



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil

Curso de Graduação em Engenharia Civil



Pablo dos Santos Cardoso Coelho

**AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE CONE DE PENETRAÇÃO
DINÂMICA COMO FERRAMENTA PARA
DIMENSIONAMENTO RODOVIÁRIO**

Ouro Preto

2018

Avaliação do ensaio de Cone de Penetração Dinâmica como ferramenta para o dimensionamento rodoviário

Pablo dos Santos Cardoso Coelho

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 13 de dezembro de 2018 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Lucas Deleon Ferreira - UFOP

Ouro Preto

2018

C672a Coelho, Pablo dos Santos Cardoso.
Avaliação do ensaio de Cone de Penetração Dinâmica como ferramenta para dimensionamento rodoviário [manuscrito] / Pablo dos Santos Cardoso Coelho. - 2018.

84f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

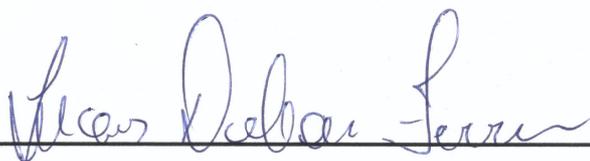
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. DCP. 2. Dimensionamento. 3. Rodovia. 4. Litologia. I. Ferreira, Lucas Deleon. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

Avaliação do Ensaio de Cone de Penetração Dinâmica como Ferramenta para Dimensionamento Rodoviário

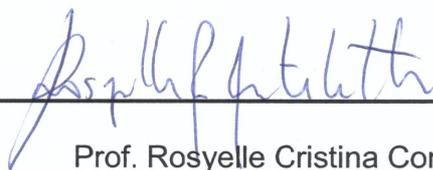
Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 13 de Dezembro de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Lucas Deleon Ferreira (D.Sc.) – Orientador – UFOP



Prof. Paulo de Castro Vieira (D.Sc.) – UFOP



Prof. Rosyelle Cristina Corteletti (D.Sc.) – UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por terem me apoiado de todas as maneiras possíveis ao longo de toda a minha educação. A todos os amigos que se fizeram presentes ao longo dos anos de graduação, pelo constante incentivo.

Agradeço ao professor Lucas Deleon, pelo apoio e confiança. Ao NUGEO por me proporcionar um ambiente de trabalho saudável e propício ao desenvolvimento de pesquisas. A todos os professores que contribuíram de alguma forma para a minha formação como engenheiro civil.

Agradeço especialmente ao engenheiro Roberto Filgueiras e à professora Rosyelle Corteletti pelos ensinamentos e pelo apoio imprescindível no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O ensaio de Cone de Penetração Dinâmica (DCP), desenvolvido em 1956, na Austrália, é uma ferramenta de larga aplicação no dimensionamento de rodovias de baixo nível de tráfego na região da África, se destacando pela sua praticidade, baixo custo e portabilidade. Este trabalho objetiva a análise da aplicabilidade do ensaio como ferramenta para os dimensionamentos rodoviários no Brasil, propondo-se a sua inserção na campanha de investigações geotécnicas de obras lineares e a redução do número de ensaios convencionais, como o CBR, o que resultaria na redução do investimento de tempo e recursos financeiros em tais investigações. A análise da aplicabilidade dos ensaios DCP foi feita com base na campanha de caracterização geológica-geotécnica desenvolvida por Corteletti, Calixto e Filgueiras em 2017 ao longo do eixo da rodovia RO-370, sendo disponibilizados 263 ensaios DCP e o estudo litológico da região. Propôs-se a segmentação e o dimensionamento rodoviário da rodovia com utilização do ensaio DCP como fonte de parâmetros geotécnicos. Constatou-se que o ensaio DCP pode ser uma ferramenta útil e de viável aplicação na atividade de dimensionamento rodoviário no Brasil.

Palavras-chaves: DCP, Dimensionamento, Rodovia, Litologia.

ABSTRACT

The Dynamic Penetration Cone (DCP) test, developed in 1956 in Australia, is a widely applied tool in the design of low-traffic roads in the Africa region, which stands out for its practicality, low cost and portability. This work aims to analyze the applicability of the test as a tool for road design in Brazil, proposing its inclusion in the geotechnical investigation campaign of linear works and reducing the number of conventional tests, such as CBR, which would result in reducing the investment of time and financial resources in such investigations. The analysis of the applicability of the DCP tests was based on the geological-geotechnical characterization campaign developed by Corteletti, Calixto and Filgueiras in 2017 along the axis of the RO-370 highway, with 263 DCP tests and the lithological study of the region being made available. It was proposed the segmentation and road sizing of the highway using the DCP test as a source of geotechnical parameters. It was verified that the DCP test can be a useful and applicable tool in the road design activity in Brazil.

Key-words: DCP, Design, Road, Lithology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Penetrômetro de cone dinâmico, DCP (FONTE: Adaptado de PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009)	4
Figura 2 - Valores de r_i (FONTE: AASHTO, 1993)	5
Figura 3 - Diferença acumulada, Z_x (FONTE: AASHTO, 1993).....	6
Figura 4 - Perfil de diferenças acumuladas (FONTE: AASHTO, 1993).....	7
Figura 5 - Ábaco para dimensionamento de pavimentos flexíveis (FONTE: DNIT, 2006)	9
Figura 6 - Representação das espessuras de um pavimento flexível (FONTE: Adaptado de DNIT, 2006)	10
Figura 7 - Rotina de cálculo para obtenção das espessuras (FONTE: AASHTO, 1993)	12
Figura 8 - Ábaco para determinação do coeficiente de equivalência a_1 (FONTE: AASHTO, 1993)	14
Figura 9 - Localização geográfica dos ensaios realizados (FONTE: GOOGLE EARTH, 2018).....	20
Figura 10 – Obtenção de camadas de penetrabilidades homogêneas	23
Figura 11 – Litologia e segmentação (FONTE: Adaptado de CORTELETTI, 2017)	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de equivalência estrutural (FONTE: DNIT, 2006).....	8
Tabela 2 - Espessuras mínimas de revestimentos betuminosos, R, em função do número de repetições de carga (FONTE: DNIT, 2006).....	10
Tabela 3 - Valores recomendados de m_i em função da qualidade de drenagem e níveis exposição à saturação da rodovia	13
Tabela 4 – Catálogo de projeto para diferentes classes de serviço (FONTE: MMTPW, 2015)	17
Tabela 5 - Cascalheiras nos domínios da rodovia RO-370 (FONTE: CORTELETTI, 2017)	22
Tabela 6 - Jazidas nos domínios da rodovia RO-370 (FONTE: CORTELETTI, 2017)	22
Tabela 7 - Valores de CBR calculados para os segmentos da RO-370	39
Tabela 8 - Resultados dos dimensionamentos	40
Tabela 9 - Módulos de resiliência do subleito	42
Tabela 10 - Valores de SN.....	44
Tabela 11 - Valores de espessura calculados	44
Tabela 12 – Recomendações de coeficientes de Poisson.....	45
Tabela 13 - Deflexões admissíveis no topo do pavimento	46
Tabela 14 - Deformações máximas admissíveis.....	47
Tabela 15 - Análise feita através do ELSYM5	48
Tabela 16 - Espessuras das camadas dimensionadas através do ELSYM5	49
Tabela 17 - Valores de MISA.....	49
Tabela 18 - Construção da SPBC para B = 30	50
Tabela 19 - Construção da SPBC para B = 10	51

Tabela 20 - Penetrabilidades máximas aceitáveis para a RO-370 (B=30).....	52
Tabela 21 – Penetrabilidades máximas aceitáveis para a RO-370 (B=10).....	53
Tabela 22 - Valores máximos, medianos e mínimos de CBR mínimo exigido para as camadas do pavimento (B=30).....	56
Tabela 23 - Valores máximos, medianos e mínimos de CBR mínimo exigido para as camadas do pavimento (B=10).....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Divisão litológica da RO-370	20
Gráfico 2 - Dispersão de pontos dos DN máximos e mínimos pelos DN médios	24
Gráfico 3 - Distribuição dos valores de DN	25
Gráfico 4 - Distribuição dos valores médios de DN.....	25
Gráfico 5 - Diferenças acumuladas.....	30
Gráfico 6 - Segmentação pelo método CUMSUM	31
Gráfico 7 - Valores representativos de DN por segmento.....	32
Gráfico 8 - Curva de balanceamento para B = 30.....	51
Gráfico 9 – Curva de balanceamento para B = 10.....	52
Gráfico 10 - Perfis de CBR mínimo por penetrabilidade máxima (B=30).....	54
Gráfico 11 - Perfis de CBR mínimo por penetrabilidade máxima (B=10).....	55

SUMÁRIO

Agradecimentos	I
Resumo	I
Abstract.....	II
Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas.....	IV
Lista de Gráficos	VI
Sumário	VII
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.1.1 Objetivos Específicos.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
1.2 Cone de Penetração Dinâmica (DCP).....	3
1.3 Segmentação Rodoviária – Método das Diferenças Acumulada.....	4
1.4 Métodos de Dimensionamento Rodoviário	7
1.4.1 DNER.....	7
1.4.2 AASHTO	11
1.4.3 Análise Mecanicista e o Software ELSYM5	14
1.4.4 MMTPW	15
3 Metodologia.....	19
3.1 Litologia	19

3.2	Ensaio DCP e Segmentação	22
3.3	Dimensionamento	26
3.3.1	Análise Mecanicista	27
3.3.2	Analogia ao método do MMTPW	28
4	Resultados	30
4.1	Segmentação.....	30
4.1.1	Comparação com a segmentação litológica.....	32
4.2	Dimensionamento segundo o DNER.....	34
4.2.1	Estimativa dos valores de CBR.....	34
4.2.2	Cálculo das espessuras de camadas.....	39
4.3	Dimensionamento segundo a AASHTO	40
4.3.1	Estimativa dos valores de M_R	40
4.3.2	Cálculo das espessuras de camadas.....	43
4.4	Dimensionamento através do ELSYM5 – Análise Mecanicista	45
4.4.1	Estimativa dos valores de M_R e coeficientes de Poisson	45
4.4.2	Deflexões e deformações máximas	45
4.4.3	Determinação das espessuras das camadas.....	47
4.5	Dimensionamento através de analogia ao método do MMTPW.....	49
4.5.1	Faixa de tráfego de 3.85×10^6 (3.85 MISA)	49
4.5.2	SPBCs e penetrabilidades máximas	50
4.5.3	Análise do subleito	57
5	Conclusão	58
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	59

Referências.....	60
Apêndice A – Mapa litológico da rodovia ro-370.....	64
Apêndice B – Valores de DN médio por estaca	65

1 INTRODUÇÃO

A caracterização da fundação de um pavimento, para fins de dimensionamento rodoviário, é uma necessidade primária na prática de construções rodoviárias. Devido ao fato de estas obras apresentarem grande extensão e se basearem em resultados de ensaios que dispendem grande quantidade de tempo e recursos financeiros, como o de determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), é clara a necessidade de se compatibilizar o número de ensaios com a onerosidade destes.

De acordo com o DNIT (2006), o espaçamento máximo longitudinal entre dois furos de sondagem do subleito varia entre 100 m e 200 m. O reflexo desta demanda é, comumente, a ocorrência de campanhas de investigação dispendiosas de tempo e recursos financeiros. Evidencia-se assim a necessidade de emprego de algum método de ensaio que seja menos dispendioso de recursos financeiros e tempo que os correntes.

Em 1956 foi desenvolvido na Austrália o cone de penetração dinâmica (DCP), que foi posteriormente aprimorado na África do Sul (PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009). O dispositivo é, atualmente, largamente utilizado em regiões da África para o dimensionamento de rodovias de baixo volume de tráfego (MMTPW, 2015). Desenvolvido com o objetivo de se mensurar a consistência de uma camada de solo através da penetração dinâmica de um cone, o DCP tem como peculiaridade a capacidade de gerar um perfil contínuo de resistência do material em campo de forma rápida, de acordo com Burnham e Johnson (1993).

Como apontam Paige-Green e Plessis (2009), existe uma série de estudos que resultaram em equações de correlação entre os parâmetros resultantes dos ensaios DCP e módulos de resiliência ou CBR, viabilizando a obtenção destes valores, comumente utilizados para o dimensionamento de pavimentos, de maneira mais rápida e menos onerosa.

O presente trabalho tem enfoque na análise de uma campanha de ensaios DCP executada ao longo do eixo da rodovia RO-370, localizada no estado de Rondônia, na região da bacia dos Parecis, na qual foram realizados ensaios distanciados entre si

longitudinalmente de 200 m. Com base nos dados, propõe-se segmentar o subleito em trechos homogêneos e dimensionar-se o pavimento através de diferentes métodos e correlações, a fim de se observar a aplicabilidade do ensaio DCP como ferramenta para o dimensionamento rodoviário.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do ensaio de Cone de Penetração Dinâmica como ferramenta para a segmentação do subleito de uma rodovia e dimensionamento das espessuras de camadas do pavimento.

1.1.1 Objetivos Específicos

Objetiva-se comparar as segmentações rodoviária e litológica, analisar os resultados de dimensionamentos feitos com base nos ensaios de Cone de Penetração Dinâmica e se propor a adesão do ensaio nas campanhas de investigação geotécnica de obras lineares de engenharia civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2 Cone de Penetração Dinâmica (DCP)

Desenvolvido na Austrália em 1956, o cone de penetração dinâmica (DCP) foi baseado em um aparelho suíço similar, sendo posteriormente aprimorado na África do Sul (PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009). O aparelho DCP tem como características a versatilidade, simplicidade e mobilidade, possibilitando a execução de grande volume de ensaios em curtos intervalos de tempo e com baixa onerosidade.

O DCP é um equipamento que se propõe a ensaiar a resistência ao cisalhamento dos solos, sendo composto por seis elementos principais: varas superior e inferior, peso, bigorna, régua e cone, conforme ilustra a figura 1. Seu funcionamento consiste, basicamente, na transferência para o cone da energia advinda da queda do peso ao longo de uma altura constante, delimitada na vara superior, sobre a bigorna, conectada ao cone de penetração pela vara inferior.

O principal parâmetro fornecido pelo ensaio é o índice de penetrabilidade (DN), que consiste na razão entre a penetração e número de golpes aplicados sobre a bigorna. O resultado da transferência de energia é a cravação da vara inferior, ligada ao cone, no material ensaiado. Os valores de DN providos pelos ensaios DCP podem ser utilizados como fontes de estimativa de diversos parâmetros geotécnicos, como apontam Berti (2005), Berti (2006), Carvalho (2005), Dione et al. (2014), Lima (2000), MMTPW (2015), Pai (2005) e Paige-Green (2009). Neste trabalho os parâmetros estimados foram os módulos de resiliência (M_R) dos solos e os valores de CBR.

Devido ao constante emprego do aparelho na África do Sul, suas características mais convencionais resultam da padronização estabelecida no país na década de 70 (PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009), também adotada pela norma ASTM D6951/D6951M-09 sendo o peso de 8 kg, a altura de queda de 575 mm, profundidade de penetração de 800 mm e o ângulo do cone de 60°.

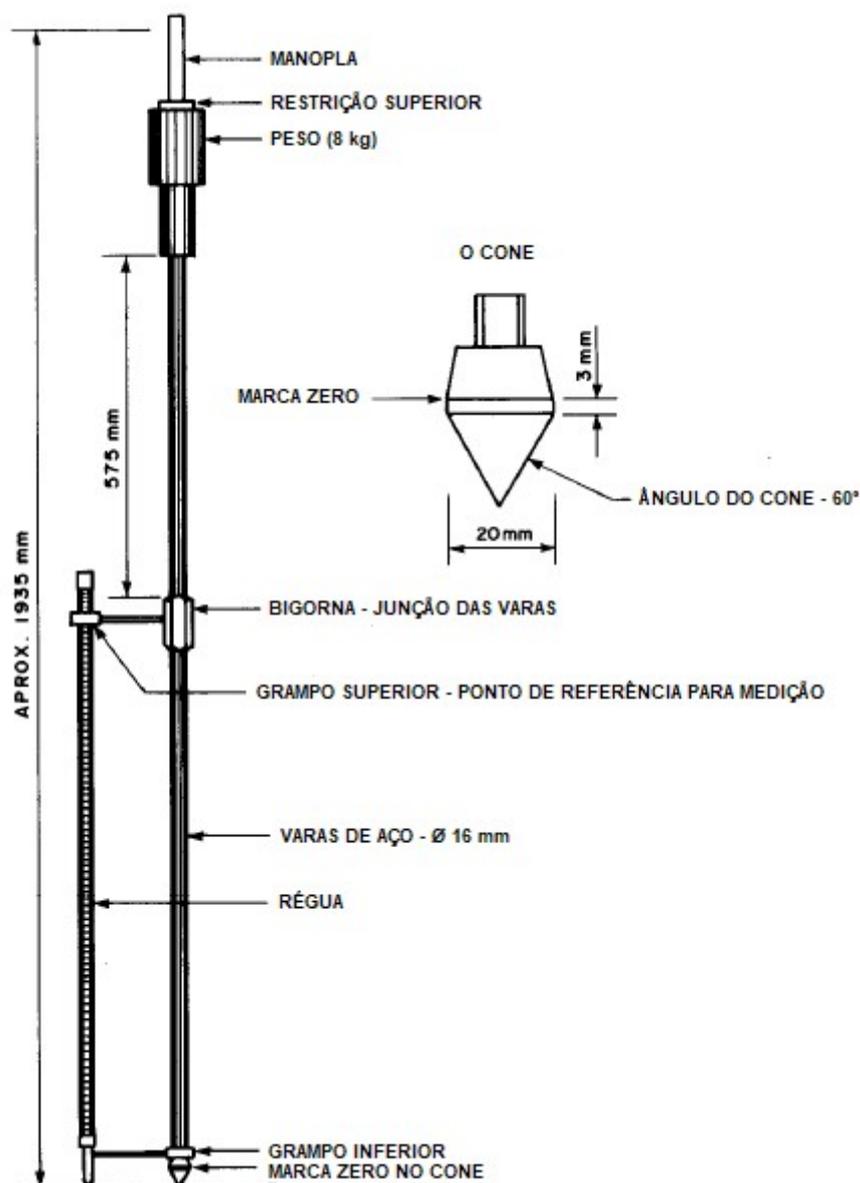


Figura 1 - Penetrômetro de cone dinâmico, DCP (FONTE: Adaptado de PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009)

1.3 Segmentação Rodoviária – Método das Diferenças Acumulada

A segmentação da rodovia RO-370 foi feita com base nos 263 ensaios DCP realizados, utilizando o método das diferenças acumuladas (CUMSUM), proposto pela AASHTO (1993), pelo Ministério de Transportes e Obras Públicas do Malawi - MMTPW(2015) e pelo DER/SP (2006). O método é elucidado no apêndice “J” do guia da AASHTO, de 1993. Adicionalmente, o DER/SP (2006) ressalta que “recomenda-se

que o coeficiente de variação da constante analisada tenha valor de, no máximo, 0,30” para cada segmento.

O método das diferenças acumuladas é definido pela AASHTO (1993) como um método analítico para definição de segmentos de comportamento homogêneo de medições r_i , tomadas ao longo de intervalos conhecidos, x_i . No presente estudo, os valores de DN assumem o papel das medições, r_i , e as distâncias das estacas assumem os valores de x_i .

