48	11,7	11,00

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

3.1.2 Cálculo do pavimento pelo método do DNER (1979)

Determinado o CBR de projeto, partiu-se para o dimensionamento da estrutura do pavimento através método do DNER (1979).

3.1.2.1 Determinação do tipo e espessura do revestimento

A determinação do tipo e espessura da camada de revestimento foi realizada com base no “N”, conforme a Tabela 4; já o valor de K_R foi determinado em função do tipo de revestimento e conforme Tabela 5. A Tabela 11 apresenta o valor dos parâmetros obtidos manualmente e, a Figura 3, apresenta os cálculos através da ferramenta computacional.

Tabela 11 - Parâmetros obtidos manualmente

Tipo de revestimento	Espessura	K_R
Revestimento de concreto betuminoso - CBUQ	12,5 cm	2,00

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 3 – Parâmetros obtidos através da ferramenta computacional.



Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

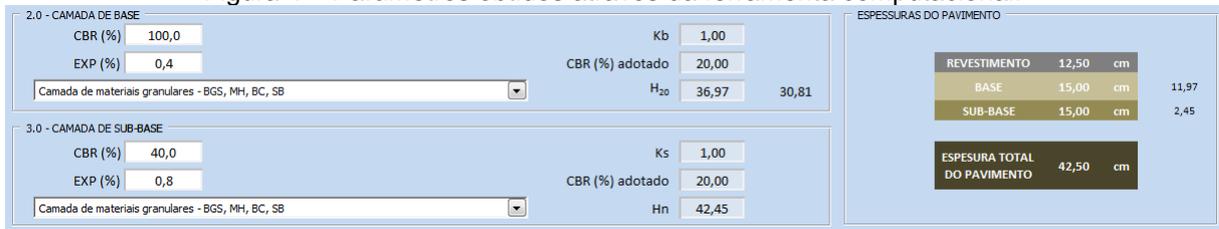
3.1.2.2 Determinação das espessuras das camadas de base e sub-base

As espessuras das camadas de base e de sub-base foram determinadas conforme item 2.3.1, cujos parâmetros, obtidos manualmente, encontram-se na Tabela 12, a Figura 4 apresenta os cálculos através da ferramenta computacional.

Tabela 12 - Parâmetros obtidos manualmente

Camada	Tipo de Revestimento	K_B :	K_S :	H_{20} :	$H_{20} + 20\%$:	H_n :	Esp. Indicada:	Esp. Adotada:
Base	Camada de materiais granulares	1,00	-	30,81	36,97	-	11,97	15,00
Sub-Base	Camada de materiais granulares	-	1,00	-	-	42,45	2,45	15,00

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos
Figura 4 – Parâmetros obtidos através da ferramenta computacional.



The screenshot shows a software interface for pavement design. It is divided into three main sections:

- 2.0 - CAMADA DE BASE:**
 - CBR (%) input: 100,0
 - EXP (%) input: 0,4
 - Material selection dropdown: Camada de materiais granulares - BGS, MH, BC, SB
 - Parameters: Kb = 1,00; CBR (%) adotado = 20,00; H₂₀ = 36,97; 30,81
- 3.0 - CAMADA DE SUB-BASE:**
 - CBR (%) input: 40,0
 - EXP (%) input: 0,8
 - Material selection dropdown: Camada de materiais granulares - BGS, MH, BC, SB
 - Parameters: K_s = 1,00; CBR (%) adotado = 20,00; H_n = 42,45
- ESPESSURAS DO PAVIMENTO:**
 - REVESTIMENTO: 12,50 cm (11,97)
 - BASE: 15,00 cm (2,45)
 - SUB-BASE: 15,00 cm
 - ESPESSURA TOTAL DO PAVIMENTO: 42,50 cm**

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Para este dimensionamento, foram verificadas todas as recomendações do método, bem como utilizado o fator de majoração para “N” superior a 10⁷.

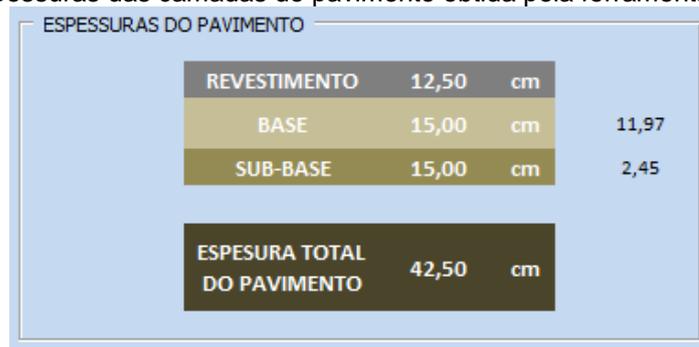
As determinações manuais de espessuras das camadas do pavimento em questão, constam na Tabela 13, e os resultados provenientes da ferramenta computacional, por sua vez, são apresentados na Figura 5.