Supondo-se três segmentos perfeitamente homogêneos com relação ao comportamento dos valores de r_i ao longo de x , nos quais são definidos r_1 , r_2 e r_3 , constantes ao longo das distâncias x_1 , (x_2-x_1) e (x_3-x_2) , como ilustra a figura 2, o primeiro passo do método consiste em definir a área acumulada sob a curva, A_x , até um determinado ponto x , conforme a equação 1:

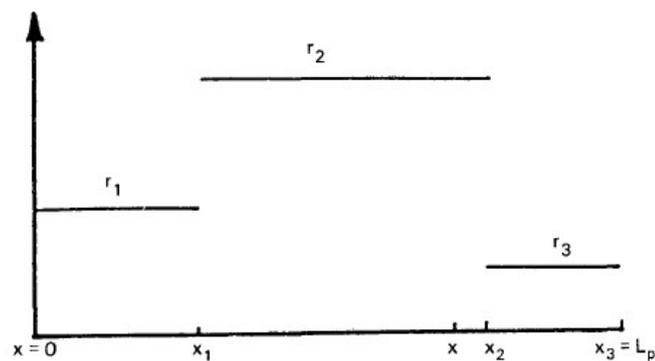


Figura 2 - Valores de r_i (FONTE: AASHTO, 1993)

$$A_x = \int_0^{x_1} r_1 dx + \int_{x_1}^x r_2 dx \quad (1)$$

Define-se também a área média acumulada, \bar{A}_x , como o produto da média de r por x . O processo de cálculo é representado pelas equações 2, 3 e 4:

$$A_{\text{total}} = \int_0^{x_1} r_1 dx + \int_{x_1}^{x_2} r_2 dx + \int_{x_2}^{x_3} r_3 dx \quad (2)$$

$$\bar{r} = \frac{A_{\text{total}}}{x_3} \quad (3)$$

$$\bar{A}_x = \int_0^x \bar{r} = \bar{r}x \quad (4)$$

A diferença acumulada em um determinado ponto x , Z_x , consiste na diferença entre a área acumulada, A_x , e a área média acumulada \bar{A}_x , conforme demonstram a equação 5 e a figura 3:

$$Z_x = A_x - \bar{A}_x \quad (5)$$

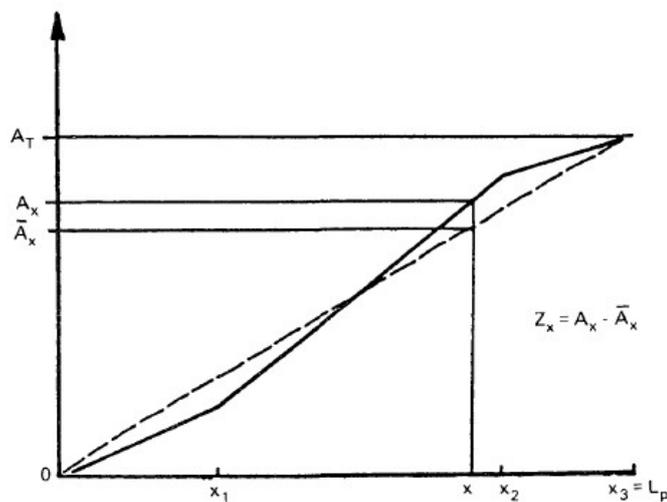


Figura 3 - Diferença acumulada, Z_x (FONTE: AASHTO, 1993)

Ao se traçar o perfil das diferenças acumuladas por x , nota-se a presença de inflexões nas posições x_1 e x_2 , pontos nos quais há mudança de comportamento de r_i , conforme apresentado na figura 4:

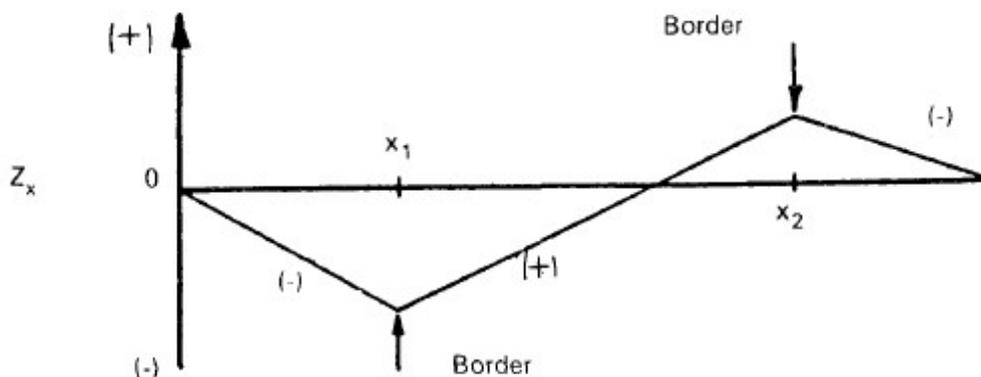


Figura 4 - Perfil de diferenças acumuladas (FONTE: AASHTO, 1993)

As inflexões indicam mudança de comportamento na acumulação de área com relação à acumulação média, que mantém uma taxa constante. Tal variação é reflexo direto da mudança de comportamento da variável r ao longo do trecho analisado, ou seja, da transição de trechos de comportamentos homogêneos.

Nas análises de dados experimentais discretos, propõe-se a analogia representada pela equação 6:

$$Z_x = A_x - \bar{A}_x = \sum_1^n a_i - \frac{\sum_1^n a_i}{x_n} \times x_i \quad (6)$$

Sendo a_i um incremento de área, definido pela equação 7:

$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i)}{2} \times (x_i - x_{i-1}) \quad (7)$$

1.4 Métodos de Dimensionamento Rodoviário

1.4.1 DNER

O método de projeto de pavimentos flexíveis do DNER, apresentado pelo DNIT (2006), apresenta uma abordagem empírica para o dimensionamento das camadas componentes do pavimento. O processo de dimensionamento se baseia na

determinação de valores de alturas genéricas totais do pavimento (H), considerando que este seja composto de um material granular padrão. Os valores de H são obtidos no ábaco referente à figura 5, o qual correlaciona valores de CBR do material sobre o qual se apoia o pavimento (subleito) e número de repetições de carregamentos equivalentes ao eixo simples de roda dupla de 8.2 tf (tonelada força). O ábaco referente à figura 5 é descrito pela equação 8, na qual H_t é a espessura genérica e N é o número de repetições de carregamentos.

$$H_T = 77.67 \times N^{0.0482} \times CBR^{-0.598} \quad (8)$$

Com o intuito de adequar a altura obtida para o pavimento de material granular padrão aos pavimentos reais, que podem ser compostos de uma diversa gama de materiais, é introduzido o conceito de coeficiente de equivalência, K, cujo valor é 1.00 para o material granular padrão. Os diversos valores de K são dispostos na tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de equivalência estrutural (FONTE: DNIT, 2006)

Componentes do pavimento	Coeficiente 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 à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

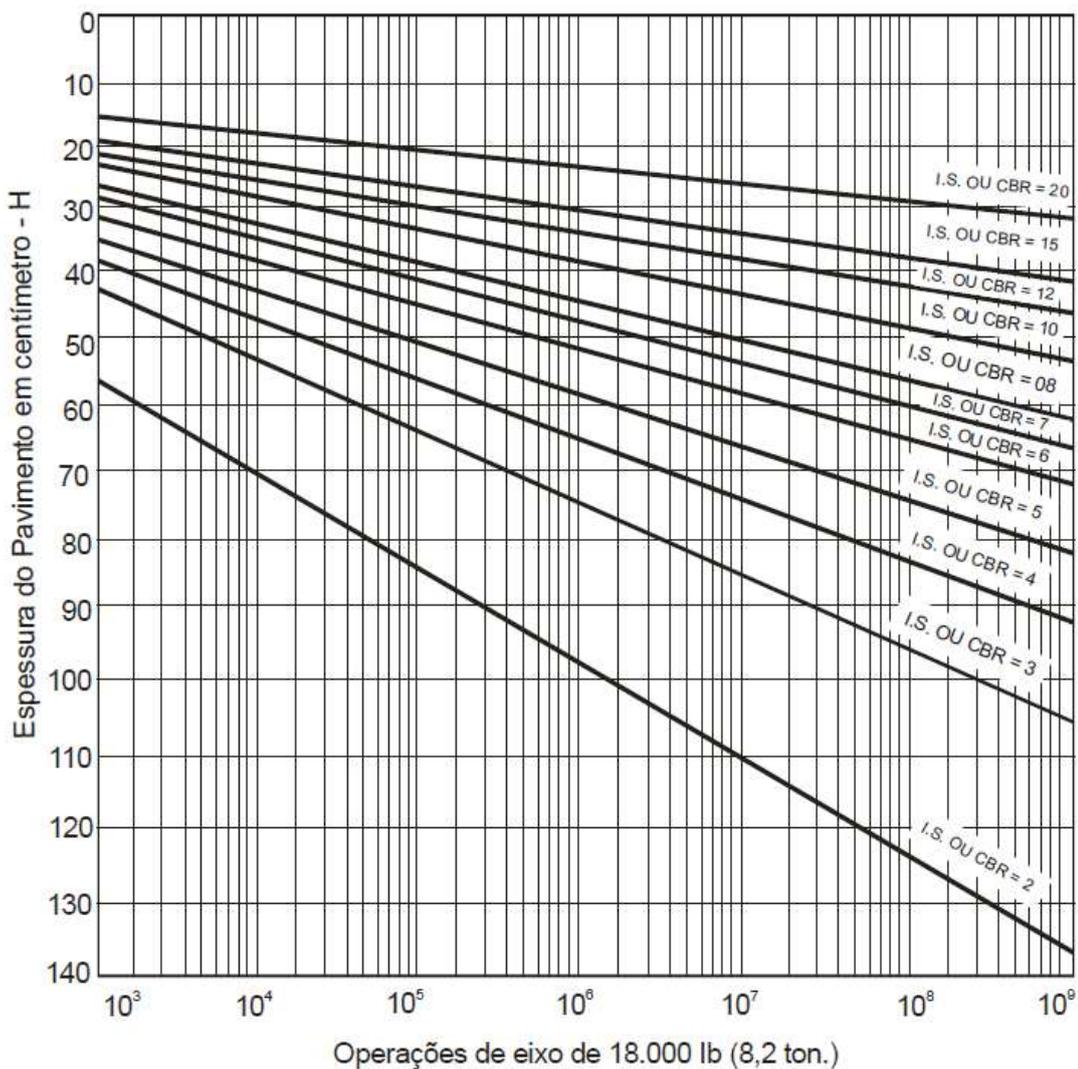


Figura 5 - Ábaco para dimensionamento de pavimentos flexíveis (FONTE: DNIT, 2006)

Cálculos de alturas totais são feitos para pavimentos granulares fictícios apoiados sobre o subleito, sobre o reforço do subleito e sobre a sub-base, representadas, respectivamente, por H_m , H_n e H_{20} , como mostra a figura 6. Concomitantemente, o valor de espessura do revestimento, R , é obtido através da tabela 2, em função do número de repetições de carga.

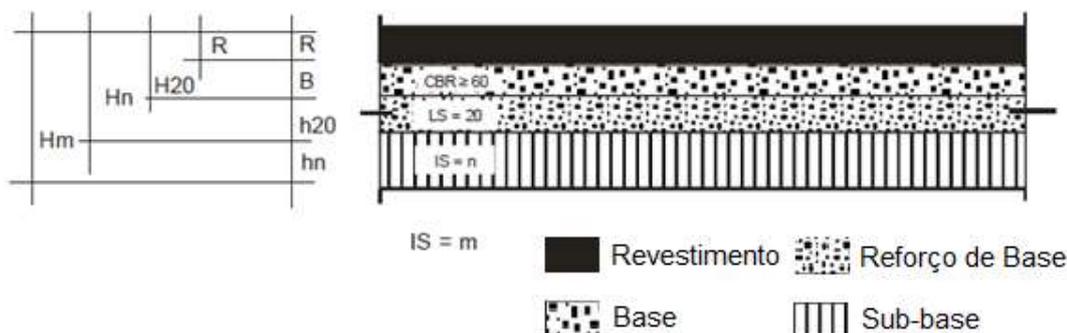


Figura 6 - Representação das espessuras de um pavimento flexível (FONTE: Adaptado de DNIT, 2006)

Tabela 2 - Espessuras mínimas de revestimentos betuminosos, R, em função do número de repetições de carga (FONTE: DNIT, 2006)

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

Obtidos os valores de H_m , H_n , H_{20} , R e os valores de K referentes a cada uma das camadas, K_R (revestimento), K_B (base), K_S (sub-base) e K_{Ref} (reforço do subleito), dá-se a solução do sistema composto pelas equações 9, 10 e 11:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (9)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (10)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S + h_nK_{Ref} \geq H_m \quad (11)$$

A solução do sistema se dá de maneira ordenada, sendo resolvida primeiramente a equação 9, a partir da qual se obtém um valor de B. O valor de B é então utilizado na equação 10 para a obtenção de h_{20} . O conjunto de valores obtidos é utilizado na equação 11 para a obtenção de h_n . Os valores obtidos nas equações são arredondados para a unidade imediatamente superior.

1.4.2 AASHTO

O método adotado pela AASHTO (1993) para dimensionamento de pavimentos flexíveis segue cinco diretrizes principais para a determinação dos números estruturais, SN, do pavimento, definidores das espessuras das camadas componentes deste. De acordo com o item 3.1.1 (parte II) do manual de dimensionamento da AASHTO (1993), são estas as diretrizes:

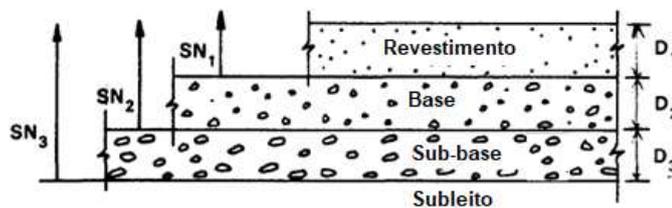
1. Definição da confiabilidade do projeto (probabilidade de o pavimento sobreviver ao período de projeto em condições de conservação iguais ou superiores à condição terminal estabelecida), definidora do desvio padrão normalizado da curva de durabilidade do pavimento, comentada com maiores detalhes no item 4.2.2 da primeira parte do manual de dimensionamento rodoviário da AASHTO (1993), Z_R .
2. Definição desvio padrão global do estudo de tráfego, S_0 , que reflete a variação do tráfego real com relação ao valor previsto.
3. Definição do número total de carregamentos de eixos padrão previstos ao longo da vida útil da via, W_{18} (eixos simples de roda dupla de 18000 lbf).
4. Definição da variação dos níveis de servibilidade do pavimento do início ao término da vida útil do pavimento, ΔPSI .
5. Definição do módulo de ruptura das camadas do pavimento, M_R .

Tais parâmetros resolvem a equação 12, implícita, apresentada a seguir, para a obtenção dos valores de SN, para a qual é apresentado um ábaco no manual de dimensionamento da AASHTO (1993).

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{1094} \right]}{0.40 + \frac{1}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10} M_R - 8.07 \quad (12)$$

A obtenção das espessuras das camadas do pavimento se dá então a partir da solução da equação 13, na qual a_i é o fator de equivalência do material da camada i com o material padrão adotado pela AASHTO (1993), m_i é o fator de umidade das camadas de solo e D_i é a espessura da camada i – com os subíndices 1, 2 e 3 representando o revestimento, a base e a sub-base, respectivamente. Os valores de espessura adotados são os inteiros imediatamente superiores aos calculados. A equação 13 é ilustrada pela figura 7:

$$SN = \sum_i^n a_i \times m_i \times D_i \quad (13)$$



$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

Figura 7 - Rotina de cálculo para obtenção das espessuras (FONTE: AASHTO, 1993)

Os coeficientes de umidade, m_i , são obtidos a partir de suposições sobre a drenagem e exposição à saturação dos materiais da via ao longo de sua vida útil, como ilustra a tabela 3:

Tabela 3 - Valores recomendados de m_i em função da qualidade de drenagem e níveis exposição à saturação da rodovia

Porcentagem de tempo em que o pavimento é exposto a níveis de umidade próximos à saturação				
Qualidade da drenagem	Menos que 1%	1-5%	5-25%	Mais que 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Boa	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Moderada	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muito pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Os coeficientes de equivalência, a_i , são calculados com base nos valores de MR dos materiais, sendo a_1 obtido a partir do ábaco apresentado na figura 8, retirado do manual de dimensionamento da AASHTO (1993), e a_2 e a_3 calculados através das equações 14 e 15:

$$a_2 = 0.249(\log_{10} M_{R2}) - 0.977 \quad (14)$$

$$a_3 = 0.227(\log_{10} M_{R3}) - 0.839 \quad (15)$$

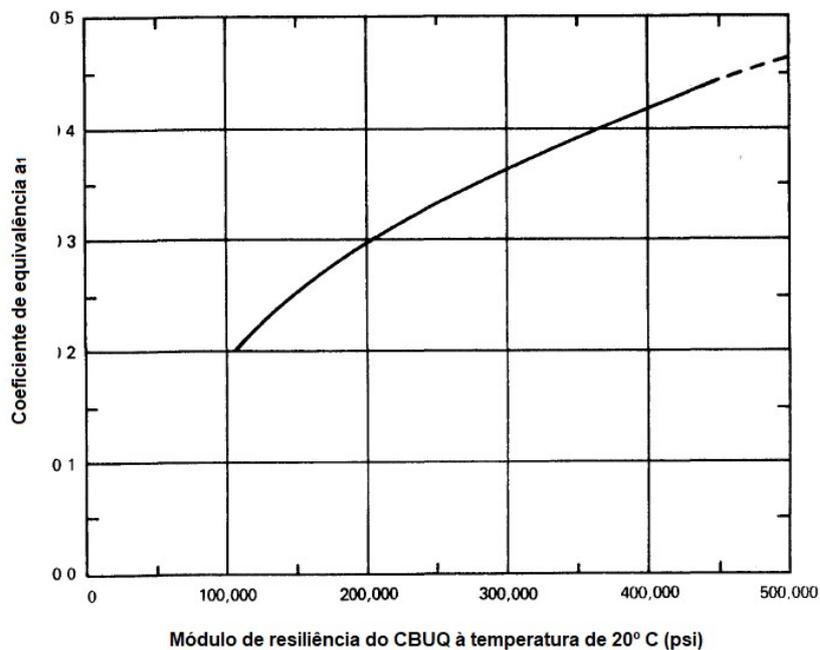


Figura 8 - Ábaco para determinação do coeficiente de equivalência a_1 (FONTE: AASHTO, 1993)

1.4.3 Análise Mecanicista e o Software ELSYM5

A análise mecanicista de pavimentos consiste na abordagem do comportamento mecânico do pavimento sob a ação da aplicação de uma carga estática qualquer. Os efeitos provenientes do carregamento de interesse para a análise mecanicista proposta são as tensões, as deformações específicas e as deflexões observadas.

A ideia trazida pela abordagem mecanicista é a de que os carregamentos atuantes no pavimento não devem provocar tensões, deformações ou deflexões que excedam a capacidade resistente dos materiais, fazendo parte desta abordagem a análise de fadiga do pavimento. A fadiga é definida como o ponto a partir do qual o pavimento perde a sua característica resiliente, ou seja, perde a capacidade de resistir a carregamentos no regime elástico, sem absorver deformações permanentes, o que é devido a ciclos excessivos de carga e descarga. Assim sendo, faz parte da abordagem mecanicista a definição de um número de ciclos máximo suportado pelo pavimento

ou, reciprocamente, a definição de um pavimento que suporte o número de ciclos estipulado.

O software ELSYM5 foi desenvolvido em 1985 pela Universidade da Califórnia, em Berkley, EUA. A ferramenta permite ao usuário obter valores de tensões, deformações e deslocamentos em vários pontos da estrutura do pavimento, utilizando um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais (X,Y,Z), sendo o plano XY coplanar à superfície do revestimento, com Y paralelo ao eixo da via, e o eixo Z perpendicular a este plano, positivo abaixo da superfície.

O software permite a análise do efeito de até dez cargas simultâneas em uma estrutura de até cinco camadas, sendo considerada ou não a fricção entre elas. Os parâmetros de entrada do programa são os módulos de resiliência dos materiais do pavimento, seus coeficientes de Poisson e as suas espessuras das camadas. Para a caracterização dos carregamentos, é necessária a inserção de dois dos três seguintes valores, acompanhados das coordenadas do ponto de aplicação do carregamento: pressão (kgf/cm²), carga (kgf) e área de aplicação (cm²).

As coordenadas dos pontos de análise são informadas de maneira análoga às coordenadas dos carregamentos. Definidos os parâmetros dos materiais e carregamentos, são feitas iterações utilizando diferentes configurações de espessuras de camadas através do software, fazendo-se a comparação dos valores de deformações, deflexões e tensões aos limites estabelecidos para a análise.

1.4.4 MMTPW

O método de dimensionamento de rodovias seladas de baixo tráfego (LVSRs) desenvolvido pelo Malawi Ministry of Transport and Public Works (2015), MMTPW, é apresentado em forma de manual, intitulado Design Manual for LVSR Using The DCP Design. O trabalho é fruto da análise de diversas rodovias de baixo volume construídas no Malawi e países da região, visando a criação de um método de dimensionamento de baixo custo que tivesse como ferramenta principal o ensaio DCP. O método adota como premissa a utilização do subleito, usualmente correspondente

a uma rodovia vicinal, como pavimento, sendo feita a análise de necessidade de adequações e a introdução do revestimento – o qual não possui função estrutural neste caso, apenas de impermeabilização e proteção das camadas inferiores. No método trabalha-se com a divisão do pavimento, como descrito no item 2.5.3 do manual de dimensionamento do MMTPW (2015), em quatro camadas de espessura padrão de 150 mm e uma de 200 mm, enumeradas de 1 a 5, para as quais é calculado valor de DN através da média ponderada dos DN observados nos ensaios. Recomenda-se também a utilização do método das diferenças acumuladas (CUMSUM) para a segmentação da estrada (item 2.5.4) do manual de dimensionamento do MMTPW (2015).

O MMTPW define faixas de volume de tráfego padronizados, LE ou TLC, em função do número de milhões de eixos simples de 8.2 toneladas (MISA). Para cada uma das faixas de tráfego são recomendados valores máximos de penetrabilidade por camada. Tais valores estão dispostos na tabela 4 para cada uma das faixas de volume de tráfego, LE.

Tabela 4 – Catálogo de projeto para diferentes classes de serviço (FONTE: MMTPW, 2015)

Traffic Class E80 x 10 ⁶	LE 0.01 0.003 - 0.010	LE 0.03 0.010 - 0.030	LE 0.1 0.030 - 0.100	LE 0.3 0.100 - 0.300	LE 0.7 0.300 - 0.700	LE 1.0 0.700 - 1.0
0- 150 mm Base ≥ 98% Mod. AASHTO	DN ≤ 8	DN ≤ 5,9	DN ≤ 4	DN ≤ 3,2	DN ≤ 2,6	DN ≤ 2,5
150-300 mm Subbase ≥ 95% Mod. AASHTO	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 9	DN ≤ 6	DN ≤ 4,6	DN ≤ 4,0
300-450 mm subgrade ≥ 95% Mod. AASHTO	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 12	DN ≤ 8	DN ≤ 6
450-600 mm In situ material	DN ≤ 40	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 13
600-800 mm In situ material	DN ≤ 50	DN ≤ 40	DN ≤ 39	DN ≤ 25	DN ≤ 24	DN ≤ 23
DSN 800 (blows)	≥ 39	≥ 52	≥ 73	≥ 100	≥ 128	≥ 143

Segundo o MMTPW, os valores dispostos na tabela 4 foram obtidos a partir de retroanálises de rodovias seladas de baixo volume (LVSRs) no Malawi e países da região, fazendo-se necessária a recorrência a fontes externas para melhor entendimento da origem destes valores. Paige-Green e Plessis (2009) apresentam, como resultado de pesquisas não referenciadas, que o número de MISA pode ser expresso pela relação apresentada na equação 16, na qual DSN₈₀₀ equivale ao número de golpes necessários para a penetração do DCP de 800 mm no material analisado.

$$MISA = C_m \times (DSN_{800})^{3.5} \times 10^{-9} \quad (16)$$

Sendo C_m o fator de umidade, com valores padronizados e iguais a 64 para solo seco, 30 solos na umidade ótima, 14 para solos molhados e 6.5 solos encharcados, independentemente do tipo de solo.

Foi utilizado neste trabalho o software AfCAP LVR-DCP v1.03, desenvolvido pelo South African Council for Scientific and Industrial Research (CSIR). O software foi desenvolvido com o intuito de permitir o tratamento de dados provenientes de ensaios DCP e o dimensionamento de LVSRs.

Para o dimensionamento, o AfCAP LVR-DCP leva em consideração os níveis de tráfego definidos pelo MMTPW (2015) na tabela 4, a partir dos quais é possível o traçado de curvas de balanceamento. Por padrão, nota-se que as *standard pavement balance curves*, ou curvas padrão de balanceamento do pavimento (SPBCs), definidas no software apresentam o parâmetro B, que determina a curvatura da curva, variando pouco em torno de 30. Segundo Paige-Green e Plessis (2009), é conhecido que pavimentos com pouco desvio da curva de balanceamento, independentemente do valor de B, apresentam bom desempenho. Não são disponibilizadas explicações pelo MMTPW (2015) ou no manual de usuário do software (2016) a respeito do que motivou a fixação dos valores de B em torno de 30.

Paige-Green e Plessis (2009) definem as curvas de balanceamento a partir da equação 17:

$$DSN(\%) = \left\{ \frac{D \times [400B + (100 - B)^2]}{4BD + (100 - B)^2} \right\} \quad (17)$$

DSN: Percentual do total de golpes aplicados para a penetração de 800 mm no ensaio DCP (structure number)

B: Parâmetro definidor das curvas padrão de balanceamento de pavimento (SPBC)

D: Percentual da profundidade total de 800 mm

3 METODOLOGIA

Foi adotada neste trabalho a seguinte metodologia: inicialmente, fez-se o tratamento de dados dos 263 ensaios DCP cedidos para este estudo, com o intuito de se obter um valor de penetrabilidade média para cada uma das estacas analisadas, como recomendado pelo MMTPW (2015). Com base nos valores de penetrabilidades médias obtidos, fez-se a segmentação da rodovia RO-370 através do método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993) e o dimensionamento da via através dos métodos do DNER (DNIT, 2006), AASHTO (AASHTO, 1993), da análise mecanicista e de analogia proposta ao método do MMTPW (MMTPW, 2015). Com base nos resultados, foi feita a análise do ensaio como ferramenta para o dimensionamento rodoviário.

3.1 Litologia

Uma detalhada campanha de caracterização geológico-geotécnica do subleito foi feita na região que compreende a extensão do km 0 ao km 59 da rodovia RO-370, situada na bacia dos Parecis, pela equipe composta pelos Eng^o Civil Roberto Almeida Cunha Filgueiras, Eng^a Geóloga Rosyelle C.Corteletti e o Eng^o Civil Flávio Calixto (2017).



Figura 9 - Localização geográfica dos ensaios realizados (FONTE: GOOGLE EARTH, 2018)

Tal campanha teve como principais objetivos a caracterização do material da região e identificação de jazidas e da litologia da região.

A caracterização apresentou as litologias representadas no gráfico 1 ao longo do eixo da rodovia:

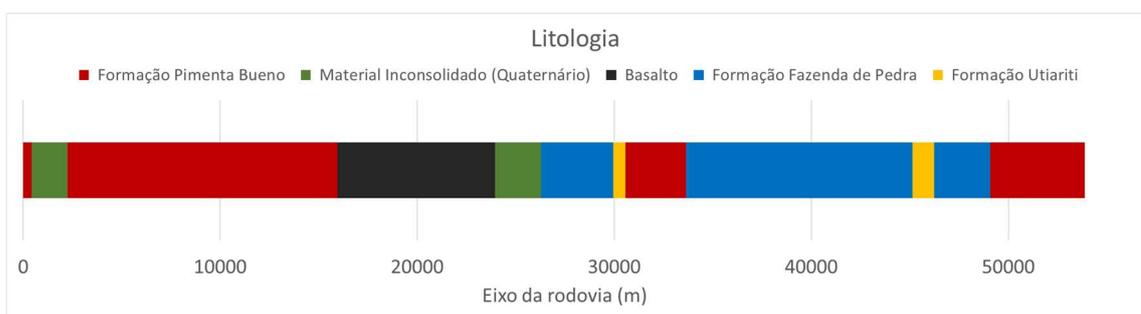


Gráfico 1 - Divisão litológica da RO-370

Um mapa litológico da RO-370 produzido por Corteletti (2017) é apresentado no apêndice A.

De acordo com Corteletti (2017), a Bacia dos Parecis apresenta uma sequência sedimentar constituída, da base para o topo, por conglomerados, argilitos, arenitos, siltitos, folhelhos, calcários e evaporitos (Siqueira 1989 e Bahia et al. 2006).

A identificação de jazidas e pedreiras de potencial uso na construção da rodovia foi direcionada pela análise da litologia e pedologia da região, auxiliada por imagens de satélite do Google Earth, mapas geológicos, além de pesquisa com os moradores da região, reconhecimento de jazidas antigas, pedreiras e depósitos de areias próximos a região. Corteletti (2017) apresenta as cascalheiras e jazidas relacionadas nas tabelas 5 e 6:

Tabela 5 - Cascalheiras nos domínios da rodovia RO-370 (FONTE: CORTELETTI, 2017)

Cascalho para RO 370	Unidade Litoestratigráfica	Litologia-tipo	Coordenadas UTM	
			N	E
cascalheira	Material Inconsolidado (quaternário)	Sedimentos arenosos, siltosos e areno-siltosos, além de lateritas	8.615.174,941	689.573,39
cascalheira	Formação Fazenda de Pedra	Arenitos que apresentam estratificação plano-paralela cruzada e acanalada e tabular de pequeno porte, avermelhados a arroxeados	8.613.382,76	681.912,32
		Arenito fino, argiloso, de cor creme, com estratificação plano-paralela e cruzada tabular de grande porte	8.613.202,77	684.18,629
			8.613.204,08	684.216,94

Tabela 6 - Jazidas nos domínios da rodovia RO-370 (FONTE: CORTELETTI, 2017)

Material para Implantação da Rodovia RO370	Unidade Litoestratigráfica	Litologia-tipo
empresímo	Material Inconsolidado (quaternário)	Sedimentos arenosos, siltosos e areno-siltosos, além de lateritas
empresímo material classificavel	Formação Fazenda de Pedra	Arenitos que apresentam estratificação plano-paralela cruzada e acanalada e tabular de pequeno porte, avermelhados a arroxeados
empresímo		
empresímo de aterial arenoso		Arenito fino, argiloso, de cor creme, com estratificação plano-paralela e cruzada tabular de grande porte
material para terraplanagem	Formação Pimenta Bueno	Arenitos são, marrons com pintas claras
Área de empresímos		
empresímos		
empresímo material vermelho		
empresímo material argiloso vermelho	Folhelhos, arenitos, siltos marrons chocolate, presença de lentes de carvão	
Material classificavel de 2º blocos diabásicos	Basalto	presença de rochas mafica, e solo velho /marrom /roxo

3.2 Ensaios DCP e Segmentação

Paralelamente ao estudo da litologia apresentado anteriormente, o Eng^o Civil Flávio Calixto realizou uma campanha de caracterização geotécnica do subleito composta por 263 ensaios DCP, realizados ao longo do trecho de 59 km analisado.

A segmentação da rodovia RO-370 foi feita com base nos ensaios DCP realizados, utilizando o método das diferenças acumuladas (CUMSUM), proposto pela

AASHTO (1993), pelo Ministério de Transportes e Obras Públicas do Malawi – MMTPW (2015) e pelo DER/SP (2006). O DER/SP (2006) recomenda que o coeficiente de variação do parâmetro utilizado para a segmentação tenha valor de, no máximo, 0,30 ao longo de cada segmento.

Para a aplicação do método de segmentação proposto à rodovia em questão, como recomendado pelo MMTPW (2015), foi necessário se obter valores de penetrabilidade médios por estaca. Através da criação de múltiplos ajustes lineares a cada um dos perfis de penetrabilidade obtidos dos ensaios DCP, foram definidas camadas de penetrabilidades homogêneas em cada uma das estacas, demarcadas pelas interseções entre os segmentos de reta ajustados aos perfis de penetrabilidade. O processo é ilustrado pela figura 10.

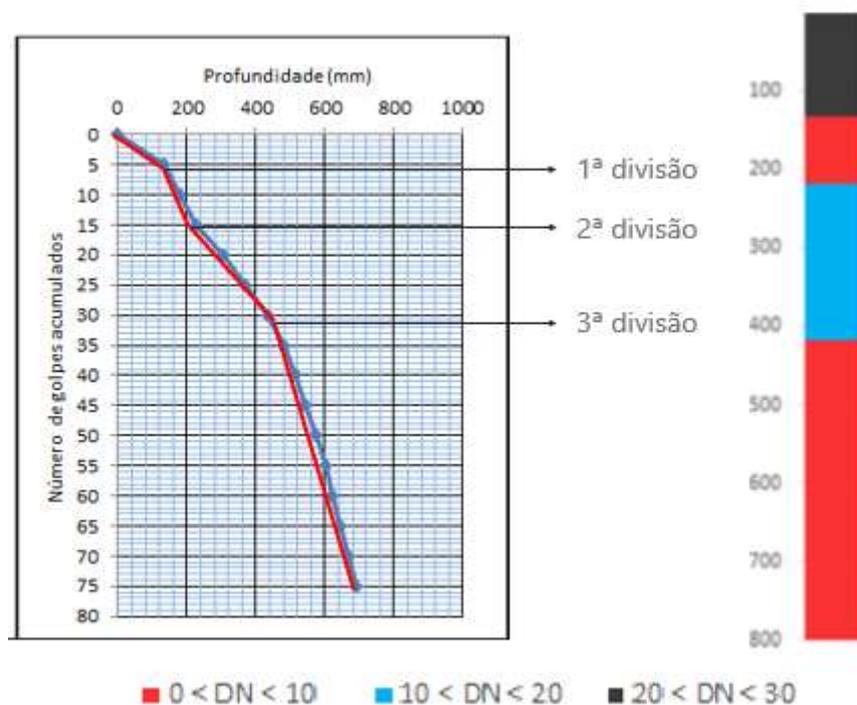


Figura 10 – Obtenção de camadas de penetrabilidades homogêneas

Fazendo-se a média ponderada das penetrabilidades pelas suas espessuras, foram obtidos os valores médios de penetrabilidades por estaca, os quais são dispostos nos gráficos apresentados no apêndice B.

A utilização dos valores médios de penetrabilidades obtidos é respaldada pela observação do comportamento das dispersões de pontos dos valores máximos de DN pelo DN médio e dos valores mínimos de DN pelo DN médio em cada estaca: nota-se que os ajustes lineares feitos para ambas as dispersões resultam em retas com valores de r^2 próximos de 1, conforme ilustra o gráfico 2, expressando a forte correlação destes valores com a média ponderada (a existência de uma razão comum entre tais valores indica um comportamento padrão da média ponderada com relação aos valores observados em cada estaca).

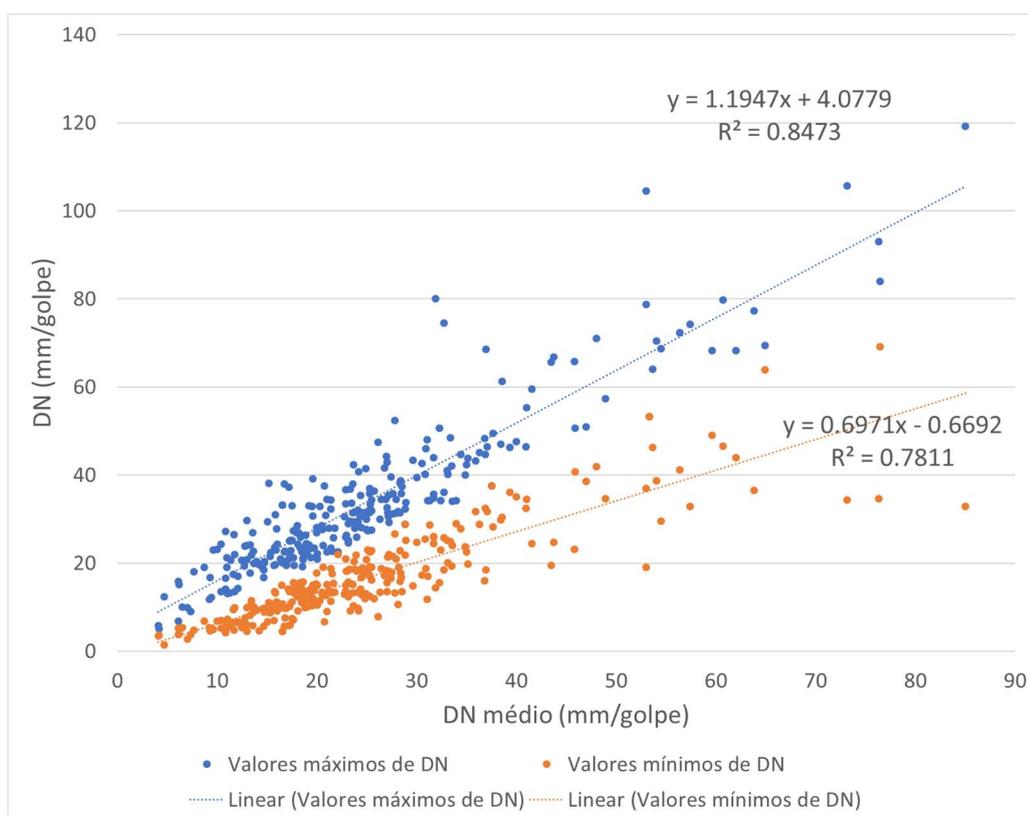


Gráfico 2 - Dispersão de pontos dos DN máximos e mínimos pelos DN médios

Nota-se ainda que a distribuição de frequência dos valores de penetrabilidade por camadas de cada estaca (gráfico 3) é muito similar à dos valores médios de cada estaca (gráfico 4), o que reforça a constatação de aplicabilidade dos valores médios.