Tabela 13 - Espessuras das camadas do pavimentos (em cm)

Revestimento	12,50
Base	15,00
Sub-Base	15,00
Espessura Total	42,50

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 5 – Espessuras das camadas do pavimento obtida pela ferramenta computacional



Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

3.1.3 Cálculo do pavimento conforme método da Resiliência

O cálculo do pavimento em questão, foi desenvolvido utilizando o método da resiliência, conforme item 2.4 do presente trabalho.

3.1.3.1 Determinação da espessura total do pavimento (Ht).

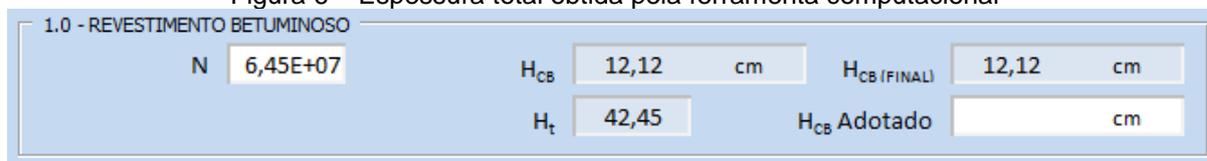
Pelo cálculo manual, a espessura foi obtida pela equação 6 e é apresentada na Tabela 14; na Figura 6, porém, é mostrado o dimensionamento realizado pela ferramenta computacional.

Tabela 14 - Espessura total do pavimento (Ht)

N	CBR _P (%)	Ht (cm)
6,45E+07	11,7	42,45

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 6 – Espessura total obtida pela ferramenta computacional



1.0 - REVESTIMENTO BETUMINOSO

N: 6,45E+07

H_{CB}: 12,12 cm

H_{CB(FINAL)}: 12,12 cm

H_t: 42,45

H_{CB Adotado}: cm

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

3.1.3.2 Determinação da espessura mínima do revestimento betuminoso

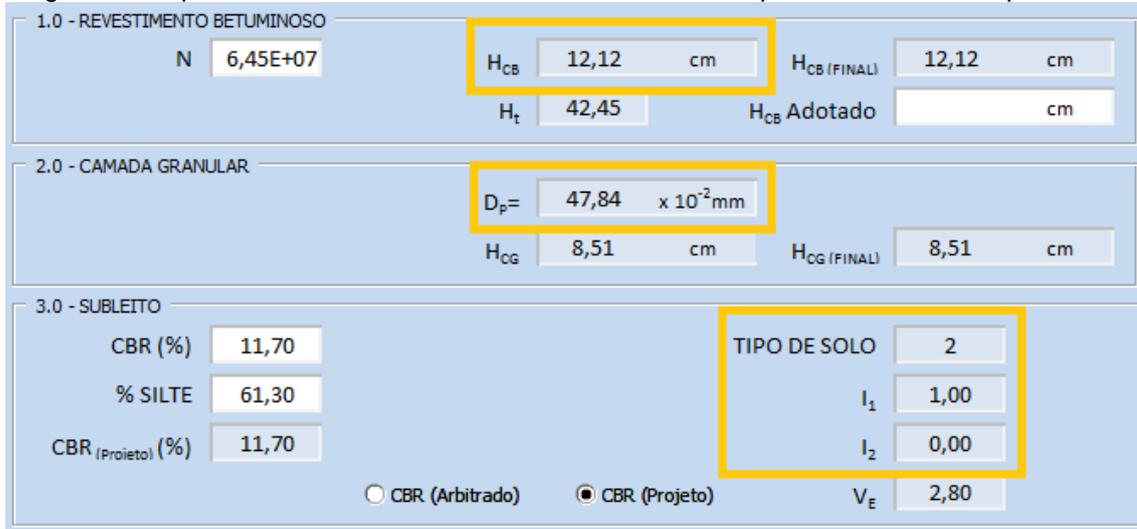
Para a determinação da espessura desta camada, necessita-se saber o tipo de solo, quanto ao comportamento resiliente, e constam na Tabela 6, do item 2.4.1, e o valor de D_P, obtido pela equação 8, que, inseridos na equação 7, do item 2.4.2.2, definem o valor mínimo (H_{CB}). Pelo cálculo manual, os resultados são os da Tabela 15, enquanto a Figura 7, apresenta os resultados obtidos pela ferramenta computacional. H_{CB} com unidade de medida em centímetros.