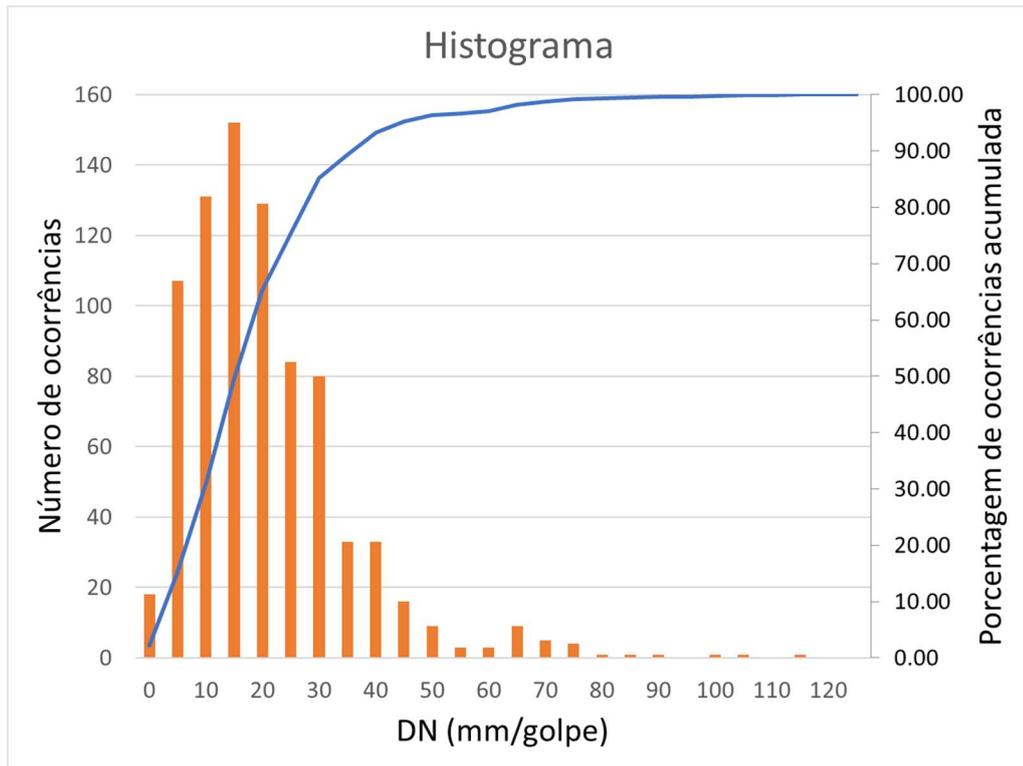


Gráfico 3 - Distribuição dos valores de DN

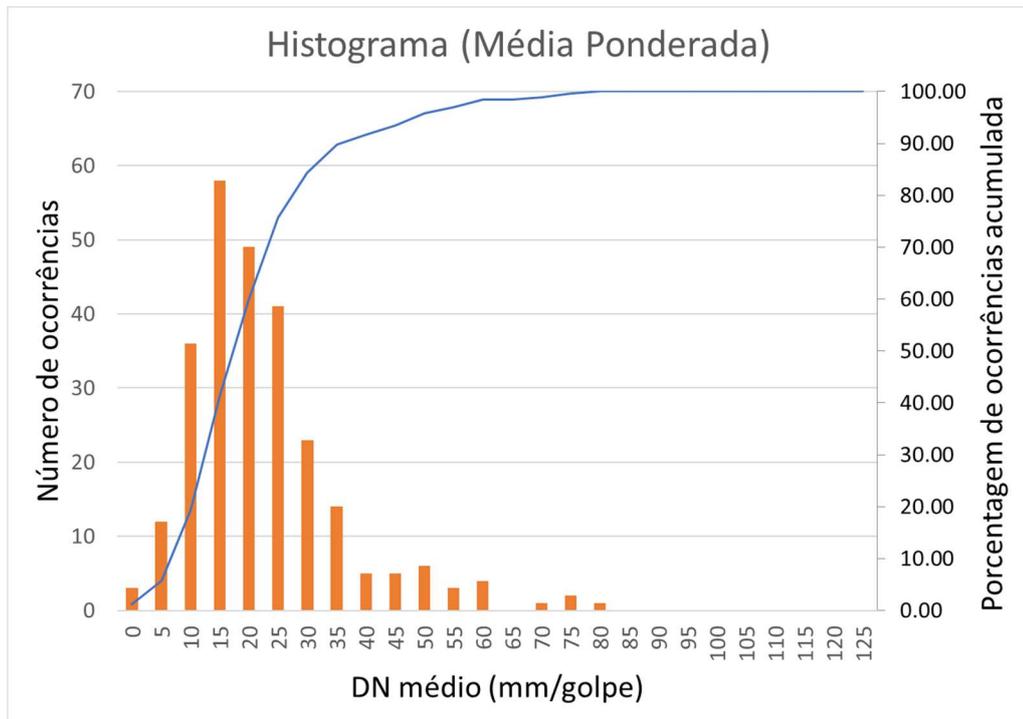


Gráfico 4 - Distribuição dos valores médios de DN

Os valores de DN médio foram utilizados para se obter, estatisticamente, penetrabilidades representativas para cada um dos segmentos. Com base nestas penetrabilidades representativas viabilizou-se a execução dos dimensionamentos.

Devido à similaridade das formas das distribuições representadas pelos gráficos 3 e 4 à forma da distribuição log-normal, os valores de DN representativos de cada segmento foram obtidos através do cálculo da média amostral dos valores de DN pela distribuição t de Student (FONSECA et al., 1980) para cada um dos segmentos. Objetivou-se garantir que houvesse 95% de confiabilidade de que nenhum valor de penetrabilidade incluído em um segmento fosse maior que os valores representativos obtidos para os mesmos segmentos.

3.3 Dimensionamento

Os valores de DN providos pelos ensaios DCP foram utilizados como fontes de estimativa de parâmetros geotécnicos, a partir de correlações apresentadas por Berti (2005), Berti (2006), Carvalho (2005), Dione et al. (2014), Lima (2000), MMTPW (2015), Pai (2005) e Paige-Green (2009). Os parâmetros estimados foram os módulos de resiliência dos solos e os valores de CBR destes materiais.

Foram feitos dimensionamentos do pavimento da RO-370 através do método proposto pela AASHTO (1993), através da abordagem mecanicista, utilizando-se o software ELSYM5, através de analogia proposta ao método do MMTPW (2015), utilizando-se o software AfCAP LVR-DCP e através do método proposto pelo DNER e apresentado pelo DNIT (2006). Foi adotado o nível de solicitação estimado de 3.85×10^6 milhões de eixos equivalentes ao longo da vida útil da rodovia, de acordo com estudo de tráfego feito para fins de projeto.

Valores usuais de CBR de base e sub-base foram adotados, assumindo-se a utilização de cascalhos advindos de jazidas com CBR de 80% e 30% para cada uma das camadas, respectivamente. Foram fixadas as espessuras mínimas de 10 cm e 15 cm para revestimento e base, respectivamente, conforme estipulado pelo DNIT (2006).

3.3.1 Análise Mecanicista

Foram analisadas as deflexões máximas no topo do pavimento, D_{adm} , através das equações 18 e 19, definidas nas normas PRO 11/79 e PRO 269/94, do DNIT. Tal verificação foi feita com o intuito de garantir que o número de repetições de carregamentos, definido pelo número N , não provocasse ruptura por fadiga no pavimento.

PRO 11/79 DNIT:

$$D_{adm} = 10^{(3.01 - 0.175 \log N)} \quad (18)$$

PRO 269/94 DNIT:

$$D_{adm} = 10^{(3.148 - 0.188 \log N)} \quad (19)$$

As deflexões máximas foram calculadas com base no número USACE (BETTEGA, 2013), N , igual a 1.37×10^7 repetições, equivalente ao número de repetições de carregamentos de eixos padrão de 8.2 tf, W_{18} (AASHTO, 1993), de 3.85×10^6 repetições.

Fez-se a análise das deformações específicas máximas, ε_{adm} , de tração e compressão aceitáveis na base do revestimento asfáltico e no topo do subleito, com limites estabelecidos através da equação 20, para a qual as constantes x e k são ajustadas empiricamente.

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{K}\right)^{-\left(\frac{1}{x}\right)} \quad (20)$$

Foi feita a análise de tensões de tração, σ_T , da fibra inferior do pavimento asfáltico, sendo verificada a equação 21:

$$\sigma_T \leq 0.75 \text{ MPa} \quad (21)$$

Sendo considerada a resistência à tração verificada no revestimento de CBUQ disposto de 0.75 MPa.

3.3.2 Analogia ao método do MMTPW

3.3.2.1 Materiais e camadas

Foi adotada para este dimensionamento a nomenclatura de camadas 1 a 5, sendo a camada 1 a mais superior, e a camada 5 a mais inferior. O revestimento, como mencionado anteriormente, não é considerado uma camada estrutural, portanto tais camadas serão compostas dos materiais disponíveis para construção da base e sub-base e de material de subleito

Uma vez que a premissa deste método é a utilização do subleito, total ou parcial, como estrutura da rodovia, estabeleceu-se a condição de que entre as camadas 1 a 5, minimamente, a camada 5 deveria ser composta de material do subleito. Caso contrário descartar-se-ia a premissa de aproveitamento do subleito como via (ou parte da mesma).

3.3.2.2 Criação da faixa de tráfego de 3.85 MISA

Foi proposta a criação de uma nova faixa de tráfego, para N de 3.85×10^6 , através da extrapolação do catálogo apresentado na tabela 4. Tal extrapolação foi feita através da utilização da equação 16, apresentada por Paige-Green e Plessis (2009), a partir da qual se propôs a obtenção do valor de DSN_{800} da faixa de tráfego criada.

Com o valor de DSN_{800} para a LE de 3.85 MISA, foram criadas duas SPBCs, a primeira com B igual a 30, similar às curvas adotadas pelo software AfCAP LVR-DCP, e a segunda com B igual a 10, com curvatura mais suavizada e menor demanda de

resistência das camadas superiores do pavimento. Tais curvas foram utilizadas para a definição das máximas penetrabilidades admissíveis por camada, através do cálculo de DN de incrementos de 50 mm distribuídos ao longo da profundidade de 800 mm, definindo-se a penetrabilidade das camadas como a média dos incrementos nelas incluídos.

3.3.2.3 Análise de qualidade dos materiais

Propôs-se a análise do subleito através do software AfCAP LVR-DCP, a fim de se verificar a aplicabilidade do material para a composição de alguma das cinco camadas definidas. A análise da aplicabilidade dos cascalhos disponíveis para a composição de base e sub-base como materiais componentes das camadas 1 a 4 foi feita através da conversão dos valores de penetrabilidade máxima por camada para valores de CBR, através de equações empíricas.

4 RESULTADOS

4.1 Segmentação

Ao se aplicar o método das diferenças acumuladas à RO-370, utilizando os valores médios de penetrabilidade por estaca obtidos, resultou-se o gráfico 5, que representa o perfil de diferenças das áreas acumuladas pelas áreas médias acumuladas, obtidos conforme a explicação do item 3.2 deste trabalho. Neste gráfico, o eixo da rodovia é representado pelo eixo horizontal, em estacas, sendo uma estaca equivalente a 20 m.

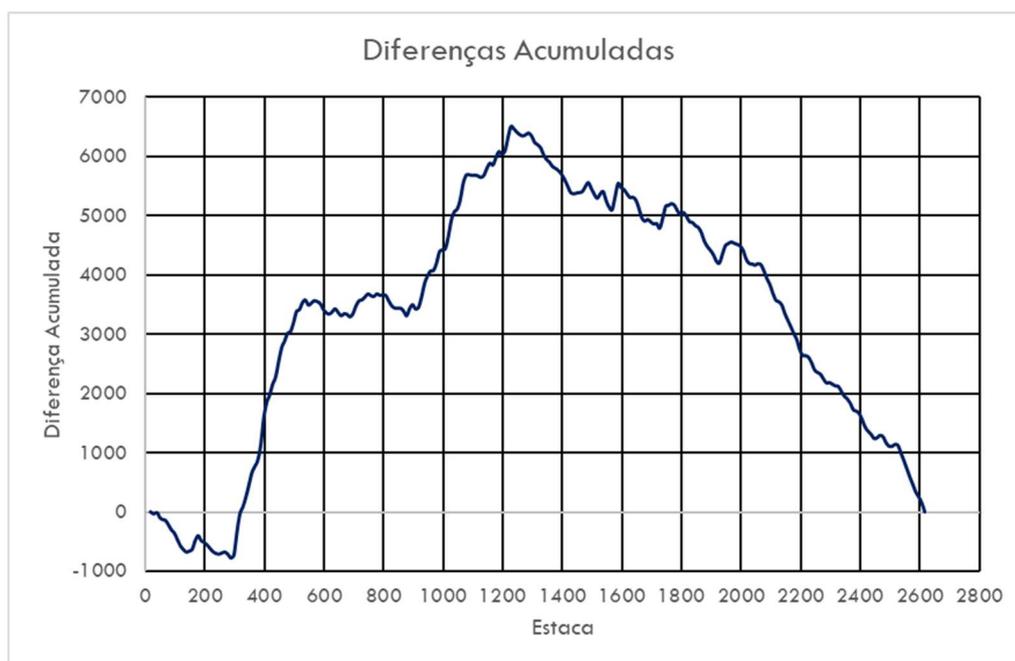


Gráfico 5 - Diferenças acumuladas

Com base no gráfico de diferenças acumuladas, propôs-se a segmentação que resultasse em segmentos com valores mínimos de CV, ou seja, com menor variabilidade de valores de DN por segmento. Os segmentos obtidos têm suas interfaces demarcadas por linhas vermelhas no gráfico 6:

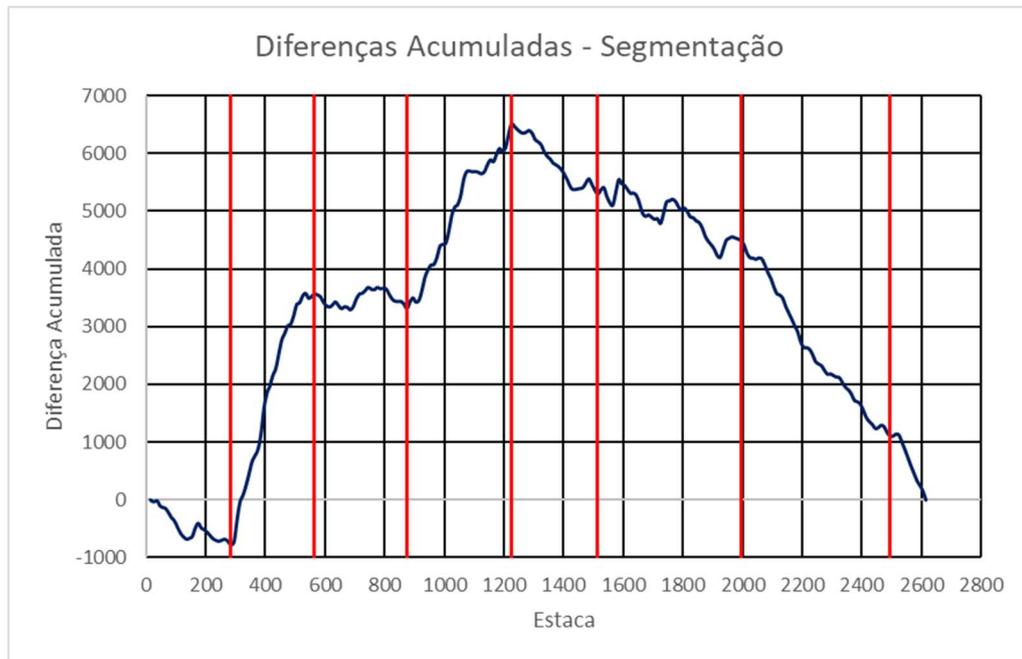


Gráfico 6 - Segmentação pelo método CUMSUM

Apesar de adotada a condição de mínima variabilidade dos valores de DN, alguns segmentos com leves deflexões não foram divididos em segmentos menores, uma vez que se tenderia à definição de segmentos muito pequenos para o atendimento da condição de CV igual ou menor a 0.30, o que é tecnicamente inviável.

Os valores de CV obtidos para os segmentos foram inferiores a 0.47, com exceção do segmento 6, que apresentou CV de 0.61. Isto se deve à peculiaridade deste trecho, que possui excessivas variações de penetrabilidade ao longo do seu comprimento.

Os valores de DN representativos de cada segmento são dispostos no gráfico 7:

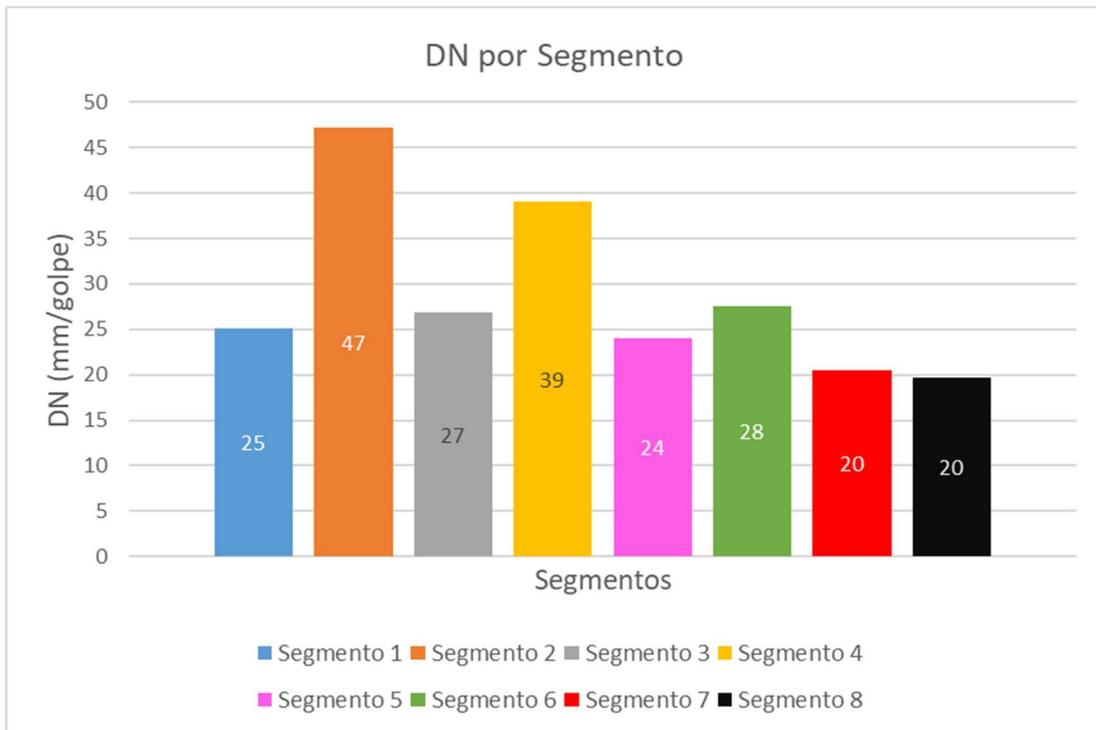


Gráfico 7 - Valores representativos de DN por segmento

Nota-se que os segmentos apresentaram valores de resistência muito próximos, com exceção dos segmentos 2 e 4, menos resistentes.

4.1.1 Comparação com a segmentação litológica

Nota-se a confirmação dos apontamentos feitos por Corteletti e Filgueiras (2016) sobre a potencial correlação entre a litologia e o comportamento geotécnico dos materiais ao longo do eixo da rodovia.

Ao se sobrepor a segmentação feita pelo método CUMSUM às divisões litológicas identificadas por Corteletti (2017), tem-se a figura 11.

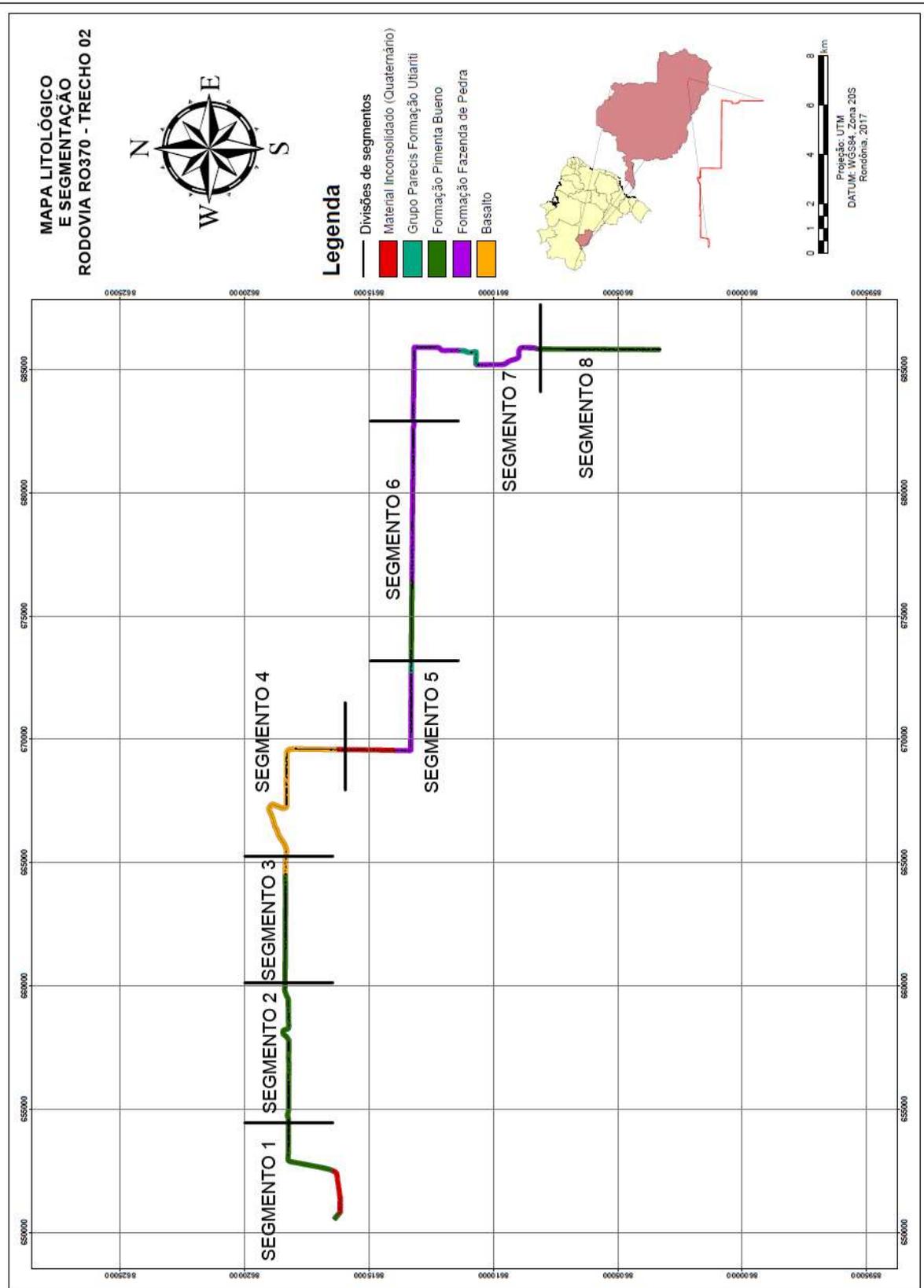


Figura 11 – Litologia e segmentação (FONTE: Adaptado de CORTELETTI, 2017)

Ao se comparar os segmentos obtidos a partir da litologia com os segmentos geotécnicos obtidos neste trabalho, nota-se que é comum que um segmento geotécnico contenha um segmento litológico, sendo o contrário incomum, sendo exceções à tendência apenas as transições entre os segmentos 1 – 2, 2 – 3 e 6 – 7. Nota-se ainda que as penetrabilidades dos segmentos 1 e 3 são muito próximas, o que mostra que o segmento 3 é um trecho destoante dos demais distribuídos ao longo do segmento litológico da Formação Pimenta Bueno abrangido pelos segmentos 1, 2 e 3.

A constatação do padrão discutido indica a constância do comportamento geotécnico dos materiais ao longo de um segmento litológico, o que torna potencialmente viável a utilização dos ensaios DCP no interior de uma litologia para caracterização auxiliar, complementada por outros ensaios, como o CBR, feitos em menor quantidade.

4.2 Dimensionamento segundo o DNER

4.2.1 Estimativa dos valores de CBR

Os valores de CBR do subleito, necessários para este dimensionamento, foram estimados com base nos valores de DN representativos de cada um dos segmentos. As estimativas foram feitas com base nas equações 22 a 43, apresentadas nos trabalhos de Berti (2005) e Berti (2006), as quais contemplam diversos tipos de materiais:

Webster et al. – vários tipos de materiais

$$\log \text{CBR} = 2.46 - 1.12 \log \text{DN} \quad (22)$$

Livneh et al. – materiais coesivos e granulares

$$\log \text{CBR} = 2.45 - 1.12 \log \text{DN} \quad (23)$$

Harison – materiais coesivos e granulares

$$\log \text{CBR} = 2.55 - 1.14 \log \text{DN} \quad (24)$$

Heyn – rodovias no Paraná

$$\text{CBR} = 443.45 \text{DN}^{-1.3} \quad (25)$$

Vertematti e Oliveira – solos transicionais (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.49 - 1.057 \log \text{DN} \quad (26)$$

Cardoso e Trichês – solos A-7-6, A-4 e A-2-4 (laboratório)

$$\text{CBR} = 512.64 \text{DN}^{-1.25} \quad (27)$$

Cardoso e Trichês – solos A-7-6, A-4 e A-2-4 (laboratório)

$$\text{CBR} = 151.58 \text{DN}^{-1.03} \quad (28)$$

Lima – solos transicionais e lateríticos (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.809 - 1.288 \log \text{DN} \quad (29)$$

Berti – solos lateríticos LA'-LG' (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.55 - 1.26 \log \text{DN} \quad (30)$$

Berti – solos lateríticos LA'-LG' ("in situ" e laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.01 - 1.01 \log \text{DN} \quad (31)$$

Kleyn – rodovias no sul da África (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.60 - 1.26 \log \text{DN} \quad (32)$$

Harison – solos argilosos, areia bem graduada e cascalho bem graduado (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 2.81 - 1.32 \log \text{DN} \quad (33)$$

TRRL – não classificado

$$\log \text{CBR} = 2.48 - 1.057 \log \text{DN} \quad (34)$$

Karunaprema e Edirisinghe – cascalho, areia e solo fino (laboratório)

$$\log \text{CBR} = 1.966 - 0.667 \log \text{DN} \quad (35)$$

Livneh apud Amini – materiais coesivos e granulares

$$\log \text{CBR} = 2.56 - 1.16 \log \text{DN} \quad (36)$$

Torres – solos tropicais

$$\text{CBR} = 567 \text{DN}^{-1.4} \quad (37)$$

Coonse – solos residuais

$$\log \text{CBR} = 2.53 - 1.14 \log \text{DN} \quad (38)$$

Esse et al. – agregados para base

$$\log \text{CBR} = 2.44 - 1.07 \log \text{DN} \quad (39)$$

NCDOT (Pavement, 1998) – materiais coesivos e agregados para base

$$\log \text{CBR} = 2.6 - 1.07 \log \text{DN} \quad (40)$$

Ponce apud Lima – materiais argilosos e arenosos

$$\log \text{CBR} = 2.89 - 1.46 \log \text{DN} \quad (41)$$

Projetos de rodovias rurais no Central Provincial Council e no Peradeniya Engineering Faculty – Sri Lanka – amostra não deformada e não saturada

$$\log \text{CBR} = 1.145 - 0.336 \log \text{DN} \quad (42)$$

IDT apud Brockenbrough e Boedecker – não especificado

$$\log \text{CBR} = 0.84 - 1.26 \log \text{DN} \quad (43)$$

As conversões de DN para CBR feitas para os oito segmentos obtidos são dispostas na tabela 7.

Tabela 7 - Valores de CBR calculados para os segmentos da RO-370

Equação	DN (mm/golpe)							
	25.10	47.23	26.89	39.07	24.06	27.52	20.42	19.65
	CBR (%)							
22	8	4	7	5	8	7	10	10
23	8	4	7	5	8	7	10	10
24	9	4	8	5	9	8	11	12
25	7	3	6	4	7	6	9	9
26	10	5	10	6	11	9	13	13
27	9	4	8	5	10	8	12	12
28	5	3	5	3	6	5	7	7
29	10	4	9	6	11	9	13	14
30	6	3	6	4	6	5	8	8
31	4	2	4	3	4	4	5	5
32	7	3	6	4	7	6	9	9
33	9	4	8	5	10	8	12	13
34	10	5	9	6	10	9	12	13
35	11	7	10	8	11	10	12	13
36	9	4	8	5	9	8	11	11
37	6	3	6	3	7	5	8	9
38	9	4	8	5	9	8	11	11
39	9	4	8	5	9	8	11	11
40	13	6	12	8	13	11	16	16
41	7	3	6	4	7	6	9	10
42	5	4	5	4	5	5	5	5
43	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	13	7	12	8	13	11	16	16
Mínimo	4	2	4	3	4	4	5	5
Média	8	4	7	5	8	7	10	10

Os menores valores de CBR foram gerados pela equação 31. A equação 40, que apresenta os maiores valores de CBR, traz valores da ordem de 300% maiores que os gerados pela equação 31. Adicionalmente, determinou-se a média dos 22 valores de CBR obtidos por segmento. Coincidentemente, tais valores correspondem às equações 22 e 23, que abrangem diversos materiais.

4.2.2 Cálculo das espessuras de camadas

O dimensionamento do pavimento foi feito utilizando-se os valores máximos, mínimos e médios de CBR do subleito, sendo obtidas espessuras de revestimento (R), base (B) e sub-base (h_{20}) expostas expostas na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados dos dimensionamentos

	Espessuras (cm)				
	Revestimento	Base	Sub-base		
	R	B	h _{20min}	h _{20med}	h _{20max}
Segmento 1	10.00	15	40.00	15.00	2.00
Segmento 2	10.00	15	79.00	40.00	19.00
Segmento 3	10.00	15	40.00	19.00	4.00
Segmento 4	10.00	15	54.00	31.00	15.00
Segmento 5	10.00	15	40.00	15.00	2.00
Segmento 6	10.00	15	40.00	19.00	6.00
Segmento 7	10.00	15	31.00	9.00	0.00
Segmento 8	10.00	15	31.00	9.00	0.00

Dada a fixação dos valores de CBR para a base e sub-base, as espessuras do revestimento e base foram invariáveis e iguais ao mínimo requerido pelo DNIT (2006). As espessuras de sub-base, funções da capacidade de suporte do subleito, por sua vez, apresentaram variabilidade, comparando-se os dimensionamentos feitos para os valores mínimos, médios e máximos de CBR.

Nota-se que, nos três casos calculados, os segmentos 2 e 4, de menores resistências, foram os que apresentaram maiores espessuras. Os segmentos 7 e 8 foram os que apresentaram as menores espessuras, sendo notadas, no caso do dimensionamento para os máximos CBR, espessuras nulas, o que indica a desnecessidade de execução destas camadas. Em todos os casos, as espessuras obtidas são exequíveis.

4.3 Dimensionamento segundo a AASHTO

4.3.1 Estimativa dos valores de M_R

Para a execução do dimensionamento através do método proposto pela AASHTO (1993) foi necessária a conversão dos valores de CBR da base e sub-base e das penetrabilidades do subleito para valores de M_R , parâmetro dos materiais componentes das camadas utilizado pelo método. As equações 44 a 50, compiladas por Carvalho (2005), Lima (2000) e Pai (2005) foram utilizadas para o cálculo do

módulo resiliente do material do subleito a partir dos valores de DN. As equações são listadas a seguir:

Angelone, Tosticarelli e Martinez (1991)

$$M_R(\text{MPa}) = 201.0 \times \text{DN}^{-0.44} \quad (44)$$

Trichês e Cardoso (1999)

$$M_R(\text{MPa}) = 266.2 \times \text{DN}^{-0.76} \quad (45)$$

Alves (2002)

$$M_R(\text{MPa}) = 188.12 \times \text{DN}^{-0.52} \quad (46)$$

Hassan (1996)

$$M_R(\text{MPa}) = 93.868 - 14.071 \ln \text{DN} \quad (47)$$

George e Udin (2000)

$$M_R(\text{MPa}) = 2613.193 \times \text{DN}^{-0.492} \text{ (Solos granulares finos)} \quad (48)$$

$$M_R(\text{MPa}) = 1093.750 \times \text{DN}^{-0.475} \text{ (Solos granulares grossos)} \quad (49)$$

Chen et al. (1999)

$$M_R(\text{MPa}) = 388 \times DN^{-0.39} \quad (50)$$

Os valores obtidos de MR do subleito são expostos na tabela 9:

Tabela 9 - Módulos de resiliência do subleito

Módulos Resilientes - Subleito							
MR (MPa)	Segmento 1						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	54.43	33.82	28.40	121.72	51.66	607.59	267.29
MR (MPa)	Segmento 2						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	42.13	24.16	18.32	96.96	43.35	456.46	202.78
MR (MPa)	Segmento 3						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	51.36	31.26	25.51	115.67	49.95	569.03	250.95
MR (MPa)	Segmento 4						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	45.34	26.63	20.82	103.46	45.67	495.51	219.49
MR (MPa)	Segmento 5						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	55.58	34.71	29.29	124.02	52.41	621.60	273.28
MR (MPa)	Segmento 6						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	56.63	36.01	31.41	125.76	52.19	637.17	279.56
MR (MPa)	Segmento 7						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	60.00	38.61	34.00	132.56	54.50	678.30	297.15
MR (MPa)	Segmento 8						
	Angelone	Alves	Trichês	Chen	Hassan	George e Udin (GF)	George e Udin (GG)
	65.73	43.28	39.08	143.92	57.79	749.75	327.51

Nota-se variabilidade nos resultados gerados pelas diferentes equações utilizadas para determinação dos valores de M_R do subleito, sendo a razão entre os valores máximos e mínimos gerados da ordem de 1000%.

Os módulos de resiliência da base e sub-base, por sua vez, foram convertidos obtidos através de conversão pela equação 51, de Heukelom e Klomp, recomendada pela AASHTO (1993), sendo obtidos os valores de M_R da base e sub-base de 827.37 MPa e 310.26 MPa, respectivamente.

$$M_R(\text{MPa}) = 10.342 \times \text{CBR} \quad (51)$$

Foi adotado para o revestimento o M_R de 3500 MPa, recomendado por Balbo (2007).

4.3.2 Cálculo das espessuras de camadas

Para este trabalho, o nível de confiabilidade foi escolhido de modo a desonerar as manutenções futuras significativamente. Assim sendo, adotou-se a confiabilidade de 95%, para a qual tem-se o valor de Z_R igual a -1.645. O valor de S_0 adotado foi o de 0.44, recomendado na parte I do manual de dimensionamento da AASHTO (1993). O valor de ΔPSI adotado foi o de 1.7, para o valor inicial de PSI igual a 4.2, como recomendado no item 2.2.1, da parte II do manual de dimensionamento da AASHTO (1993).

Definidas as constantes da equação 12, procedeu-se a obtenção das espessuras das camadas do pavimento através da equação 13.

Os valores de m_i para base e sub-base foram escolhidos supondo-se moderadas condições de drenagem, com as camadas expostas à saturação entre 5% e 25% da vida útil do pavimento. É adotado o valor de m_i igual a 0.9, visando-se não extremar os resultados. Para o revestimento foi adotado o valor de m_1 de 1.0, dada a impermeabilidade do material (AASHTO, 1993).

O valor de a_1 obtido a partir do ábaco da figura 8 foi 0.45. Os valores de a_2 e a_3 calculados a partir das equações 14 e 15 foram 0.29 e 0.22, respectivamente.

Os valores de SN e as espessuras foram calculados para os valores máximos, mínimos e medianos de M_R do subleito, de modo a abranger de maneira satisfatória a variação de valores de M_R . Os valores máximos, mínimos e medianos foram obtidos através das equações de 48, 45 e 44, respectivamente, e dispostos na tabela 10.

Tabela 10 - Valores de SN

Resumo - SN					
SN	Subleito			Base	Sub-base
	Max	Med	Min		
Segmento 1	5.53	4.46	1.77	1.56	2.31
Segmento 2	6.33	4.82	1.99	1.56	2.31
Segmento 3	5.72	4.55	1.82	1.56	2.31
Segmento 4	6.09	4.73	1.92	1.56	2.31
Segmento 5	5.48	4.42	1.76	1.56	2.31
Segmento 6	5.36	4.39	1.74	1.56	2.31
Segmento 7	5.22	4.31	1.70	1.56	2.31
Segmento 8	4.99	4.17	1.63	1.56	2.31

As espessuras máximas, mínimas e medianas dimensionadas para o pavimento são apresentadas na tabela 11:

Tabela 11 - Valores de espessura calculados

Espessuras (cm) - $m_i = 0.9$					
	Revestimento	Base	Sub-base		
	D₁	D₂	D_{3Max}	D_{3Med}	D_{3Min}
Segmento 1	10.00	15	29.00	16.00	0.00
Segmento 2	10.00	15	40.00	20.00	0.00
Segmento 3	10.00	15	32.00	17.00	0.00
Segmento 4	10.00	15	37.00	19.00	0.00
Segmento 5	10.00	15	29.00	15.00	0.00
Segmento 6	10.00	15	27.00	15.00	0.00
Segmento 7	10.00	15	25.00	14.00	0.00
Segmento 8	10.00	15	22.00	12.00	0.00

Nota-se também neste dimensionamento a variabilidade notada no dimensionamento feito pelo método do DNER (2006), com espessuras de sub-base alcançando variações da ordem de 40 cm. Em todos os casos, as espessuras obtidas são exequíveis.

4.4 Dimensionamento através do ELSYM5 – Análise Mecanicista

4.4.1 Estimativa dos valores de M_R e coeficientes de Poisson

Os valores de M_R do subleito foram estimados através das mesmas equações utilizadas no dimensionamento feito pelo método proposto pela AASHTO (1993) – equações 44 a 50. Adotou-se novamente a equação 51 para a conversão dos valores de CBR da base e sub-base, a fim de se padronizar os valores de resistência obtidos para estas camadas.

Foram adotados os coeficientes de Poisson recomendados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2004) e por Balbo (2007), conforme disposto na tabela 12.

Tabela 12 – Recomendações de coeficientes de Poisson

Coeficiente de Poisson (ν)		
CBUQ - PMQ	0.32 - 0.38	Balbo (2007)
Materiais Granulares	0.40 - 0.50	PMSP (2004)
Solos Arenosos	0.30 - 0.35	Balbo (2007)
Solos Finos	0.40 - 0.45	Balbo (2007)

Dentro dos limites estabelecidos, propôs-se trabalhar com os valores de 0.35 para o CBUQ, 0.45 para a base, sub-base e para o subleito, evitando-se extremar os resultados.

4.4.2 Deflexões e deformações máximas

As deflexões máximas no topo do pavimento foram calculadas a partir das equações 18 e 19. Os resultados são dispostos na tabela 13.

Tabela 13 - Deflexões admissíveis no topo do pavimento

D_{ADM} (10^{-2} mm)	
PRO 11/79 DNIT	PRO 269/94 DNIT
57.69	64.02

O valor de deflexão admissível para o número de repetições de carga estipulado calculado através da norma PRO 11/79, do DNIT (1979), se mostrou mais conservador, sendo assim adotado como critério de aceitação do dimensionamento. O atendimento da deflexão admissível estipulado por esta norma implica no atendimento da norma PRO 269/94, do DNIT (1994).

Os valores de deformações específicas máximas, ϵ_{adm} , de tração e compressão aceitáveis na base do revestimento asfáltico e no topo do subleito, calculadas pela equação 20 utilizando as constantes x e k compiladas por Severi, Balbo e Rodolfo (1998), conforme ilustra a tabela 14.

Tabela 14 - Deformações máximas admissíveis

Máxima Deformação Específica de Tração na Base da Camada do Revestimento em Função do número N ($1,37 \times 10^7$)					
Autor	Ano	k	x	Fonte	ϵ (cm/cm)
Pretorius (1969) appud Barker et al. (1977)	1969	9.7E-10	4.030	Severi et. Al.	9.83E-05
Pell et. Al.	1972	2.20E-19	6.103	Severi et. Al.	5.94E-05
Epps et. Al. Apud Pell	1973	6.28E-07	3.010	Severi et. Al.	3.70E-05
FHWA	1976	1.09E-06	3.512	Severi et. Al.	1.86E-04
Ashpalt Institute	1976	2.96E-05	3.291	DERSP	2.85E-04
Brown et. Al.	1977	8.90E-13	4.900	Severi et. Al.	1.21E-04
Treybig et. Al.	1977	9.73E-15	5.160	Severi et. Al.	7.97E-05
Pinto & Preusler	1980	2.85E-07	3.690	DERSP	1.96E-04
Preusler	1983	2.99E-06	2.150	Severi et. Al.	1.29E-06
Pinto	1991	6.64E-07	2.930	Severi et. Al.	2.86E-05
Barver et. Al.	1,997	9.70E-10	4.030	DERSP	9.83E-05
Mínimo					1.29E-06
Médio					1.08E-04
Máximo					2.85E-04
Máxima Deformação Específica de Compressão no Topo da Camada do Subleito em Função do número N ($1,37 \times 10^7$)					
Autor	Ano	k	x	Fonte	ϵ (cm/cm)
Dormon & Metcalf	1965	6.07E-10	4.762		3.68E-04
Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge)					
- 50% de confiabilidade	1985	6.15E-07	4.000	DERSP	4.60E-04
- 85% de confiabilidade	1985	1.97E-07	4.000		3.46E-04
- 95% de confiabilidade	1985	1.05E-07	4.000		2.96E-04
Asphalt Institute (Santucci)	1984	1.34E-09	4.484		2.69E-04
Mínimo					2.69E-04
Médio					3.48E-04
Máximo					4.60E-04

4.4.3 Determinação das espessuras das camadas

A determinação das espessuras das camadas através do software ELSYM5 foi feito de maneira iterativa: propôs-se uma estrutura de camadas e verificou-se se os requisitos de projeto são atendidos. Inicialmente, propôs-se a verificação das espessuras obtidas a partir do dimensionamento feito pelo método da AASHTO (1993) para os valores medianos de M_R do subleito. Foram feitas iterações com alterações da ordem de unidade de centímetro para a espessura da sub-base quando apresentados valores de tensões, deflexões e deformações específicas muito diferentes dos estabelecidos como critérios deste dimensionamento.