Tabela 15 - Espessura do revestimento betuminoso H_{CB}

Tipo de Solo	I1	I2	D _P	H _{CB}
II	1	0	47,84	12,12

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 7 – Espessura do revestimento betuminoso H_{CB} obtida pela ferramenta computacional



Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

3.1.3.2 Determinação da espessura da camada granular

A espessura da camada granular é determinada pela equação 9, do item 2.4.2.4, com o Valor Estrutural (VE), da Tabela 7. O resultado, calculado manualmente, está na Tabela 16, e na Figura 8, constam os resultados da ferramenta computacional. H_{CG} com unidade de medida em centímetros.

Tabela 16 - Parâmetros e resultados obtidos manualmente

V_E	H_{CG}	H_{CG} (Adotado)
2,8	8,52	10,00

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 8 – Espessura da camada granular H_{CG} obtida pela ferramenta computacional



Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

As determinações manuais de espessuras das camadas do pavimento em questão constam na Tabela 17, os resultados provenientes da ferramenta computacional, por sua vez, são apresentados na Figura 9.

Tabela 17 - Espessuras das camadas dos pavimentos (em cm)

	Cálculo manual
Revestimento	12,12
Camadas Granulares	10,00
Espessura Total	22,12

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

Figura 9 – Espessuras das camadas do pavimento obtida pela ferramenta computacional



ESPESSURAS DO PAVIMENTO			
REVESTIMENTO	12,20	cm	12,12
CAMADA GRANULAR	10,00	cm	8,51
ESPESSURA TOTAL DO PAVIMENTO	22,20	cm	

Fonte: Jeanderson Rodrigues Lemos

A determinação do CBR de projeto bem como a espessura das camadas de cada um dos métodos realizado no presente trabalho foi também calculada pelos professores especialistas que ministram as disciplinas de pavimentação na Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC. O tempo médio de cálculo manual realizado pelos mesmos foi de aproximadamente vinte minutos, já na ferramenta computacional, foi de apenas quatro minutos, ou seja, cinco vezes mais rápido, comprovando mais uma vez a funcionalidade, agilidade e eficiência da mesma.

4. CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento da ferramenta computacional em questão, o tempo de cálculo do CBR de projeto, e determinação das espessuras das camadas do pavimento conforme métodos estudados se mostraram cinco vezes menor que o

cálculo manual realizado por professores especialistas na área, e em cada re-análise que se julgar necessária esta diferença tende a ser maior. Para o cálculo do CBR de projeto, esta diferença também aumentará com a verificação de cada trecho, a fim de reduzir o número de substituição de solo para a camada de subleito. Os resultados obtidos através da ferramenta computacional se mostraram com um grau de confiabilidade, se não superior no mínimo igual ao desenvolvido manualmente, com o grande atrativo de não ser necessário buscar em literatura os parâmetros e recomendações pertinentes aos métodos estudados.

5. REFERÊNCIAS

- DNIT – Manuais: Manual de Pavimentação de 2006.** Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em 5 de Fevereiro de 2013.
- PIACENTINI, Giovane. **Análise Mecânica de Pavimento Flexível Dimensionado Através dos Métodos do DNER (1979) e da Resiliência.** 2007. 197f. TCC (Curso de Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.
- JORGE, Fabiano da Silva. **Redimensionamento da duplicação da BR-101/SC, lote 28 e avaliação do impacto financeiro.** 2008. 93f. TCC (Curso de Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.
- PINTO, Salomão (Org). **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Copiarte, 2002.
- PINTO, Salomão et al. **DNIT: Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 274 p.
- Prefeitura Municipal de São Paulo. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis para o tráfego leve e médio.** IP-04/2004. São Paulo, 2004.
- SANTOS, Adailton Antônio dos. **Determinação do CBR (ISC) de projeto.** Apostila de Estradas III. Criciúma, 2012.
- SANTOS, Adailton Antônio dos. **Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.** Apostila de Estradas III. Criciúma, 2012.
- SANTOS, Adailton Antônio dos. **Pavimentos – Definições, Classificação e Introdução ao Dimensionamento.** Apostila de Estradas III. Criciúma, 2012.