Os seguintes resultados, apresentados na tabela 15, foram obtidos para o segmento 1 da rodovia. A análise foi replicada para os demais segmentos.

Tabela 15 - Análise feita através do ELSYM5

Segmento 1	Camada		Sob a Roda			Entre as Rodas		
	Ponto		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Coordenadas	X (cm)	0.00	0.00	0.00	14.40	14.40	14.40	
	Y (cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Z (cm)	0.01	9.99	41.01	0.01	9.99	41.01	
Tensões Normais	σ_x (kgf/cm ²)	-1.07E+01	3.62E+00	7.14E-01	-4.04E+00	-1.24E-01	8.06E-01	
	σ_y (kgf/cm ²)	-1.21E+01	4.65E+00	8.01E-01	-8.01E+00	3.52E+00	8.75E-01	
	σ_z (kgf/cm ²)	-5.63E+00	-2.50E+00	-2.20E-01	-1.04E-01	-1.63E+00	-2.34E-01	
Deformações Normais	ϵ_x (cm/cm)	-1.29E-04	8.18E-05	1.46E-04	-3.44E-05	-2.44E-05	1.67E-04	
	ϵ_y (cm/cm)	-1.82E-04	1.22E-04	1.87E-04	-1.87E-04	1.18E-04	1.99E-04	
	ϵ_z (cm/cm)	6.73E-05	-1.54E-04	-2.91E-04	1.18E-04	-8.04E-05	-3.19E-04	
Deslocamentos	Ux (cm)	1.38E-03	-4.83E-04	-2.32E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	Uy (cm)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	Uz (cm)	4.72E-02	4.66E-02	3.91E-02	4.66E-02	4.68E-02	3.95E-02	

As células de cor verde representam valores inferiores aos limites estabelecidos. As células de cor amarelo representam valores próximos à média dos limites estabelecidos (parcialmente inferiores à totalidade dos limites levantados).

Nota-se que as tensões de tração na base do revestimento asfáltico foram aceitáveis, assim como as deflexões no topo do pavimento. As deformações específicas de tração na base do revestimento foram parcialmente inferiores à totalidade dos limites estabelecidos e ligeiramente superiores à média dos limites. As deformações específicas de compressão no topo do subleito, igualmente, se encontram próximas à média, parcialmente inferiores limites levantados. Valores de deformação próximos à média foram aceitos no dimensionamento, dada a variabilidade nos limites de deformação específica notados na tabela 13.

As configurações de camadas aceitas, de acordo com as análises feitas através do software ELSYM5, são apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 - Espessuras das camadas dimensionadas através do ELSYM5

		Configurações de Camadas (cm)							
		Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3	Segmento 4	Segmento 5	Segmento 6	Segmento 7	Segmento 8
Revestimento	D ₁	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Base	D ₂	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Sub-base	D _{3Max}	16.00	20.00	16.00	18.00	15.00	13.00	13.00	15.00

Nota-se que as estruturas de pavimentos obtidas para os 8 segmentos foram muito próximas às configurações iniciais propostas para a execução das iterações, sendo também exequíveis.

4.5 Dimensionamento através de analogia ao método do MMTPW

4.5.1 Faixa de tráfego de 3.85×10^6 (3.85 MISA)

A fim de se validar a equação 16, apresentada por Paige-Green e Plessis (2009), obteve-se o valor de MISA de cada uma das faixas de tráfego listadas na tabela 4 a partir dos seus valores de DSN₈₀₀. Os valores de MISA calculados são apresentados na tabela 17:

Tabela 17 - Valores de MISA

DSN ₈₀₀	MISA
39	0.01
52	0.03
73	0.10
100	0.30
128	0.71
143	1.05

Nota-se que a equação analisada apresenta grande fidelidade aos os valores de LE apresentados na tabela 4. Fez-se então a extrapolação do catálogo para o valor de MISA de 3.85. Para o valor de MISA de 3.83 foi obtido DSN₈₀₀ igual a 207 golpes, e para MISA igual a 3.89, foi obtido DSN₈₀₀ igual a 208 golpes. Para este dimensionamento foi adotado o valor de DSN₈₀₀ igual a 208 golpes, evitando-se a minoração das resistências mínimas das camadas do pavimento obtidas para o valor de MISA de 3.85.

4.5.2 SPBCs e penetrabilidades máximas

Foram traçadas, através da equação 17, duas SPBCs, com valores de B iguais a 30 e 10. Fixando-se o valor do parâmetro B, foi possível traçar as SPBCs e calcular os valores de DSN, golpes acumulados e DN em função da profundidade a fim de se definir as máximas penetrabilidades aceitáveis por camada, parâmetros de definidores de um nível de serviço de catálogo (MMTPW, 2015).

Os resultados obtidos para os valores de B utilizados são apresentados nas tabelas 18 e 19, para as quais foram calculados valores de DSN para incrementos de 50 mm de penetração. Com base nos valores de DSN obtidos, calculou-se a penetrabilidade de cada um dos incrementos de 50 mm, definindo-se a penetrabilidade das camadas de 150 mm como a média dos DN dos incrementos de 50 mm nela incluídos.

Tabela 18 - Construção da SPBC para B = 30

Curva de Equilíbrio do Pavimento					
B = 30.00					
D	DSN	Golpes (acumulado)	Profundidad e (mm)	DN (mm/golpe)	DN médio (mm/golpe)
0.00	0.00	0.00	0	0.00	
6.25	18.69	38.70	50	1.29	1.71
12.50	33.01	68.33	100	1.69	
18.75	44.32	91.74	150	2.14	
25.00	53.48	110.71	200	2.64	3.21
31.25	61.05	126.38	250	3.19	
37.50	67.42	139.56	300	3.79	
43.75	72.84	150.79	350	4.45	5.18
50.00	77.52	160.47	400	5.16	
56.25	81.60	168.91	450	5.93	
62.50	85.18	176.33	500	6.74	7.63
68.75	88.36	182.90	550	7.61	
75.00	91.19	188.76	600	8.53	
81.25	93.73	194.02	650	9.50	11.09
87.50	96.02	198.77	700	10.53	
93.75	98.10	203.07	750	11.61	
100.00	100.00	207.00	800	12.74	

Tabela 19 - Construção da SPBC para B = 10

Curva de Equilíbrio do Pavimento					
B = 10.00					
D	DSN	Golpes (acumulado)	Profundidad e (mm)	DN (mm/golpe)	DN médio (mm/golpe)
0.00	0.00	0.00	0	0.00	2.83
6.25	9.06	18.75	50	2.67	
12.50	17.59	36.41	100	2.83	
18.75	25.64	53.07	150	3.00	
25.00	33.24	68.81	200	3.18	3.36
31.25	40.44	83.71	250	3.36	
37.50	47.27	97.84	300	3.54	
43.75	53.74	111.25	350	3.73	3.92
50.00	59.90	124.00	400	3.92	
56.25	65.76	136.13	450	4.12	
62.50	71.34	147.68	500	4.33	4.54
68.75	76.67	158.71	550	4.54	
75.00	81.76	169.24	600	4.75	
81.25	86.62	179.30	650	4.97	5.31
87.50	91.27	188.93	700	5.19	
93.75	95.73	198.16	750	5.42	
100.00	100.00	207.00	800	5.65	

Os resultados apresentados nas tabelas 18 e 19 são dispostos em forma de SPBCs no gráfico 8 e 9.

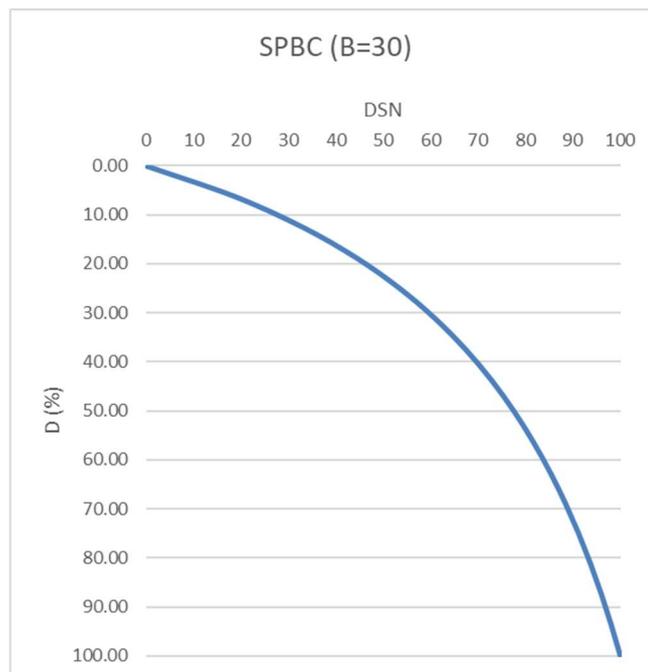


Gráfico 8 - Curva de balanceamento para B = 30

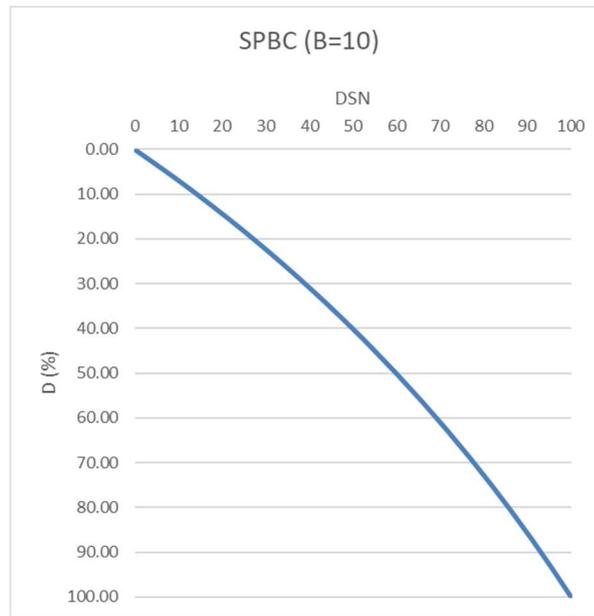


Gráfico 9 – Curva de balanceamento para B = 10

Os perfis de penetrabilidades máximos aceitáveis para que a rodovia se mostrasse competente para receber o tráfego de 3.85 MISA são então dispostos nas tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Penetrabilidades máximas aceitáveis para a RO-370 (B=30)

LE 3.85	
Camada	DN (mm/golpe)
1	≤ 1.71
2	≤ 3.21
3	≤ 5.18
4	≤ 7.63
5	≤ 11.09

Tabela 21 – Penetrabilidades máximas aceitáveis para a RO-370 (B=10)

LE 3.85	
Camada	DN (mm/golpe)
1	≤ 2.83
2	≤ 3.36
3	≤ 3.92
4	≤ 4.54
5	≤ 5.31

As conversões entre os valores de penetrabilidades máximas e CBR mínimos foram feitas utilizando-se as equações 22 a 43, relacionadas anteriormente. Os gráficos 10 e 11 ilustram os valores CBR mínimos necessários por penetrabilidades máximas.

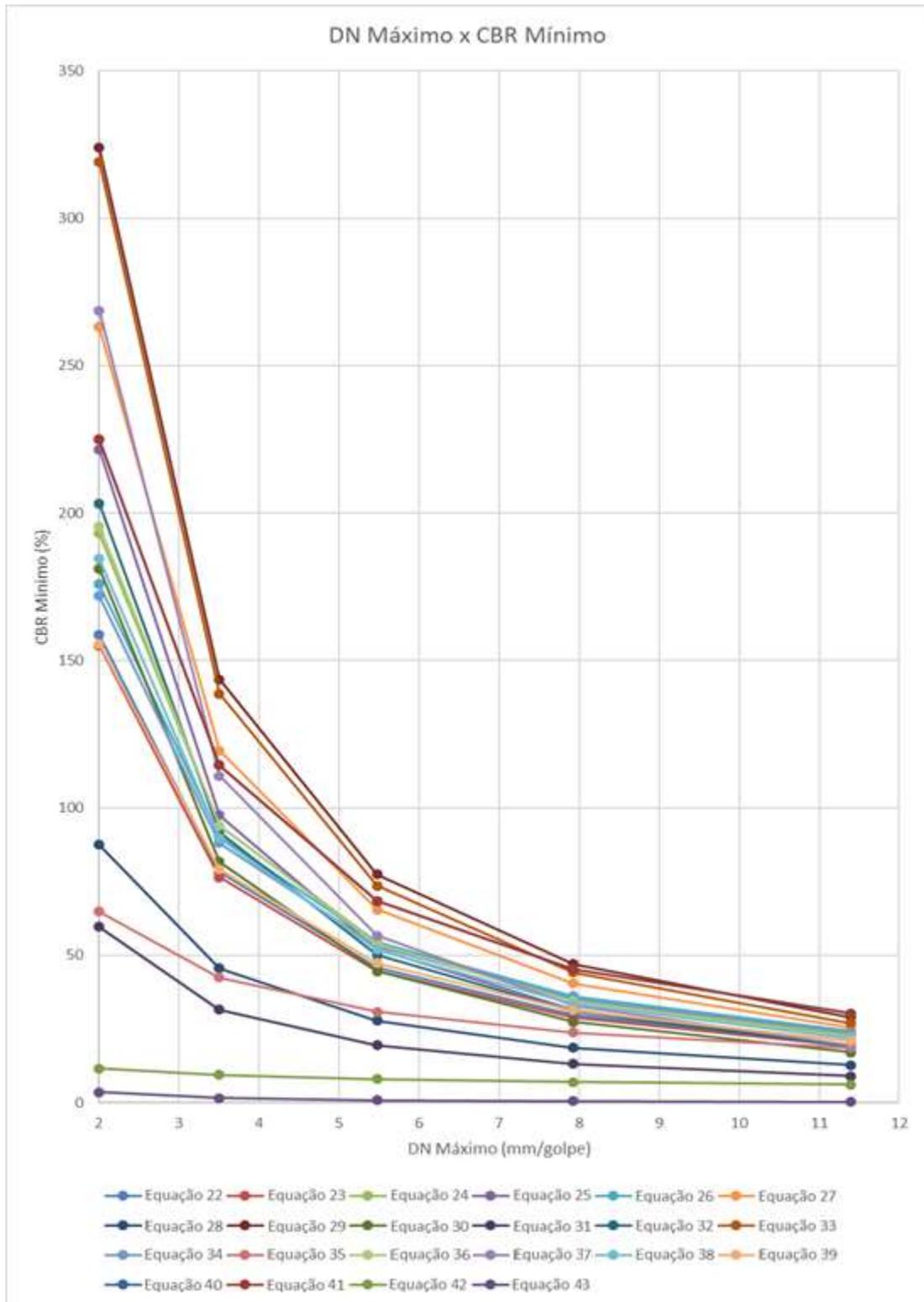


Gráfico 10 - Perfis de CBR mínimo por penetrabilidade máxima (B=30)

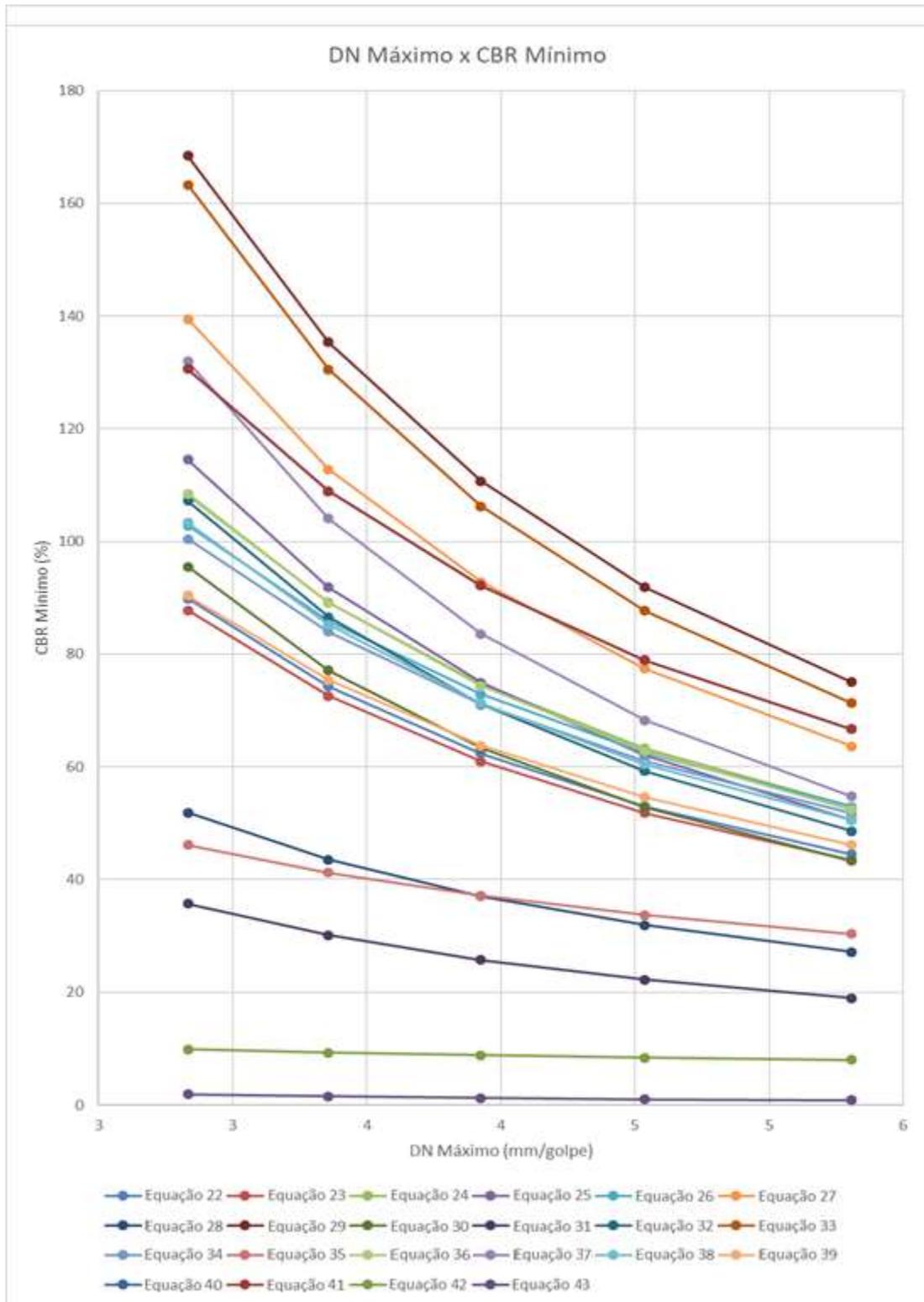


Gráfico 11 - Perfis de CBR mínimo por penetrabilidade máxima (B=10)

Os valores máximos, mínimos e medianos de CBRs mínimos necessários por camadas, obtidos através das conversões feitas, são dispostos nas tabelas 22 e 23, para as SPBCs de B iguais a 30 e a 10, respectivamente.

Tabela 22 - Valores máximos, medianos e mínimos de CBR mínimo exigido para as camadas do pavimento (B=30)

Equação		Máximo	Mediano	Mínimo
		41	38	43
Camada	DN (mm/golpe)	CBR (%)		
1	≤ 1.71	≥ 356	≥ 184	≥ 4
2	≤ 3.21	≥ 144	≥ 90	≥ 2
3	≤ 5.18	≥ 77	≥ 52	≥ 1
4	≤ 7.63	≥ 47	≥ 33	≥ 1
5	≤ 11.09	≥ 30	≥ 22	≥ 0

Tabela 23 - Valores máximos, medianos e mínimos de CBR mínimo exigido para as camadas do pavimento (B=10)

Equação		Máximo	Mediano	Mínimo
		41	38	43
Camada	DN (mm/golpe)	CBR (%)		
1	≤ 2.83	≥ 170	≥ 104	≥ 2
2	≤ 3.36	≥ 132	≥ 85	≥ 2
3	≤ 3.92	≥ 106	≥ 71	≥ 1
4	≤ 4.54	≥ 85	≥ 60	≥ 1
5	≤ 5.31	≥ 68	≥ 51	≥ 1

Nota-se que, apesar da variabilidade dos valores de CBR gerados pelas equações de conversão, o pavimento é infactível através da análise das duas SPBCs, sendo os materiais disponíveis para substituição do subleito nas camadas 1 a 4 insuficientemente resistentes de acordo com a maioria das equações de conversão utilizadas. Este resultado indica de que o dimensionamento da RO-370 é inviável através da analogia proposta.

4.5.3 Análise do subleito

Os segmentos obtidos a partir da segmentação feita previamente, utilizando o método CUMSUM, foram inseridos no software, sendo então feita a análise dos materiais através das duas SPBCs obtidas, inseridas no software como classes de tráfego.

Nos 8 segmentos analisados, observou-se a impossibilidade do material de subleito de compor as camadas 1 a 5, sendo recomendado o melhoramento ou troca deste material. Tal constatação indica a inviabilidade de construção da rodovia através desta metodologia.

5 CONCLUSÃO

O ensaio DCP mostrou-se uma ferramenta de possível aplicação nos processos de dimensionamento rodoviário. Constatou-se que existe grande similaridade entre as divisões litológicas e as divisões produzidas pela segmentação através do ensaio DCP, o que sugere a possibilidade de se executar a campanha de caracterização geotécnica do subleito ao longo da via utilizando-se o ensaio DCP, auxiliado por ensaios CBR feitos com quantidade reduzida ao longo dos segmentos litológicos. Tal prática poderia acarretar a redução do dispêndio de tempo e recursos financeiros comuns na etapa de caracterização do subleito de rodovias.

A variabilidade de espessuras de subleito obtidas neste trabalho reflete a ausência de ensaios auxiliares. Nota-se, entretanto, que o pavimento da rodovia RO-370 é factível através dos dimensionamentos feitos pelo método da AASHTO (1993), DNER (DNIT, 2006) e pela análise mecanicista, utilizando-se todas as conversões expostas neste trabalho. Todas as espessuras de camadas obtidas nestes dimensionamentos foram verossímeis, o que indica que o dimensionamento através da ferramenta é abrangente, em termos de materiais.

O método proposto pelo MMTPW (2015) mostra-se ineficiente no dimensionamento de rodovias de tráfego superior aos definidos no manual de dimensionamento (MMTPW, 2015), sendo sugerida a total substituição da via, o que vai contra a premissa do método, que é o reaproveitamento do subleito. A impossibilidade de aplicação do método proposto pelo MMTPW (2015) no dimensionamento da RO-370 pode ser associada à incompatibilidade entre as naturezas das rodovias africanas retroanalizadas para a elaboração do método com a RO-370, uma vez que o método considera pavimentos com revestimentos muito delgados e sem função estrutural, cabendo às camadas subjacentes a competência estrutural. A desconsideração da função estrutural do pavimento faz com que materiais muito resistentes sejam necessários, limitada a espessura do pavimento a 80 cm.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros a realização de ensaios CBR ao longo do eixo da rodovia analisada. A realização destes ensaios forneceria o material necessário para a calibração de equações de conversão adequadas aos materiais encontrados na via, sendo assim possibilitadas conversões realistas entre DN e CBR. A disponibilidade de resultados de ensaios CBR também possibilitaria a comparação dos dimensionamentos baseados nestes com os dimensionamentos baseados nas conversões de DN para CBR propostas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, D.C., 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6951/695**. Pensilvânia, 2009.

BAHIA R. B. C.; PEDREIRA, A. J. **Depósitos glaciogênicos da Formação Pimenta Bueno (Carbonífero) na região de Rolim de Moura, sudeste de Rondônia**. A Terra em Revista. 1996. 1:24-29.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BERTI, C. **Avaliação da Capacidade de Suporte de Solos “In Situ” em Obras Viárias Através do Cone de Penetração Dinâmica – Estudo Experimental**. Campinas, 2005. 121p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Concentração de Transportes.

BERTI, C. **Correlação entre índices de penetrabilidade DCP e CBR disponíveis na literatura**. In: V Jornadas Luso-brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, 2006, Recife.

BETTEGA, W. P. **Cálculo do número “N” - USACE**. Curitiba, 2013. Notas de Aula.

CARVALHO, R. G. **Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina**. São José dos Campos, 2005. 141p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação na área de Infra-Estrutura Aeroportuária.

CORTELETTI, R. C. **Caracterização geológica da bacia dos Parecis**: relatório técnico. Ouro Preto, 2017.

CORTELETTI, R. C.; FILGUEIRAS, R. A. C.; CALIXTO, F. **Caracterização geológico-geotécnica do subleito da rodovia RO-370**: relatório técnico. Belo Horizonte, 2017.

CORTELETTI, R. C.; FILGUEIRAS, R. A. C. **Relatório geológico e geotécnico - vistoria dos taludes das margens do reservatório da UHE Aimorés**: relatório técnico. Belo Horizonte, 2016.

DE BEER, M.; RENSBURG, Y. **User Software Help File (SHF): AfCAP LVR-DCP v1.03**. Oxford, 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Projeto de Pavimentação**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **PRO 011/79: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNPAV**.1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **PRO 269/94: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNPAV**.1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis**. 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DIONE, A.; FALL, M.; BERTHAUD, Y.; BENBOUDJEMA, F.; MICHOU, A. **Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M. -E) Pavement Design**. In: Revue du CAMES, 2014.

GOOGLE EARTH-MAPAS. <http://mapas.google.com>. Consulta realizada em 03/11/2018.

LIMA, L. C. **Investigação geotécnica de vias urbanas empregando o método das pastilhas e o penetrômetro dinâmico de cone – DCP**. Florianópolis, 2005. 254p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MINISTRY OF TRANSPORT AND PUBLIC WORKS. **Design Manual for Low Volume Sealed Roads Using the DCP Design Method**. Malawi, 2015.

PAI, C. M. D. **O ensaio DCP aplicado no controle de qualidade de compactação de obras viárias executadas com solos lateríticos de textura fina**. São José dos Campos, 2000. 148p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação na área de Infra-Estrutura Aeroportuária.

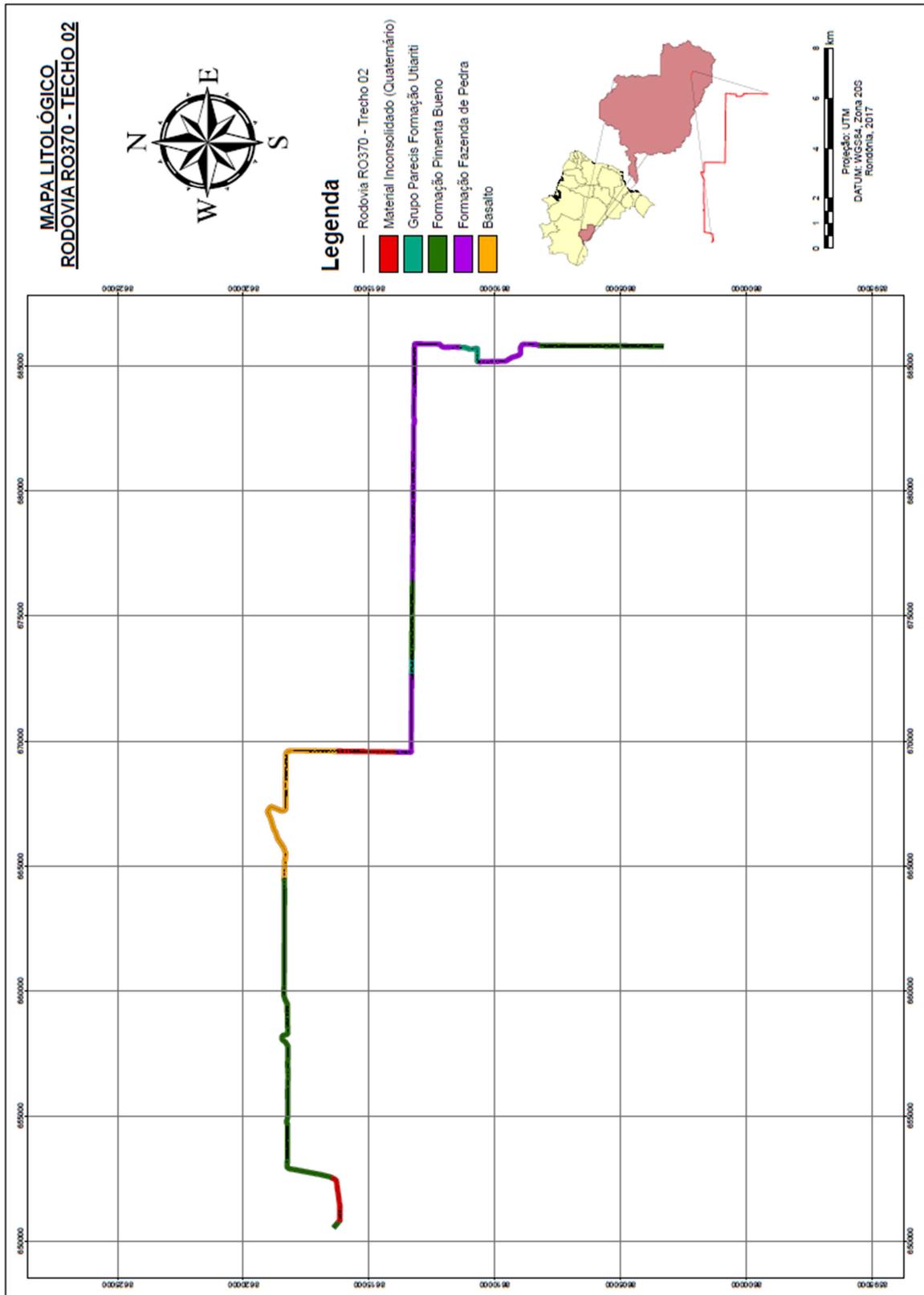
PAIGE-GREEN, P; PLESSIS, L. **Use and interpretation of the dynamic cone penetrometer (DCP) test**. In: CSIR Built Environment, 2009, Pretória.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento.** São Paulo, SP, 2004.

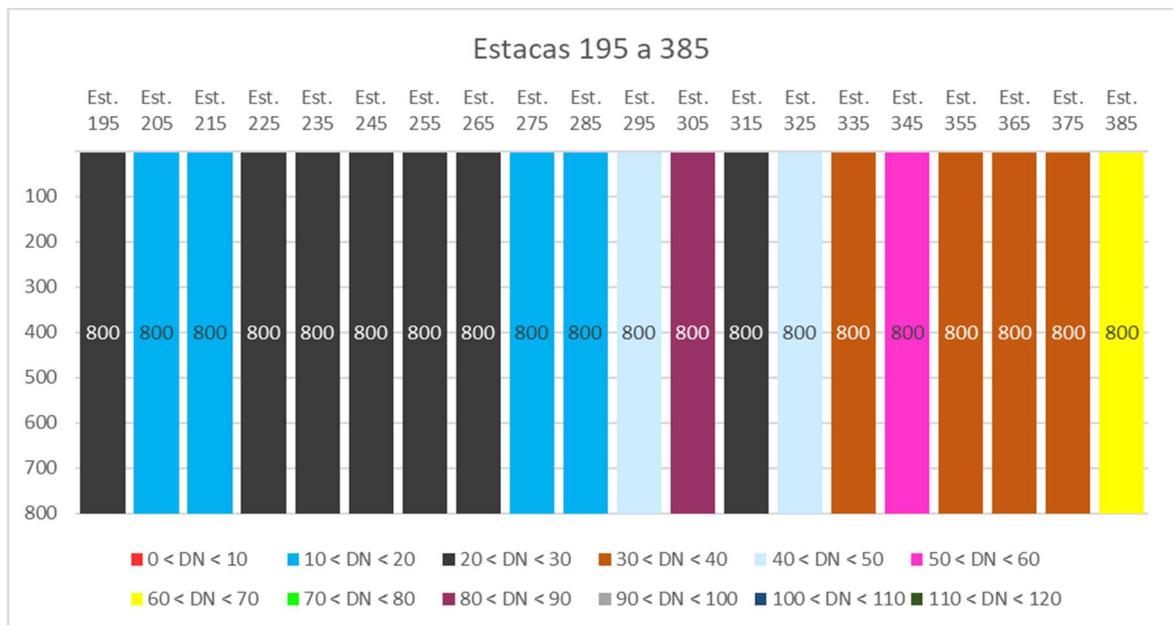
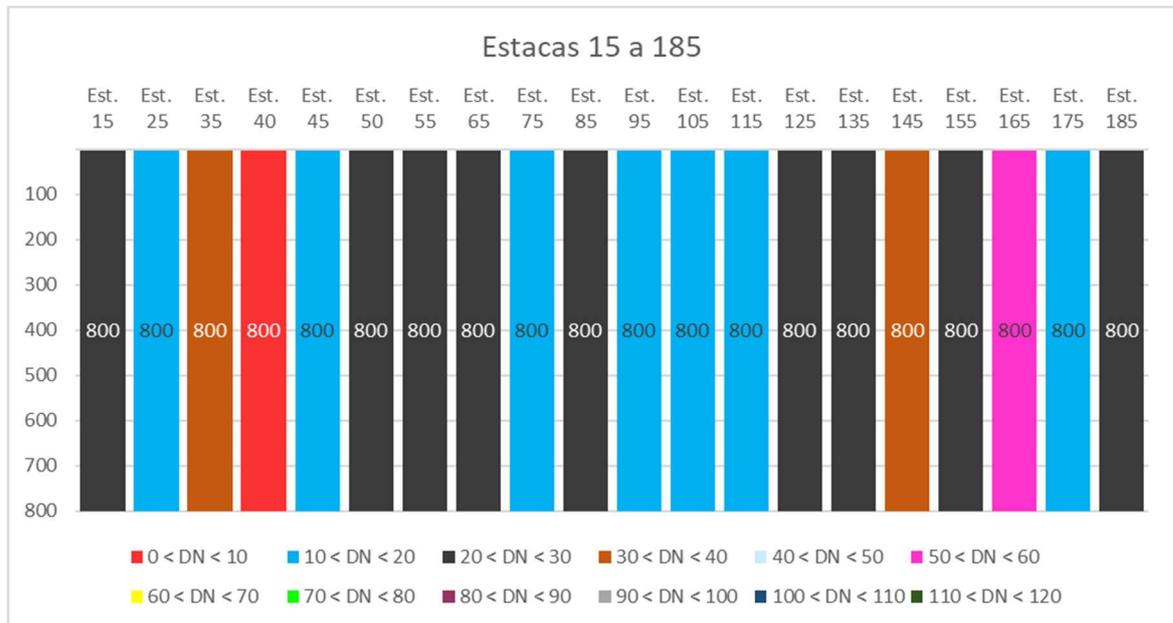
SEVERI, A. A.; BALBO, J. T.; RODOLFO, M. **Conceitos mecanicistas básicos sobre pavimentos asfálticos.** São Paulo, 1998. 53p.

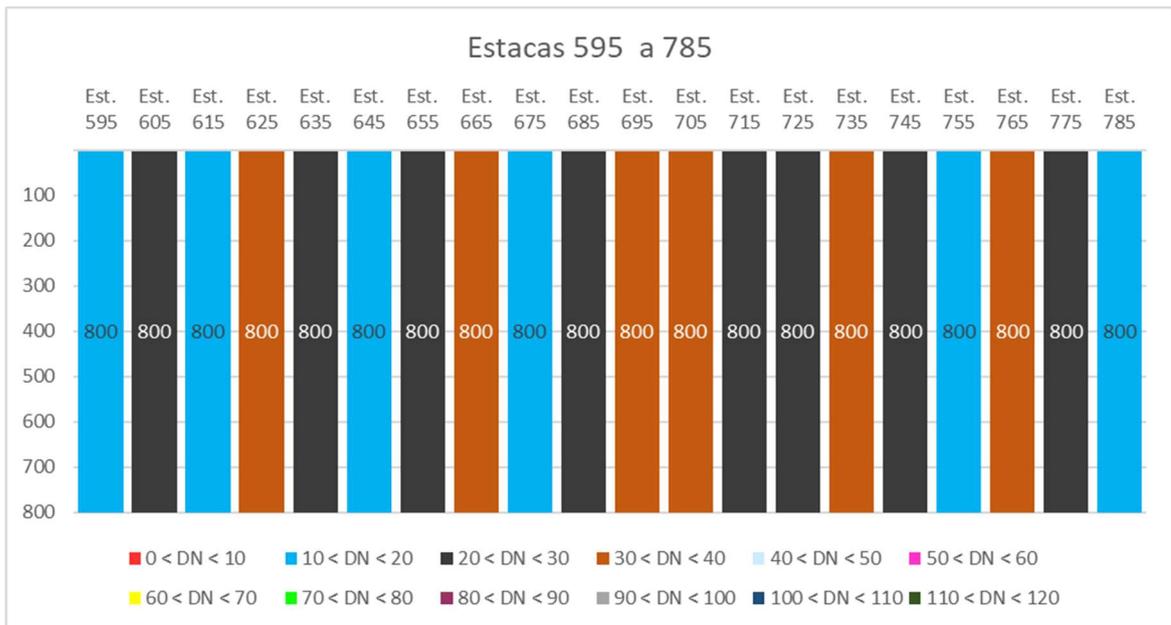
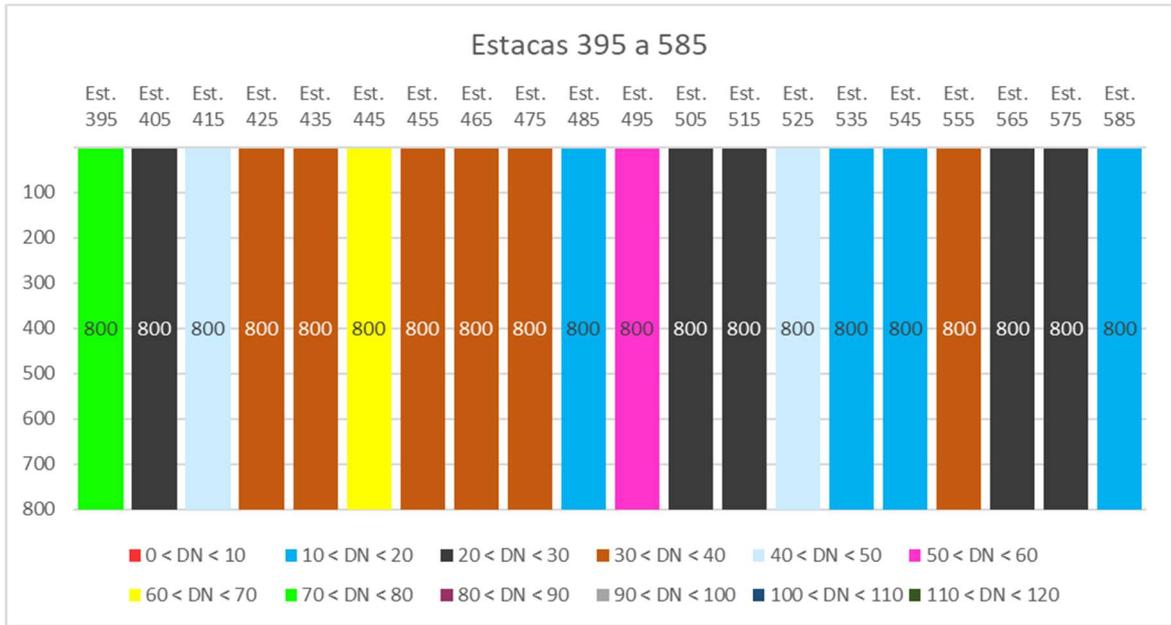
SIQUEIRA, L. P. 1989. **Bacia dos Parecis.** Boletim de Geociências da Petrobrás, 3:3-16.

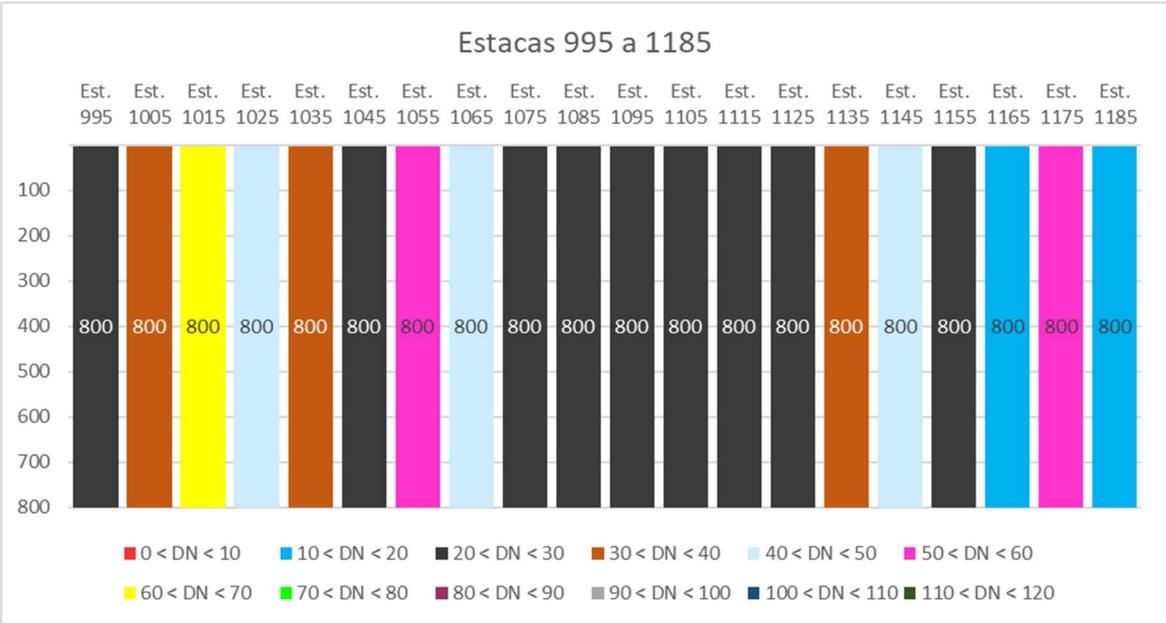
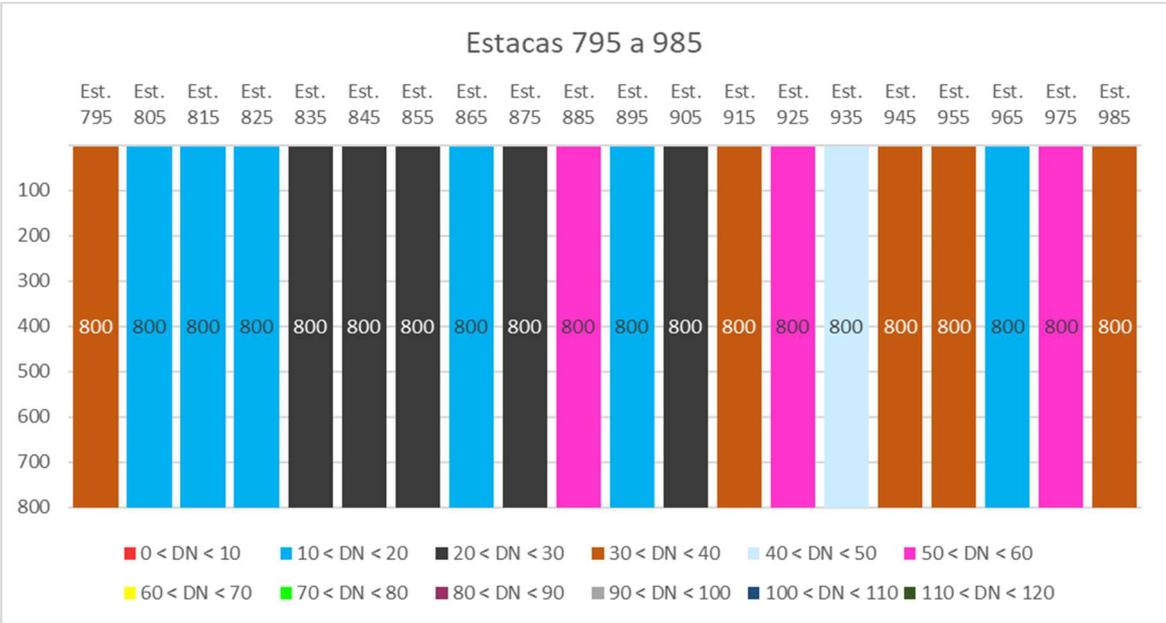
APÊNDICE A – MAPA LITOLÓGICO DA RODOVIA RO-370



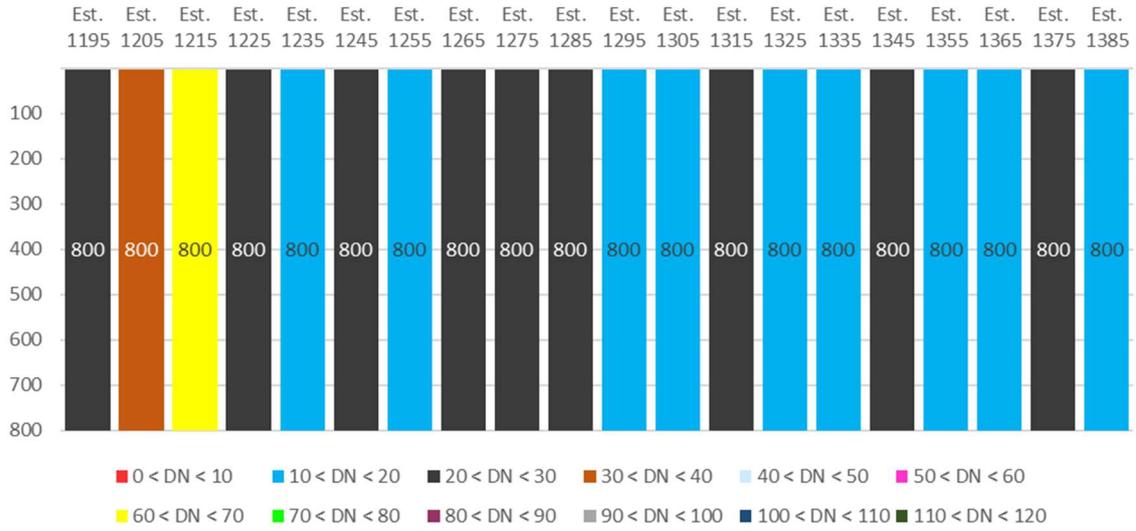
APÊNDICE B – VALORES DE DN MÉDIO POR ESTACA



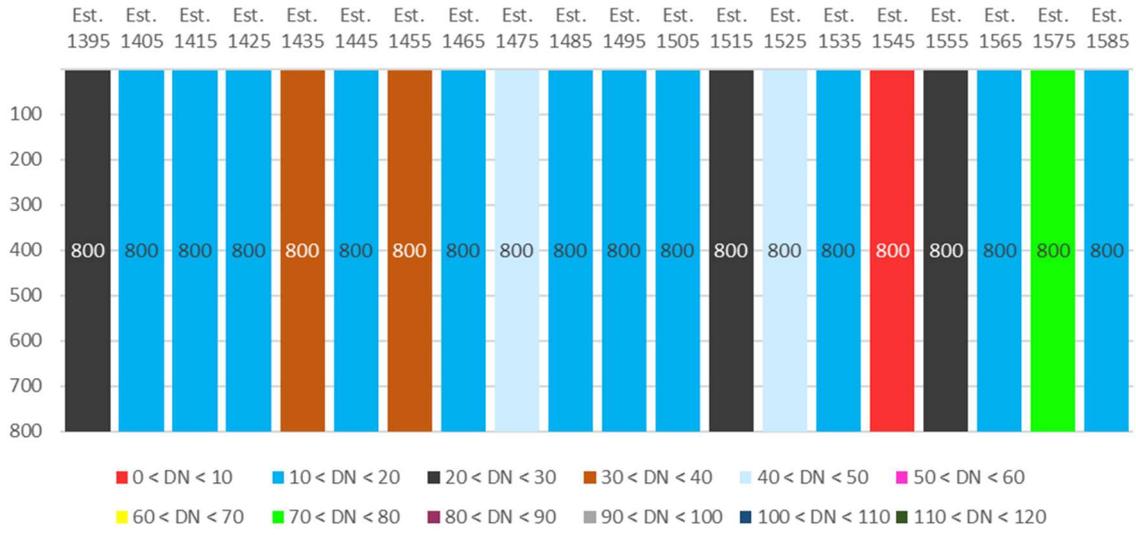


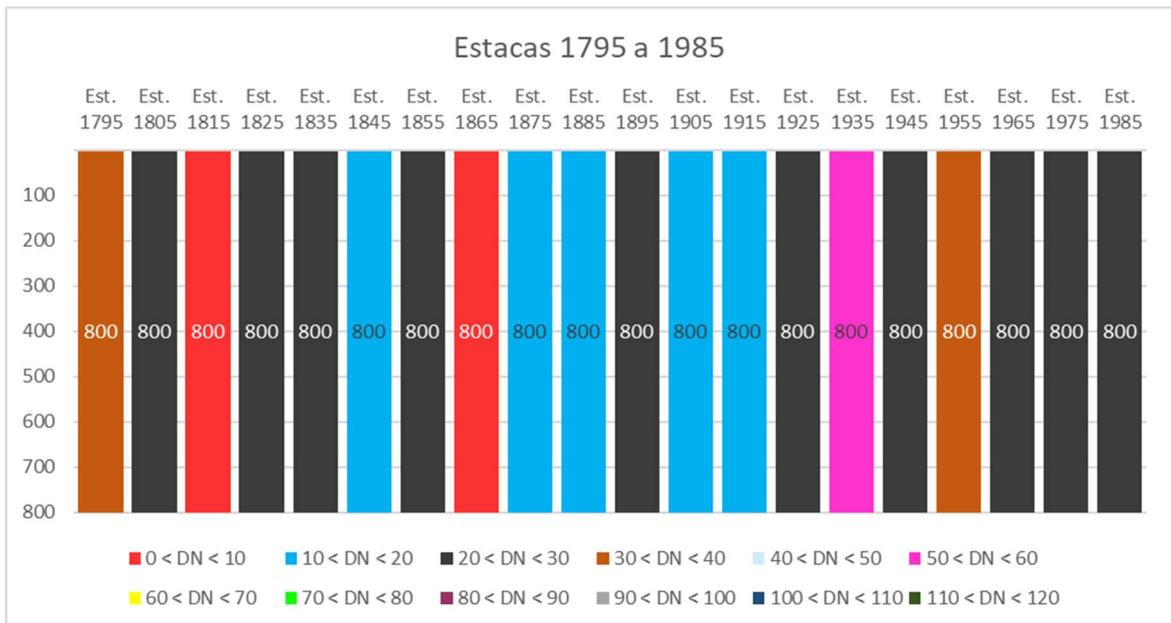
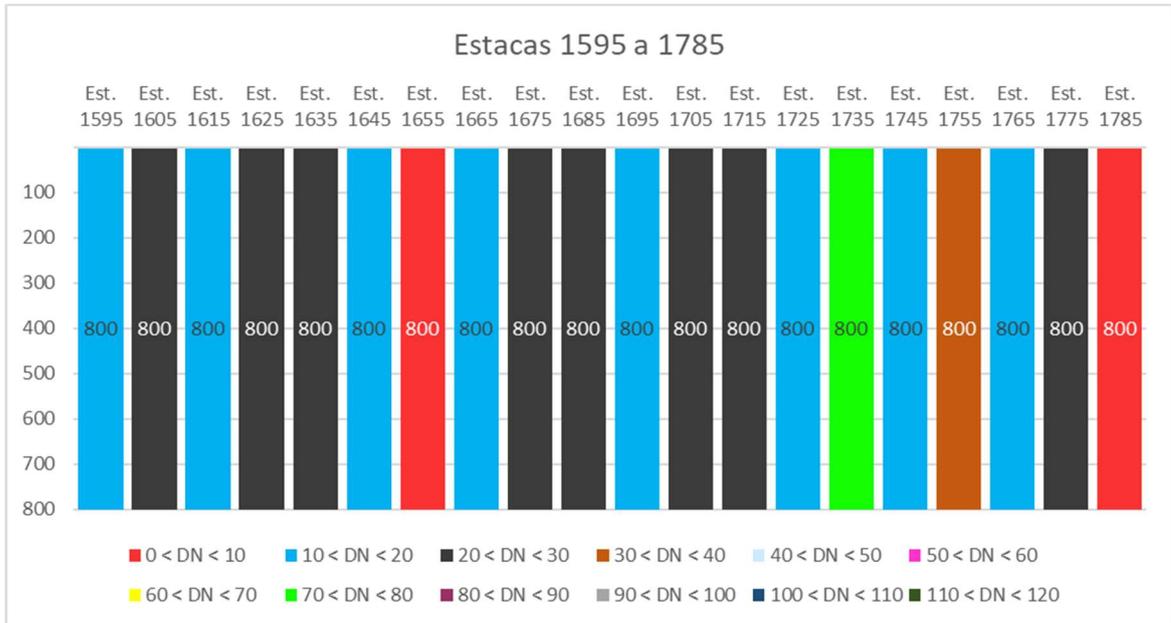


Estacas 1195 a 1385

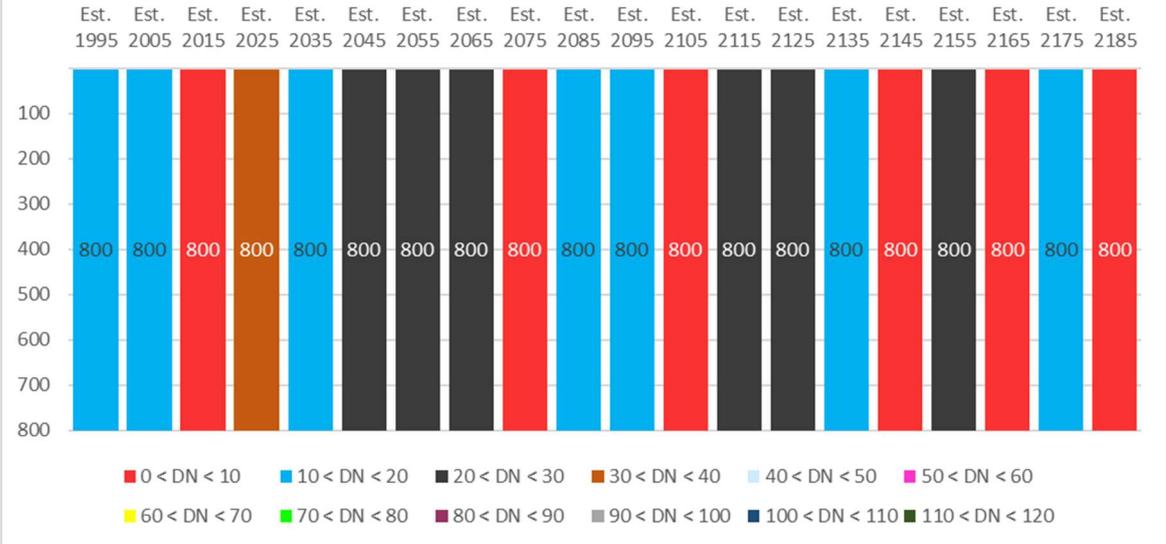


Estacas 1395 a 1585

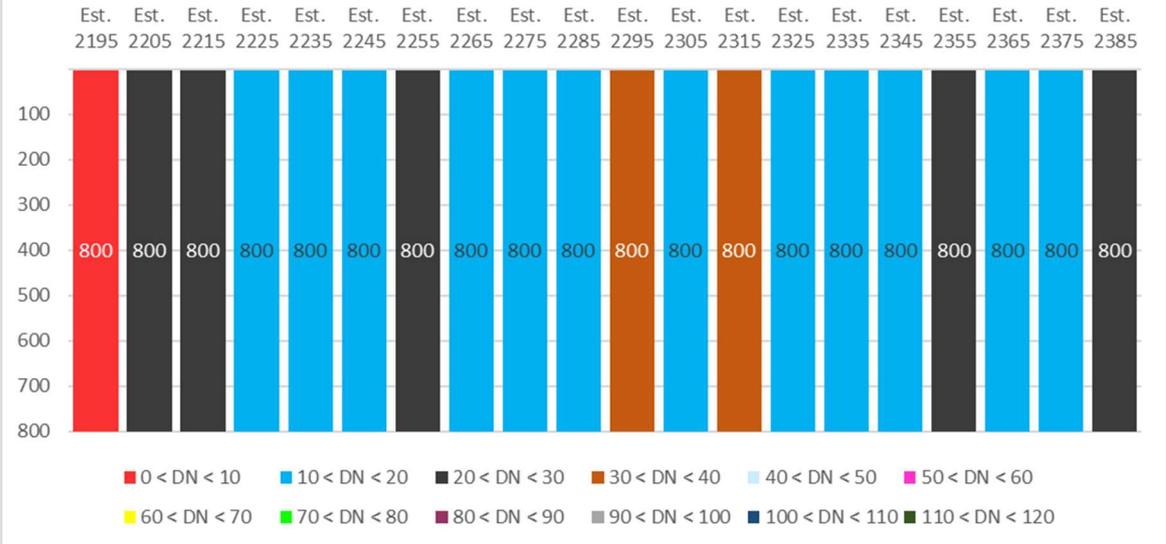




Estacas 1995 a 2185

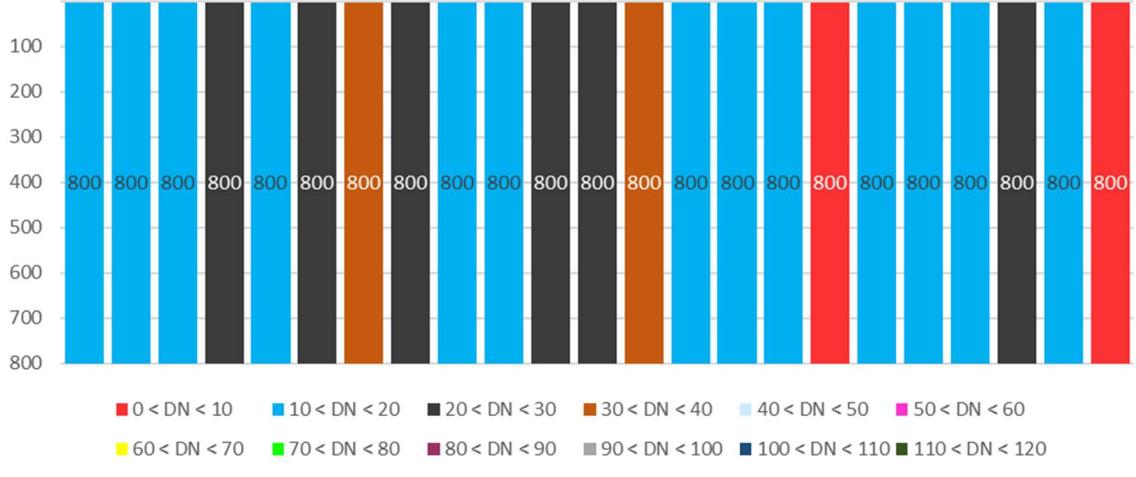


Estacas 2195 a 2385



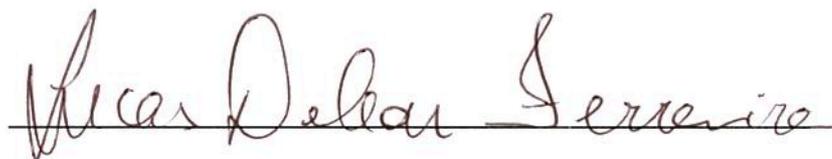
Estacas 2395 a 2615

Est.
 2395 2405 2415 2425 2435 2445 2455 2465 2475 2485 2495 2505 2515 2525 2535 2545 2555 2565 2575 2585 2595 2605 2615



Declaração de Conformidade

Certifico que o aluno Pablo dos Santos Cardoso Coelho, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Avaliação do ensaio de Cone de Penetração Dinâmica como ferramenta para dimensionamento rodoviário", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

A handwritten signature in black ink, reading "Lucas Deleon Ferreira", written over a horizontal line.

Lucas Deleon Ferreira

Orientador

Ouro Preto, 19 de dezembro de 2018